

## 비균질 다공성 매질의 효율적 해석 방법

### Effective Method for Analysis of Heterogeneous Porous Media

박 창 근\*

Park, Chang Kun

#### Abstract

The existing methods to analyze the heterogeneous porous media based on the similar media concept are the microscopic Miller similitude(MiS), the macroscopic Miller similitude(MaS) and the Warrick similitude(WS). The inter-relationship is found such that  $MiS \subset MaS \subset WS (\subset: \text{subset})$ . The proposed method is based on the assumption that the scale variables  $\alpha = w$  and the moisture content is dimensionless by introducing the effective degree of saturation instead of the degree of saturation into WS. The method, without the loss of generality in view of the inspectional analysis, can explain the heterogeneity of the media by using the scale variable  $\alpha$  only. The media of  $\alpha = 1$  (average of  $\alpha$ ) means the equivalent media corresponding to the heterogeneous media, while the standard deviation of  $\alpha$  may explain the degree of the heterogeneity of the media under consideration. The hydraulic conductivity of the media with  $\alpha > 1$  is greater than that of the equivalent media, and the effective moisture content of the media with  $\alpha > 1$  is also greater. Based on these properties of the scale variable  $\alpha$ , the ideal vertical one-dimensional heterogeneous porous media is generated by using the technique of random number generation.

*Keywords* : heterogeneous porous media, similar media concept, scale variable, equivalent media, random number generation

#### 요 약

유사매질개념에 의하여 비균질 다공성 매질을 설명할 수 있는 기존의 방법은 미시 밀러 상사(MiS), 거시 밀러 상사(MaS)와 웨릭 상사(WS)로 나눌 수 있고, 그들간의 관계는  $MiS \subset MaS \subset WS (\subset: \text{subset})$ 임을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안한 방법은 WS에서 축척변수  $\alpha = w$ 로 가정하고 함수량을 포화도 대신 유효포화도로 축척한 것이다. 이 방법은 검사해석의 관점에서 일반성이 결여되지 않고, 축척변수  $\alpha$ 만으로 비균질 매질을 설명할 수 있다. 즉  $\alpha = 1$  ( $\alpha$ 의 평균값)인 매질은 비균질 매질에 상응하는 등가매질을 의미하고,  $\alpha$ 의 표준편차는 다공성 매질의 비균질 정도를 설명한다.  $\alpha > 1$ 인 매질의 투수계수는 등가매질의 투수계수보다 크며 또한 유효함수량은  $\alpha > 1$ 인 매질에서 크게 나타난다. 이와같은  $\alpha$ 의 성질을 이용하여 가상적인 연직 1차원 비균질 다공성 매질을 난수 발생기법으로 생성하였다.

**핵심용어** : 유사매질, 비균질 다공성 매질, 축척변수, 등가매질, 난수발생기법

\* 관동대학교 토목공학과 조교수

## 1. 서 론

강우-유출 모형을 개발하는데 있어서 가장 큰 어려움 중에 하나는 강우손실 산정시 유역의 공간적 非均質性을 어떻게 고려할 것인가이며, 대부분의 모형은 유역의 비균질성을 고려하기가 어렵기 때문에 유역내에서 균질하다고 가정된 한 지점에서 구한 침투율 곡선을 사용한다(Mishra 등, 1980). 또한 자연상태의 흙은 공간적으로 균질하게 분포되어 있지 않으며 특히 연직방향으로는 성층(stratification)으로 분포되어 있기 때문에 다공성 매질에서 비포화 흐름 또는 포화흐름을 보다 정확히 해석하려면 흙의 공간적 비균질성을 고려하여야 한다.

비균질 매질을 해석하는 방법으로는 결정론적 방법과 추계학적 방법이 있다. 결정론적 방법에는 관심있는 모든 공간에서 실측된 자료를 이용하여 비균질 매질을 해석하는 방법과 하나의 體系(system) 특성을 다른 체계에 해당하는 특성과 연결지우는 縮尺變數(scale variable)를 이용하여 체계의 非均質性을 고려하는 相似媒質概念(similar media concept)에 기초한 방법으로, Miller와 Miller(1955)가 처음으로 도입하였다. 추계학적 방법으로는 흙의 수리특성의 통계치를 이용하여 난수를 발생시켜 비균질 매질을 구성하는 난수발생 기법과 거시적 관점에서 흙 특성의 평균에 대한 변동을 스펙트럼으로 분석하는 스펙트럼 섭동방법(spectrum perturbation method) 등이 있다. 윤성용과 선우중호(1994)는 물보유함수인 Brook-Corey식에 섭동을 도입하여 유효 비포화 투수계수와 유효 이방성 비(effective anisotropy ratio)를 유도한 바 있고, 또한 상기 네가지 방법의 장단점을 논한 바 있다. 실제로 매질의 비균질성을 고려하여 비포화 흐름을 해석하고자 할 때, 비포화 흐름의 해석 조건에 따라 두 개의 방법을 결합하여 사용하기도 한다(Hopmans, 1987).

