

토양 및 지하수에서의 NAPL 제거를 위한 스팀주입 수치해석 Numerical Analysis of NAPL Removal from Soil and Groundwater Using Steam Injection

이 상 일*

Lee, Sang-II

Abstract

Numerical models simulating the process of NAPL removal from contaminated soil or groundwater through steam injection can be a useful tool for designing and evaluating the cleanup strategy under various field conditions. One- and two dimensional numerical analyses were conducted based on the governing equations describing the NAPL removal as a non-isothermal, multi-phase and multi component process. Relatively good agreements were obtained between the numerical results and the observations from one-dimensional laboratory experiment, except some discrepancy due to experimental difficulties. Simulation effectively identified the steam displacement process of xylene floating on the water table and TCE sinking on the aquifer bottom in a two-dimensional analysis. Overall, simulation models have a high potential in the design/appraisal of a system for field application of the technique as well as in the examination of complex processes such as vaporization which is hard to identify experimentally.

Keywords: NAPL removal, Steam injection, Heat and mass transport

요 지

NAPL로 오염된 토양이나 지하수에 스팀을 주입하여 제거하는 과정을 모의하는 수치모형은 다양한 현장상황에서의 적절한 작업조건을 설계·평가하는데 매우 유용한 도구가 될 수 있다. 스팀주입에 의한 NAPL 제거과정을 다상, 다요소 시스템의 비등온 과정으로 기술하는 지배방정식에 기초한 T2VOC를 이용하여 1 및 2차원 상황에 대하여 수치해석을 수행하였다. 1차원의 경우 수치해는 실험상 어려움으로 인한 편차를 제외하고는 실험에서 얻은 칼럼내 온도분포와 비교적 좋은 일치를 보였다. LNAPL인 xylene과 DNAPL인 TCE에 대한 2차원 해석도 상이한 물성에 상응하는 분포와 제거과정을 합리적으로 예측하는 것이 가능함을 보여주었다. 수치모형의 활용범위는 실험적으로 확인하기 어려운 기화에 의한 가스의 생성과 같은 복잡한 과정의 구명을 비롯하여 스팀주입기술의 현장적용시 매우 넓은 것으로 판단된다.

핵심용어 : NAPL 제거, 스팀주입, 열 및 물질전달

* 동국대학교 토목환경공학과 조교수

Assistant Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

1. 서론

유기용매나 석유화학물 등과 같은 NAPL(Non-Aqueous Phase Liquid)에 의한 토양 및 지하수 오염이 심각한 문제로 대두되고 있다. 대부분 불수용성이 오염물질들은 초기단계에는 불포화 토양의 간극사이에 끼어 있다가 시간이 경과함에 따라 하부로 이동하여 밀도의 고저에 따라 지하수면 부근(LNAPL의 경우)이나 지하수면 바닥 혹은 불투수층 표면에 집적(DNAPL의 경우)되어 지하수를 오염시킨다. 전통적인 양수에 의한 정화방법은 물에 잘 녹지 않는 NAPL의 특성상 극히 비효율적일 수밖에 없다. 또한, 지표 근처의 토양이 국지적으로 오염되었을 경우에는 토양세척이 오염정화를 위한 효율적인 방법이 될 수 있지만, 오염이 지하 깊은 곳에서 발생하였거나 굴착이 현실적으로 불가능할 경우에는 다른 대안이 필요하다.

스팀주입을 이용한 정화공법은 열적 처리법의 하나로서 오염된 지반에 스팀 주입-회수 시스템을 장치, 스팀의 압력과 온도를 이용하여 NAPL의 유동성을 증대 시킴으로써 유해한 부산물의 생성 없이 NAPL을 제거할 수 있는 기술이다. '80년대 초에 처음 시도된 이래(Hilberts, 1985), Hunt 등(1988), Udell과 Stewart(1992), 이상일 등(1997), 장연수 등(1998)에 의해 스팀주입에 의한 NAPL의 제거 가능성이 현장 및 실험실 연구를 통해 입증된 바 있다. 그러나 대수층의 불균일성과 다양한 오염물질 등으로 대변되는 상이한 현장 상황에 적합한 스팀주입 작업조건을 매번 실험적으로 규명하는 데에는 한계가 있다. 따라서 스팀주입에 의한 NAPL 제거과정을 모의할 수 있는 수치모형은 오염도 양이나 대수층의 정화 프로그램을 설계하거나 평가할 때 매우 유용한 도구가 될 것이다.

