

불포화 다공성 매질체의 공기-물 경계면 비표면적 계산모델 분석

Analysis of Calculation Model for Specific Air-water Interface Area in Unsaturated Porous Media

김민규* · 김성배** · 박성직*

Kim, Min-Kyu · Kim, Song-Bae · Park, Seong-Jik

Abstract

In unsaturated porous media, the air-water interface (AWI) plays an important role in removing of biocolloids such as bacteria, viruses, and protozoan (oo)cysts. In this study, four models related to calculation of specific AWI area are analyzed to determine the appropriate model, and the selected models are verified using the previously reported experimental data. The results indicate that the modified model from Niemet et al. (2002) is the most appropriate tool for calculating the specific AWI area using the van Genuchten (1980) parameters obtained from the water retention curve. Hence, it is expected that this model could be used to quantitatively determine the attachment of biocolloids to AWI in the transport modeling of biocolloids in unsaturated porous media.

Keywords : Air-water interface, Unsaturated porous media, Biocolloids, Model analysis

I. 서 론

불포화 다공성 매질체(unsaturated porous media)에서 콜로이드(colloids)입자의 이동은 중요한 수질환경적인 의미를 갖는다. 특히, 박테리아(bacteria), 바이러스(viruses), 그리고 원생동물 포자

(protozoan (oo)cysts)와 같은 바이오콜로이드(biocolloids)입자의 불포화 토양에서의 이동은 지하수 수질오염 및 수처리와 관련하여 중요한 의미가 있다. 예를 들면, 토양에 살포된 하수 슬러지(sludge), 축산폐수 및 폐기물, 분산하수처리시스템(onsite wastewater treatment system)의 유출수 등이 비포화대(vadose zone)를 통과하여 대수층(aquifer)에 도달하는데, 비포화대에서의 바이오콜로이드 입자의 이동은 지하수 오염에 큰 영향을 미친다(Huysman and Verstraete, 1993; Powelson and Gerba, 1994; McMurry et al., 1998). 또한,

* 서울대학교 환경바이오콜로이드공학연구소
** 서울대학교 지역시스템공학과
** Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4587
Fax: +82-2-873-2087
E-mail address: songbkim@snu.ac.kr

수자원 확보를 위한 토양-대수층처리(soil-aquifer treatment)시 하수처리수가 불포화대를 통과하는데, 이 때 물 속에 존재하는 바이오콜로이드 입자들이 불포화 토양에서 제거된다(Quanrud et al., 2003).

다공성 매질체에서의 이동 중 바이오콜로이드 입자는 토양표면으로의 부착이나 여과 등에 의해 제거된다. 특히, 불포화 조건에서는 바이오콜로이드 입자가 공기-물 경계면(air-water interface, AWI)에 부착하여 제거된다. Wan et al. (1994)은 박테리아가 모세관력(capillary forces)에 의하여 AWI에 비가역적(irreversible)으로 부착된다고 하였다. Thompson et al. (1998)은 AWI가 바이러스의 사멸(inactivation)에 중요한 역할을 하는 것으로 보고하였다. 그리고 Powelson and Mills (2001)는 *Escherichia coli*의 이동에 있어서 AWI의 중요성을 실험을 통해 증명하였다. 이와 같이, 불포화 다공성 매질체에서 바이오콜로이드 입자의 이동 시 AWI의 중요성이 보고되었는데, 이와 더불어 AWI의 면적을 구하려는 노력들이 지난 10여 년간 여러 연구자들에 의해 진행되었다(Cary, 1994; Peng and Brusseau, 2005).

