The Journal of Engineering Geology, Vol.13, No.1, March, 2003.pp.51-65

불균질한 다공성 매질에서의 지하수위 변동을 고려한 저밀도 비수용성유체(LNAPL)의 흐름 모의

Simulations of the Flow and Distribution of LNAPL in Heterogeneous Porous Media under Water Table Fluctuation Condition

천 정 용(Jeong-Yong Cheon)*	(주)지오그린21
이 진 용(Jin-Yong Lee)	(주)지오그린21
이 강 근(Kang-Kun Lee)	서울대학교 지구환경과학부

요약 / ABSTRACT

불포화대에서 저밀도 비수용성유체의 이동과 분포를 모의하기 위하여 STOMP(Subsurface Transport over Multiple Phase) 시뮬레이터를 이용하였다. 균질한 매질에서의 저밀도 비수용성유체의 이동은 조립질 매질에서 빠르고, 세립질 매질에서는 불포화대에 더 많이 잔류한다. 조립질 매질 내에 세립질층이 존재할 경우, 이 층이 지하수면으로부터 멀수록 저밀도 비수용성유체가 불포화대에 더 많이 잔류된다. 조립질 매질에 세립질 또는 더 조립질인 매질이 렌즈 상으로 존재하는 경우에는 저밀도 비수용성유체가 이들 렌즈를 통과하지 못한다. 불균질한 렌즈가 존재할 때의 저밀도 비수용성유체의 분포를 초기조건으로, 지하수면의 변동에 따른 저밀도 비수용성유체의 이동을 모의하였다. 지하수위의 변동에 따라 불포화대에 잔류되어 있던 저밀도 비수용성유체의 수직방향 이동이 증가되었다. 특히, 지하수면의 하강 시 저밀도 비수용성유체가 조립질 렌즈를 통해 이동하나, 세립질 렌즈를 통해서는 이동하지 못한다. 일련의 수치실험의 결과로부터 유류 등의 저밀도 비수용성유체의 오염분포는 매질의 불균질성 그리고 지하수위 변동과 같은 수리지질학특성에 의해 크게 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다.

주요어 : 저밀도 비수용성유체, 오염, 다중상 흐름, 수치모의, 불균질성, 지하수위변동, 모세관장벽

A series of numerical simulations were carried out using STOMP(Subsurface Transport over Multiple Phase) simulator. The flow and distribution of LNAPL were analyzed in homogeneous fine and coarse sand. Vertical movement of LNAPL is faster in the coarser sand. But the total volume of LNAPL retained in the unsaturated zone is larger in the finer sand. A fine layer in the coarse sand domain is

* Corresponding auther: cildon@hanmir.com

also simulated. The results showed that the retained LNAPL volume and shape are highly influenced by the position of the fine layer. Flow and distributions of LNAPL were simulated when there were heterogeneous lenses in the sand domain. Water table fluctuation was also considered. In these cases, it was found that the heterogeneous lens was a barrier to LNAPL flow, and water table fluctuation stimulated the downward movement of retained LNAPL.

The LNAPL flow and distribution observed in these numerical experiments show that in the subsurface environment, the behaviors of LNAPL highly depend on heterogeneities of unsaturated zone and the dynamic hydrogeologic condition such as water table fluctuation. These results can explain some of the complexity of LNAPL flow and distribution patterns in LNAPL contaminated field sites.

Key Words : LNAPL, contamination, multiphase flow, numerical modeling, heterogeneity, water table fluctuation, capillary barrier

서 론

최근 유류와 같은 비수용성유체(NAPLs, NonAqueous Phase Liquids) 특히 저밀도 비수용성유체(LNAPLs, Light NonAqueous Phase Liquids)에 의한 토양 및 지하수 오염이 주요한 환경문제로 대두되고 있다. 일반적으로 비수용성유체는 일단 누출되면, 물에 녹지 않는 성질로 인하여 지하에서 모세관압, 중력, 부력에 의하여 자유상으로 퍼지거나 공극 사이에 포획되기도 한다. 비록 비수용성이긴 하지만, 성분에 따라 일부 물에 녹고 기화되기도 한다. 공극 사이에 포획된 비수용성유체는 지하수와 토양의 장기적 오염원으로 작용하기도 한다. 특히 이번 연구에서 초점이 맞춰진 저밀도 비수용성유체의 경우는 물보다 가벼운 성질로 인하여 지하수면을 만나면 지하수면을 통과하지 못하고 지하수면 위에서 퍼지게 된다. 따라서 많은 양의 유류가 누출되었다면, 지하수면을 따라 퍼지면서 넓은 지역의 지하수와 토양을 오염시킬 수 있다.

지하수 및 토양의 오염 연구에 있어서 오염물질의 지하에서의 거동을 이해하는 것은 매우 중요하다. 오염물질의 지하에서의 거동에 대한 정확한 이해는 그 오염지역에 대한 정밀조사, 위해성 평가 및 복원설계에 기초자료를 제공하고 그 효율과 경제성을 좌우할 수 있는 중요한 요소이다. 그 동안 지하에서의 저밀도 유류의 거동을 이해하기 위해서, 많은 연구자에 의해 실험실에서 물리적인 모의(Pantazidou and Sitar, 1993; Schroth et al., 1998a; van Geel and Sykes, 1994)와 수치모의(Abriola and Pinder, 1985; Corapcioglu and Baehr, 1987; Kaluarachchi and Parker, 1990; Sleep and Sykes, 1993; White and Oostrom, 1996; Schroth et al., 1998b)가 수행되었다. 특히 STOMP 시뮬레이터(the Subsurface Transport over Multiple Phase Simulator)를 이용하여 불균질 불포화대에서의 비수용성유체의 흐름과 분포에 대한 연구가 수행된 사례가 있다(Schroth et al., 1998b). 위 연구자들의 이전 연구에서는 저밀도 비수용성유체의 지하에서의 거동은 일반적으로 지하의 불균질성, 그 불균질성의 기하학적 분포, 수리지질학적 환경에 크게 영향을 받는다고 보고되고 있다. 그러나 불균질한 매질로 구성된 불포화대에서의 저밀도 비수용성유체의 이동에 대한 이해는 여전히 불완전하며, 많은 연구가 필요하다.

저밀도 비수용성유체로 인한 오염의 경우 대부분이 불포화대에 잔류해 있고, 지하수면을 따라 퍼지기 때문에 오염물질의 이동과 분포는 매질의 불균질성뿐만 아니라 지하수위의 변동에도 크게 영향을 받는다. 특히 우리나라에서처럼 여름철에 집중적인 강우가 있고, 이에 따른 지하수위의 변동이 큰 상황에서는 이러한 기작을 이해하는 것이 중요하다 하겠다. 이러한 문제점은 이미 지적되었다(Lee et al., 2001). 그러나 이에 대한 연구와 이해는 미미한 편이다.

이 연구의 목적은 수치모의를 통하여 지하의 다공질 매질의 불균질성과 지하수면의 변동에 의

하여 저밀도 비수용성유체의 이동과 분포가 어떠한 영향을 받는지 이해하는 것이다. 수치모의에는 STOMP 시뮬레이터를 이용하였다.