본 논문에서는 스팀에 의한 NAPL 제거과정 즉, 다상, 다요소 시스템의 비등은 과정에 대한 지배방정식을 도출하고 이의 수치해를 구하는 절차를 소개한다. 또한, 1차원 칼럼실험의 결과를 수치해와 비교함으로써 수치해의 타당성을 검증하고, 실험이 기술적으로 쉽지 않은 2차원 확대모형에서는 LNAPL과 DNAPL의 제거과정을 수치적으로 비교·연구함으로써 보다 복잡한 실제 현장에서의 수치해석의 가능성 및 유용성을 검토하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 지배방정식

3가지 질량요소(공기, 물, 화학물질)가 존재하는 비

등은 시스템의 거동을 기술하기 위해서는 세 개의 질량보존 방정식과 한 개의 에너지보존 방정식이 필요하다. 체적 V , 표면적 Γ 를 갖는 유동 구역에 대한 가장 일반적인 보존 방정식을 적분형태로 표현하면 다음과 같다(Falta 등, 1992).

$$\frac{d}{dt} \int_V M^k dV = \int_{\Gamma} \vec{F}^k \cdot \vec{n} d\Gamma + \int_V q^k dV \quad (1)$$

여기서 위치자 k 가 a 면 공기(air), w 면 물(water), c 면 화학물질(chemical), 그리고 h 면 열(heat)을 의미한다. M^k 는 단위 다공성 물질체적당 요소 k 의 양, \vec{F}^k 는 V 로의 요소 k 의 총 flux, \vec{n} 은 바깥쪽으로 향하고 표면에 직각인 단위 벡터, q^k 는 단위 체적당 요소 k 의 생성률(generation rate)을 의미한다.

(1) 요소누적항 M^k

공기와 물에 대한 질량누적항 M^k ($k = a, w$)는 가스, 액체, NAPL 상(相)에 의한 기여를 더한 것으로 표현될 수 있다.

$$M^k = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^k \quad (2)$$

ϕ 는 공극률[-], S_{β} 는 β 상의 포화도[-], ρ_{β} 는 β 상의 밀도[M/L³], X_{β}^k 는 상 β 인 요소 k 의 질량비(mass fraction, [-])이다. 이때 β 가 g 면 가스, w 면 액상, n 이면 NAPL을 의미한다.

화학물질($k = c$)의 경우 선형 평형 흡착효과를 추가로 고려한다.

$$M^c = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^c + \rho_b \rho_w X_w^c K_d \quad (3)$$

이때 ρ_b 는 흙의 건조체적밀도, X_w^c 는 액상 화학물질의 질량비[-], K_d 는 유기물의 흙-물 분배계수 [L³/M]이다(Karickhoff 등, 1979).

열($k = h$)에 관한 누적항은 고체(흙)와 액상으로부터의 기여를 고려하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M^h = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} u_{\beta} + (1 - \phi) \rho_R C_R T \quad (4)$$

이때 u_{β} 는 상 β 의 비내부에너지(specific internal energy, [L²T²]), ρ_R 은 흙입자의 밀도, C_R 은 흙

의 열용량 $[L^2 T^2 / \Theta]$, T는 온도 Θ 이다. 액상 및 NAPL의 비내부에너지는 조성에 독립적이거나, 가스상의 경우는 조성에 매우 관계가 깊으며 다음과 같이 표시된다.

$$u_g = \sum_{k=a,w,c} X_g^k u_g^k \quad (5)$$

이때 u_g^k 는 가스상으로 존재하는 요소 k의 비내부 에너지이다.