본 연구의 목적은 상사매질개념을 이용하여 비균질 매질을 해석할 수 있는 기존의 방법들을 비교 검토하고, 그것을 바탕으로 비포화 흐름 지배방정식의 변수들간의 관계를 단순화시킬 수 있는 효율적인 방법을 제시하는데 있다. 또한 제안된 방법으로 구성된 변수들간의 관계를 설명하는 축척변수를 난수발생 기법으로 가상적인 비균질 매질을 생성하고자 한다.

## 2. 지배방정식의 무차원화

측정된 자료를 이용하여 비균질성을 처리하기 위하

여 일반적으로 相似媒質概念을 도입하여 비균질 매질에서 발생하는 비포화 흐름(또는 포화 흐름)을 해석한다. 이 개념은 물리적 기반을 가진 1개 또는 2개의 매개변수를 이용하여 空間的 非均質性을 쉽게 고려할 수 있는 장점을 가지고 있으므로, 相似媒質概念을 이용하여 媒質의 비균질성을 해석하는 방법을 살펴보고자 한다.

상사매질개념의 전개에 이용되는 縮尺變數는 일반적으로 차원해석기법과 함수표준화(functional normalization)기법으로 구할 수 있다. 상사개념에 기초한 차원해석기법에는 차원해석과 검사해석(inspectional analysis)이 있는데, 차원해석은 물리적 체계(system)를 묘사하는 次元量의 개수를  $\pi$ 항이라 불리는 무차원 양의 개수로 줄어든게 하는 단순화 과정이고 검사해석은 잘 정의된(well-posed) 초기-경계치 문제를 가능한 많은 물리적 상수와 변수를 소거시킬 수 있는 무차원 형태로 변환하여 축척변수를 구하는 방법이다. 회귀분석(regression analysis)에 기초한 함수표준화기법은 축척변수를 임의로 정의하여 실험으로 그 타당성을 입증하는 방법이다.

타원형 미분방정식인 Richards식은 비포화 흐름의 지배방정식으로, 다음과 같이 독립변수가 모세관압력 또는 함수량이 두가지 형태로 표시된다.

$$C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\Psi)}{\partial z}, C(\Psi) = \frac{d\theta(\Psi)}{d\Psi} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}, D(\theta) = K(\theta) \frac{d\Psi(\theta)}{d\theta} \quad (1b)$$

여기서  $C$ 는 단위 모세관 압력수두 변화에 의한 함수량의 변화를 나타내는 함수보유능력(water capacity),  $\Psi$ 는 모세관 압력수두,  $\theta$ 는 함수량,  $K$ 는 투수계수,  $D$ 는 확산계수(diffusivity),  $t$ 는 시간,  $z$ 는 연직 방향이 양수인 거리를 나타낸다.

식 (1)과 그에 적절한 초기 및 경계조건을 이용하여 비포화 흐름을 해석하는 것은 잘 정의된 초기-경계치 문제를 해석하는 것이므로, 본 연구에서는 검사해석을 이용하여 Richards식을 무차원 형태로 표시하고자 한다. 따라서 검사해석으로 Richards식을 무차원 형태로

표시하기 위해 무차원 변수,  $X, T, \theta$ 와  $K$ 에 대해 다음과 같은 축척변환을 정의한다.

$$X = \gamma z, \quad T = \beta t, \quad \Theta = \mu \theta + \delta, \quad K = xK \quad (2)$$

여기서  $\gamma[L^{-1}]$ ,  $\beta[T^{-1}]$ ,  $\mu$ ,  $\delta$ 와  $x[T/L]$ 는 축척변수이다. 따라서 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면, 식 (1)의 무차원 형태는 각각 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial T} &= \frac{\partial}{\partial X} \left[ K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right] \\ -N \frac{\partial K(\Psi)}{\partial X}, \quad C(\Psi) &= \frac{dC(\Psi)}{d\Psi} \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial T} &= \frac{\partial}{\partial X} \left[ D(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial X} \right] \\ -N \frac{\partial K(\Theta)}{\partial X}, \quad D(\Theta) &= \frac{dD(\Theta)}{d\Theta} \end{aligned} \quad (3b)$$

여기서 無次元 水理特性(dimensionless hydraulic properties)은 다음과 같이 표시된다.

$$\Psi = \frac{\gamma^2 \mu}{x\beta} \psi, \quad C = \frac{x\beta}{\gamma^2} C, \quad D = \frac{\gamma^2}{\beta} D, \quad N = \frac{\gamma\mu}{x\beta} \quad (4)$$

### 3. 상사매질개념의 종류

#### 3.1 微視 밀러 相似 (Microscopic Miller Similitude, MiS)

다음의 두가지 가정을 만족하는 비균질한 두 媒質을 미시 밀러 상사(MiS)라 하고, 그러한 媒質들을 밀러 相似(similar)하다고 한다(Miller와 Miller, 1955).

