

지하수 오염 정화를 위한 PTS 공정의 모사

김주형 · 이종협
서울대학교 화학공학과

1. 서론

NAPLs(nonaqueous-phase-liquids)의 지하 유출은 토양지반뿐 아니라 지하수 까지 오염시킬 우려가 있다. 이러한 유기오염원의 현장처리(*in-situ* treatment)를 위하여 SVE(soil vapor extraction), air-sparging, biodegradation 등의 방법들이 많이 연구되어 왔으나, 대량의 유기 오염물이 유출되어 장시간 방치되었을 경우 불포화지대의 잔류오염물뿐 아니라 지하수의 경계면 혹은 그 이하까지 확산된 오염물을 제거하기 위해서는 유기오염물을 지하수와 함께 펌프로 퍼내는 것이 가장 쉽고 효과적인 방법이다. NAPLs는 일단 지하에 침투하고 나면, 형태적으로 복잡한 양상을 띠며 수직 또는 수평 방향으로 이동해 가는데, 이는 오염물의 물성과 지반의 수력학적 특성, 그리고 특히 토양의 불균일한 성질에 의해 많이 좌우된다.

본 연구에서는, DNAPL(denser-than-water NAPL)과 LNAPL(lighter-than-water NAPL) 모두에 대하여 일련의 시나리오가 세워졌는데, 다공성 매체인 토양은 서로 다른 투수율을 가지는 4개의 지층을 가지고 있으며 제일 아래의 지층을 통과하여 지하수가 느린 속도로 흐르고 있으며, 유출된 오염물이 지하수에 닿아 퍼져서 추출정(pumping well) 가까이 도달할 때, 진공을 걸어서 NAPLs를 제거하는 것이다. PTS(Pumping-and-Treatment System)는 다음과 같은 목적 또는 효과가 있다.

- 1) 안정화된 NAPLs의 막이나 덩어리를 지하수에 파동을 일으켜서 다시 이동성을 갖도록 한다.
- 2) 지하수면을 끌어 내려서 NAPLs를 불포화지대에 드러나게 한다.
- 3) 평평한 지하수면을 원뿔모양으로 휘어지게 만든다.

이동성 있는 LNAPLs는 지하수위의 경사를 따라 중력에 의하여 더 쉽게 추출정을 향하여 이동한다. 이 LNAPLs는 추출정 가까이 모여서 휘어진 지하수면 위에 두꺼운 층을 형성하게 되는데, 이러한 현상은 보다 높은 농도로 NAPLs를 회수할 수 있게 도와준다[6].

- 4) 불투수층 또는 지반의 바닥 위에 고인 DNAPLs의 웅덩이나 DNAPLs가 지하수면에서 퍼지는 초기상태에 형성된 막과 혹은 제거할 수 있다.

LNAPLs와 DNAPLs에 대하여 위에서 언급한 시나리오에 따라 HP735/125 워크스테이션을 이용하여 각각 독립된 이차원 모사가 수행되었다. 수행한 비정상상태 유한차분계산에 의하여 원뿔모양의 지하수면 형성과 NAPLs의 제거 효율이 급속히 증가하는 임계시점을 성공적으로 관찰할 수 있었다. 결과로서 이 경우에 있어서의 PTS 공정의 가능성을 타진하여 보았다.

2. 이론 및 계산

실제 토양내의 오염물 거동을 모사하기 위해서는 4-phase(공기-물-오염물-토양) modeling이 필요한데, 이를 수행하기 위해서 VOF(volume of fluid) multiphase model을 이용하여 3개의 이동상에 대하여 모사 하였으며 토양에 대해서는 다공성 매체로서 1개의 고정상으로 가정하였다. VOF model에서 3개의 이동상은 서로 섞이지 않고 같은 운동량 보존식에 의하여 거동이 정해진다. 계산 수행을 위한 기본적인 식들은 질량 보존식, 운동량 보존식이며 이는 아래와 같다. 계산의 편의

를 위하여 에너지의 이동은 무시하였고 지하수의 매우 느린 속도를 감안하여 운동량 보존식에서 층류를 가정하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i = \dot{m}'' \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j u_i = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

나머지 1개의 상인 토양에 대해서는 각 층에 대하여 균일한 기공도와 투수계수를 가지는 다공성 매체로 가정하여 이를 위의 (2)식의 운동량 감쇄항인 F_i 에 반영하였다.

$$F_i = \frac{\frac{\mu}{\alpha} u + \beta \left(\frac{1}{2} \rho |u| u \right)}{\phi} \quad (5)$$

여기서, α 는 투수계수이고, ϕ 는 기공도, 그리고 β 는 관성 저항을 나타낸다.