(2) Flux항 \vec{F}^k

공기, 물, 화학물질의 3가지 질량 flux항은 세 가지 상(가스, 액체, NAPL)에 대한 합으로 표현된다.

$$\vec{F}^k = \sum_{\beta} \vec{F}_{\beta}^k \quad (6)$$

액체와 NAPL상태의 질량 flux는 Darcy 법칙의 다상 형태로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\vec{F}_{\beta}^k = -k \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} X_{\beta}^k (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \vec{g}) \quad (7)$$

여기서 k는 투수능(permeability, $[L^2]$), $k_{r\beta}$ 는 β 상의 상대투수능[-], μ_{β} 는 점성계수[M/LT], P_{β} 는 압력[M/L²], \vec{g} 는 중력가속도 벡터[L/L²]이다. 액상 및 NAPL의 압력은 각각 기체의 압력과 다음과 같은 관계에 있다.

$$P_w = P_g - P_{cgw} \quad (8)$$

$$P_n = P_g - P_{cgn} \quad (9)$$

이때 $P_{cgw} < 0$ 및 $P_{cgn} < 0$ 은 각각 가스-액체, 가스-NAPL간 모세관압이다.

가스 상태의 각 요소의 질량 flux는 이송(advection)과 확산(diffusion)을 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{F}_g^k = -k_0 \left(1 + \frac{b}{P_g}\right) \frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g} X_g^k (\nabla P_g - \rho_g \vec{g}) + \vec{j}_g^k \quad (10)$$

여기서 k_0 는 높은 기체압력에서의 투수능, b는 낮은

압력에서의 가스 투수능에 관한 Klinkenberg 인자, 그리고 \vec{j}_g^k 는 가스 상태인 요소 k의 확산에 의한 질량 flux로서 물(w)과 유기화합물(c)의 증기에 대하여 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{j}_g^k = -\phi S_g \tau_g D_g^k \rho_g \nabla X_g^k \quad (11)$$

D_g^k 는 기체 상태의 요소 k에 대한 분자확산계수(molecular diffusion coefficient, $[L^2/T]$), τ_g 는 각각의 굴곡도(tortuosity, [-])로서 다음과 같이 모형화될 수 있다(Millington과 Quirk, 1961).

$$\tau_g = \phi^{1/3} S_g^{7/3} \quad (12)$$

공기에 대한 확산질량 flux \vec{j}_g^a 는 (11)식과

$$\vec{j}_g^a + \vec{j}_g^w + \vec{j}_g^c = 0 \quad (13)$$

로부터 결정된다.

열전도와 대류에 의한 heat flux는 다음과 같다.

$$\vec{F}^h = -K \nabla T + \sum_{\beta} h_{\beta} \vec{F}_{\beta} \quad (14)$$

K는 다공성매질의 열전도계수 $[ML/T^2\Theta]$, h_{β} 는 β 상의 비엔탈피 $[L^2 T^2]$ 이다. 내부에너지의 경우와 마찬가지로 액상과 NAPL의 비엔탈피는 조성에 무관하다고 가정할 수 있고, 가스의 경우에는 (15)식과 같이 조성의 함수로 표시된다.

$$h_g = \sum_{k=a,w,c} X_g^k h_g^k \quad (15)$$

(3) 생성 및 소멸항 q^k

물·공기·화학물질이 모두 생성($q > 0$)과 소멸($q < 0$)의 대상이 될 수 있다. 특히, 액상으로 존재하는 휘발성 유기탄소의 생물학적 분해(biodegradation)는 지수함수적인 감쇄법칙을 따르는 것으로 모형화 할 수 있다. 즉,

$$q^c = \frac{dM_w^c}{dt} = -\lambda M_w^c = -\lambda \phi S_w \rho_w X_w^c \quad (16)$$

이때, λ 는 감쇄상수 $[T^{-1}]$ 이다.

