

## 지하수면 위의 LNAPL 이동을 고려한 용질이동에 대한 분석

김지훈 · 최종근\*

서울대학교 지구환경시스템공학부

## Analyses on Solute Transport with the Movement of an LNAPL on the Water Table

Jihoon Kim · Jonggeun Choe\*

School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National University

### ABSTRACT

A modified model was developed for solute transport in porous media that can consider the movement of an LNAPL above the water table. From the results of sensitivity analyses with and without considering LNAPL movement, there are some differences according to the hydraulic gradient, the quantity of oil leakage and dispersivity. The mean deviation between the model in this study and a conventional model without LNAPL movement increases as the hydraulic gradient decreases and the quantity of oil leakage increases. Variation of dispersivity has no influence on the magnitude of the mean deviation. However, the spatial distribution of the deviation between the two models is wider as dispersivity increases. Furthermore, groundwater is at high risk of contamination in the vertical direction in the case that transverse dispersion value is large. A conventional model underestimates the concentration of solute in an aquifer where the movement of an LNAPL cannot be negligible. Based on the study results, it is important to understand how fast the LNAPL moves on the water table for realistic prediction of solute transport in an aquifer with the movable LNAPL on the water table.

**Keywords :** movement of an LNAPL, solute transport, vertical equilibrium, UST

### 요약문

지하 유류저장탱크에서 유류가 지속적으로 누출되는 경우에는 지하수 이동에 비해서 LNAPL의 이동을 무시할 수 없다. 본 연구에서는 지하수면 위에서 LNAPL의 이동을 고려한 수정된 용질이동 모델을 개발하였다. LNAPL 이동을 고려하지 않는 기존 모델과 비교한 결과 수두 구배, 누출되는 유류의 양, 분산지수에 따라 두 모델은 차이점을 보였다. 수두 구배가 낮을수록, 누출되는 유류의 양이 증가할수록 수정된 모델과 기존 모델 사이의 평균편차가 증가하였다. 분산지수가 변화함에 따라서 평균편차는 변하지 않았지만, 분산지수가 증가할수록 두 모델 사이의 편차는 공간적으로 보다 넓게 나타났다. 수직방향으로의 분산이 크게 나타날 경우에는 LNAPL의 이동을 고려한 모델과 이동을 고려하지 않은 모델과의 차이가 지하수 유동 방향뿐만 아니라 수직방향으로도 크게 나타났다. 결국 LNAPL의 이동을 무시할 수 없는 지하환경에서는 기존의 모델을 가지고 용질이동을 모사할 경우 실제보다 농도가 낮게 추정될 가능성이 높다. 이 연구의 결과로 LNAPL이 지하수면 위에서 얼마나 빨리 이동하는지 아는 것이 올바른 오염물의 농도 예측에 중요하다는 것을 파악하였다.

**주제어 :** LNAPL 이동, 용질이동, 수직평형, 지하저장탱크

\*Corresponding author : johnchoe@snu.ac.kr

원고접수일 : 2003. 3. 14 계재승인일 : 2003. 6. 10

질의 및 토의 : 2003. 12. 30 까지

## 1. 서 론

현재 우리나라에서는 많은 수의 지하저장탱크에서 시설의 노후화로 다양한 유류가 누출되고 있고, 이로 인해 지하수와 토양이 심각하게 오염되고 있다. 누출된 유류는 불포화대에서는 토양에 잔류포화도를 남기면서 아래방향으로 이동하고 지하수면에 도달하면 NAPL(non-aqueous phase liquid)을 형성하게 된다. NAPL은 지하수의 중요한 오염원 중의 하나이다. 형성된 NAPL은 자유상으로 이동하면서 일부는 지하수에 용해되어 지하수와 함께 이동한다. 물보다 가벼운 유류는 LNAPL(light NAPL)을 형성하여 지하수면의 상부에 존재하고, 물보다 무거운 유류는 DNAPL(dense NAPL)을 형성하여 불투수층을 만날 때까지 하향으로 이동하게 된다.

NAPL의 이동은 다공질매질을 통해 석유, 가스, 물의 다상유동을 이루는 석유공학 연구분야와 많은 공통점을 지니고 있다. 석유와 가스를 함유하고 있는 저류층은 피압되어 있지만, LNAPL이 존재하는 대수층은 대부분 자유대수층이다. NAPL의 이동을 묘사하기 위해 피압대수층을 가정하고 LNAPL, 물, 공기의 3상을 고려한 다상유체 유동모델이 1987년 제시되었다<sup>[1,2]</sup>. Bear 등<sup>[3]</sup>과 Bear와 Ryzhik<sup>[4]</sup>는 자유대수층에서의 NAPL 유동방정식을 유도하고, 누출량이 적은 경우의 이론적 근사해를 제안하였다. 제시된 유동방정식은 NAPL의 수직적 평형을 가정하기 때문에 기존의 3상 유동방정식보다 수치해석 계산속도가 빠른 장점이 있다.