이 modeling에서 임의의 토양을 가정하여 grid를 짠 것이 Figure.1에 주어져 있다.

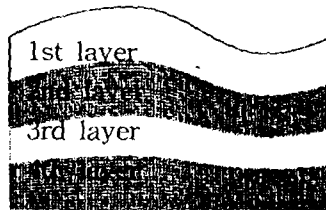


Figure.1 Grid for 2-D Pumping and Treatment System.

이 모사에서는 52×32개의 cell을 설정하여, 경계면과 dead zone을 제외한 1440개의 각 cell에 대하여 식 (2)과 같은 층류에 대한 운동량 보존방정식을 가지고 시간에 따른 각 상(air phase, water phase, and NAPL phase)의 부피비와 속도 등을 SIMPLE 알고리즘을 통해 계산하였다.

Fig. 1과 같은 모양의 100m×60m의 크기로 2차원의 실제 지형을 가정하였고, 중앙의 약간 우측으로 초기 지하수면의 아래 3m까지 well을 설정하였다. 우선 well에 진공을 걸지 않은 상태로 예비계산을 행하여 지하수면으로부터 35m 위에서 단면적 25m²만큼 존재한다고 가정하여 이를 초기 값으로 시간에 따른 모사를 수행하였는데, DNAPL의 경우 21.9일, LNAPL의 경우 20.2일 정도 경과 후에 지하수면 위에서의 안정된 분포를 얻을 수 있었다. 이때부터 다시 well에 진공을 걸어서 본계산을 수행하였다.

지반으로서의 Porous media에 대한 물성들은 Table.1, 유기오염물의 물성, 지하수의 유속, 중력, well의 지름과 압력 등은 Table.2와 같다.

Table.1 properties of porous media.

	지층의 성질			
	1st layer	2nd layer	3rd layer	4th layer
porosity(ϕ)	0.5	0.5	0.5	0.5
permeability (α)	darcy	darcy	darcy	darcy
inertial resistance(β)	ignored	ignored	ignored	ignored
initial water saturation	unsaturated	unsaturated	unsaturated	saturated

Table.2 Chemical properties and dynamic conditions.

변수	값
density LNAPL	1.30 g/cm ³
DNAPL	0.67 g/cm ³
viscosity LNAPL	5.664E-4 kg/m.s
DNAPL	
groundwater velocity	0.003 m/day
중력	9.8 m/s ²
well의 지름	1 m
Pumping pressure	5×10 ⁴ Pa (-0.5atm relative)

3. 결과 및 고찰

계산은 DNAPL의 이동현상과 LNAPL의 이동현상에 대하여 각각 독립적으로 행해졌다.

예비계산의 경우, 우선 정사각형 모양의 초기 오염물의 형태는 곧 수직방향으로 일그러지기 시작했다. 수면에 닿을 때까지의 시간은 DNAPL이 18시간, LNAPL이 1.6일 정도로 불포화지대에서의 중력확산은 DNAPL이 2배 가까이 빨리 일어났다. 물에 닿는 후에는 LNAPL은 시간이 경과할수록 비교적 고르게 수면 위로 퍼져 나갔고, DNAPL도 역시 물보다 밀도가 높음에도 불구하고 수면에 닿은 후 경계면으로 어느 정도 퍼지면서 이동하였는데, 이는 물과 DNAPL의 비교적 작은 밀도차와 상 경계에서의 충격에 의하여 일어나는 현상으로 보여진다. 단, LNAPL은 연속된 막을 이루며 지하수 흐름을 따라 이동하는 반면 DNAPL은 군데군데에서 막이 끊어지는 현상을 보였으며, 수면 아래로 몇 개의 핵처럼 보이는 핵을 형성하며 이를 중심으로 분포하려는 경향을 보였다.