지금까지 열 및 화학적 평형상태에 있는 4개 요소의

표 1. 상의 존재형태에 따른 주변수

상	주변수
액상	P_g, X_w^a, X_w^c, T
액상-NAPL	P_g, S_w, X_w^a, T
가스-액상	P_g, S_w, X_g^c, T
가스-액상-NAPL	P_g, S_w, S_g, T

열역학적 상태를 기술하기 위한 4개의 지배방정식이 유도되었다. 이 지배방정식의 주변수는 상의 존재형태에 따라 달라지는데, 가능한 7가지 조합(가스, 액체, NAPL, 가스-액체, 가스-NAPL, 액체-NAPL, 가스-액체-NAPL) 중, 현실적으로 액상은 항상 존재함을 감안하면 4가지 경우가 고려의 대상이 된다. 각 경우에 대한 주변수가 표 1에 제시되어 있으며, 나머지 물리량들은 이 주변수와와의 관계식, 함수형태, 열역학 표 등에 의해 결정된다.

대상지역이 시, 공간적으로 나누어지고 초기 및 경계 조건이 주변수에 대해 주어지면, 수치적으로 해를 구할 수 있다. 즉, 지역을 N개의 grid block으로 나눈다면 각 block에서 최대 4개의 지배방정식이 유효하므로 4N개의 비선형 대수방정식이 얻어진다. 매 시간 step에 대해 방정식을 Taylor 전개하여 1차항까지를 취함으로써 얻어지는 선형방정식들은 sparse direct matrix 법(Duff, 1977)이나, iterative preconditioned conjugate gradient 법(Moridis와 Pruess, 1995)으로 해를 얻을 수 있다. 수치해석에 관한 자세한 내용은 Falta 등(1992)에서 찾을 수 있다.

3. 1차원 해석

1차원 칼럼에서의 단일 NAPL 제거과정을 재현하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에는 T2VOC (Falta 등, 1995) 프로그램이 사용되었다. 길이 50 cm, 내경 5 cm의 칼럼을 포함하는 실험장치가 그림 1에 나타나 있다. 장치 및 실험절차에 관하여는 이상일 등(1997)과 장연수 등(1998)에 상세히 설명되어 있다. Octane(표 2 참조)을 주입한 모래와 화강토에서의 스팀에 의한 거동을 해석하기 위한 입력자료가 표 3에 나타나 있다.

NAPL 제거실험을 수치적으로 모의하기 위해 다음과 같은 단계로 해석을 수행하였다.

(1) 오염되지 않은 순수한 자연상태와 같은 정적평형상태의 구현을 위해 주어진 해석대상 구역이 초기 및 경계조건을 만족하도록 한다.

(2) 일정량의 오염물질을 칼럼내로 주입하여 오염물질을 확산시킨다.

(3) 칼럼 안으로 스팀을 주입하고 NAPL 제거과정을 시간에 따라 관찰한다.

토양시료를 모래로 하였을 경우의 스팀주입후 칼럼 내 온도변화는 그림 2(a)와 같다. 실험에서보다는 수치해석에서 스팀의 칼럼내 이동속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 이는 실험과는 달리 수치해석에서는 스팀주입 초기에 스팀주입부에서의 열손실이 일어나지 않기 때문인 것으로 보인다. 그러나 수치해석 결과 실험과 마찬가지로 스팀이 각 Port 위치에 도달하게 되면 급속하게 온도가 상승하는 것을 볼 수 있으며 각 Port에 도