STOMP 시뮬레이터

STOMP 시뮬레이터는 포화 및 불포화 다공질 매질에서 3차원으로 3상 유체의 흐름과 거동을 모의할 수 있는 수치모델이다. 기본 방정식은 물질의 질량, 에너지 보존식으로 이루어져 있다. 이번 연구는 물-유류 모드(water-oil mode)를 이용하여 수행되었다. 이 모드는 등온, 수동적 기체 압력 하에서 물과 유류의 거동을 모의할 수 있다. 유류의 물로의 용해, 기화, 매질로의 흡탈착은 없는 것으로 가정하였다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}(n\rho^w s_w) = -\nabla\cdot(\rho^w q^w) + \dot{m}_w \qquad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(n\rho^N s_N) = -\nabla\cdot(\rho^N q^N) + \dot{m}_N \qquad (2)$$

여기에서

$$q^w = -\frac{kk_{rw}}{\mu_w}\cdot(\nabla P^w - \rho^w g)$$

$$q^N = -\frac{kk_{rN}}{\mu_N}\cdot(\nabla P^N - \rho^N g)$$

w : 수용상(aqueous phase)

N : 비수용성유체(NAPL)

n : 공극율(porosity)

ρ : 유체밀도(density)

s : 유체 포화도(fluid saturation)

P : 유체압력(fluid pressure)

q : 체적 유동벡터(volumetric flux vector)

$\dot{m}$: 성분질량 공급율(component mass source rate)

k : 고유투수계수(intrinsic permeability)

k_r : 상대투수계수(relative permeability)

μ : 점성도(viscosity)

위 식은 시간에 대해 내연후방차분법(fully implicit time differencing)을 적용한 유한차분법(integrad-volume finite difference method)으로 이산화 하여, 주요 변수인 P^w, P^N에 대해 뉴턴-랩슨 반복법(Newton-Raphson iteration method)으로 푼다. 각 상에 대한 포화도, 상대투수도와 같은 2차 변수들은 해당 구성방정식을 이용하여 계산된다.

STOMP 시뮬레이터 내에서 대표적인 비선형 방정식은 상대투수도-포화도-모세관압 관계(k_r- s - P, relative permeability-saturation-capillary pressure relations)이다(White and Oostrom, 1996). 이번 모의에서는 VGM을 이용하였다. VGM은 van Genuchten 함수관계(van Genuchten retention relations, van Genuchten, 1980)와 Mualem 공극 분포 모델(Mualem, 1976; Parker et al., 1987)을 기초로 한 것이다. 또한 비수용성유체의 잔류효과를 고려하는 단순화된 k_r- s- P 관계(hysteretic k_r- s- P relation)를 적용하였다. 자유상의 비수용성유체가 없는 경우에는 비수용성유체의 유효 잔류 포화도(effective trapped NAPL saturation)는 유효 포화도와 같다. 자유상의 비수용성유체가 존재하는 경우에 비수용성유체의 유효 잔류 포화도(effective trapped NAPL saturation)는 가상 물의 포화도(apparent aqueous saturation)에 관한 선형방정식으로부터 계산된다. 비수용성유체의 유효 잔류 포화도는 Land(1968)의 원리를 변형한 식으로부터 계산된다. 상대투수도와 포화도의 관계(relative permeability-saturation)는 Mualem의 공극 크기 분포 모델을 기초로 하여 구성하고 있다(Mualem, 1976; Parker et al., 1987).

수치모의 결과와 토의

이번 수치모의는 2차원의 3가지 불포화 매질에서 저밀도 비수용성유체의 이동과 분포를 계산하였다. 지하수위 변동 조건에서도 저밀도 비수용성유체의 이동과 분포를 모의하였다. 모두 5가지의 다공성 매질 특성을 선택하였고, 선택한 모든 매질은 등방성인 것으로 가정하였다(Table 1). 저밀도 비수용성유체로는 톨루엔(toluene)을 선택하였다(Table 2). 톨루엔을 선정한 이유는 우리나라의 역동적인 수리지질학적인 환경에서 비수용성유체 특히 톨루엔에 의한 오염이 보고된 사례가 있기

Table 1. Porous material properties for the simulations.

	Silty clay loam*	Silt loam*	Sandl**	Sand*	Gravel**
Porosity	0.43	0.45	0.38	0.38	0.41
Saturated hydraulic Conductivity, $_{W}$ (cm)	1.94×10^{-5}	1.25×10^{-4}	8.59×10^{-3}	7.58×10^{-3}	8.95×10^{-1}
van Genuchten, (1/cm)	0.01	0.02	0.015	0.145	1.0
van Genuchten, n	1.23	1.41	2	2	1.5
Irreducible water Saturation, $_{c}$	0.207	0.149	0.1	0.1	0.01
Effective NAPL Residual saturation, $_{c}$	0.07	0.06	0.05	0.03	0.001

* : Carsel and Parrish (1988), ** : Nichols et al. (1997)

Table 2. Fluid (toluene) properties for the simulations.

Density, $_{W}$, ^{3}	Viscosity, Pa s	Gas-toluene interfacial tension, mN/m	Toluene-water interfacial tension, mN/m
866.21	5.867×10^{-4}	29.00	36.1

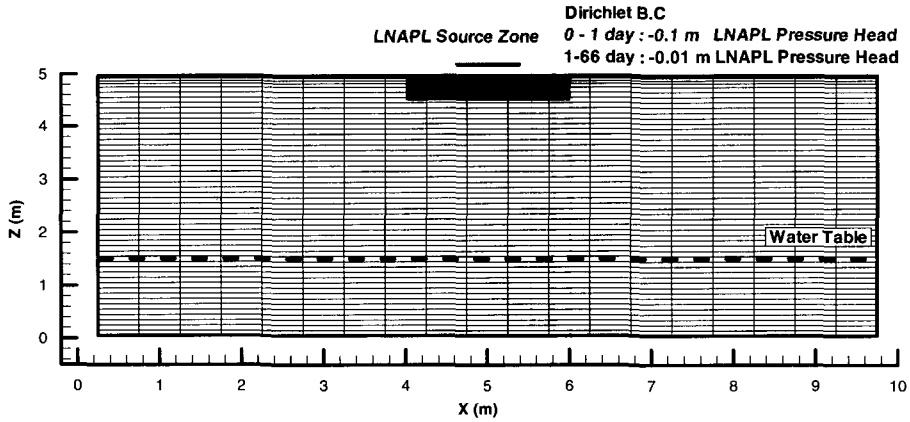

Fig. 1. Grid used in simulations of the flow and distribution of LNAPL at homogeneous domain.