가정 ① : 다공성 매질의 내부형상이 단지 공극에 대한 미시특성 길이만 다르고 다공성 매질은 같은 공극율을 가지며 상대적으로 같은 공극크기 분포를 가진다.

가정 ② : 공극내에서 물의 거동은 점성흐름이고 공기와 물의 접촉면에서의 현상은 표면 장력법칙에 지배된다.

가정 ①에 의하여 미시 특성 길이  $\lambda$ 를 도입하고 임의의 거시(macrosopic) 특성길이  $L$ 을 도입한다.

가정 ②에 의해 모세관 속도  $V_{cap} \equiv \sigma/\eta (=72 \text{ m/s}$  25°C 물에서,  $\sigma[M/T^2]$ 는 표면장력,  $\eta[M/LT]$ 는 점성계수)를 도입하여 특성속도  $V_M \equiv V_{cap} \cdot \lambda/L$ 을 정의한다. 따라서 식 (2)의 縮尺變數는 다음과 같고 식 (4)의 무차원 수리특성은 Table 1에 수록되어 있다.

$$\gamma = L^{-1}, \quad \beta = \frac{\sigma\lambda}{\eta L^2}, \quad \mu = 1(\delta=0), \quad k = \frac{\eta}{\rho g \lambda^2} \quad (5)$$

여기서  $\rho[M/L^3]$ 는 밀도이고,  $g[L/T^2]$ 는 중력가속도이다. 이러한 밀러 상사를 가진 흙의 존재는 Miller와 Miller(1955), Klute와 Wilkinson(1958), Wilkinson과 Klute(1958)의 실험으로 알려졌다.

#### 3.2 巨視 밀러 相似(Macroscopic Miller Similitude, MaS)

MiS는 식 (2)의 축척변수중  $\beta, x$ 를 정의하기 위하여 공극에 대한 미시특성 길이를 사용하고 또한  $\mu=1$ 이므로 함수량에 대해서는 아무런 축척변환을 수행하지 않은 것이다. 따라서 미시특성 길이를 거시특성 길이로 대치하고 함수량을 축척할 때 보다 유연성을 주기 위하여 MaS가 도입되었다.

Reichardt 등(1972, 1975)은 흙  $i$ 에서 MiS의 미시특성길이  $\lambda_i$ 를 거시특성 길이로 이해하기 위해 초기 함수량이  $\theta_0$ 이고 지표면 함수량이  $\theta_1$ 이라는 조건을 가지는 수평흐름 지배방정식에 Boltzmann 변환을 이용하여 구해지는 무차원 해,  $X = \mathcal{O}(\Theta) \cdot T_{1/2}$ 가 실험오차 범위내에서 모든 흙에 대해 같다는 사실을 실험으로 증명하였다. 여기서  $\mathcal{O}(\Theta)$ 는 Boltzmann 변환 계수이고,  $\Theta = (\theta - \theta_0)/(\theta_1 - \theta_0)$ 이다. 따라서 함수 표준화기법을 이용하여 습윤전선까지의 거리  $X$ 와  $T_{1/2}$ 의 그래프에서 기울기를  $m$ 이라 하면 흙  $i$ 에서 미시특성길이  $\lambda_i$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_i = \left( \frac{m_i}{m_s} \right)^2 \lambda_s \quad (6)$$

참자  $s$ 는 대표 흙(reference soil)을 의미하므로  $\lambda_s$ 는 대표되는 흙의 미시특성길이로서  $\lambda_s=1$ 로 둘 수 있다. 따라서 해당하는 MaS의 무차원 수리특성은

Table 1에 있는 MiS의 무차원 수리특성에서  $\lambda$  대신에  $(m_i/m_s)^2$ 를 대입하면 구할 수 있고, 그 결과가 역시 Table 1에 수록되어 있다.

Youngs와 Price(1981)는 검사해석을 수행하여 다음과 같은 축척변수를 정의하였다.

$$\gamma = \frac{\rho g L}{\sigma}, \quad \beta = \frac{(\rho g)^2 L^3}{\eta \sigma \Delta \theta_s}, \quad (7)$$

$$\mu = \Delta \theta_s (\delta = -\theta_o \cdot (\Delta \theta_s)^{-1}), \quad \alpha = \frac{\eta}{\rho g L^2}$$