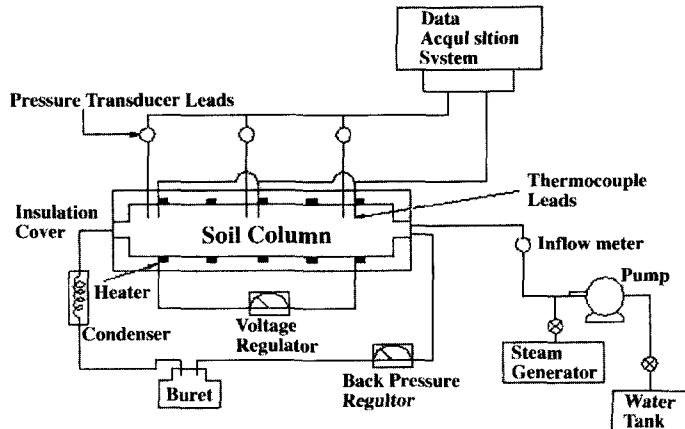


그림 1. 스팀주입 실험장치 개요도

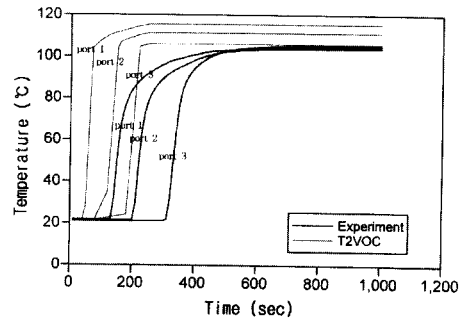
표 2. NAPL의 물성비교표

Parameter	Sand	Granite soil
Permeability (m ²)	1.54 × 10 ⁻¹¹	4.97 × 10 ⁻¹³
Porosity	0.4	0.4
Soil grain heat capacity (J/kg°C)	900	1,255
Soil grain density (kg/m ³)	1,600	1,400
Dry media thermal conductivity (W/m°C)	1.5	0.3
Water saturated media thermal conductivity (W/m°C)	1.7	2.4
Initial temperature (°C)	22	40
Water component injection rate (kg/sec)	3.0 × 10 ⁻⁴	1.6 × 10 ⁻⁴
Outlet pressure (Pa)	101,333	101,333

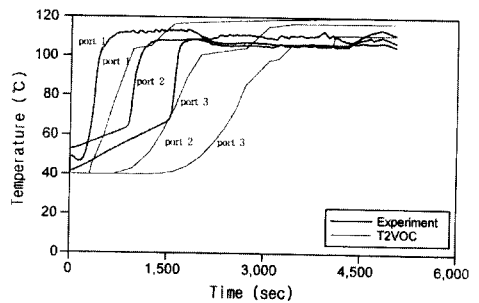
달하는 시간차도 거의 동일함을 알 수 있다. 최종적인 칼럼내 온도는 수치해석의 경우가 실험에서 관측된 것보다 다소 높았는 바, 이는 이론적으로 외부와의 열교환을 무시한 단열 경계조건이 실제에서는 완벽하게 구현되지 못한 것에 연유하는 것으로 판단된다.

화강토에 대한 수치해석 결과는 그림 2(b)와 같다. 실험과 비교하여 수치해석에서 스팀의 각 Port 도달 시간 및 칼럼 통과시간이 더 많이 소요되는 이유는 표 3에서 보는 바와 같이 화강토의 건조 및 포화시 열전도 계수가 큰 차이를 보이고 있음에서 추정할 수 있다. 즉, 수치해석은 스팀주입 이전에 칼럼이 물로 완전히 포화되는 것을 가정한 반면, 실험에서는 기술적 어려움으로 인하여 부분적으로만 포화되었기 때문인 것으로 판단된다. 그림 2(a)에서와 마찬가지로 2(b)에서도 스팀주입구에 가까운 Port일수록 최종온도가 높게 나타나는 수치해석결과는 동일한 온도분포를 보인 실험계측보다 합리적인 것으로 보인다.

전반적으로 실험과 수치해석이 다소 차이가 나는 이유는 수치해석에 쓰인 입력자료가 실험조건을 정확히 반영하지 못했을 가능성을 생각할 수 있다. 다짐 정도에 따른 토양물성의 차이, 단열의 한계, thermocouple의 위치, 스팀유입 및 출구조건의 모형과 실제의 상이함



(a)



(b)

그림 2. 스팀주입시 칼럼내 온도변화 비교 (a: 모래, b: 화강토)

표 3. 1차원 해석 입력자료

NAPL	Molecular Weight (g/g·mol)	Liquid Density (g/cm ³)	Boiling Point (°C)	Water Solubility at 20°C (mg/L)	Viscosity (cP)
octane	114.2	0.70	125.8	0.7	0.51
o-xylene	106.2	0.88	144.4	185	0.85
TCE	131.4	1.46	86.8	1,100	0.59

등이 그것이다. 그러나 이러한 편차가 수치해석 모형의 필요성과 기여도를 감소시키지는 않을 것으로 보이며, 특히 실제 현장조건은 매우 불균일하며 이를 실험적으로 재현하는 것이 거의 불가능함을 상기할 때 더욱 그러하다.