AWI의 면적을 구하는 것은 바이오콜로이드의 이동과 부착을 이해하는데 있어서 매우 중요하다. AWI의 면적은 토성(soil texture), 함수율(water content), 용적밀도(bulk density)등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Peng and Brusseau, 2005). AWI의 비표면적 추정에 관한 연구는 실험적 방법과 이론적 방법으로 나뉘어 이루어져 왔다. 실험적 방법으로는 크게 기체 상태 혹은 액체 상태의 추적자(tracer)를 이용하는 간접적인 측정 방법(Kim et al., 1997, 1999; Anwar et al., 2000; Costanza-Robinson and Brusseau, 2002)과 공극매체에 대한 Computed Micro Tomography 촬영을 통한 이미지 분석(Culligan et al., 2006), 광선의 투과도와 AWI의 비표면적 관계식 추정(Niemet et al., 2002) 등의 직접적인 측정법이

있다. 또한 이론적 방법으로는 수학적 가정 및 관계식 유도를 통한 시뮬레이션(Reeves and Celia, 1996; Bradford and Leij, 1997; Berkowitz and Hansen, 2001; Oostrom et al., 2001; Dalla et al., 2002)등이 있다.

이러한 여러 연구들 중 일부는 AWI의 비표면적 계산을 위한 수학적 모델 제시하고 있다. 이들 모델은 대부분 체적함수비(volumetric water content) 또는 유효 포화도(effective saturation)의 함수로 AWI의 비표면적을 계산할 수 있도록 되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 불포화 다공성 매질체에서 바이오콜로이드 입자의 이동에 중요한 역할을 하는 AWI의 비표면적을 구하기 위해 개발된 모델들을 비교분석하여 적합한 모델을 제시하고자 한다. 이를 위하여, 문헌조사를 통해 얻어진 네 가지 모델을 선택하여, 이들의 특징들을 시뮬레이션을 통해 분석함으로써 모델의 적용성을 검토하였다. 그리고 문헌에 제시된 실험결과를 이용하여 이를 검증하고 가장 적합한 모델을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

1. Cary(1994)의 모델

AWI의 비표면적을 구하기 위해 개발된 모델 중, Cary(1994)는 공극매체에 포함된 비혼합성인 두 유체의 계면에서 비표면적을 계산하기 위한 관계식을 유도하였다. 공식은 유체의 체적비율, 모세관수의 보유 관계(retention relation), 매체를 이루는 고체입자의 비표면적 등을 반영하고 있다.

$$A_{AWI} = \frac{2\theta_s^b}{r_0} \left[\lambda \theta_m \frac{(\theta_0^b - \theta^b)}{-b} + \frac{(\theta_0^{1-b} - \theta^{1-b})}{1-b} \right] \dots (1)$$

$$r_0 = \frac{2\sigma}{\rho_w g h_0} \dots \dots \dots (2)$$

여기서, A_{AWI} 는 공기-물 경계면의 비표면적(cm^2/cm^3),

θ_s 는 공극매체의 포화 체적함수비(=공극률), θ_m 은 단일층 함수비(monolayer water content), θ 는 체적함수비, b 는 공극률 지수(porosity index), λ 는 경험적 파라미터, v_0 는 에어-엔트리(air-entry)에 대한 유효공극 반지름, ρ_w 는 물의 밀도(g/cm^3), g 는 중력가속도(cm/s^2), σ 는 물의 표면장력(g/s^2), h_0 는 에어-엔트리이다.

2. Niemet et al.(2002)의 모델

Niemet et al.(2002)은 1차 배수(primary drainage) 상태에서의 함수특성곡선(water retention curve) 파라미터를 이용하여 관계식을 유도하였다. 이들은 van Genuchten(1980)의 공식을 이용하여 AWI의 비표면적 관계식을 다음과 같이 나타내었다.

$$A_{AWI} = \frac{3\rho_w g \theta_s m}{2\sigma \alpha} [B(w, z) - I_u(w, z)] \dots\dots\dots (3)$$

$$u = S_e^{1/m}, w = m - \frac{1}{n}, z = 1 + \frac{1}{n}, m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

여기서, a, n 은 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선 파라미터, S_e 는 유효 포화도, $B(w, z)$ 는 w 와 z 의 beta function, $I_u(w, z)$ 는 w 와 z 의 incomplete beta function이다. 한편, van Genuchten(1980)의 공식은 다음과 같다.

$$K(S_e) = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$\theta(S_e) = S_e(\theta_s - \theta_r) + \theta_r \dots\dots\dots (6)$$

$$S_e(h) = [1 + (ah)^n]^m \dots\dots\dots (7)$$

여기서 K 는 수리전도도(hydraulic conductivity, cm/s), K_s 는 포화 수리전도도(cm/s), θ_r 는 잔여 체적함수비(residual volumetric water content), h 호

는 압력수두(pressure head, cm)이다.