해당하는 무차원 수리특성은 Table 1에 수록되어 있다. 거시특성길이  $L$ 을 흡 수리특성을 이용하여  $(\eta \cdot k_s)^{1/2}$ ,  $-\sigma/P_{0.5}$ ,  $\eta S_s/\sigma$ 와 같이 세가지로 정의하였다. 여기서  $k_s (= K_s \mu / \rho g)$ 는 포화 고유(intrinsic)투수계수,  $P_{0.5}$ 는  $0.5\theta_s$ 에서 모세관 압력,  $S_s$ 는 확산계수  $D(\theta)$ 를  $\theta$ 에 대해  $\theta_r$ 에서  $\theta_s$ 까지 적분한 값이다. 이상 세가지 방법으로 정의된  $L$ 을 이용하여 비포화 흐름을 해석한 결과와 실측자료와 비교를 통해서 상기방법은 非相似(dissimilar) 매질에 대한 적용 가능하고 세가지  $L$  중 어느 것을 사용하여도 무방하다.

한편 Sposito와 Jury(1985)는 초기함수량이  $\theta_0$ 이고 지표면 함수량이  $\theta_1$ 인 조건을 가지는 식 (1b)에 대해 검사해석을 수행하여, 식 (2)의 축척변수중  $\lambda$ 와  $\mu$ 를 다음과 같이 표시하였다.

$$\lambda = L^{-1}, \quad \mu = (\theta_1 - \theta_0)^{-1} \quad (8a)$$

$$= \Delta \theta_1^{-1} (\delta = -\theta_0 \cdot (\Delta \theta_1)^{-1})$$

Miller와 Miller(1955)의 가정 ②에 의해 모세관 특성길이  $l \equiv (\sigma/\rho g)^{1/2} (=2.7 \times 10^{-3} \text{ m for water at } 25^\circ\text{C})$ 를 정의하고,  $\varepsilon \equiv L/l$ 와  $M_i \equiv \lambda/l$ 로 정의한다.  $\varepsilon$ ,  $M_i$ 와 MiS의 특성속도  $V_M$ 을 이용하여 식 (2)의 나머지 축척변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\beta = \frac{V_M}{\Delta \theta_1 L}, \quad \alpha = \frac{1}{V_M \varepsilon M_i} \quad (8b)$$

식 (8)의 축척변수를 식 (4)에 대입하면 Table 1의 무차원 수리특성을 구할 수 있다.

MiS는 가정 ①에 의해 외견상 초기함수량( $\theta_0$ )과 지표면함수량( $\theta_1$ )이 모든 상사 흡에 대해 같아야 한다는 조건을 요구하고, 또한 물리적으로는 다공성 매질내에서 흡의 내부형상에 대한 가정을 만족해야하지만, MaS는 모든 상사 흡에 대해 초기함수량과 지표면 함수량이 같지 않아도 되고, 또한 미시특성 길이를 거시 특성길이로 대치할 수 있도록 공식화되었다. 따라서 MiS는 MaS와 분명히 구분되고 다음 식과 같이 MiS는 MaS의 특수한 경우에 해당한다.

$$\text{MiS} \subset \text{MaS}; \quad \subset: \text{subset} \quad (9)$$

### 3.3 닐슨 상사 (Nielsen Similitude, NS)

식 (1b)에 대하여 초기함수량이  $\theta_0$ 이고 지표면에서 강우강도  $R=0$ 일 때 검사해석을 수행하면 식 (2)의 축척변수중  $\gamma$ 와  $\mu$ 는 다음과 같다.

$$\gamma = L^{-1}, \quad \mu = \theta_0^{-1} (\delta = 0)$$

또한 축척변수  $\beta$ 는 시간차원을 포함하는 양(quantity)에 의해 정의될 수 있으므로, Simmons 등(1979)은 Gardner와 Mayhugh(1958)의 투수계수와 확산계수를  $K(\theta) = K_o \cdot \exp\{a(\theta - \theta_0)\}$ ,  $D(\theta) = D_o \cdot \exp\{b(\theta - \theta_0)\}$  형태로 표시하여 식 (2)의 나머지 축척변수를 다음과 같이 정의하였다.

$$\beta = D_o/L^2, \quad \alpha = K_o^{-1}$$

상기 축척변수들을 식 (4)에 대입하면 NS의 무차원 수리특성을 구할 수 있다. 일단  $K_o$ ,  $\Psi_o (= D_o \theta_o / K_o)$ 와  $A (= a - b)$ 가 하나의 흡에 대해 실험으로 결정되면, 그 흡이 다른 흡에 대해 닐슨 상사한지의 여부는 초기함수량  $\theta_0$ 에 의해 결정된다. Nielsen 등(1973), Simmons 등(1979)의 현장실험을 통해 닐슨 상사한 흡의 존재를 검증하였다. NS가 반무한( $L \rightarrow \infty$ ) 흡 기둥의 물 거동에 적용되면,  $L = D_o/K_o$ 로 대치하여 해당하는 축척변수와 무차원 수리특성을 구할 수 있다.