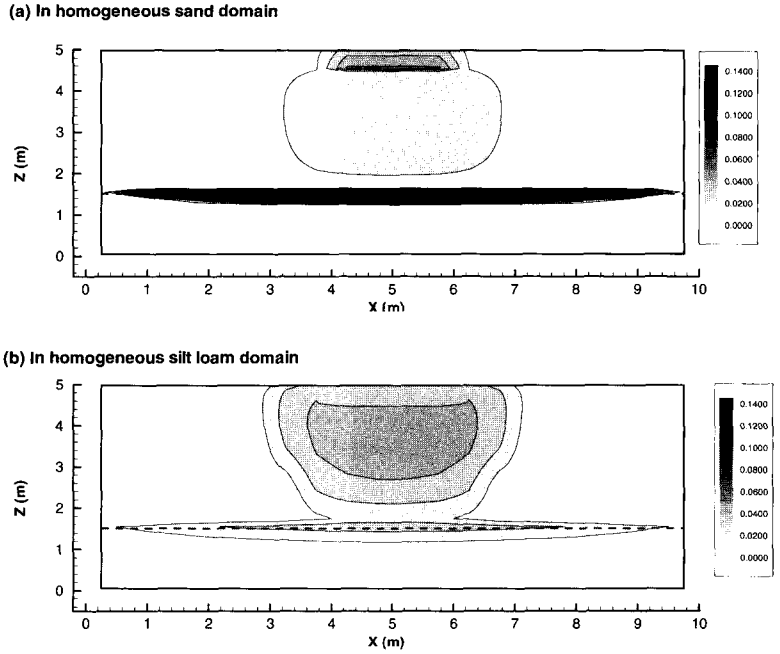

Fig. 2. Simulated volumetric content of LNAPL in homogeneous domain at t=1000 days.

때문이다(Lee et al., 2001). 비록 본 수치모의가 현장 상황을 현실 그대로 반영하고 있지는 않지만, 수치모의를 통해서 현장의 특징적인 수리지질학적 환경에서 저밀도 비수용성유체 즉, 톨루엔이 어떻게 거동하고 분포할 것인지를 이해하는데 조금이라도 도움이 될 것이라고 생각한다.

모든 모의에서 수렴한계는 10^{-5} Pa로 설정하였고, 시간 간격 당 최대 뉴턴-랩슨 반복계산 횟수는 16회로 선정하였다. 시간 간격 증가 인자는 1.25이다.

모의 1 : 균질매질의 경우

조립질 매질과 세립질 매질에서의 저밀도 비수용성유체의 흐름과 분포를 모의하기 위해 모래(sand)와 실트롬(silt loam)을 균질매질로 선정하였다. 모의 영역은 x방향으로 10 m, z방향으로 5 m 인 2차원 직사각형모양의 영역이고, 총 1040셀(20×52)로 구성하였다(Fig. 1). 상부 지표부분의 셀은 더 세립하게 구성하였고, 가장 작은 셀은 0.5 m × 0.05 m 이다.

물과 비수용성유체에 대한 초기 조건은 상부로부터 3.5 m 하부에 지하수면에 위치해 있는 것으로 설정하였으며, 비수용성유체는 모의 영역 내에 존재하지 않은 것으로 하였다. 지하수면은 모의 영역 하부에 Dirichlet 경계조건과 좌측과 우측 경계에는 수리경사 경계조건(hydraulic gradient boundary condition)을 부여하여 모의 수행 중에 일정하게 유지되도록 하였다. 모의 영역 상부 중앙부에서 저밀도 비수용성유체의 누출은 시간에 따라 변하는 Drichlet 경계조건을 부여하였다. 저밀도 비수용성유체가 누출되는 구간은 1 m 길이에 2개의 셀에 해당한다. 초기 하루동안은 저밀도 비수용성유체의 수두를 -0.1 m로 유지하였고, 그 후로 66일 동안 -0.01 m로 유지하면서 저밀도 비수용성유체를 누출시켰다. 198 L의 비수용성유체가 모의 영역 내로 누출되었다. 저밀도 비수용성유체가 주입되는 구간을 제외한 모든 구간은 저밀도 비수용성유체에 대하여 불투수경계로 설정하였다.

저밀도 비수용성유체는 모래에서 보다 빠르게 이동한다. 모래에서 저밀도 비수용성유체가 77일만에 지하수면에 도달한 반면, 실트롬에서는 382

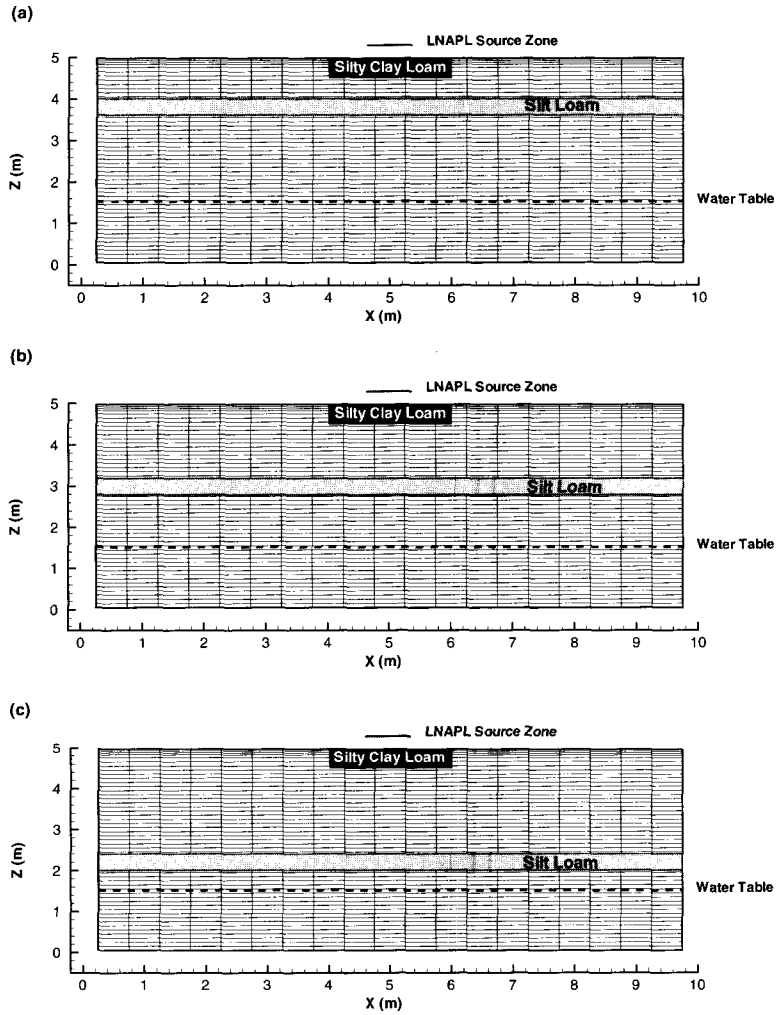

Fig. 3. Grid used in simulations of the flow and distribution of LNAPL at silt loam layer in sand. (a) Silt loam layer exists between 1~1.4 m bts(below top surface). (b) Silt loam layer exists between 1. 8~2.2 m bts. (c) Silt loam layer exists between 2.6~3m bts.