본계산은 DNAPL의 경우 21.9일, LNAPL의 경우 20.2일 정도 경과 후에 어느 정도 지하수면 위에 안정된 분포를 보이면서 well의 가까이 도달한 시점으로부터 well에 주어진 진공을 걸어 비정상상태로 수행하였다.

DNAPL에 대한 계산에서, 너무 높은 음압(-0.5 atm relative)을 걸어서인지 계산 초기에 fluctuation이 다소 발생하였다. Well에 진공을 건 후 한참동안은 DNAPL과 LNAPL의 경우 모두 그리 두드러진 제거효과가 나타나지 않았다. Pumping을 시작한지 약 5일의 시간이 경과하면서 well 근처의 압력분포가 안정되었고, 지하수면도 well의 양쪽으로 휘어서 움푹 들어간 형태를 갖추게 되었는데, 지하수면의 형태적 변화는 너무 높은 음압을 걸었고 well의 지름도 1m로 매우 큰 탓에 다소 과장된 모양을 나타낸 것으로 보이나, 일단 지하수면의 모양이 원뿔 모양으로 휘어진 후 급속히 제거효율이 높아졌다. 특히 DNAPL의 경우 LNAPL보다 중력의 영향을 더 크게 받아서 well주위의 움푹 들어간 지하수면을 따라 더 빠른 속도로 제거가 이루어졌다. Pumping 이전에는 평평한 막으로 분포하던 것이 굽어진 지하수면을 따라 well을 향하여 이동하며 제거되었다. 또한 Pumping을 시작할 때의 DNAPL의 최대 부피비는 0.171이었으나, 이로부터 2일 경과 후 0.173, 5일 경과 후 0.147, 6일 경과 후 0.118, 7일 경과 후 0.07, 그리고 8.4일 경과(초기상태로부터 28.4일 경과) 후 DNAPL의 최대 부피비가 0.0107인 계산 결과로 미루어 볼 때, 일단 압력분포가 안정이 되고 지하수면의 휘어진 모양이 갖추러 지면 제거속도가 급속히 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다.

LNAPL에 대해서도 비슷한 양상을 보였는데, DNAPL은 불연속적으로 층이 끊겨서 pumping well로 추집되는 반면 LNAPL은 연속된 층이 유연하게 연결되며 추집됨을 알 수 있다. 또한 DNAPL은 지하수면이 일단 굽어지면 급속히 제거되는 반면, LNAPL은 지하수면이 굽어진 후에도 제법 시간이 경과한 후에 완전히 제거가 이루어진다. 이는 굽어진 수면의 중심으로 이동해 가는 것이 중력에 의한 효과가 크기 때문인 것으로 보이며, pumping을 시작한 후 완전히 제거가 이루어지기까지는 DNAPL이 약 7일, LNAPL이 약 13일 정도가 경과되었다. Well 입구에서의 최소압력과 NAPLs의 회수정도를 반영하는 최대 부피비의 관계에서, 압력이 안정되었을 때 지하수면의 모양도 원뿔형태의 곡면을 잘 갖추었으며, 이 시점이 NAPLs가 급속히 제거되는 임계시점임을 보여주는데, 특히 DNAPL에 대해서 더 두드러졌다.