### 3.4 웨릭 相似(Warrick Similitude, WS)

Warrick 등(1977)은 함수표준화기법을 사용하여 세

가지 독립적인 현장실험으로부터 얻은 2,252개의 모세관 압력  $\Psi$ 의 현장자료와 2,640개의 투수계수  $K$ 의 현장자료를 이용하여 축척변수  $\alpha_i$  [ $L^{-1}$ ]와  $w_i$  [ $L^{1/2}/T^{1/2}$ ]가  $\Psi_i \alpha_i = \Psi_m \alpha_m$ ,  $K_i/w_i^2 = K_m w_m^2$ 와 같은 관계를 만족함을 입증하였다. 여기서 첨자  $i$ 는 흙  $i$ 를 의미하고,  $\Psi_m$ 과  $K_m$ 은 각각 실측자료의 평균 모세관 압력수두와 투수계수를 의미한다. 따라서 축척변수의 평균은  $\alpha_m = w_m = 1$ 이 되므로

$$\Psi_i = \Psi_m / \alpha_i, \quad K_i = K_m \cdot w_i^2 \quad (10)$$

인 관계가 성립된다. 또한 일반적으로 흙들의 공극율은 같지 않으므로  $\Psi$ 와  $K$ 는 포화도( $\Theta/\Theta_s$ )의 함수로 나타난다. 따라서 식 (2)의 축척변수  $\gamma$ 는  $\alpha$ 로,  $x$ 는  $w^{-2}$ 으로,  $\mu = \Theta_s^{-1}(\delta = 0)$ 로 표시되므로 상기 관계를 식 (3)에 대입하여 정리하여 보면  $\beta = \alpha w^2 / \Theta_s$ 임을 알 수 있고, 해당하는 축척변수는 다음 식과 같다.

$$\gamma = \alpha, \quad \beta = \alpha w^2 / \Theta_s, \quad \mu = \Theta_s^{-1}(\delta = 0), \quad x = w^{-2} \quad (11)$$

WS의 무차원 수리특성은 Table 1에 수록되어 있다.

WS는 초기조건과 경계조건에 독립되어 공식화되었으므로 Table 1의  $\Psi$ 와  $K$ 를 나타내는 식을 외관적 관점에서 보면 MaS는 WS의 특수한 경우에 해당되고 또한 식 (9)의 관계를 이용하면 WS, MaS, MiS에 대하여 다음의 종속관계를 얻을 수 있다.

$$MiS \subset MaS \subset WS; \quad C: \text{subset} \quad (12)$$

#### 4. 상사매질 개념에 기초한 새로운 모형

Table 1에서 알 수 있듯이 WS와 MiS의  $\Psi$ 와  $K$  형태가 외관상 비슷하다는 점에 착안하여 Simmons 등(1979)은 현장 실측자료를 이용하여  $\alpha$ 와  $w$ 사이의 선형관계,  $w = (1.1 \pm 0.1)\alpha$  ( $\alpha$ 와  $w$ 사이의 상관계수  $r^2 = 0.80$ )를 수립하였고, Russo와 Bresler(1980a)는 1200개의 실측자료를 사용하여  $w = 1.065 \alpha$  ( $r^2 = 0.86$ )임을 보였다. Warrick 등(1977)은 Panoche Soil의 840개 자료분석에서  $r^2 = 0.91$ 임을 보였고, Sharma 등(1980)은 26개 지점의 현장실험을 통해  $r^2 = 0.81$ 임을 보였으며, Hopmans(1987)은  $r^2$

=0.761임을 보였다.

본 연구에서는 WS에서 각종 현장실측 자료의 통계치를 기반으로  $\alpha = w$ 로 가정하고 WS와는 다르게  $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 인 관계를 이용하여 식 (2)의 축척변수를 다음과 같이 정의하고자 한다.

$$\gamma = \alpha, \quad \beta = \alpha^3 / \theta_u, \quad \mu = \theta_u^{-1}(\delta = -\theta_r \cdot \theta_u^{-1}) \quad (13)$$

따라서 식 (4)의 무차원 수리특성은 다음과 같고 Table 1에 정리되어 있다.

$$\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (14a)$$

$$\Psi = \alpha \Psi \quad (14b)$$

$$C = C / (\alpha \theta_u) \quad (14c)$$

$$K = K / (\alpha^2) \quad (14d)$$

$$D = (\theta_u / \alpha) D \quad (14e)$$

$$N = 1 \quad (14f)$$

여기서 함수량에 대해 유효포화도로 축척한 이유는 비포화 흐름해석시 이력현상을 고려하고자 할 때 이력현상 모형의 전개에서 함수량 대신 유효함수량 ( $= \theta - \theta_r$ )을 사용하였으므로 수치해석의 일관성을 유지하는데 있어서 편리함을 제공하기 때문이고, 그러한 변환은 검사해석의 관점에서 일반성이 결여되지 않는다. 또한 제안된 방법은 기존의 방법들보다 단순하므로 비포화 흐름 해석시 효율적으로 적용될 수 있다.