일만에 도달하였다. 그러나 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 두 매질에서 모두 저밀도 비수용성유체의 퍼지는 양상은 비슷하다. 불포화대에서의 저밀도 비수용성유체의 흐름은 주로 중력과 모세관압에 의해서 지배받기 때문에 저밀도 비수용성유체의 흐름은 수직방향으로 뿐만 아니라 수평방향으로 퍼지게 된다. 그러므로 그 퍼져 나가는 모양은 타원형의 형태를 띄게 되는 것이다. 일반적으로 모세관압은 세립질의 매질에서 더 크기 때문에 저밀도 비수용성유체는 조립질 매질보다 세립질 매질에서 보다 많이 수평방향으로 퍼지게 된다. 모래에서 보다 실트롬에서 저밀도 비수용성유체가 더 많이 잔류한다(Fig. 5). 이는 앞에서 설명하였듯이 실트롬에서 모세관압이 더 크기 때문이고, 수리전도도 또한 상대적으로 작기 때문이다. 저밀도 비수용성유체가 수직방향으로 이동하다가 지하수면

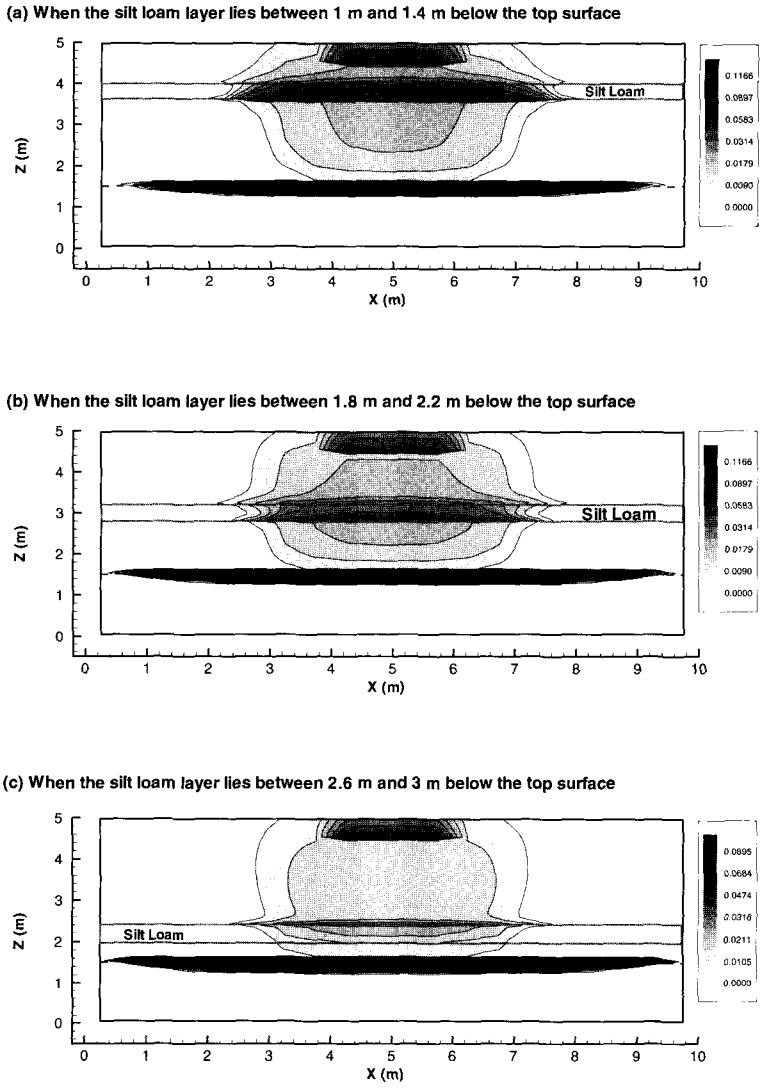

Fig. 4. Simulated volumetric content of LNAPL when silt loam layer exists in sand at t=1000 days.

을 만나면, 더 이상 하부로 이동하지 못하고 팬케이크 모양으로 지하수면상부에 쌓이게 된다(Fig. 2). 그 두께는 실트롬에서 좀더 두껍다.

모래의 상부에서는 저밀도 비수용성유체의 포화도가 갑작스럽게 증가하였다가 저밀도 비수용성유체가 하부로 전진해 내려감에 따라 점진적으로 감소한다. 이런 과정에서 물의 포화도는 변하지 않는다. 저밀도 비수용성유체의 전면이 지하수면에 도달함에 따라 갑작스럽게 물의 포화도가 감소하며, 점점 더 많은 저밀도 비수용성유체가 축적됨에 따라 점진적으로 포화도가 감소하게 된다. 실트롬의 경우, 물의 포화도는 침투하는 저밀도 비수용성유체에 의해 시간에 따라 약간 감소한다. 그러나 이러한 현상은 관측지점이 지하수면으로부터 멀리 있을수록 작다. 이것은 Hofstee et al. (1998)이 실내실험을 통해 PCE (perchloroe-

thylene)가 대부분의 불포화대에서 물을 밀어내면서 퍼지지 않는다는 것을 관찰했던 것처럼, 물의 포화도가 낮은 불포화대 상부에서는, 물이 매질과 같이 움직이지 않는 물체의 역할을 하고 있음을 지시해준다.

정리하면, 모의1의 결과는 세립질 매질의 불포화대에서 저밀도 비수용성유체는 보다 천천히 이동하며, 보다 많은 양이 불포화대에 잔류한다는 것을 보여준다. 대부분의 불포화대에서의 저밀도 비수용성유체의 흐름은 지하수면 근처를 제외하곤 물의 포화도에 영향을 주지 않기 때문에 저밀도 비수용성유체, 물, 공기의 3상 흐름이 아니라, 저밀도 비수용성유체와 공기의 2상 흐름으로 해석할 수 있다.

모의2 : 층형태의 불균질매질의 경우

조립질 매질 내에 세립질 매질이 층상으로 존재할 경우 저밀도 비수용성유체의 흐름과 분포의 양상을 파악하기 위하여 모래영역에 실트롬층이 존재하도록 모의 영역을 구성하여 비수용성유체를 흘려주는 모의를 수행하였다.

이 모의에서는 0.4 m 두께의 실트롬층의 위치를 3가지로 달리하여 모의를 수행하였다. 첫 번째 조건은 상부로부터 1~1.4 m에 실트롬층을 위치시켰고, 두 번째 조건은 1.8~2.2 m에 위치시켰으며, 마지막 세 번째 조건으로 2.6~3 m에 위치시켰다. 모두 불포화대에 위치한다(Fig. 3). 초기조건과 경계조건은 모의1과 동일하다.

모의결과 저밀도 비수용성유체의 분포는 Fig. 4와 같다. 모의 초기에 저밀도 비수용성유체의 유동양상은 모의1의 균질성 매질에서와 동일하다. 그러나 저밀도 비수용성유체가 모래와 실트롬층의 경계에 도달하면, 수평적인 움직임이 발생된다. 모래에 비해 상대적으로 모세관압이 크고 수리전도도가 낮아 물의 흐름이 느린 실트롬층에 저밀도 비수용성유체가 잔류되고 일부 저밀도 비수용성유체가 실트롬층을 통과해 수직방향으로 이동한다. 실트롬층을 포함한 모래영역에 잔류하는 저밀도 비수용성유체의 부피가 균질한 모래층에 비해서는 많고, 균질한 실트롬에 비해서는 적다(Fig. 5). 이는 불포화대 모래영역 내에 실트롬층이 저밀도 비수용성유체의 잔류에 영향을 미침을 보여

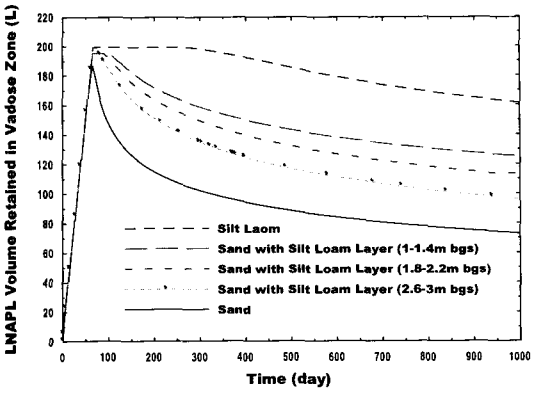

Fig. 5. LNAPL volume retained in unsaturated zone at simulation 1 and simulation 2 over time.