3. Faulkner et al.(2003)의 모델

Faulkner et al.(2003)은 Rose and Bruce(1949)가 제시한 모세관 압과 AWI 비표면적의 관계식인 식 (8)에 유효포화도에 따른 모세관 압 관계를 나타내는 van Genuchten(1980)의 식을 대입하여 아래와 같이 AWI의 비표면적 계산식을 제시하였다.

$$A_{AWI} = \frac{\rho_w g \theta h(\theta)}{\sigma} \dots\dots\dots (8)$$

$$A_{AWI} = \frac{\rho_w g \theta}{\sigma \alpha} [S_e^m - 1]^n \dots\dots\dots (9)$$

4. Peng and Brusseau(2005)의 모델

Peng and Brusseau(2005)는 기체 상태의 추적자를 이용하여 8가지 다른 입도분포를 갖는 공극매체에 대해 AWI의 비표면적을 측정하는 실험을 하였다. 또한 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선 공식을 응용하여 공극 입자가 같은 최대 비표면적(s)에 대한 AWI의 비표면적 관계식을 아래와 같이 제시하였다.

$$A_{AWI} = s [1 + (\alpha(S_w - S_m))^n]^m \dots\dots\dots (10)$$

$$s = \frac{6\rho_b}{d\rho_p} \dots\dots\dots (11)$$

여기서, s 는 토양 입자의 최대 비표면적, S_w 는 포화도 = 함수비(θ)/공극률(θ_0), S_m 은 단일 층 포화도(monolayer saturation), d 는 토양 입자의 평균 입경(cm), ρ_p 는 토양 입자의 밀도(g/cm^3), ρ_b 는 토양의 단위용적밀도(g/cm^3)이다.

III. 결과 및 토의

1. 사질토양에 대한 모델의 적용

본 연구에서 계산 모델을 적용하려는 토양은 주로 수리 전도도가 크고 바이오폴로이드의 이동성이 큰 사질토양이다. 따라서 위에 제시한 네 가지 모델과 Table 1에 제시된 파라미터를 이용하여 사질토양에서의 AWI 비표면적을 계산한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Cary(1994)와 Peng and Brusseau(2005)는 토양 공극 매질체 내의 포화도가 최소가 되는 상태를 단일층 포화도(monolayer saturation)로 정의하였으며, 대부분의 식토(clay)나 깨끗한 광물입자와 같이 친수성 표면을 가지는 경우의 토양 수분은 토양 입자의 표면에 얇은 막을 이루게 된다고 가정하였다. 따라서 AWI 비표면적은 유효포화도(S_e)가 영 값에 근접하는 상황에서 토양 입자의 비표면적에 근접하는 값을 갖는다. Cary(1994)의 모델에 따른 값은 유효포화도가 작아질수록 공기-물 경계면의 비표면적이 증가하는 경향을 보여준다. 하지만 같은 가정에 근거한 Peng and Brusseau(2005)의 모델에서는 유효포화도에 따라 공기-물 경계면이 거의 변화하지 않았다. 이러한 차이의 원인은 Peng and Brusseau(2005)가 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선식을 인용했으나, 주요한 파라미터인 n 값은 실제 토양이 갖는 일반적인 값과 거리가 있는 값을 제시하였기 때문이다.

Niemet et al.(2002)이 제시한 모델의 결과도 유효포화도가 작아질수록 공기-물 경계면의 비표면적이 증가하는 경향을 보여주고 있다. Faulkner et al.(2003)의 모델에 의한 결과는 유효포화도에 따라 큰 변화가 없으나, 포화상태에서는 영 값에 도달하며 잔여함수비(θ_r)에 가까운 부분에서는 급속히 증가하고 있다. 이러한 결과는 n 값이 3.17로 다른 토양에 비해 큰 사질토양에서만 나타나는 현상으로 n 값이 1.2~1.8인 다른 종류의 토양에서는