#### 5. 가상적인 비균질 다공성 매질의 구성

본 연구에서 비균질 다공성 매질을 처리하기 위해 제안한 방법은 웨릭 相似에서 두 體系(system)사이의 수리특성을 연결지우는 두 개의 축척변수  $\alpha$ 와  $w$ 가 같다고 가정하고 또한 함수량을 포화도 대신 유효포화도로 무차원시킨 것이다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법을 이용하면 매질의 비균질성은 한 개의 매개변수  $\alpha$ 에 의해 설명되어질 수 있다. 한편 Nielsen 등(1973), Warrick 등(1977), Smith와 Hebbert(1979), Luxmoore와 Sharma(1980)는 현장 흙에 대한 실험에 의해  $\alpha$ 가 대수정규분포를 하고 있음을 밝혔다.

연직 1차원 다공성 매질에서 단위 길이마다 비균질한 가상적 매질을 만들기 위하여 縮尺變數  $\alpha$ 를 난수(random number)로 발생시키고자 한다.  $\alpha$ 는 평균이

Table 1. Classification of Similar Media Concept

Class	Author(s)	Moisture Content	Capillary Pres. Head	Moisture Capacity	Hydraulic Conductivity	Diffusivity	N
MiS	Miller & Miller(1955)	none	$\Psi = \frac{\rho g \lambda}{\sigma} \Psi$	$C = \frac{\sigma}{\rho g \lambda} C$	$K = \frac{\eta K}{\rho g \lambda^2}$	$D = \frac{\eta}{\sigma \lambda} D$	$N = \frac{\rho g \lambda}{\sigma}$
		$\Theta = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}$	$\Psi = \frac{\rho g}{\sigma} \left( \frac{m_i}{m_s} \right)^2 \Psi$	$C = \frac{\sigma}{\Delta \theta_1 \rho g} \left( \frac{m_s}{m_i} \right)^2 C$	$K = \frac{\eta}{\rho g} \left( \frac{m_s}{m_i} \right)^4 K$	$D = \frac{\Delta \theta_1 \eta}{\sigma} \left( \frac{m_s}{m_i} \right)^2 D$	$N = \frac{\rho g \lambda}{\sigma} \left( \frac{m_i}{m_s} \right)^2$
MaS	Reichardt et al(72, 75)	$\Theta = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0}$	$\Psi = \frac{\rho g \lambda}{\sigma} \Psi$	$C = \frac{\sigma}{\Delta \theta_s \rho g L} C$	$K = \frac{\eta K}{\rho g \lambda^2} K$	$D = \frac{\Delta \theta_1 \eta}{\sigma L} D$	$N = 1$
		$\Theta = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}$	$\Psi = \frac{\epsilon M_i}{L} \Psi$	$C = \frac{L}{\Delta \theta_1 \epsilon M_i} C$	$K = \frac{L}{v_M \epsilon M_i} K$	$D = \frac{\Delta \theta_1}{v_M L} D$	$N = \epsilon M_i$
WS	Warrick et al(1977a)	$\Theta = \frac{\theta}{\theta_s}$	$\Psi = a \Psi$	$C = \frac{1}{a \theta_s} C$	$K = \frac{1}{w^2} K$	$D = \frac{a \theta_s}{w^2} D$	$N = 1$
		$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	$\Psi = a \Psi$	$C = \frac{1}{a \theta_u} C$	$K = \frac{1}{a^2} K$	$D = \frac{\theta_u}{a} D$	$N = 1$

MiS : Microscopic Miller Similitude  $\Delta \theta_1 = \theta_1 - \theta_0$   $\theta_1$  : surface moisture content  
 MaS : Microscopic Miller Similitude  $\Delta \theta_s = \theta_s - \theta_0$   $\theta_0$  : initial moisture content  
 WS : Warrick Similitude  $\theta_u = \theta_s - \theta_r$   $\theta_s$  : saturated moisture content  
 $\theta_r$  : residual moisture content

1이고 표준편차가 0.25를 가지고 대수정규분포한다고 가정하여, 다음과 같이 난수를 발생시킨다. 구간  $[0, 1]$ 에서 균일분포(uniform distribution)를 따르는 난수를 발생시킨 후, 각 난수값에 해당하는 표준정규분포를 따르는 확률변수의 값을 구하여 그 값을  $k$ 라 하면, 구하고자 하는 난수  $\alpha$ 는 다음의 식으로부터 계산된다.

$$\ln \alpha = M + k \cdot ST \quad (15)$$

여기서  $M$ 은  $\ln \alpha$ 의 평균이고  $ST$ 는  $\ln \alpha$ 의 표준편차이고,  $\alpha$ 의 평균  $m$ 과  $\alpha$ 의 표준편차  $st$ 와는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$ST = \ln(1 + (st/m)^2) \quad (16-1)$$

$$M = ST - 0.5(ST)^2 \quad (16-2)$$

상기 방법을 이용하여 1,000개의 난수  $\alpha$ 를 발생시켰을 때, 평균이 1.002이고 표준편차가 0.248이므로 비교적 만족스러운 난수라 판단된다. 1,000개의 난수중 51개를 Fig.1에 도시되어 있는 바와 같이 선택하였다.