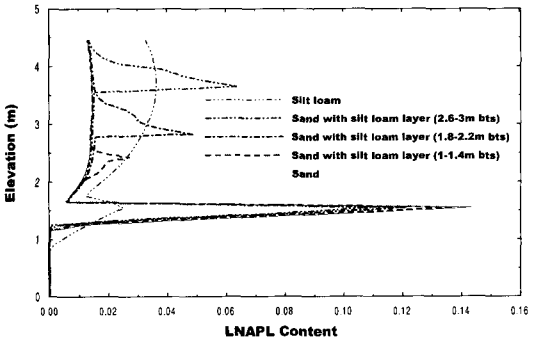

Fig. 6. Simulated vertical content of LNAPL in simulation 1 and simulation 2 at x=5 m.

준다. 또한 실트롬층의 위치에 따라 잔류되는 저밀도 비수용성유체의 양이 다르게 나타난다. 실트롬층이 지표면으로부터 가까이 있을수록 보다 많은 저밀도 비수용성유체가 불포화대에 잔류한다(Fig. 5). 그리고 실트롬층의 위치에 따라 저밀도 비수용성유체의 수직적 분포가 달라진다(Fig. 6). 실트롬층이 지표로부터 가까이 있는 경우에는 실트롬층과 모래층의 하부경계에 저밀도 비수용성유체가 축적되며, 실트롬층이 지하수면에 가까이 있는 경우에는 실트롬층과 모래층의 상부경계에 축적된다. 이는 물의 포화도 때문이다. 초기조건을 지하수위가 지표로부터 3.5 m에 유지되도록 설정하였기 때문에 실트롬층이 지하수면에 가까이 위치할수록 포화도가 높게된다. 결과적으로 저밀도

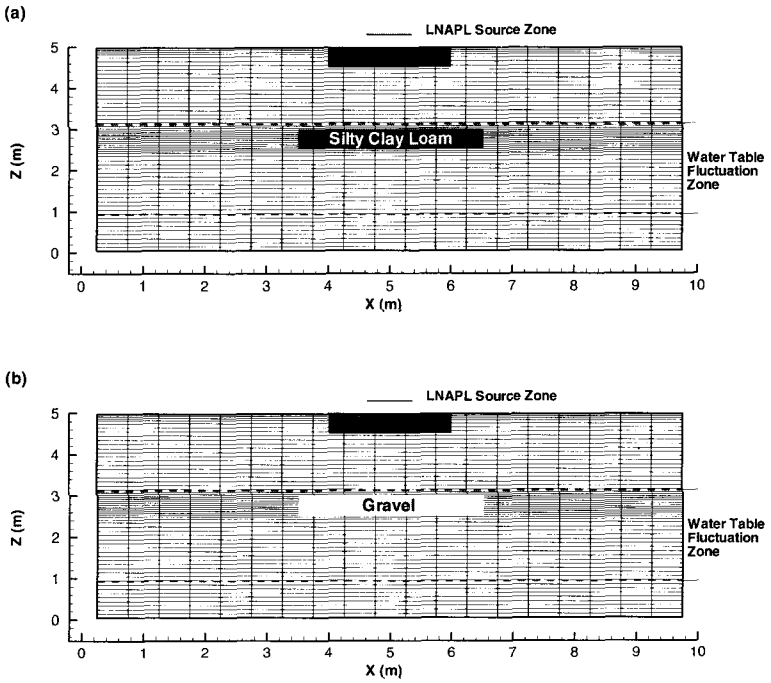

Fig. 7. Grid used in simulations of the flow and distribution of LNAPL in heterogeneous material with lens. (a)-Sand with silty clay loam lens. (b) Sand with gravel lens.

비수용성유체가 잔류될 수 있는 공극의 크기는 실트롬층이 지하수면에 멀수록 크며, 이에 따라 보다 많은 저밀도 비수용성유체가 잔류될 수 있다. 실트롬층이 지하수면에 가까이 있을수록 실트롬층의 물의 포화도가 높아 저밀도 비수용성유체가 모래와 실트롬층의 상부경계를 통과해 지나가기가 어렵다. 따라서 상부경계에 저밀도 비수용성유체가 축적되는 것이다.

결과적으로 세립질층이 존재할 경우, 저밀도 비수용성유체가 균질한 매질에서보다 수평적으로 보다 많이 퍼지고, 세립질층의 존재 위치에 따라 낮은 깊이에 잔류할 가능성이 있다. 불포화대에 잔류하는 저밀도 비수용성유체의 부피와 분포형태는 세립질층의 위치에 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 세립질층의 개수에도 영향을 받을 수 있음을 추론할 수 있다.

모의3 : 렌즈형태의 불균질 매질의 경우

어떤 매질에 보다 조립한 매질의 렌즈가 있는 경우와 보다 세립한 매질의 렌즈가 있는 경우에 저밀도 비수용성유체의 이동과 분포를 모의하기 위해 모래1(sand1) 영역에 실트질점토롬(silty clay loam) 렌즈가 있는 경우와 자갈(gravel) 렌즈가 있는 경우를 모의하였다. 또한 지하수위변동의 영향을 모의하기 위해 본 모의3에서는 2단계로 나누어 모의를 수행하였다.

1단계 : 80일 동안의 저밀도 비수용성유체의 누출과 분포 과정

2단계 : 지하수위 변동

모의영역은 가로 10 m, 세로 5 m의 2차원이며, 총 1180(20×59)개의 셀로 구성되어 있다. 모의영역의 최상부 부분과 실트질점토롬 렌즈 또는 자갈 렌즈가 위치한 상부로부터 1.9 m와 2.6 m 사이의 셀을 조밀하게 구성하였다. 가장 작은 셀은 0.5 m × 0.05 m이다. 두께 0.5 m 길이 3 m의 렌즈는 저밀도 비수용성유체가 누출되는 직하부,

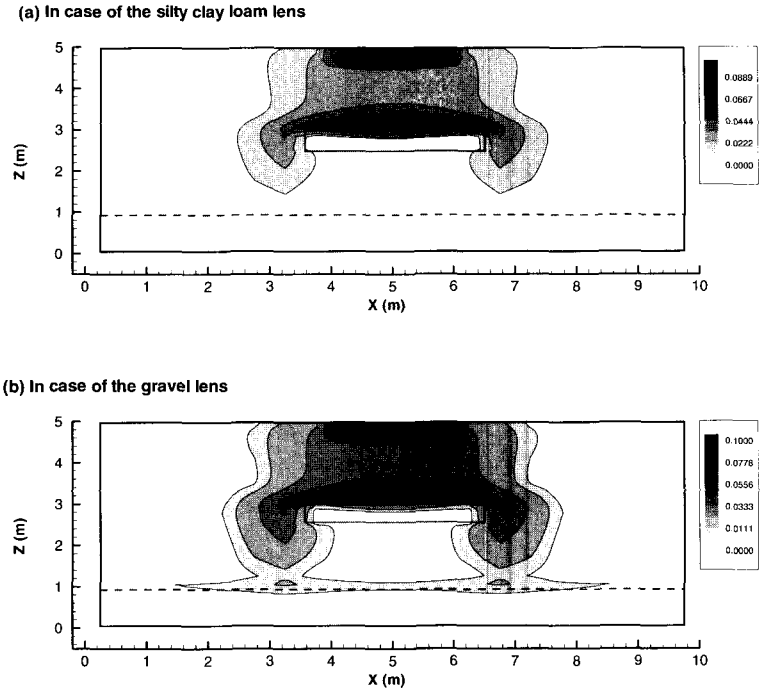

Fig. 8. Simulated volumetric content of LNAPL at t=80 days in case of the presence of silty clay loam or gravel lens in sand1' (LNAPL infiltration).