NAPL의 지속적 누출은 장기적으로 지하수를 오염시키기 때문에 NAPL의 용해에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Bradford와 Abriola<sup>[5]</sup>는 매질의 습윤도에 따른 NAPL의 용해를 연구하였고, Zhou 등<sup>[6]</sup>은 이론적인 NAPL 용해 모델을 제시하였으며, Knutson 등<sup>[7]</sup>은 NAPL의 형상에 따른 용해정도를 연구하였다. Seagren과 Rittmann<sup>[8]</sup>은 지하수 흐름이 정상상태에서 LNAPL의 물질이동에 대해 LNAPL의 용해가 국지적 평형상태인 경우와 비평형상태인 경우에 대해 연구하였으며 일반적인 지하수 조건에서는 LNAPL의 용해가 국지적 평형에 도달한다고 하였다. Brauner와 Widdowson<sup>[9]</sup>은 유동이 없는 NAPL에서 현장실험을 통해 지하수에 용해된 용질의 이동을 수치적 모사와 비교 검증하였다. 최근에는 대수층 인자의 공간적 분포를 파악하기 위하여 유선 시뮬레이션과 지구통계적 기법을 이용한 적화 연구도 활발히 이루어지고 있다<sup>[10-12]</sup>. 이와 같은 연구는 이용 가능한 자료의 효과적 통합이용과 관심인자의 특성화에 매우 유용하게 적용될 수 있다.

지속적인 유류누출이 있는 경우에는 NAPL의 이동을 무시할 수 없게 된다. 이는 또한 비정상상태이므로 기존의 연구와는 달리 NAPL의 이동을 동시에 고려해야 보다 정확한 용질이동 모델링이 가능하다. 본 연구의 목적은 지하저장탱크에서 지속적으로 누출이 있을 경우 LNAPL의 이동을 고려한 오염물질 이동을 고찰하는 것이다. 지속적인 누출의 경우 유류누출량이 많기 때문에, LNAPL의 이동은 수치해석 방법을 사용하여 묘사할 수 있다. LNAPL의 용해는 Seagren과 Rittmann<sup>[8]</sup>의 국지적 평형을 가정하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. LNAPL 이동 모델

Fig. 1과 Fig. 2는 중력과 모세관압에 따른 LNAPL, 물, 공기의 수직적 평형을 가정한 모식도이다. 본 연구에서는 매단위 시간동안 수직적으로 상평형이 존재한다고 가정한다. 이러한 가정은 다른 연구자들에 의해서도 사용되었다<sup>[3,4]</sup>. 지하저장탱크에서 지속적으로 유출되는 유류는 지하수면 위에 축적되어 잔류포화도를 초과하게 되고 이를 초과한 기름의 부피를 'LNAPL Lens'라고 정의 한다. 지하매질은 물에 대해 강한 습윤도(또는 친수성)를 가지고, 공기에 대해 가장 낮은 습윤도를 가진다고 가정한다. 이와 같은 가정 하에서 공기, 물, 기름의 수직적 분포가 결정되며 유효포화도를 다음과 같이 계산할 수 있다<sup>[3,4,13]</sup>.

$$S_i = \frac{S_i - S_{ir}}{1.0 - S_{ir}} = [1.0 + (a_{ij}z)]^{\frac{v-1.0}{v}} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{S}_i$ : i-번째 상의 유효포화도(무차원)

$S_i$ : i-번째 상 포화도(무차원)

$a_{ij}$ : i, j 상 사이 모세관 압 곡선 모양지수( $m^{-1}$ )

v: 모세관압 곡선 모양지수(무차원)

z: 수두(m)

하침자 w는 지하수, n은 NAPL, a는 공기, r은 임계잔류량을 의미한다. 모세관압 곡선 모양지수는 매질의 종류에 따라 다르며 일반적으로 1.5에서 5.0 사이의 값을 갖는다.

