

비포화대에서의 수분 분포에 대한 연구

The resolution of the soil moisture in Unsaturated zone

성윤경¹⁾, 김상현²⁾
Sung Yun-kyung, Kim Sang-hyun

1. 서론

강우가 형성되면 포화대, 즉 지하수면에 이르기까지는 침투를 통해 비포화대를 통과하게 된다. 그러므로 비포화대의 수문학적 특성이 그 지역의 강우 유출을 설명하는데 중요한 요소가 된다. 이 때 침투를 시간과 깊이에 따른 수리학적 전도도, K (hydraulic conductivity)와 토양 수분 θ (water content)와 부압(suction pressure)을 이용하여 설명하는 Richard's equation과 Fokker-Plank nonlinear diffusion form을 이용해 나타낼 수 있다. 깊이에 따른 토양 수분 θ 의 변화를 지하방향으로 이동하는 파(wave)라고 하면 이 파는 확산과 중력의 두 항으로 나타낼 수 있다. 압력파의 전파를 통해 강우의 전달이 이루어진다고 할 수 있다. 이를 확산항이 중력항에 비해 작다는 가정 하에서 비포화대를 통한 물의 흐름 방정식을 압력 전파식으로 나타내는 방법과 확산항을 충분히 고려하여 변환을 통한 분석적인 해를 이용하여 나타내는 두 가지 방법으로 설명할 수 있다. 본 연구에서는 파를 통해 비포화대의 수문학적 특성을 알아보고 이를 통해 강우 유출을 설명한다.

2. 본론

토양 수분의 지체가 짧고 압력 수두가 0에 가까운 특성선을 가지는 수리학적 특성을 가진 토양은 압력파의 발달로 수분의 수직적인 이동이 일어나게 된다. 이러한 특성을 가진 토양이 0에 가까운 압력을 띠 때 강우가 발생하면 수리학적 전도도의 급격한 증가로 인해 압력 수두의 급격한 변화를 가져온다. 이러한 변화는 압력파가 지하 방향으로 전파될 때 이전의 물을 방출하게 한다 (Torres,1998).

압력파 방정식은 확산과 중력에 의한 힘으로 나타나는데 이 중 중력의 영향으로 인해 발생하는 파의 메커니즘은 깊이에 따라 감소되는 경향을 보인다(smith,1983).

비 포화대의 수직적 흐름은 토양층 내의 공기의 흐름을 무시하고 질량 보존 방정식의 미분형을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

확산항을 고려한 Richard equation은

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[(D(\theta)) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] = 0 \tag{2}$$

1) 부산대학교 환경공학과 석사과정

2) 부산대학교 환경공학과 조교수

이때 q 를 토양 수분 θ 만의 함수라 가정하고 위 식을 이용하면 다음과 같은 파 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

(3)

일반적으로 θ 에 따른 특성속도는 v_c 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_c(\theta) = \frac{dz}{dt} = \frac{dq}{d\theta} \quad (4)$$

파 방정식의 특성해는 그때의 v_c 에 따른 각각의 θ 의 양이다. 이때의 v_c 는 K(hydraulic conductivity)와 θ 의 관계에서 알 수 있다. 파는 θ 가 깊이에 따라 증가하는지 감소하는지에 따라 advancing wave와 trailing wave로 구분된다. 이때 θ 가 도달하는 깊이는 특성선 방법에서 구한 이동 속도와 시간의 곱으로 나타낸다.

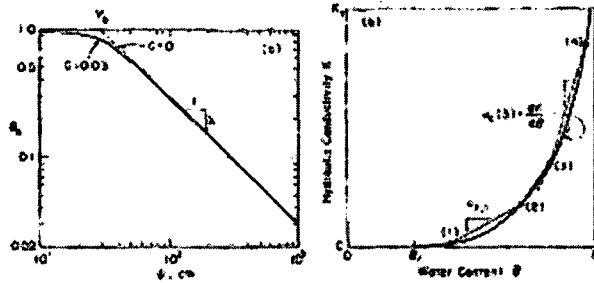


그림1. 토양의 모세관 현상의 특성선과 토양 수분과 수리학적 전도도와의 관계

이를 이용, θ 에 따른 깊이를 알 수 있어 비포화대 내의 수분의 분포를 나타낼 수 있고 비포화대 내에서의 수직적인 수분의 이동현상을 알 수 있다. 여기서 이를 컴퓨터 프로그램으로 만들어 강우와 시간에 따른 토양 수분의 분포를 나타낼 수 있게 하였다.

다른 한 방법은 확산의 영향을 무시하지 않고 변환을 이용한 해를 구해 깊이에 따른 토양 수분의 분포를 구하는 방법이다. 먼저 Richard equation을 적분 가능한 형태로 만들어 Burgers equation으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{a}{(b-\theta)^2} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] = \frac{a}{b-\theta} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{2a}{(b-\theta)^3} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{a}{(b-\theta)^2} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - U \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

이때, $z = x + Ut$, b, c 는 상수이다.