상부로부터 2~2.5 m에 위치시켰다(Fig. 7). 1단계에서 물에 대한 초기조건과 경계조건을 제외하고는 모의1의 초기조건과 경계조건이 동일하다. 지하수면이 상부로부터 4 m하부에 위치하도록 정수두 초기조건을 부여하였다. 1단계에서는 지하수면이 4 m 하부에 일정하게 위치되도록 바닥에는 Dirichlet 경계조건을 부여하였고, 좌측과 우측경계에는 수두구배 경계조건을 부여하여 80일간 모의를 수행하였다. 지하수위 변동을 모의하는 2단계에서는 1단계의 80일의 결과를 초기조건으로 5일 동안 지하수면을 상부로부터 1.9 m하부까지 상승시킨 후, 다시 10일 동안 원래의 위치인 상부로부터 4 m 까지 하강시켰다. 경계조건은 모의영역 바닥에 시간에 따라 변하는 Dirichlet 경계조건을 좌측과 우측 경계에도 시간에 따라 변하는 수두구배 경계조건을 부여하였다.

특히 이 모의에서 모래1 영역 내에 자갈 렌즈가 존재하는 경우는 모세관 장벽을 모의하는 것이라고 할 수 있다. 모세관 장벽은 불포화대 어떤 매질에 보다 조립질 매질이 존재할 경우, 포화대에서와는 달리 이 조립질 매질이 주변의 세립질 매질의 모세관압 때문에 유체이동의 장벽이 된다. 이미 불포화대에서의 지하수의 흐름에 있어서 모세관장벽의 중요성은 실내실험(Miyazaki, 1988)과 수치모의(Oldenburg and Pruess, 1993)로 증명되었다. 또한 모세관 장벽주변에서의 저밀도 비수용성유체의 흐름 또한 실내실험과 수치모의를 통해 제시되었다(Schroth et. al, 1998b).

1단계 : 저밀도 비수용성유체의 누출

모의결과 저밀도 비수용성유체의 분포를 보면, 저밀도 비수용성유체가 실트질점토롬 렌즈와 자갈 렌즈를 통과하지 못하고 주변을 타고 흐르는 것을 알 수 있다(Fig. 8). 실트질점토롬 렌즈의 경우, 모래1에 비해 모세관압이 크기 때문에 초기부터 높은 함수율을 가지고 있다. 앞에서 언급하였

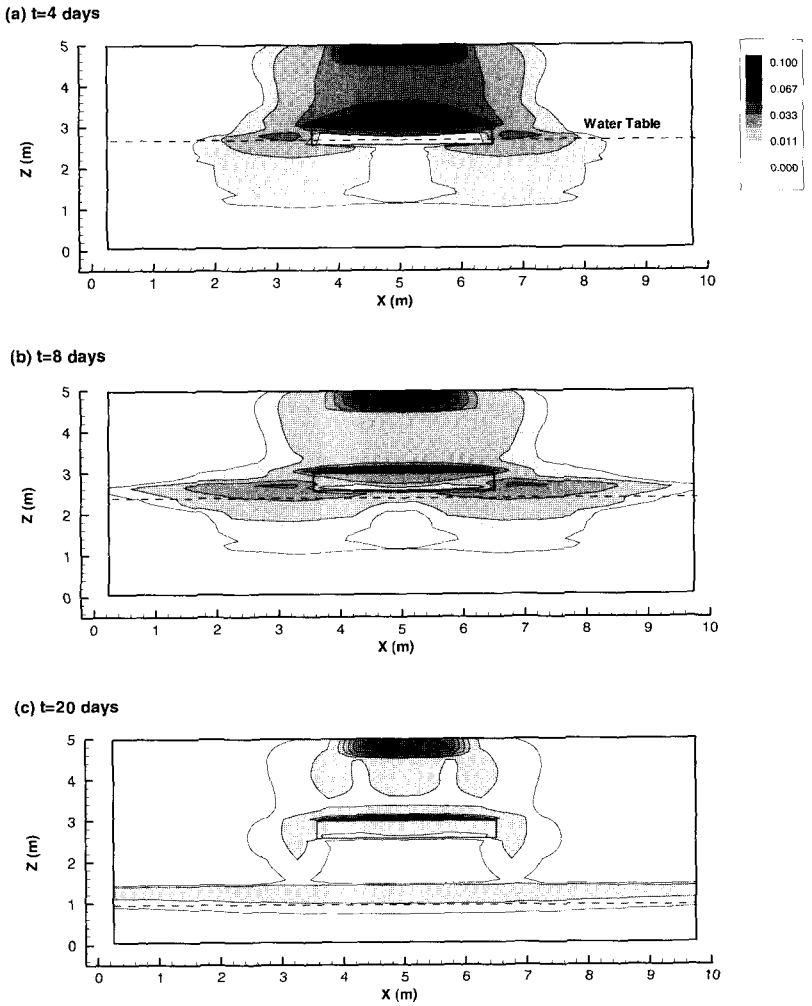

Fig. 9. *Simulated volumetric content of* LNAPL *at* (a) *t*=4 *days*, (b) *t*=6 *days, and* (c) *t*=20 *days in* case of the presence of silty clay loam lens in sand1. Water table fluctuates between 4 m bts and 1.9 m bts.

듯이 불포화대에서의 저밀도 비수용성유체의 흐름시 저밀도 비수용성유체가 물을 밀어내면서 이동하지 못하고, 또한 실트질점토롬 렌즈 내에 저밀도 비수용성유체가 지나갈 수 있는 공간의 크기가 작기 때문에 수직방향으로 이동하는 저밀도 비수용성유체가 실트질점토롬 렌즈를 통과하지 못하는 것이다. 만약 저밀도 비수용성유체가 매우 낮은 함수율 하에서 누출된다면, 모세관현상에 의해 스펀지가 물을 빨아들이듯이 모래1 영역 내에 존재하는 실트질점토롬 렌즈와 같은 세립질 매질로 이루어진 부분으로 빨려 들어가 잔류할 수도 있다. 그러나 특히, 우리나라의 경우는 수리지질학적 조건이 강우 그리고 수위의 변동과 같이 역동적이기 때문에 현실적으로 물의 포화도가 낮은 상태로 불포화대가 유지되기는 어렵다. 불포화대에서 모래1 영역 내에 실트질점토롬 렌즈와 같이