위의 식을 이용하면 다음과 같은 물질수지 방정식을 유도할 수 있다<sup>[3,4]</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_n}{\partial t} &= \frac{k}{\mu_n} \nabla [T_n(\xi_1) \nabla (\rho_n g \xi_1 + \rho_n g \eta)] \\ \frac{\partial U_w}{\partial t} &= \frac{k}{\mu_w} \nabla [T_w(\xi_1) \nabla (\rho_n g \xi_1 + \rho_w g \eta)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 T_w &= \int_{\eta}^{\xi_2 + \eta} k_{rw}(S_w, S_n) dz = \int_0^{\xi_2} k_{rw}(S_w, S_n) dz \\
 T_n &= \int_{\eta}^{\xi_2 + \eta} k_{rn}(S_w, S_n) dz = \int_0^{\xi_2} k_{rn}(S_w, S_n) dz \\
 U_n &= \phi \int_0^{\xi_2} S_n(z) dz = \phi \int_0^{\xi_1} [1 - S_w(z)] dz + \phi \int_{\xi_1}^{\xi_2} [S_f(z) - S_w(z)] dz \\
 U_w &= \phi(\eta + \int_0^{\xi_2} S_w dz)
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\phi$ : 공극률(무차원)

$\mu$ : 점성도(cp)

$\rho$ : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

$g$ : 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)

$k$ : 절대 유체투과율(m<sup>2</sup>)

$t$ : 시간(day)

$T_i$ :  $i$ -번 째 상의 상대 유체투과율을 수직방향으로

적분한 값(m)

$U_i$ : 단위 면적 당  $i$ -번 째 상의 부피(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)

Figs. 1과 2에 표시된 대로  $\xi_1$ 는 LNAPL과 물이 존재하는 구간(m)이고,  $\xi_2$ 는 LNAPL의 두께(m)이다.  $\eta$ 는 기준면에서 LNAPL 하부까지의 거리(m)이다. 식 (3)에서 하첨자 1은 NAPL과 물을 합한 전체 액상을 의미한다.  $\xi_1$ 와  $\xi_2$  사이에는 근사적으로 다음과 같은 식이 성립한다<sup>3,4)</sup>.

$$\xi_2 = \frac{\xi_1}{1-A}, \quad A = \frac{\alpha_{nw}}{\alpha_{an}} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ 는 두 상 사이의 모세관압 곡선 모양지수를 나타낸다. 식 (4)에서  $\xi_2 > 0$ 이어야 하므로, LNAPL의 이동은  $A < 1$ 인 경우에 한하여 고찰한다<sup>3,4)</sup>.  $A < 1$ 인 경우만을 모사하는 것은 물에 대한 강한 습윤성이라는 가정을 뒷받침

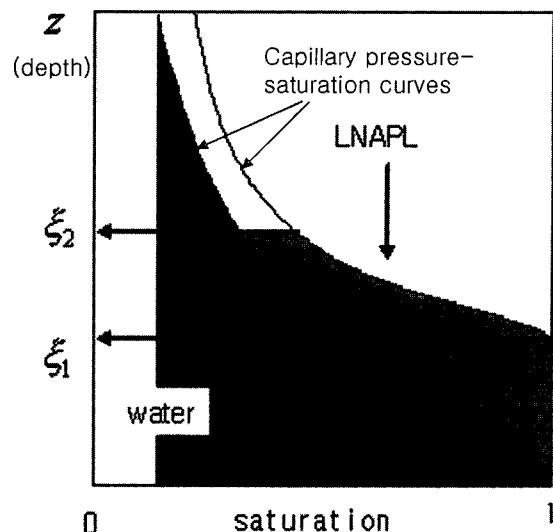


Fig. 2. An example of static saturation distribution of water and NAPL.

한다. 위의 미분방정식으로 LNAPL을 모사할 경우 수직 방향으로 격자를 나눌 필요가 없고, 풀어야 할 미지수도 2개 이므로, 일반적인 풀이 방법인 2차원-3상 모사방법을 이용했을 경우보다 계산이 훨씬 수월하다.

## 2.2. 용질이동모델

2차원에서의 용질이동에 대한 지배방정식은 다음 식 (5)와 같다<sup>14)</sup>.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{v}_x C) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{v}_z C) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5)$$

$$C(L_1 \leq x \leq L_2, z = 0) = 1.0$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}(-\infty \leq x \leq L_1 \text{ or } L_2 \leq x \leq \infty, z = 0) = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(x = -\infty \text{ or } \infty, z) = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}(x, z = -\infty) = 0$$

여기서,  $C$ : 용질의 상대농도(무차원)

$\bar{v}_x, \bar{v}_z$ : x, z 방향으로의 지하수 속도(m/s)

$D_x, D_z$ : x, z 방향으로의 분산계수(m<sup>2</sup>/s)

$L_1 \leq x \leq L_2$ : LNAPL이 존재하는 구간(m)

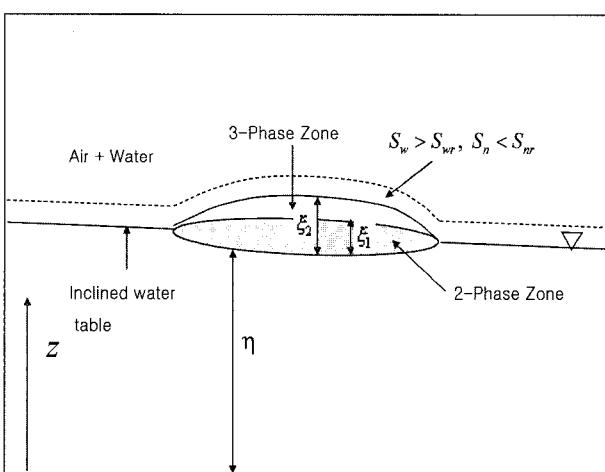


Fig. 1. A schematic disposition of an LNAPL lens (modified from Fig. 1 of Bear and Ryzhik, 1998).

