

비균일 비포화 영역에서 물의 이동에 관한 수치 시뮬레이션 (Numerical Simulation of Water Migration through a Nonuniform Unsaturated Zone)

이근상*

1. 서론

비포화 영역 내에 함유된 물은 지표면에서 증발이 일어날 때 포화율 변동에 따른 모세관 압력의 변화로 인해 지표면 방향으로 이동한다. 이러한 물의 이동은 물 포화율 분포를 변화시켜 비포화 영역에서의 물의 이동 속도와 지표면에서의 증발량 및 증발 속도에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 비포화 영역의 물리적, 화학적 특성이 물의 이동에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 필요성이 증가하고 있다. 기존의 연구(Dougherty *et al.*, 1993; 이상득과 정일현, 1997; 이상득 등, 1998)들은 실험을 통하여 한두가지 인자들을 제한된 범위에서 변화시키면서 얻은 결과를 바탕으로 결론을 유도하였다. 실제 비포화 영역에서의 물의 이동은 토양 입자의 입도 분포에 따라 결정되는 공극률이나 투수율 등의 물리적인 요소 뿐만 아니라 입자 표면의 화학적 성질 등에 의하여 영향을 받는다. 특히 유효투수율, 모세관 압력 등은 물 포화율의 함수로 나타나므로 비포화 영역 내 물의 이동과정을 수치 예측 모델을 통해 보다 정확히 규명할 필요성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 비포화영역 내 토양입자의 입도 분포, 입자표면과 물과의 상호특성, 토양의 초기 함수율 등의 인자들이 물의 이동속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 새로운 모델을 제안하였다.

2. 수식화

토양 내 물의 속도와 포화율을 예측하기 위한 미분 방정식을 유도하고 이의 수치 해를 구하기 위한 이론적 연구를 수행하였다. 수식화 과정에서 비포화 영역 내 유체 거동은 액체와 기체의 이상유체로 표현할 수 있고 모세관 압력은 물 포화율의 함수로 나타난다고 가정하였다.

연속 방정식과 운동량 방정식을 결합하면 포화율에 관한 단일 비선형 미분방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = 0.17813 \left(\frac{S_b}{p_c} \right)_A^{2.005} \frac{1}{\mu \varepsilon} \frac{\partial p_c}{\partial S} \left[\left(\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{1}{(1 - S_r)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}}} \left(\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right)^{\frac{2(\lambda+1)}{\lambda}} \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

유도과정에서 상대투수율과 모세관 압력은 물 포화율의 함수로 일반화된 Brooks-Corey 모델(Helmig, 1997), 절대투수율은 모세관압력-포화율 그래프로부터 결정된 Swanson (1981)의 상관식을 이용하였다.

윗 식을 푸는데 필요한 경계 및 초기조건은 다음과 같다. 기존 논문에 제시된 실험상태를 고려하여 컬럼의 하부에서의 유체 유입속도를 0으로 설정하였다.

$$\varepsilon v = 0 \text{ at } x = 0 \quad (2)$$

비포화층의 표면으로부터 대기로의 증발량은 포화율에 따른 선형적 증발 효율을 가정하여

주요어: 비포화 유동, 증발, 비균일층, 대수층, 유한요소법

*경기대학교 건설공학부 환경공학전공

다음과 같이 컬럼 상부의 경계조건을 표현할 수 있다.

$$\epsilon S v = M_o S \text{ at } x = l \quad (3)$$

이 된다. 초기 조건은 증발이 시작될 때 물의 포화율로 나타난다.

$$S = S_o \text{ at } t = 0 \quad (4)$$

3. 계산 및 결과 고찰

유한요소해석

비포화 영역 내에서의 물의 이동에 관한 여러가지 인자들의 영향을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치모델을 개발하였다. 모든 계산에 있어 비포화영역의 깊이(l)는 0.2 m, 지표면에서의 증발량은 1.0×10^{-7} m/sec 로 고정하였다. 토양 입자의 기하학적 특성 즉 크기와 입도 분포는 진입압력 p_d 와 Brooks-Corey 인자 λ 로 특성화하였다.

계산결과 및 분석

본 수치 모델을 이용하여 균일토양의 경우 공극 크기와 초기 포화율이 비포화 영역에서 물의 이동에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 불균일 토양의 경우 공극 크기, 공극 분포의 불균일도, 초기 포화율의 변화에 따른 물 이동의 변동을 계산하였다.

동일한 크기의 공극으로 구성된 균일 다공성 매체에 대하여 공극 크기를 변화시키면서 증발에 따른 물 포화율 분포를 계산하여 Figure 1에 나타내었다. 공극 크기에 관계없이 전체적인 평균 포화율은 거의 비슷하였다. 진입압력이 작을수록 즉 공극 크기가 클수록 전체적으로 균일한 포화율 분포를 보였으나 그 차이는 무시할 수 있는 정도이다.

매체의 비균일성이 물의 이동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 수치 계산을 수행하고 Figure 2에 한 예를 제시하였다. λ 값이 3.0에서 0.5까지 감소할 때는 큰 변화를 보이지 않으나 0.2로 작아짐에 따라 지표면 부근의 포화율이 급격하게 감소한다. 다수의 계산 결과를 분석하면 이러한 변화 양상은 초기 포화율이 클 때는 심하게 나타나지 않으나 초기 포화율이 작을수록, 진입압력이 커질수록 더욱 분명하게 나타남을 보여 준다.