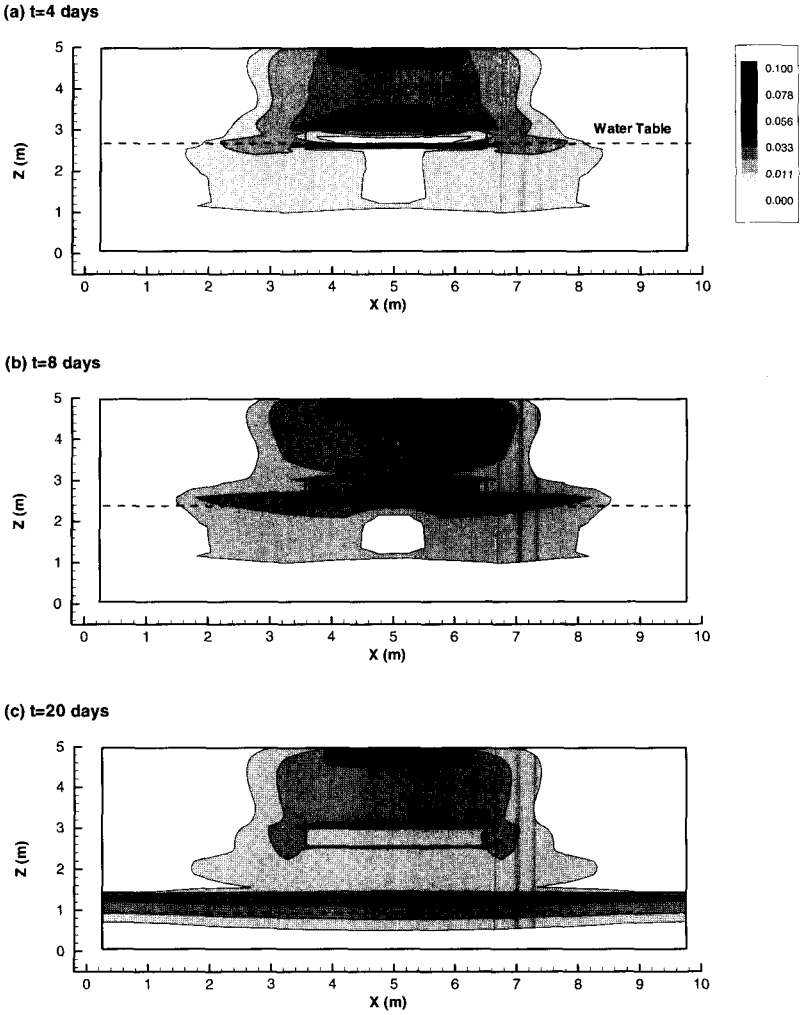

Fig. 10. Simulated volumetric content of LNAPL at (a) t=4 days, (b) t=8 days, and (c) t=20 days in *case of the presence of gravel lens in sand1*. Water table fluctuates between 4 m bts and 1.9 m bts.

국부적으로 주변보다 조립질 매질은 침투하는 저밀도 비수용성유체와 물의 장벽이 될 수 있고, 오염물질 확산의 한 원인이 될 수 있다.

자갈 렌즈의 경우, 자갈 렌즈 상부에서 저밀도 비수용성유체가 수직방향으로 지나가지 못하고 축적되면서 수평으로 퍼지는 현상은 실트질점토롬 렌즈의 경우와 동일하다. 그러나 이러한 현상이 생기는 원인은 실트질점토롬 렌즈의 경우와는 다르다. 그 원인은 모래1과 자갈간의 모세관 장벽에 의한 것이다. 저밀도 비수용성유체가 두 매질의 경계를 통과하여 조립한 매질의 주변 매질보다 큰 공극으로 이동할 만큼 경계부의 모래1 매질에서의 모세관압이 낮아지지 않기 때문이다. 보다 조립질 매질이 불포화대에 존재하기 때문에 공기에 비해 상대적으로 저밀도 비수용성유체가 수착성 유체(wetting fluid)가 된다. 따라서 불포화

대에서 물이 이동할 때 조립질 매질의 상부에 축적되는 것처럼 저밀도 비수용성유체에 있어서도 이와 같은 현상이 발생되는 것이다(Miyazaki, 1988). 이는 조립질 매질이 포화대에서는 유체의 흐름 통로가 될 수 있지만, 불포화대에서는 반대로 유체 흐름의 장벽이 될 수 있음을 지시해준다.

정리하면, 불포화대에서 주변 매질보다 세립질 매질의 렌즈뿐만 아니라 조립질 매질의 렌즈도 저밀도 비수용성유체의 흐름에 장벽역할을 함으로써 불포화대에서의 저밀도 비수용성유체의 흐름과 분포에 중요한 역할을 할 수 있다.

2단계 : 지하수위 변동

지하수면이 변동하면 지하수면 상부에 축적되어있던 비수용성유체가 일부 같이 거동하면서 지하수면 하부에 잔류하기도 하고, 보다 넓은 지역으로 퍼져 나가기도 한다(Pantazidou and Sitar, 1993). Reddi et al. (1998)은 불포화대를 중심으로 지하수면이 변동하는 구간에서의 저밀도 비수용성유체의 이동과 거동을 모의할 수 있는 수치모델을 제시하였고, 수치실험을 통하여 지하수면의 변동이 저밀도 비수용성유체의 지하수로의 용해와 생분해가 촉진될 수 있다고 결론지었다. 그러나 이전까지의 연구들은 주로 포화대에 중점을 두고 있으며, 개념적이었다. 불포화대에서 지하수위 변동에 따른 저밀도 비수용성유체의 분포와 흐름에 관한 연구는 실내실험 또는 수치적으로도 그렇게 활발히 이루어지고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 수치모의를 통하여 지하수가 변동하는 환경 하에서 저밀도 비수용성유체의 흐름과 분포가 어떻게 영향을 받는지 관찰하였다.

1단계 모의에서의 저밀도 비수용성유체의 분포 결과를 초기조건으로 지하수위 변동에 따른 저밀도 비수용성유체의 거동과 분포양상을 관찰하였다. 지하수면이 변동에 따라 물이 저밀도 비수용성유체를 밀어내고, 일부 저밀도 비수용성유체가 같이 이동하면서 저밀도 비수용성유체가 보다 넓은 면적으로 퍼져 나간다. 지하수면이 상승하면서 일부의 저밀도 비수용성유체도 지하수면과 평형을 이루면서 같이 상승한다. 지하수면이 변동되어 원래 위치로 돌아온 후에 불포화대에서 저밀도 비수용성유체로 오염된 부피는 실트질점토롬 렌즈의 경우와 자갈 렌즈의 경우 모두 증가되었다(Fig. 9와 Fig. 10). 그러나 지하수위 변동 동안의 저밀도 비수용성유체의 흐름은 두 경우에 있어서 다르게 나타났다. 실트질점토롬 렌즈의 경우, 렌즈가 저밀도 비수용성유체의 흐름을 방해한다. 그래서 대부분의 저밀도 비수용성유체는 실트질점토롬 렌즈를 지나가지 못하고 이를 피해서 지하수면의 변동과 함께 움직인다. 자갈 렌즈의 경우, 앞의 경우와는 반대로 대부분의 비수용성유체가 자갈 렌즈를 통하여 이동한다(Fig. 10). 지하수면이 자갈 렌즈 바로 아래에 위치할 때 자갈 렌즈 안에 저밀도 비수용성유체가 상대적으로 많이 분포한다. 이는 지하수면이 하강할 때 자갈 렌즈 주변의 저밀도 비수용성유체가 자갈 렌즈 속으로 흘러든다는 것을 보여준다.