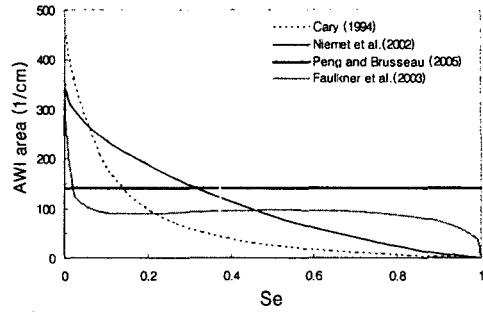


Fig. 1 Comparison of specific AWI area calculated for sandy soil using four models

Table 1 Parameters for calculation of specific AWI area of sandy soil using four models

Parameter	Definition	Value
b	Empirical parameter	2
d	Mean particle diameter	0.025 cm
g	Gravitational constant	981 cm/s ²
h_0	Air-entry	2 cmH ₂ O
n	van Genuchten's water retention function parameter	3.17
S_m	monolayer saturation	0.00062
α	van Genuchten's water retention function parameter	0.035
θ_m	Monolayer volumetric water content	0.0037
θ_r	Residual volumetric water content	0.053
θ_s	Saturated volumetric water content	0.375
λ	Empirical parameter	160
ρ_b	Bulk density of soil	1.55 g/cm ³
ρ_p	Particle density of soil	2.65 g/cm ³
ρ_w	Water density	1 g/cm ³
σ	Surface tension	74.2 g/s ² (=0.0742 N/m)

Niemet et al.(2002), Cary(1994)의 결과와 유사한 경향을 갖게 된다.

2. 모델의 민감도 분석

Cary(1994)의 모델의 경우 에어-엔트리(h_0), 공극율 지수(b), 경험상수(λ), 단일층 함수비(θ_m) 등이 주요한 파라미터인데, 이들에 대한 민감도 분석을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2a는 에어-엔트리(h_0)가 커지는 경우 유효 공극 반지름(v_0)을 감소시켜 AWI의 비표면적이 증가하는 것을 보여주고 있다. 에어-엔트리는 모세관 상승고를 의미하며 접촉 각이 0°인 경우에 식 (2)에 의해 유효 공극 반지름을 구하기 위해 사용된다. 공극율 지수(b)와 경험상수(λ)는 토양의 특성을 표현하는 경험적 파라미터로써 그 값이 증가함에 따라 AWI의 비표면적 역시 증가하는 경향을 보여준다. 또한 단일층 포화도(θ_m) 값이 증가할 경우 AWI의 비표면적은 증가하게 된다.

Niemet et al.(2002)의 모델에서 AWI의 비표면적 값은 a , n 값에 영향을 받는다. a , n 값은 실험을 통해 결정되는 값이지만 토양의 토성(soil texture)에 따라 어느 정도의 경향성을 가진다. USDA는 토성 분류에 따라 평균 a , n 값을 제시하고 있는데, n 값은 사질토양에서 가장 큰 3.17의 값을 가지고 미사토 혹은 식토와 같은 토양에서는 평균적으로 1.2에서 1.8 사이의 값을 갖는다. a 값은 사질토양에서 0.035로 가장 큰 값을 가지며 미사질 양토(silt loam)의 경우 0.005로 가장 작은 값을 가진다. Fig. 3은 이 범위 내에서의 a , n 값에 대한 민감도를 보여주고 있다.

n 값은 토양이 가지는 입도분포에 따른 경향성을 가진다. 즉, 토양의 입자가 큰 사토에서는 보다 큰 n 값을 가지며, 토양 입자가 작아질수록 작은 n 값을 가진다. 또한 토양 입자의 평균 입경이 작을수록