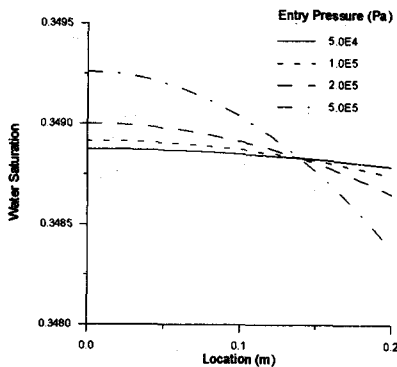


Figure 1. Saturation profiles for the cases of uniform grains ($\lambda = 3$) with different sizes after 100 hours ($S_i = 0.5$).

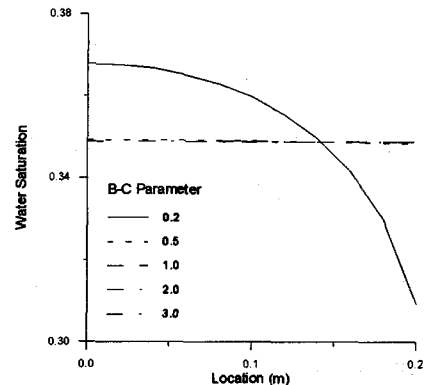


Figure 2. Saturation profiles for the cases of nonuniform grains with different sizes after 100 hours ($S_i = 0.5$, $p_d = 5 \times 10^4$ Pa).

균일 매체에 대하여 초기 포화율이 일정 시간 동안의 증발이 일어난 전후에 포화율

차이, 즉 증발량에 미치는 영향을 조사한 결과를 Figure 3에 나타내었다. 진입 압력에 관계 없이 초기 포화율이 클수록 더 많은 양이 증발되었으나 위치에 따른 변화는 없었다.

동일한 계산을 비균일 매체에 대하여 수행하고 가장 심한 변화를 보인 결과를 Figure 4에 제시하였다. 여러 경우에 대하여 계산을 수행한 결과 공극의 크기가 작고 초기 포화율이 0.9인 경우 지표면 부근에서 매우 급격한 포화율 변화를 나타내었다.

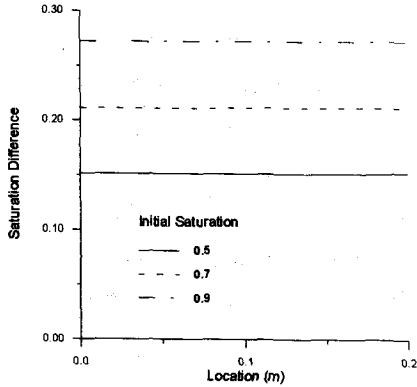


Figure 3. Saturation profiles for the cases of uniform grains with different sizes as a function of initial saturation after 100 hours ($p_d = 5 \times 10^5$ Pa).

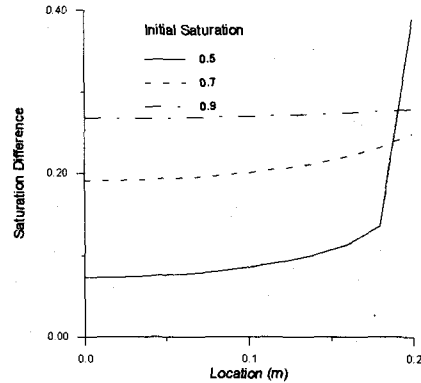


Figure 4. Saturation profiles for the cases of nonuniform grains with different sizes as a function of initial saturation after 100 hours ($\lambda = 0.2$, $p_d = 5 \times 10^5$ Pa).

4. 결론

비포화영역에서 물의 이동을 수식화한 수치 모델을 개발하고 이를 이용하여 토양입자의 물리적, 화학적 특성 및 지층 불균일도가 미치는 영향을 분석하였다. 균일 지층의 경우, 공극 크기나 진입 압력의 영향은 미미했으나 초기 포화율이 클수록 증발량이 커지는 양상을 보였다. 비균일 매체에서는 공극 크기와 초기 포화율이 작을수록 지층 불균일도에 의한 포화율 변화 효과가 커진다. 초기 포화율이 클수록 최대 공극의 크기가 작을수록 지표면 부근의 유체가 지층하부의 유체보다 훨씬 빠른 속도로 이동함을 알 수 있었다. 본 모델은 다양한 토양 환경으로 구성된 비포화 영역에서 물의 이동에 관한 유용한 정보를 제공할 수 있음을 보여주었다.

5. 참고문헌

1. 이상득, 정일현, 1997, 흙의 입경조성과 함수율이 토양의 증발 Parameter에 미치는 영향, 대한환경공학회지, 19, p. 1-8.
2. 이상득, 박성천, 이강일, 1998, 토양-대기 간의 잠열 수송 모델에 관한 연구, 대한환경공학회지, 20, p. 1511-1522.
3. Dougherty, E.J., A.L. McPeters, M.R. Overcast, and R.G. Carbonell, 1993, Theoretical Analysis of a Method for in Situ Decontamination of Soil Containing 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin, *Environ. Sci. Tech.*, 27, p. 505-515.
4. Helmig, R., 1997, *Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface: A Contribution to the Modeling of Hydrosystems*, Springer-Verlag, Berlin, Germany
5. Swanson, B.F., 1981, A Simple Correlation between Permeabilities and Mercury Capillary Pressures, *J. of Pet. Tech.*, p. 2498-2504.