식 (14d)에 의하면  $\alpha > 1$ (Fig. 1의 A점)인 매질의 투수계수는 평균투수계수( $K_m$ )보다 큰 매질이고  $\alpha < 1$ 인 매질(Fig. 1의 B점)의 투수계수는  $K_m$ 보다 작은 매질이라는 물리적 의미를 가지고 있다. 투수능력이 좋은 매질(예를 들면 sand에 해당)은 투수능력이 나쁜 매질(loam에 해당)보다 유효함수량이 크다는 것을 의미한다. Table 2를 참조하면  $\alpha < 1$ 인 매질(loam)에서의 유효함수량은 대표 매질( $\alpha = 1$ 인 매질)에서 보다 유효함수량이 축소되어 나타난다. 모세관 압력의 경우  $\alpha > 1$ 인 매질에서의 임계압력( $\Psi_{ae}$ )과 최소 모세관압력( $\Psi_{min}$ )이 대표매질에서 보다 작게 나타나는 물리적 의미를 가지고 있다. 이와 같이 투수계수, 유효함수량

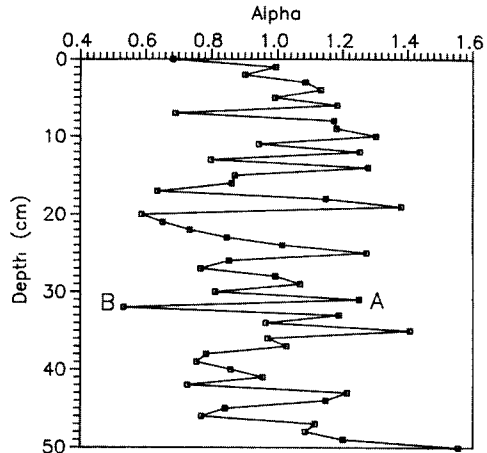


Fig. 1. Generated Random Number of Scale Variable  $\alpha$

및 모세관 압력의 특성을 설명하는  $\alpha$ 의 물리적 의미를 Table 2를 참조하면 보다 명확히 알 수 있다.

제안된 방법은 비균질 다공성 매질을 하나의 축척변수  $\alpha$ 로 설명할 수 있는 것이다. 축척변수  $\alpha = 1$ 인 매질은 고려하고자 하는 비균질 다공성 매질에 상응하는 등가매질로 이해할 수 있다. 비균질성의 정도는  $\alpha$ 의 표준편차로 설명할 수 있다. 즉 표준편차가 크면 그만큼 다공성 매질의 비균질의 정도가 심하다는 것을 의미하고 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서 비균질 다공성 매질을 처리하는 기존의 방법들을 비교 검토하여 비포화 흐름 해석시 효율적으로 적용할 수 있는 방법을 제안하고, 난수발생 기법을 이용하여 가상적인 연직 1차원 비균질 다공성 매질을 생성하였다.

상사매질 개념에 의해 전개된 비균질 매질을 설명할

Table 2. Hydraulic Properties of Soils

Soil Type	$\theta_u$	$\Psi_{ae}$	$\Psi_{min}$	$K_s$ (cm/sec)	Authors
Sand	0.180	12.5	36.0	0.0169	Poulovassilis(1970)
Caribou Silt Loam	0.125	20.0	425.0	0.00017	Topp(1971)

$\theta_u$ : effective moisture content

$\Psi_{ae}$ ,  $\Psi_{min}$ : air entry value and minimum capillary pressure head measured by negative  $H_2O$  cm, respectively

$K_s$ : saturated hydraulic conductivity (cm/sec)