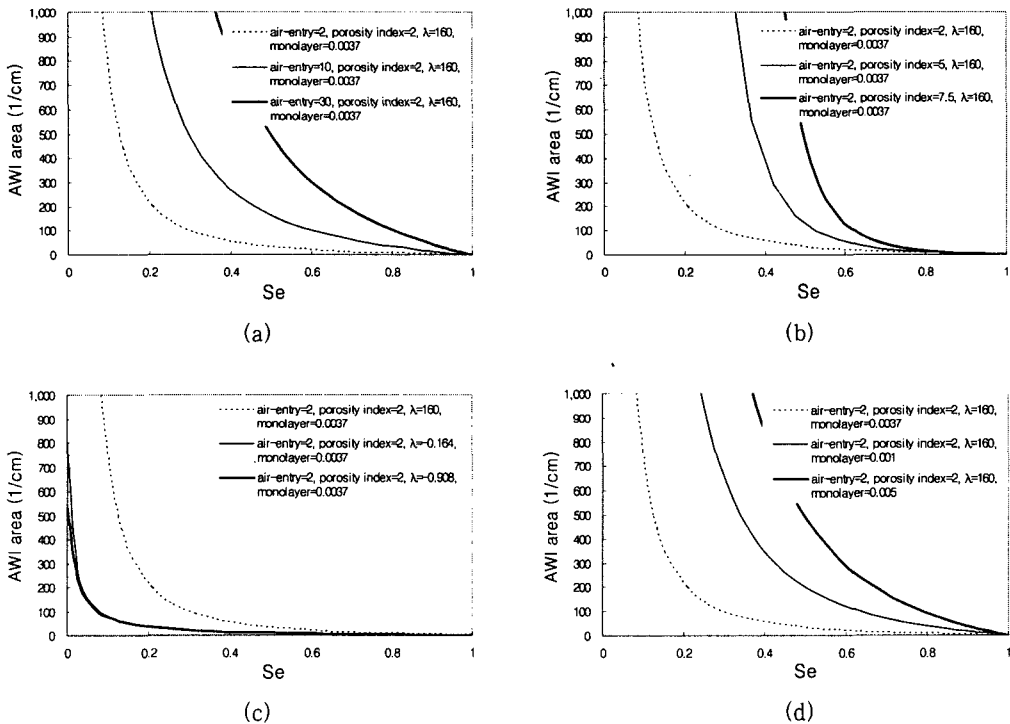


Fig. 2 Sensitivity analysis of Cary(1994)'s model: a) air-entry(h_0), b) porosity index(b) c) empirical constant (λ), d) monolayer water content(θ_m)

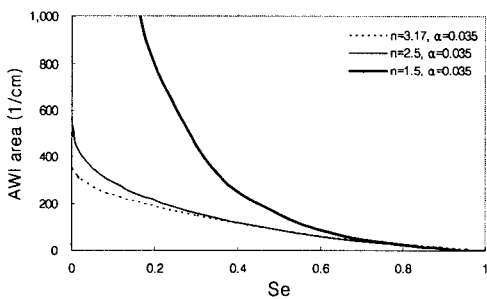
토양 입자의 비표면적은 커지게 되므로 토양 공극 사이에 존재하는 AWI의 비표면적이 증가하는 경향을 가지는 것이 합리적이다. Niemet et al. (2002)의 모델에서 n 값이 작아질 때 보다 큰 공기-물 경계면의 비표면적을 가지는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 3a).

a 값은 토양 입자의 평균 입경과의 직접적인 경향성은 갖지 않으나 입도분포에 따른 토양의 함수특성을 특징짓는 파라미터가 된다. a 값은 사질토양과 같이 입경이 큰 입자나 식토와 같이 입경이 작은 입자가 좁은 입도분포 하에 고르게 혼합된 경우보다는 미사질 양토와 같이 크고 작은 입자가 혼재하는 경우에 더 작은 값을 가지게 된다. 이러한 경우, 토양 입자의 비표면적은 균일한 토양 입경을 갖는 토양에 비하여 커지게 되므로 AWI의 비표면적 역시 증가하는 결과를 기대할 수 있다. Niemet et al. (2002)의 계산모델에서는 예측한 바와 같이 a 값

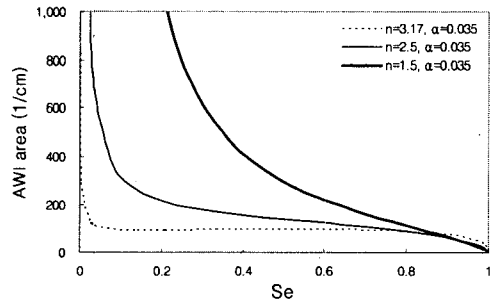
이 작아질수록 AWI의 비표면적이 증가하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3b).