본 연구에서는 LNAPL의 이동효과에 대해 고찰하기 때문에 흡착으로 인한 지체상수와 생분해 효과는 무시하였다. 오염지역에서의 오염원은 LNAPL의 용해되는 양이고, 수직적 상평형을 가정하였기 때문에 지하수 유동은 수평 방향으로만 존재한다. 따라서 수직방향으로의 유속( $v_z$ )은 없다. 분산지수는 매질의 불균질성을 나타내는 지수로서

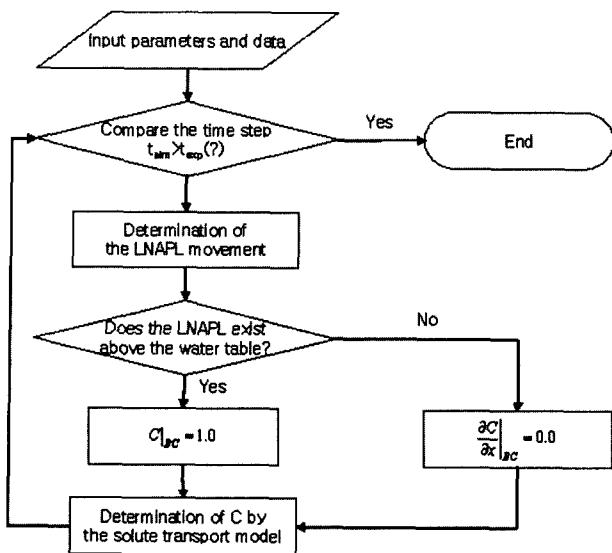


Fig. 3. Algorithm of the model in this study.

규모에 따라서 다른 값을 가진다.

### 2.3. 모델 구성

경계조건은 LNAPL 이동에서는 일정 수두구배조건을 사용하였다. 용질이동에서는 LNAPL이 존재하는 구간에서는 LNAPL 용해의 국지적 평형을 가정하였다<sup>18)</sup>. 그러므로 주어진 단위시간 동안 LNAPL은 지하수에 용해도만큼 용해되고 상부에 LNAPL이 존재하는 구간은 상대농도값이 1.0<sup>19)</sup> 된다. 본 연구에서는 지속적인 유류누출에 대해 다루고 있으므로, 용해에 의한 LNAPL의 질량감소는 전체 LNAPL의 양에 비해 극히 작으므로 무시하였다. LNAPL 존재하지 않은 지역은 비유동 경계조건을 사용하였다. 수치해석법에 사용된 알고리즘은 Fig. 3과 같고 이 알고리즘을 통해 매 시뮬레이션 시간마다 LNAPL의 이동을 개선하게 된다. 이와 같은 방법으로 점 오염원이던 LNAPL이 그 유동으로 인하여 면적 오염원이 되는 것에 따른 용질이동의 변화를 모사할 수 있게 된다.

## 3. 결 과

### 3.1. 1차원 분석

횡분산지수가 종분산지수보다 상당히 작은 값을 갖는 경우에는 용질이동은 거의 종방향으로 이루어 진다. 이러한 경우 용질이동은 1차원 유동으로 볼 수 있고, 용질의 농도는 지하수면 상단부의 농도를 나타낸다.

본 연구에서 사용된 모델을 LNAPL의 이동을 고려하지 않은 기존의 모델과 비교하였다. 기존 모델은 LNAPL을

고정 오염원으로 간주하기 때문에 오염원 이동 및 확장을 생신하지 않는 반면 본 연구에 사용된 모델에서는 매 계산시간마다 오염원의 이동을 생신한다. 본 연구에서 사용된 모델과 기존의 모델과의 차이점을 알아보기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석과 그 상대적 차이를 비교하기 위해 다음과 같은 평균편차(mean deviation)의 개념을 사용하였다.

$$\text{평균편차} = \frac{\int_{\delta_1}^{\delta_2} (C_N - C_C) dx}{\int_{\delta_1}^{\delta_2} dx} \quad (6)$$

여기서,  $\delta_1: v_x t - \sqrt{2D_x t}$

$\delta_2: v_x t + \sqrt{2D_x t}$

$C_N$ : 본 연구에서 사용된 모델의 상대농도(무차원)