비선형 방정식의 해를 구하기 위해 비선형 계수 C 를 도입한다.

$$C = \frac{b - \theta_i}{\theta_0 - \theta_i} \quad (7)$$

$$C_n = \frac{b - \theta_n}{\theta_0 - \theta_n} \quad (8)$$

C 는 토양 수분 θ_i 와 θ_0 의 범위에 걸쳐 확산의 상대적인 변화를 나타낸다. C_n (Broadridge and White, 1998)의 함으로 수리학적 특성을 나타낼 수 있다. 토양 수분의 함을 다음과 같이 나타내면,

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_n}{\theta_0 - \theta_n} \quad (9)$$

$z^* = z/\lambda_s$, $t_{s^*} = t/t_s$, $D_* = D/\bar{D} = C_n(C_n - \Theta)^2$ 을 이용하여 Richard equation을 아래와 같이 표현할 수 있다. 이때 \bar{D} 는 D 의 평균값이다.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t_{s^*}} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left(D_* \frac{\partial \Theta}{\partial z^*} \right) - \frac{\partial K_*}{\partial z^*} \quad (10)$$

$$K_* = \frac{K - K_n}{K_s - K_n} = \frac{(C_n - 1)\Theta^2}{C_n - \Theta} \quad (11)$$

방정식의 해를 구하기 위해 flux boundary condition을 이용하여 식을 간략화 시킨 후 Hopf-Cole 변환과 Kirchhoff, Laplace변환(Carlsaw,1959)을 통해 해를 구할 수 있다.

$$\Theta = C_n[1 - (2\rho + 1 - u^{-1})^{-1}] \quad (12)$$

$$z_* = [\rho(\rho + 1)\tau + (2\rho + 1)\xi - \ln u]/C_n \quad (13)$$

이때 $\rho = r_*/4C_n(C_n - 1)$, $\tau = 4C_n(C_n - 1)t_{s^*}$, $\xi = [C_n - 1 + 1.5C_n - \Theta_i]r_*t_{s^*}/(1 - \Theta_i)$ 이다. 깊이에 따른 토양 수분의 값을 알 수 있으므로 이를 이용하여 침투 유량을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$q = \int_{z_i}^{z_0} \frac{\partial \theta}{\partial t} \partial z \quad (14)$$

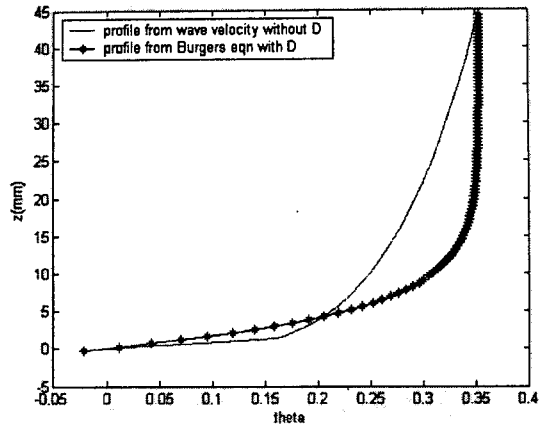


그림1. 깊이에 따른 토양 수분 값의 변화

그림1의 실선은 파의 속도방정식을 이용하여 나타낸 것으로 확산의 영향을 고려해 주지 않은 경우의 토양 수분의 분포를 나타낸 것이고 *로 표기한 선은 Burgers방정식을 이용하여 구한 해로 확산의 영향을 고려하여 토양 수분의 분포를 나타낸 것이다. 그림1에서 확산의 영향으로 토양 수분의 전파 속도가 커졌음을 알 수 있다.

3. 결론

강우시의 전도도가 포화시의 전도도 값보다 작을 때 발생하고 침투의 영향으로 발생하며 지하수면이나 일시적으로 발생된 수면으로의 더해지는 재충전은 비포화대에서 발생한 유량이라는 조건을 만족할 때 비포화대 내의 수직적 수분의 전달을 설명할 수 있다. 강우 현상에 따라 토양 수분의 값이 변화하고 그 변화가 파의 형태로 비포화대 내로 전파된다. 이때 토양 수분의 값은 깊이에 따라 증가, 감소하는 메커니즘을 띄고 있다. 이를 확산항을 고려하는 방법과 하지 않는 두 가지 방법으로 토양 깊이와 시간에 따른 수분의 분포, 이동양상과 확산의 영향을 알아보았다. 이로서 실제 강우 시 유출에 기여하는 토양 수분 값을 알아 지역의 강우 유출 현상을 설명할 수 있다.

감사의 글 : 본 연구는 BRAIN PUSAN 21과 21세기 프론티어 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

4. 참고문헌

Broadridge,P.,I.White, 1998, Constant rate rainfall infiltration: A versatile nonliar model.I.Analtic solution, Water Reasources Res., 24:145-154

Carslaw,H.S.,J.C.Jaeger. 1959, Conduction of heat in solids, 2nd edition. Oxford Univ.Press,London

Roger E.Smith, Keith R.J.Smettem, Philip Broadbridge, D.A. Woolhiser, 2002. Infiltration Theory for Hydrologic Applications, American Geophysiccal Union, pp. 12-197

Smith, R.E. 1983. Approximate soil water movement by kinematic characteristics. Soil Sci.Soc. Am.J. 47:3-8

Torres.R., W.E.Dietrich, D.R.Montgomery, S.P.Anderson, and K.Loague, 1998. Unsaturated zone processes and the hydrologic response of a steep, unchanneled catchment. Water Resources Res. 3:1865-1879