Faulkner et al. (2003)의 모델에서는 Niemet et al. (2002)의 계산모델과 같이 van Genuchten (1980)의 함수특성곡선 관계식의 a , n 값이 중요한 파라미터로 작용한다. a , n 값의 변화에 대한 AWI의 비표면적 변화 양상은 Niemet et al. (2002)과 동일하다. 특징적인 것은 토양의 n 값이 커질수록 유효포화도가 0.5이하로 낮아지는 상황에서의 AWI의 비표면적이 오히려 감소하는 경향을 보이는 것이다. 이는 식 (9)에서 알 수 있듯이 Faulkner et al. (2003)의 모델에서의 AWI의 비표면적은 체적함수비(θ)에 직접 비례하게 되는데, 유효포화도가 감소하는 동안 체적함수비를 제외한 다른 부분의 증가값보다 체적함수비의 감소값이 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

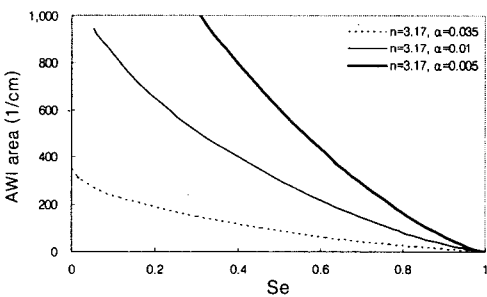
Peng and Brusseau (2005)의 모델은 앞에서



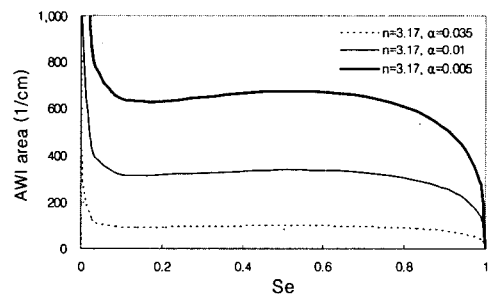
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 3 Sensitivity analysis of Niemet et al. (2002)'s model: a) n , b) a

Fig. 4 Sensitivity analysis of Faulkner et al. (2003)'s model: a) n , b) a

언급한 것처럼 일반적으로 사용되는 a , n 값의 범위에서 적용하기 어렵다. Peng and Brusseau(2005)가 논문에서 제시한 a 값은 4~42까지의 분포를 보이는데 비해 USDA의 토성 분류상의 평균값들은 0.005~0.035의 값을 가진다. 또한, 앞서 제시한 Niemet et al.(2002)와 Faulkner et al.(2003)의 모델들과는 달리 a 와 n 값이 변할 때, AWI의 비표면적이 거의 변화하지 않는 경향을 보이고 있다 (Fig. 5 a,b).

Peng and Brusseau(2005)의 모델은 식 (10)과 같이 유효포화도가 영 값이 되는 경우 토양 입자의 최대 비표면적(s)과 AWI의 비표면적이 같아진다는 가정 하에 유도되었다. 이때 s 는 식 (11)에 제시된 것처럼 토양 입자의 평균 입경에 의해 영향을 받는다. 이때, 토양 입자의 입경(d)이 작아짐에 따라 AWI의 비표면적이 증가하는 것으로 나타났

다(Fig. 5c). 하지만, 유효포화도가 영 값에 근접할 때 토양 입자의 표면에 얇은 층을 이루는 물의 단일층 포화도(S_m)에 따른 AWI의 비표면적 변화는 매우 미미한 것으로 나타났다(Fig. 5d).

3. AWI의 비표면적 계산모델의 선정

불포화대에서의 바이오클로이드 입자의 이동 모델에 적용하기 위한 AWI의 비표면적 계산모델 선정 하기 위해 다음과 같은 조건을 고려하였다. 첫째, 새로운 경험적 파라미터의 도입이 필요하지 않으며 일반적으로 널리 사용되는 토양의 특성 인자들만으로 계산이 가능해야 한다. 둘째, 기존 문헌에 제시된 실험결과와 어긋나지 않아야 한다.