$C_C$ : LNAPL의 이동을 고려하지 않은 모델에서 구한 상대농도(무차원)

평균편차를 계산하기 위하여 선택된 두 지점,  $\delta_1(m)$ 과  $\delta_2(m)$ 의 특별한 물리적 의미는 없다. 이송과 분산을 고려한 점 오염원의 경우 시간에 따라 오염물의 농도변화가 정규분포를 따르고 그 정규분포의 표준편차와 분산지수와의 관계는 식 (7)과 같다<sup>15)</sup>. 따라서 이송에 따른 유동전면을 기준으로 표준편차의 거리 만큼에 해당하는 전후의 값들은 정규분포의 특징에 의해 전체농도의 약 68%를 나타낸다. 수치모사에 사용된 변수 값은 Table 1에 표시되어 있다.

$$D = \frac{\sigma^2}{2t} \quad (7)$$

여기서,  $D$ : 분산지수( $m^2/s$ )

$\sigma$ : 오염물 농도분포의 표준편차(m)

$t$ : 시간(second)

Table 1. Default Data used in Sensitivity Analyses

Water density	1000 kg/m <sup>3</sup>
LNAPL density	700 kg/m <sup>3</sup>
Water viscosity	1.0 cp
LNAPL viscosity	0.29 cp
Residual water saturation	0.15
Residual LNAPL saturation	0.15
$\alpha_{nw}$	4.4 m <sup>-1</sup>
$\alpha_{aw}$	10.27 m <sup>-1</sup>
System size	300 m
Depth	5 m
Advection front	86.4 m
Hydraulic gradient	0.005 m/m
Flowrate of oil leakage	20.0 l/day
Dispersivity	11.76 m
Diffusion constant	10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
Capillary pressure shape parameter v	2.0

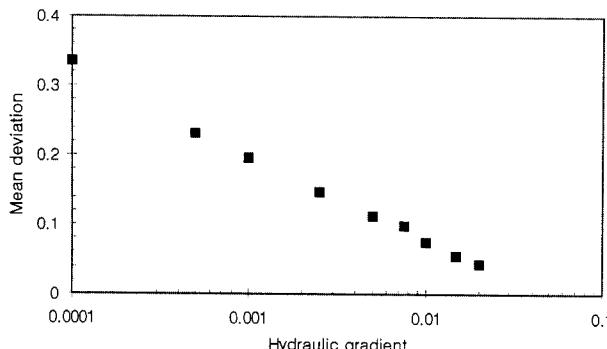


Fig. 4. Mean deviation (Eq. (6)) change depending on hydraulic gradient.

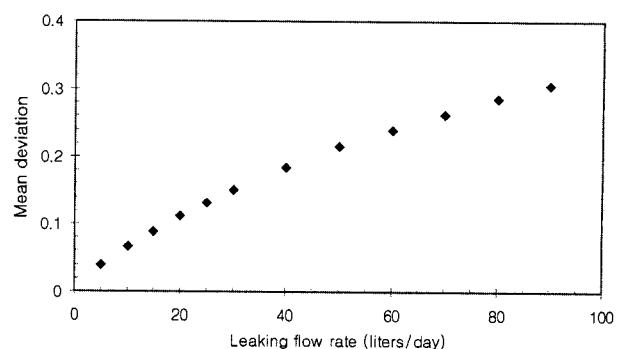


Fig. 5. Mean deviation change depending on the quantity of oil leakage.

### 3.1.1. 수두구배의 변화에 따른 민감도 분석

일반적인 지하수 수두구배는 0.02보다 작은 범위에 있으므로 민감도 분석은 0~0.02 수두구배에서 수행하였다. Fig. 4는 수두구배에 따른 평균편차의 값을 보여준다. 수두구배의 로그값과 식 (6)으로 정의된 평균편차 사이에 직선적인 관계가 나타난다. 그림에서 알 수 있듯이 수두구배가 큰 경우에는 지하수의 빠른 유동으로 인하여 NAPL의 이동으로 인한 영향이 작아져서 상대적으로 표준편차가 작게 나타난다. 수두구배가 작은 경우 LNAPL이 상대적으로 빠르게 확장되면서 LNAPL의 이동을 고려한 경우와 고려하지 않는 모델 사이의 평균편차는 상당히 커진다. 이러한 결과는 지하수와 LNAPL 이동의 상대적인 차이에 기인한다.