4. 2차원 확장

가로 18.3 m, 세로 4.8 m 규모의 가상 2차원 대수층을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 대상토양으로는 모래를, 오염물질로는 LNAPL인 xylene과 DNAPL인 TCE를 사용하여 각각의 스팀에 의한 이동 및 제거경향을 비교하여 보았다.

2차원 모형의 격자구성 및 경계조건은 그림 3과 같다. 수치해석의 첫 번째 단계로 대상 오염물질 약 700 kg을 모형의 중앙상부에서 1.4667×10^{-4} kg/sec의 주입율로 55.6일 동안 주입하였다. 그후 약 10년 동안 자연감쇄가 없다는 것을 전제로 오염물질의 토양내 확산·이동을 모의하였고 마지막으로 171.3일 동안 7.4×10^{-4} kg/sec의 주입율로 스팀을 주입하였다.

그림 4는 오염물질이 주입된 지 10년이 지난 뒤의 xylene과 TCE의 토양내 포화도를 나타낸 것이다. xylene은 물보다 비중이 작으므로 깊이 3 m 부근에 형성된 지하수면 부근에 분포하며, TCE는 지하수면을 통과하여 불투수층으로 표시된 바닥면에 도달하였음을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6은 스팀주입 후 105 및 130일 후의 토양내 각각의 오염물질의 포화도를 나타낸 것이다. 105일이 지난 후에는 스팀이 오염지역에 도달하여 오염물질을 하류방향으로 밀어내고 있음을 알 수 있으며, 빈간극이 존재하는 불포화층에서의 NAPL

이동속도가 지하수로 포화되어 있는 층에서보다 낮은 저항 때문에 빠름을 알 수 있다. 130일 후에는 오염물질의 대부분이 스팀주입부로부터 12~18 m 떨어진 곳에 분포하고 있으며 비등점과 점도가 상대적으로 낮은 TCE가 xylene에 비해 더 빠르게 제거되고 있음을 알