Cary(1994)의 모델은 원통형의 공극을 가정하고 포화도의 변화에 따라 물과 공기가 차지하는 부

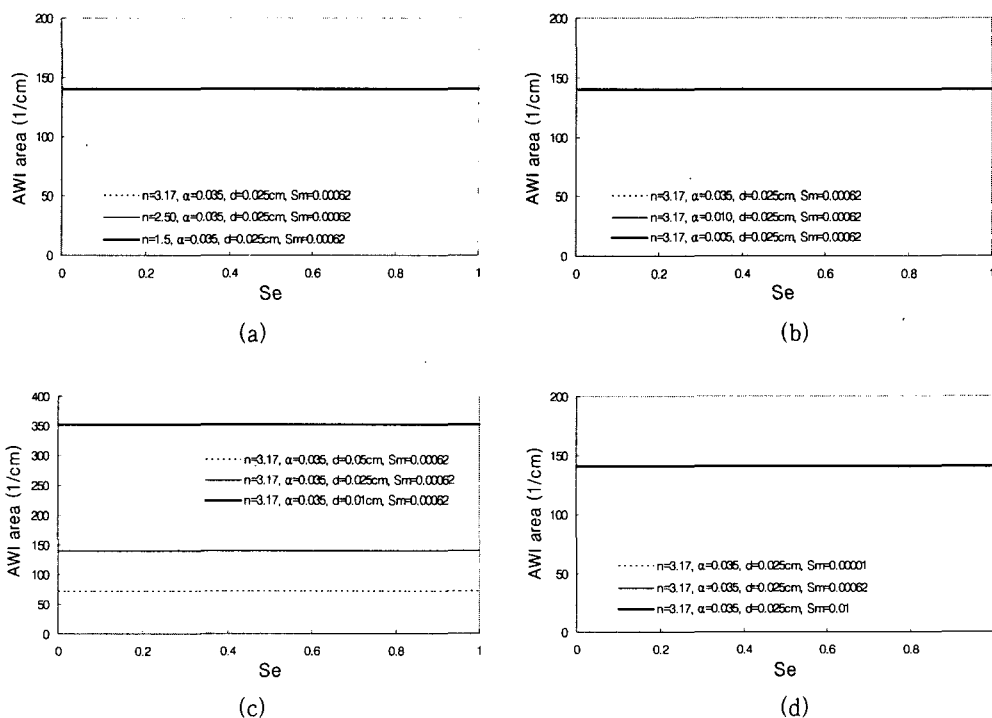


Fig. 5 Sensitivity analysis of Peng and Brusseau (2005)'s model: a) n , b) a , c) mean particle diameter(d) d) monolayer saturation(S_m)

피의 변화를 계산하여 그 경계면을 결정하였다. 이와 같이 모세관압과 공기-물 경계면의 관계를 유도하는 과정은 관련 연구자들에 의해 재차 인용된 바 있다. Cary(1994)의 계산모델에서 필요로 하는 값은 앞서 민감도분석을 행한 에어-엔트리(h_0), 공극률 지수(b), 경험상수(λ), 단일층 흡수비(θ_m) 등이다. 하지만, 이 파라미터들은 여러 토양을 대상으로 하여 측정된 문헌값이 거의 존재하지 않으며 대상이 되는 토양에서 실험을 통해 직접 파라미터 값을 얻는 방법론 또한 제시되지 않아, Cary(1994)가 논문에서 직접 제시한 세 가지 토양의 경우에만 적용할 수 있다는 한계가 있다. 또한 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 Cary(1994)의 모델은 낮은 유효포화도에서 AWI의 비표면적이 기하급수적으로 증가하게 되는데, 이러한 결과는 Kim et al.(1997)와 Anwar et al.(2000) 등에 의해 이루어진 최근의 실험 결과와 많은 차이를 보인다. 따라서 Cary(1994)의 모델은 불포화대의 바이오콜로이드 이동 모델링에 적용하기에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