지하수의 이동은 수두구배에 의해 결정이 되지만, LNAPL의 유동은 수두구배와 유출되는 기름의 양에 의한 유체 포텐셜에 영향을 받는다. 물론, 수두구배가 큰 경우 지하수의 유동속도는 빨라지고 지하수에 용해된 NAPL의 성분은 결과적으로 빨리 이동하게 된다. 수두구배가 작을 수록, 지하수의 유동속도는 직접적인 영향을 받아서 유속이 줄어든다. 하지만 LNAPL은 지속적인 유류의 유입으로 인한 포텐셜 증가로 지하수 수두구배가 줄어드는 영향을 덜 받는다. 결국 지하수 수두구배가 줄어들수록 LNAPL의 이동은 전체 유체이동에서 차지하는 비중이 높아지게 되고 식 (6)으로 정의된 표준편차가 증가하게 된다.

### 3.1.2. 유출되는 기름 양에 따른 민감도 분석

Fig. 5는 동일 시간동안 누출된 유류의 양에 따른 평균편차의 변화를 보여준다. 예상했던 대로 누출량이 많을수록 그 평균편차는 증가한다. 왜냐하면, 누출되는 유류의 양은 LNAPL의 포텐셜 변화와 직접적인 관계가 있기 때문이다. 누출되는 유류의 유량이 많을 수록 LNAPL 포텐

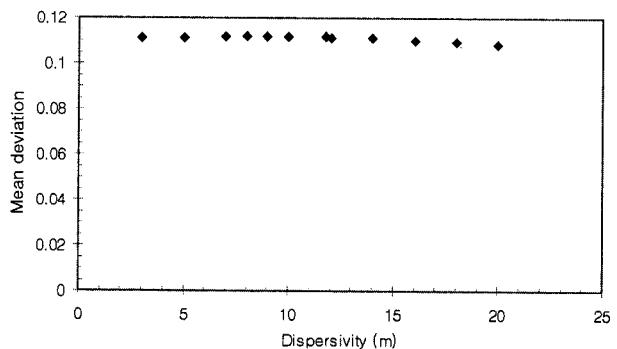


Fig. 6. Mean deviation change depending on dispersivity.

살 값과 포텐셜 구배가 증가하고, LNAPL은 빨리 이동하게 된다. 결과적으로 LNAPL의 유동성 증가는 LNAPL의 이동을 고려한 용질이동 모델과 기존 모델과의 차이를 증가시킨다.

### 3.1.3. 분산지수에 따른 민감도 분석

Fig. 6은 분산지수의 변화에 따른 평균편차 값의 변화를 보여준다. 일반적으로 분산지수가 클수록 두 물질간의 계면에서 섞임이 증가하여 공간적으로 그 섞임 영역이 넓어진다. 분산지수가 커지면, 본 연구에서 사용한 모델도 기존 모델과 마찬가지로 농도분포의 차이가 공간적으로 넓게 나타나지만 분산지수의 변화에 따른 평균편차의 값은 일정하게 나타난다. Fig. 7과 Fig. 8은 이러한 효과를 보여준다.

Fig. 7은 분산지수가 18 m인 경우이고 Fig. 8은 8 m인 경우이다. 분산지수가 클수록 NAPL의 상대농도가 공간적으로 더 넓게 분포하고 그 결과 평균편차를 계산하는 구간도 증가함을 알 수 있다. 두 경우 모두 NAPL의 이동을 고려한 경우에 그 상대농도가 크게 나타났고 그 차이는 주어진 조건에 따라 변하지만 사용된 조건의 경우 10% 이상

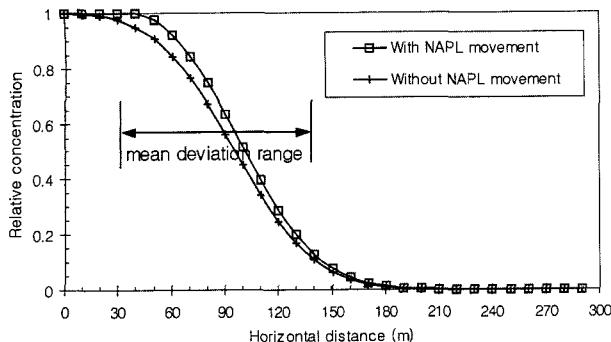


Fig. 7. Relative concentration profiles when dispersivity is 18 m.

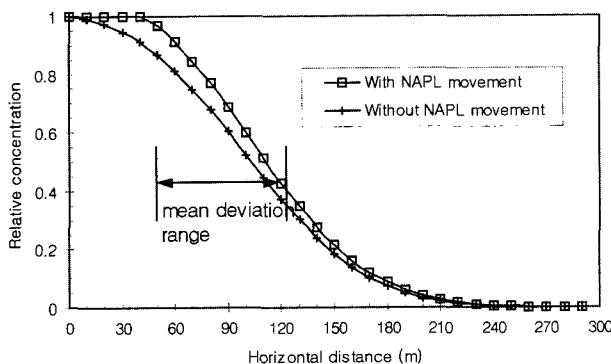


Fig. 8. Relative concentration profiles when dispersivity is 8 m.