수 있는 기존의 방법은 미시 밀러 상사(MiS), 거시 밀러 상사(MaS), 웨릭 상사(WS)로 크게 세가지로 분류할 수 있고, 상기 방법들의 포함관계는  $MiS \subset MaS \subset WS$  ( $\subset$ :subset)임을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안된 방법은 WS에서 현장 실측자료의 통계치를 근거리하여 축척변수  $\alpha$ 와  $w$ 가 같다고 가정하고 함수량을 포화도 대신 유효포화도로 무차원시킨 것이다. 따라서 비균질 다공성 매질을 하나의 축척변수  $\alpha$ 로 설명할 수 있고, 난수발생기법으로  $\alpha$ 를 생성하여 가상적인 연직 1차원 비균질 다공성 매질을 구성하였다.  $\alpha = 1$  ( $\alpha$ 의 평균)인 매질은 비균질 매질에 상응하는 등가매질로 이해될 수 있고, 매질의 비균질 정도는  $\alpha$ 의 표준편차에 의해 설명되어 진다. 본 연구에서 제안된 방법에 사용된 축척변수  $\alpha$ 의 물리적 의미는 다음과 같다.  $\alpha > 1$ 인 다공성 매질의 투수계수는 등가매질의 투수계수보다 크며, 또한  $\alpha < 1$ 인 매질의 유효함수량은 등가매질의 유효함수량보다 크다. 그러나  $\alpha > 1$ 인 매질의 임계모세관압력은 등가매질의 임계압력보다 작다.

### 참 고 문 헌

- 윤성용, 선우중호 (1995). "추계학적 방법에 의한 거시 비포화 흐름의 지배방정식 유도" 대한토목학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 443-450.
- Gardner, W.R. and Mayhugh, M.S. (1958). "Solutions and tests of the diffusion equation for the movement of water in soil." *Proc. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 22, pp. 197-201.
- Hopmans, J. W. (1987). "A comparison of various method to scale soil hydraulic properties." *J. of Hydrology*, Vol. 93, pp. 241-256.
- Klute, A and Wilkinson, G.E. (1958). "Some tests of the similar media concept of capillary flow: I. Reduced capillary conductivity and moisture characteristic data." *Proc. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 22, pp. 278-281.
- Luxmoore, R. J. and Sharma, M. L. (1980). "Runoff response to soil heterogeneity: Experimental and simulation comparison for two contrasting watershed." *W.R.R.*, Vol. 16, No. 44, pp. 675-684.
- Miller, E.E. and Miller, R.D. (1955). "Theory of capillary flow: 1. Practical implications, 2. Experimental information." *Proc. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 19, pp. 267-275.
- Mishra, M.L., Gardner, G.A. and Hunt, C.G. (1980). "Spatial variability of infiltration in a watershed." *J. of Hydrology*, Vol. 45, pp.101-122.
- Nielsen, D.R., Bigger, J.W. and Erh, K.T. (1973). "Spatial variability of field measured soil water properties." *Hilgardia*, Vol. 42, pp. 215-259.
- Poulovassilis, A. (1970). "The effect of the entrapped air on the hysteresis curves of a porous body and on its hydraulic conductivity." *Soil Science*, Vol. 109, No. 3, pp. 154-162.
- Reichardt, K., Libardi, D.L. and Nielsen, D.R. (1975). "Unsaturated hydraulic conductivity determination by a scaling technique." *Soil Science*, Vol. 120, No. 3, pp. 165-168.
- Richardt, K., Nielsen, D.R. and Biggar, J.W. (1972). "Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soils." *Proc. of Soil. Soc. Am.*, Vol. 36, pp. 241-245.
- Russo, D. and Bresler, E. (1980). "Scaling soil hydraulic properties of a heterogeneous field." *J. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 44, pp. 681-684.
- Sharma, M.L. Gardner, G.A. and Hunt, C.G. (1980). "Spatial variability of infiltration in a watershed." *J. of Hydrology*, Vol. 45, pp. 101-122.
- Simmons, C.S., Nielsen, D.R. and Bigger, J.W. (1979). "Scaling of field-measured soil-water properties: I. Methodolgy, II. Hydraulic conductivity and flux." *Hilgardia*, Vol. 47, pp. 77-174.
- Smith, R.E. and Hebbert, R.H.B. (1979). "A Monte Carlo analysis of the hydrologic effects of spatial variability of infiltration." *W.R.R.*, Vol. 15, No. 2, pp. 419-429.
- Sposito, G. and Jury, W.A., (1985). "Inspectional



- analysis in the theory of water flow through unsaturated soil." *J. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 49, No. 4, pp. 791-798.
- Topp, G.C. (1971). "Soil water hysteresis in silt Loam and clay Loam soils." *W.R.R.*, Vol. 7, No. 4, pp. 914-920.
- Warrick, A.W., Mullen G.J. and Nielsen, D.R. (1977). "Scaling field-measured soil hydraulic properties using a similar media concept." *W.R.R.*, Vol. 13, No. 2, pp. 355-362.
- Wilkinson, G.E. and Klute, A. (1958). "Some tests of the similar media concept of capillary flow: systems data." *Proc. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 22, pp. 434-437.
- Youngs, E.G. and Price, R.I. (1981). "Scaling of infiltration behavior in dissimilar porous media." *W.R.R.*, Vol. 17, No. 4, pp. 1065-107.
- (논문번호:98-002/접수:98.01.10/심사완료:98.06.19)