PTS를 통하여 saturated zone의 LNAPL뿐 아니라 DNAPL까지 제거할 수 있는 가능성을 이 모사를 행한 결과 얻을 수 있었고, DNAPL의 경우 아직 포화지대에 널리 확산되지 않은 상태라면 그 핵 근처에 Pumping well을 장치하면 오히려 LNAPL보다 더 나은 효율을 보일 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

PTS는 지하수면의 조금 아래에 추출정(pumping well)을 장치하여 진공을 걸어 물과 함께 부유 오염물을 제거하기 위한 공정인데, 이를 통하여 LNAPL뿐 아니라 DNAPL까지 제거할 수 있는 가능성을 알아보기 위하여 SIMPLE 알고리즘을 이용한 FDM method를 사용하여 비정상상태 모사를 수행하였다. PTS의 과정에서 지하수의 유속이 그리 빠르지 않고 깊은 지층의 투수율이 그리 높지 않다면 pumping well을 중심으로 지하수면이 휘어서 원뿔 모양으로 움푹 들어가는 현상을 이용하여 중력에 의하여 부유오염물이 well을 향하여 이동하여 보다 넓은 범위를 쉽게 정화할 수 있는데, 계산 결과를 통하여도 이를 확인할 수 있었다. LNAPL과 DNAPL 모두 그 제거효율이 well에 걸린 음압의 안정성과 지하수면의 형태적 변화에 민감한 경향을 보였으며, 급속히 제거가 이루어지는 임계시점을 확인할 수 있었다. 특히 DNAPL의 경우, 예비계산에서 확인한 바와 같이 지하수면에 닿은 후 그대로 아래로 떨어지는 것이 아니라, 상경계면에서의 매질의 차이 때문에 우선 어느 정도의 시간까지 횡적으로 확산되어 가다가 수면 아래로 핵을 형성하며 불포화지대에 침투하므로, 핵 근처에 well을 장치하여 보다 효과적인 제거가 가능하리라 예상했었는데, 계산한 결과 LNAPL에 비하여 오히려 더 빠르게 제거됨을 보였다.

그러나 모사결과에서처럼 바닥까지 드러날 정도로 지하수면을 변화시키기란 실제의 PST 공정에서는 힘들 것으로 보인다. 이 공정은 지하수의 유속이 매우 빠를 경우에는 휘어진 수면의 모양을 얻기가 힘들 것이며, 다른 공정보다 비교적 큰 동력을 필요로 하는 공정이라는 단점이 있다. 하지만 이 공정은 쉽고 장치가 간단하며 다른 공정에서 다루기 힘든 포화지대에서의 비휘발성 유기물의 처리가 가능 할 뿐 아니라, 안정된 형태로 고정되어 있는 지하수면 위의 오염물을 지하수면을 낮추어 불포화지대에 노출시켜 유동이 가능하게 함으로써 SVE 등의 공정과 연계하는 등 응용성이 많은 공정으로 생각되는 만큼, 본 연구를 통하여 지하수면의 변화에 의해 제거효율이 배가될 수 있음을 가시적으로 확인하여 PTS 공정의 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] Illangasekare, T.H., Member, ASCE, Armbruster III E.J. and Yates D.N., 1995. Non-Aqueous-Phase Fluids in Heterogeneous Aquifers - Experimental Study, J. of Environ. Eng., Aug.
- [2] Hayden, N.H. and Voice, T.C., 1993. Microscopic observation of a NAPL in a three-fluid-phase soil system, J. of Contaminant Hydrology, 12.
- [3] Mayer, A.S. and Miller, C.T., 1992. The influence of porous medium characteristics and measurement scale on pore-scale distributions of residual nonaqueous-phase liquids, J. of Contaminant Hydrology, 11.
- [4] Lanhard, R.J., Johnson T.G. and Parker J.C., 1993. Experimental observations of nonaqueous-phase liquid subsurface movement, J. of Contaminant Hydrology, 12.
- [5] Catalan, L.J.J. and Dullien, F.A.L., 1995. Application of gravity drainage to the recovery of residual LNAPL in homogeneous and lensed sand packs, J. of Contaminant Hydrology, 18.
- [6] Akindunni, F.F., Gillham R.W., Conant, B., Jr. and Franz, T., 1995. Modeling of Contaminant Movement Near Pumping Wells: Saturated-Unsaturated Flow with Particle Tracking, Groundwater, Vol. 33, No. 2.
- [7] Gefell, M.J., Thomas, G.M. and Rossello, S.J., 1994. Maximum Water-Table Drawdown at a Fully Penetrating Pumping Well, Groundwater, Vol. 32, No. 3.