두 경우 모두 지하수위 변동에 의해 렌즈 상부 및 주변에 축적되어 있던 저밀도 비수용성유체의 수직방향으로의 이동을 증가시켰다. 특히 보다 조립한 렌즈는 지하수위변동환경에서는 저밀도 비수용성유체의 이동통로가 될 수 있음을 알 수 있다.

요약 및 결론

수치모의를 통하여 불포화대에서의 저밀도 비수용성유체의 이동과 분포 특성을 파악해보았다. 균질한 매질 조건에서는 보다 조립인 매질에서의 저밀도 비수용성유체의 수직적 흐름이 빨랐으나, 불포화대에 잔류하는 비수용성유체의 양은 세립질 매질에서 더 많았다. 모래 매질 내에 실트롬층이 있는 경우에 불포화대에 잔류하는 저밀도 비수용성유체의 양은 실트롬층의 위치에 크게 영향을 받는다. 실트롬층이 지하수면으로부터 멀리 위치해 있을수록 보다 많은 저밀도 비수용성유체가 불포화대에 잔류된다. 모래1층 내에 모래1층보다 조립질 렌즈와 세립질 렌즈가 분포해 있는 경우에 저밀도 비수용성유체의 흐름과 분포를 모의한 결과, 두 경우 모두 저밀도 비수용성유체가 렌즈를 통과하지 못하고 렌즈 위에 축적되거나 피해서 지나감을 관찰할 수 있었다. 세립질 렌즈의 경우에는 세립질 렌즈가 주변의 매질에 비해 함수

율이 높고 투수도가 낮기 때문이다. 조립질 렌즈의 경우는 주변매질과 조립질 렌즈 사이의 모세관 장벽 때문이다. 지하수위 변동 하에서는 렌즈 상부에 축적되어 있던 저밀도 비수용성유체의 수직방향으로의 이동을 증가시킨다. 세립질 렌즈의 경우는 수위변동에 따라 저밀도 비수용성유체가 세립질 렌즈를 통과하지 못하고 주변을 돌아서 수직방향으로 이동되나, 조립질 렌즈의 경우는 지하수위의 변동과 함께 조립질 렌즈 속으로 저밀도 비수용성유체가 이동되는 것을 볼 수 있었다.

위의 수치실험의 결과로부터 불포화대에서의 저밀도 비수용성유체의 흐름은 불포화대의 불균질성과 지하수면의 변동과 같은 역동적인 수리지질학적 조건에 크게 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과들은 유류와 같은 저밀도 비수용성유체로 오염된 현장조사에서 지하수 및 토양 내에서의 오염분포가 불규칙하게 나타나는 것에 대한 하나의 이유가 될 수 있다. 따라서, 저밀도 비수용성유체로 오염된 것으로 추정되는 오염부지조사의 경우, 보다 효율적으로 현장을 보다 정확히 이해하기 위해서는 지하매질의 분포 그리고 지하수위변동과 같은 수리지질학적조사가 정밀하게 이루어져야 한다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호 3-5-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Abriola, L.M., and Pinder, G.F., 1985, A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds 1. Equation development, Water Resour. Res., v. 21, n. 12, 11-18.

Carsel, R.F., and Parrish, R.S., 1988, Developing joint provability distributions of soil water retention characteristics, Water Resour. Res., v. 24, 755-764.

Corapcioglu, M.Y., and Baehr A.L., 1987, A compositional multiphase model for groundwater contamination by petroleum products 1. Theoretical considerations, Water Resour. Res., v. 23, n. 1, 191-200.

Hofstee, C., Oostrom, M., Dane, J.H., and Walker, R.C., 1998, Infiltration and redistribution of perchloroethylene in partially saturated, stratified porous media, J. Contam. Hydrol., v. 34, 293-313.

Kaluarachchi, J.J., and Parker J.C., 1990, Modeling multicomponent organic chemical transport in three-fluid-phase porous media, J. Contam. Hydrol, v. 5, 349-374.

Land, C.S., 1968, Calculation of imbibition relative permeability for two and three phase flow from rock properties, Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Engng., v. 243, 149-156

Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Lee, K.K., Lee, S.Y., and Lee, M.H., 2001, Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer, J. Contam. Hydrol, v. 50, 139-158.

Miyazaki, T., 1988, Water flow in unsaturated soil in layered slopes, J. Hydrol., v. 102, 201-214.

Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res., v. 12, n. 3, 513-522.

Nichols, W.E., Aimo, N.J., Oostrom, M., and White, M.D., 1997, STOMP: Subsurface Transport over Multiple Phases. Application guide. PNNL-11216, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.

Oldenburg, C.M., and Pruess., K., 1993. On the numerical modeling of capillary barriers. Ground Water, v. 29, n. 4, 1045-1056.

Pantanzidou, M., and Sitar, N., 1993. Emplacement of nonaqueous liquids in the vadose zone. Water Resour. Res., v. 29, n. 3, 705-722.

Parker, J.C., Lenhard, R.K., and Kuppusamy, T., 1987. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. Water Resour. Res., v. 23, n. 4, 618-624.

Reddi, L.N., Han, W., and Banks, M.K., 1998. Mass loss from LNAPL pools under fluctuating water table conditions. J. Environ. Eng., v. 124, n. 12, 1171-1177.

Schroth, M.H., Istok, J.D., and Selker, J.S., 1998a. Three phase immiscible fluid movement in the vicinity of textural interfaces. J. Contamin. Hydrol., v. 32, 1-23.

Schroth, M.H., Istok, J.D., Selker, J.S., Oostrom, M., and White, M.D., 1998b. Multifluid flow in bedded porous media: laboratory experiments and numerical simulations. Adv. Water Resour., v. 22, n. 2, 169-183.

Sleep, B.E., and Sykes, J.F., 1993. Compositional simulation of groundwater contamination by organic compounds 1. Model development and verification. Water Resour. Res., v. 29, n. 6, 1709-1718.

White, M.D., and Oostrom, M., 1996a. STOMP: Subsurface Transport over Multiple Phases. Thery Guide. PNNL-11217. Pacific Northwest National Laboratory. Richland, WA.

van Geel, P.J., and Sykes, J.F., 1994. Laboratory and model simulations of a LNAPL spill in a variably-saturated sand. 1. Laboratory experiment an image analysis techniques. J. Contamin. Hydrol., v. 17, 1-25.

van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil. Sci. Soc. of Am. J., v. 44, 892-898.

투 고 일 2003년 1월 8일
심 사 일 2003년 1월 9일
심사완료일 2003년 2월 20일

천정용
(주)지오그린21
우)151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교 연구공원 본관 519호
Tel: 02-2102-1931
e-mail: cildon@hanmir.com

이진용
(주)지오그린21
우)151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교 연구공원 본관 519호
Tel: 02-2102-1931
e-mail: hydrolee@netian.com

이강근
서울대학교 지구환경과학부
우)151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1
Tel: 02-880-8161
e-mail: kklee@snu.ac.kr