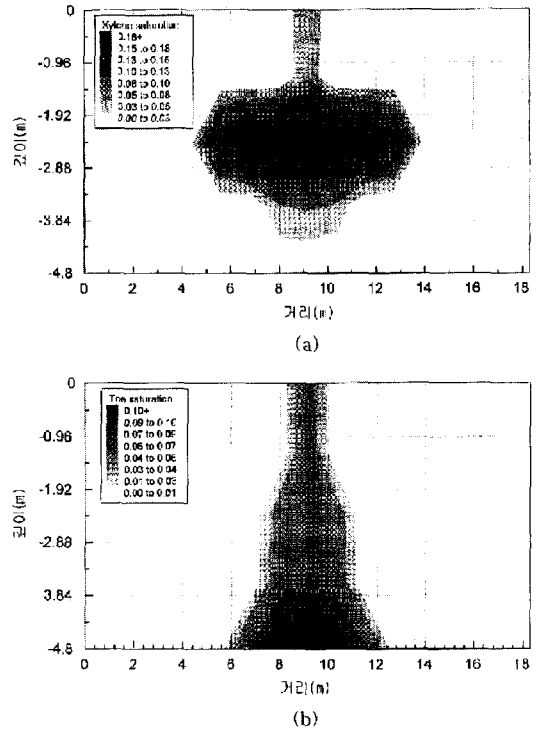


그림 4. 스팀주입전 xylene(a) 및 TCE(b)의 토양내 포화도

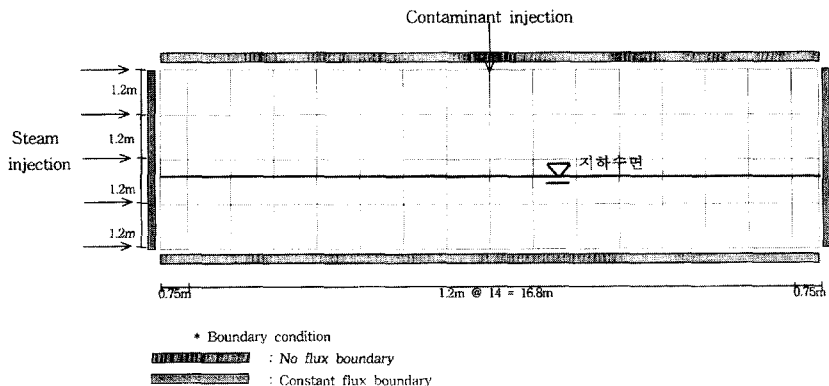
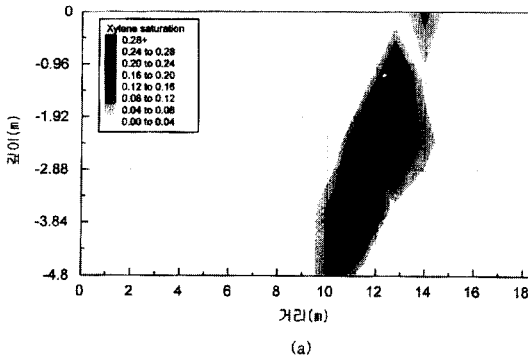
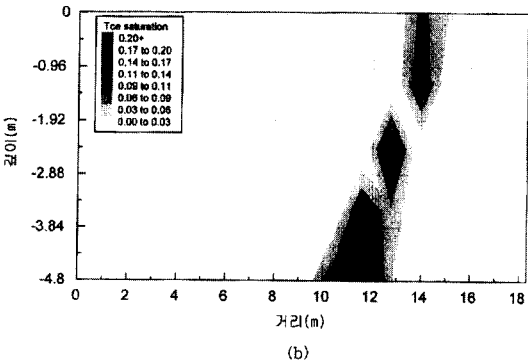


그림 3. 2차원 모형의 격자망 및 경계조건

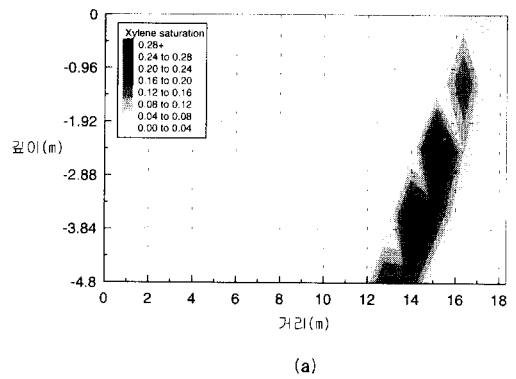


(a)

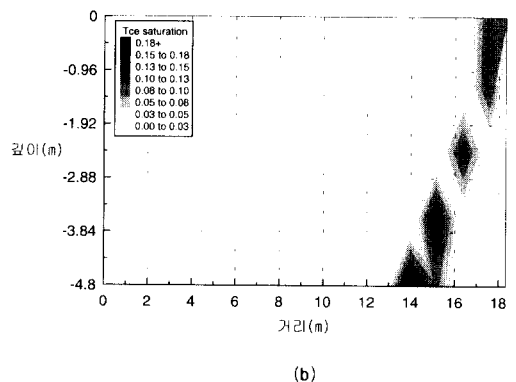


(b)

그림 5. 스팀주입 105일 후 xylene(a) 및 TCE(b)의 토양내 포화도



(a)



(b)

그림 6. 스팀주입 130일 후 xylene(a) 및 TCE(b)의 토양내 포화도

수 있다. 약 171일 후에는 대상구역으로부터 xylene과 TCE가 100 % 제거됨이 확인되었다. 우측 경계에 진공압력 상태의 추출정(extraction well)을 설치할 경우의 거동에 대하여는 다른 곳에서 다루기로 한다.