평균편차의 차이를 보였다. 분산지수 증가에 따라 식 (6)으로 정의된 상대적 차이는 일정하지만, 분산지수가 증가함에 따라서 지하수에 녹아있는 용질의 총량에 대한 두 모델의 차이가 증가하게 된다.

### 3.2. 2차원 분석

만일 횡분산( $D_T$ )이 종분산( $D_L$ )에 비해 무시할 수 없을 경우, 2차원 분석을 수행해야만 한다. Fig. 9는 분산계수비( $D_T/D_L$ )의 변화에 따른 지하수면에서의 농도상대편차 [ $(C_N - C_C)/C_N$ ]를 보여준다. 관측지점 1과 2는 다음과 같이 설정하였다. 관측지점 2는 분산이 없는 경우 이송에 의한 유동전면을 나타내고 관측지점 1은 분산을 고려한 경우 농도분포의 표준편차 거리만큼 유동전면에서 후방지점이다.

$$v_x t / \sqrt{2D_x t} : \text{관측지점 } 1$$

$$v_x t : \text{관측지점 } 2$$

Fig. 9를 보면, 분산계수의 비가 증가할수록 기존 모델과 본 연구에서 사용된 모델과의 차이가 커짐을 알 수 있다. Figs. 10과 11은 서로 다른 분산계수비에 대하여 농도 단면도 모습을 보여준다. 분산계수비가 작으면 수평방향과 비교하여 수직방향으로의 용질이동이 거의 없어서 지하수면

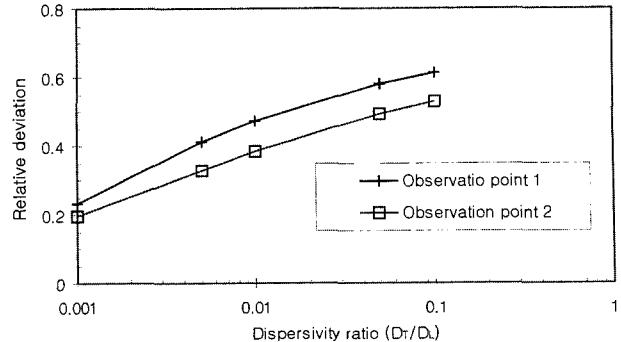


Fig. 9. Relative deviation  $[(C_N - C_C)/C_N]$  depending on the dispersivity ratio.

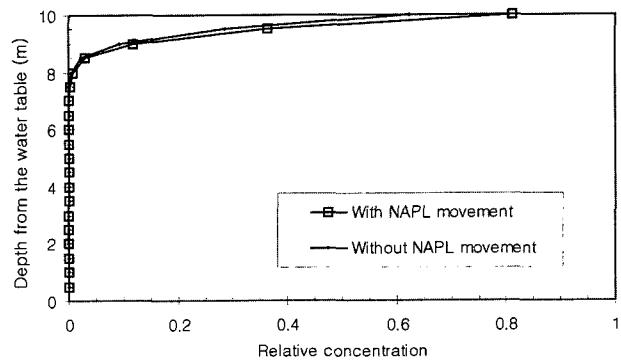


Fig. 10. Concentration profiles between the two models at the observation point 1 in the case of  $D_T/D_L = 0.001$  (negligible transverse dispersivity).

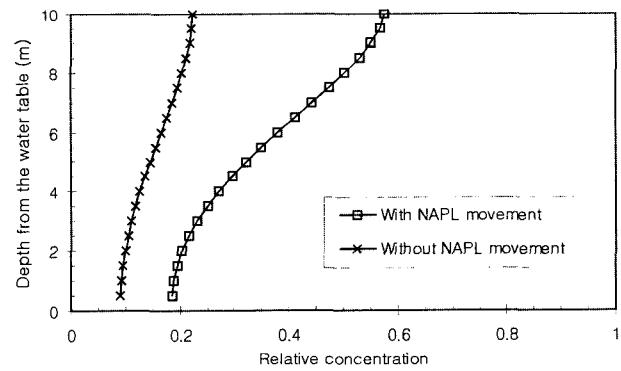


Fig. 11. Concentration profiles between the two models at the observation point 1 in the case of  $D_T/D_L = 0.1$  (considerable transverse dispersivity).

최상부에서만 두 모델이 다른 결과 값을 가지게 된다. 반면, 분산계수비가 크면 수직방향으로의 용질이동이 많이 나타나기 때문에 수직방향에서도 두 모델의 예측값이 큰 차이를 보이게 된다. 위의 결과를 종합해 보면 분산계수비가 커질수록 두 모델의 차이가 커지게 되고, 누출된 유류가 지하수에 더 많이 용해된다.