5. 요약 및 결론

스팀주입을 이용하여 토양 및 지하수의 NAPL을 제거하는 기술은 유해한 생성물질을 발생시키지 않고 다른 정화기술에 비해 상대적으로 짧은 시간 안에 작업을 완료할 수 있다는 점에서 유망하다. 한편, 다양한 현장상황에 적합한 작업조건을 매년 실험적으로 결정하거나, 시행오차에 의존하는 것은 적절치 않으므로 NAPL 제거과정을 모의할 수 있는 시뮬레이션 모형을 활용하여 설계 및 평가에 이용하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 스팀주입에 의한 NAPL 제거과정을 다상, 다요소 시스템의 비등은 과정으로 가정한 지배방정식을 소개하고, 1 및 2차원 상황에 대한 수치해석을 수행하였다. 1차원 수치해석과 칼럼실험과의 결과비교

는 전체적 경향이 비교적 잘 일치함을 나타내었으며, 편차는 수치해석에 사용된 입력자료가 실험조건을 정확히 반영하지 못한 점에 기인하는 것으로 판단되었다. 2차원 해석에서는 공간 및 시간변화에 따른 오염물의 분포를 통해 상이한 NAPL의 물성이 스팀에 다르게 작용하는 양상을 이해할 수 있었다.

결국, 수치모형은 복잡한 지하환경과 다양한 NAPL의 거동을 모의하고 스팀주입법의 설계와 그 효율성의 평가에 도움을 줌은 물론, 실험적으로 확인하기 어려운 가스의 발생이나, 생화학적 반응 등을 해석할 수 있다는 측면에서도 유용할 것으로 판단된다. 그러나, NAPL의 다양한 형태로의 자연감쇄나 진공 추출정의 설치에 의한 오염물의 회수, 전극을 이용한 토양의 가열효과 등 실용적인 정화기술의 개발을 위해서는 더욱 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 동국대학교 전문학술지 논문게재연구비

지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이상일, 장연수, 김선기 (1997). “스팀주입에 의한 토양내 NAPL 제거 실험.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 459~465.
- 장연수, 이상일, 임종주 (1998). “스팀주입을 이용한 토양에서의 NAPL 제거에 관한 1차원 실험.” 대한환경공학회지, 대한환경공학회, Vol. 20, No. 5, pp. 693-700.
- Duff, I.S. (1977). *MA28-A Set of FORTRAN subroutines for sparse unsymmetric linear equations*, AERE Harwell Report R 8730.
- Falta, R.W., Pruess, K., Javandel, I., and Witherspoon, P.A. (1992). “Numerical modeling of steam injection for the removal of nonaqueous phase liquids from the subsurface. 1. Numerical formulation.” *Water Resour. Res.* Vol. 28, No. 2, pp. 433-449.
- Falta, R.W., Pruess, K., Finsterle, S. and Battistelli, A. (1995). *T2VOC user's guide*, Lawrence Berkeley Lab. Report LBL-36400, LBL, Berkeley, CA.
- Hilberts, B. (1985). “In Situ Steam Stripping.” *Contaminated soil*. Edited by Assink, J.W., Van Den Brink, W.J., Proc. of First Intern. TNO Conf. on Contaminated Soil. Utrecht, The Netherlands, November 11-15, pp. 680-687.
- Hunt, J.R., Sitar, N. and Udell, K.S. (1988). “Non-aqueous phase liquid transport and clean up: 2. Experimental studies.” *Water Resour. Res.*, Vol. 24, No. 8, pp. 1259~1269.
- Karickhoff, S.J., Brown, D.S. and Scott, T.A. (1979). “Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments.” *Water Resour. Res.*, Vol. 13, No. 3, pp. 241-248.
- Millington, R.J. and Quirk, J.P. (1961). “Permeability of porous solids.” *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 57, pp. 1200-1207.
- Moridis, G. and Pruess, K. (1995). *A package of preconditioned conjugate gradient solvers for the TOUGH2 family codes*, Lawrence Berkeley Lab. Report LBL-36235, LBL, Berkeley, CA.
- Udell, K.S. and Stewart, L.D. (1992). “Combined steam injection and vacuum extraction for aquifer cleanup.” *Subsurface contamination by immiscible fluids*. Edited by Weyer, Balkema, Rotterdam. pp. 327-335.

(논문번호:98-049/접수:1998.07.31/심사완료:1998.10.12)