#### 4. 결 론

민감도 분석으로부터 LNAPL이 점 오염원으로 여길 수 없을 경우 LNAPL의 이동을 무시한 기존의 용질이동 모델은 지하수 오염 농도를 낮게 추정할 수 있다. 특히 수두구 배가 0.01보다 작을 때는 평균편차가 10% 이상 크게 차이가 난다. 또한 분산계수비가 클수록 지하수 오염은 더욱 더 심하게 나타난다. 결국 LNAPL의 이동이 존재하면 LNAPL의 이동을 고려한 용질이동 모델을 사용해야 한다. 민감도 분석에 따른 결론을 종합하면 다음과 같다.

- LNAPL의 이동을 고려하지 않은 모델은 용질이동에서 이류현상이 지배적이지 않은 경우 농도값을 낮게 예측한다.
- 누출된 유류 유량이 증가할수록, LNAPL의 빠른 이동으로 인해서 기존 모델은 농도값을 더 낮게 예측한다.
- 분산지수의 변화는 평균편차값에는 영향을 미치지 않지만, 분산지수가 클수록 두 모델 사이의 농도값 차이가 공간적으로 크게 나타난다.
- 분산계수비가 클수록 LNAPL의 이동은 두 모델의 차이를 더욱 더 크게 하는 요인이다.

#### 사 사

이 연구는 21C 프론티어 과제 지속가능한 수자원 연구비(Code 3-2-1)에 의해 지원되었습니다. 저자는 서울대학교 공학연구소 소속입니다.

#### 참고문헌

1. Baehr, A. L. and Corapcioglu, M. Y., "Compositional Multiphase Model for Groundwater Contamination by Petroleum Products 2. Numerical Solution," *Water Resources Research*, **23**(1), pp. 201-213 (1987).
2. Corapcioglu, M. Y. and Baehr, A. L., "Compositional Multiphase Model for Groundwater Contamination by Petroleum Products 1. Theoretical Considerations," *Water Resources Research*, **23**(1), pp. 191-200 (1987).
3. Bear, J., Ryzhik, V., Braester, C., and Entov, V., "On the Movement of an NAPL Lens on the Water Table," *Transport in Porous Media*, **25**, pp. 283-311 (1996).
4. Bear, J. and Ryzhik, V., "On the Displacement of NAPL Lenses and Plumes in a Phreatic Aquifer," *Transport in Porous Media*, **33**, pp. 227-255 (1998).
5. Bradford, S. A. and Abriola, L. M., "Dissolution of Residual Tetrachloroethylene in Fractional Wettability Porous Media: Incorporation of Interfacial Area Estimates," *Water Resources Research*, **37**(5), pp. 1183-1195 (2001).
6. Zhou, D., Dillard, L. A., and Blunt, M. J., "A Physically Based Model of Dissolution of Nonaqueous Phase Liquid in the Saturated Zone," *Transport in Porous Media*, **39**, pp. 227-255 (2000).
7. Knutson, C. E., Werth, C. J., and Valocchi, A. J., "Pore-scale Modeling of Dissolution from Variably Distributed Nonaqueous Phase Liquid Blobs," *Water Resource Research*, **37**(12), pp. 2951-2963 (2001).
8. Seagren, E. A. and Rittmann, B. E., "A Critical Evaluation of the Local-Equilibrium Assumption in Modeling NAPL-Pool Dissolution," *J. of Contaminant Hydrology*, **39**, pp. 109-135 (1999).
9. Brauner, J. S. and Widdowson, M. A. "Numerical Simulation of a Natural Attenuation Experiment with a Petroleum Hydrocarbon NAPL Source," *Ground Water*, **39**(6), pp. 939-952 (2001).
10. Jang, M. and Choe, J., "Stochastic Optimixation for Global Minimization and Geostatistical Calibration," *J. of Hydrology*, **266**, pp. 40-52 (2002).
11. Jang, M., Lee, J., Choe, J., and Kang, J. M., "Modeling of Solute Transport in a Single Fracture using Streamline Simulation and Experimental Validation," *J. of Hydrology*, **261**, pp. 74-85 (2002).
12. 최종근, 공간정보 모델링: 크리깅과 최적화, 1판, 구미서관, 서울 (2002).
13. Kool, J. B. and Parker, J. C., "Development Evaluation of Closed-Form Expressions for Hysteric Soil Hydraulic Properties," *Water Resources Research*, **23**(1), pp. 105-114 (1987).
14. Bedient, P. B., Rifai, H. S. and Newell, C. J., *Ground Water Contamination: Transport and Remediation*, 1st Ed., Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey (1994).
15. Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., *Physical and Chemical Hydrogeology*, 1st Ed., John Wiley & Sons Inc., New York, USA (1990).