Faulkner et al.(2003)의 모델은 두개의 파라미터(a, n)가 AWI의 비표면적을 좌우하게 된다. 모델의 결과는 Fig. 4b에서 보는 바와 같이 USDA(United States Department of Agriculture)의 토성분류상 사질토양에 해당하는 n 값(=3.17)이 적용하였을 때 유효포화도 0.2~0.8의 범위에서 AWI의 비표면적은 큰 변화를 보이지 않으며 유효포화도가 감소함에 따라 AWI의 비표면적이 미세하게 감소하고 있다. 그러나 일반적으로 AWI의 비표면적은 유효포화도가 감소함에 따라 커지는 것으로 알려져 있으며 여러 연구자들에 의한 실험결과(Kim et al., 1997, 1999; Anwar et al., 2000; Costanza-Robinson and Brusseau, 2002)도 이를 뒷받침하고 있다. 따라서 Faulkner et al.(2003)의 모델도 부적합한 것으로 판단된다.

Peng and Brusseau(2005)의 모델은 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선 공식을 이용하였으나 배수실험 등을 통해 얻어지는 van Genu-

chten(1980)공식의 a, n 값을 그대로 사용할 수 없다. 다시 말하면, USDA에서 제시하는 사질토양의 평균적인 a, n 값을 이용한 경우에 Peng and Brusseau(2005)의 모델은 적용에 한계가 있다. Peng and Brusseau(2005)는 a, n 을 균등계수(uniformity coefficient)로부터 추정할 수 있는 경험식을 제시하였으나, van Genuchten(1980)의 공식에 의한 a, n 값이 불포화대의 바이오콜로이드 이동 모델링 과정에서 물의 흐름을 나타내는 Richards' equation을 수치적으로 계산하는 과정에서 직접 사용되는 것과는 달리 별도의 실험과정을 통해 추정해야 하므로 그 적용성에 문제가 있다.

Niemet et al.(2002)의 모델은 주요 파라미터가 a, n 이며, 이는 함수특성곡선(함수비-모세관압 곡선)에 van Genuchten(1980)의 공식을 적용함으로써 구해질 수 있다. Niemet et al.(2002)의 모델에 사용된 a, n 값은 Peng and Brusseau(2005)의 경우와 달리 van Genuchten(1980)의 공식에 적용되는 값들과 동일하다. 따라서 별도의 실험이나 파라미터의 추정과정 없이 AWI의 비표면적을 계산할 수 있는 장점이 있다. 따라서 Niemet et al.(2002)의 모델이 불포화대의 바이오콜로이드 이동 모델링 시 AWI의 비표면적을 계산하는데 가장 적합하다고 판단된다.

4. Niemet et al.(2002)의 모델 검증 및 개선된 모델 제안

Niemet et al.(2002)의 모델을 검증하기 위해 Anwar et al.(2000)의 실험데이터를 이용하였다. Anwar et al.(2000)은 불포화흐름에서 계면활성제(추적자)의 흡착실험을 통해 AWI의 비표면적을 추정하였다. 실험은 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm의 평균 입경을 가지는 세 가지 유리구슬 재질의 공극 매체에 대해 수행하였으며, 공극률, 수리전도도, 함수특성곡선, 추정된 AWI의 비표면적 등 이번 연구에서 모델의 검증에 필요한 실험 결과들

을 모두 제시하고 있다.

Anwar et al.(2000)가 제시한 함수특성곡선으로부터 α , n 을 계산하기 위해 United States Salinity Laboratory에서 개발한 RETC(REtention Curve)라는 프로그램을 사용하였다. RETC는 함수비 대 모세관압 실험데이터의 입력만으로 van Genuchten(1980)의 α , n 은 물론 θ_s 와 θ_r 등을 구할 수 있다. Anwar et al.(2000)이 제시한 함수특성곡선과 RETC에서 구한 α , n , θ_s , θ_r 를 이용해 계산한 함수특성곡선과의 비교 결과 및 파라미터 값을 Fig. 6과 Table 2에 나타내었다.

Anwar et al.(2000)의 실험을 통해 제시한 AWI의 비표면적 데이터와 Niemet et al.(2002)의 모델에 Table 2에 제시된 파라미터 값을 적용하여 계산한 결과를 비교하여 Fig. 7a에 나타내었다. Niemet et al.(2002)의 모델 결과는 Anwar

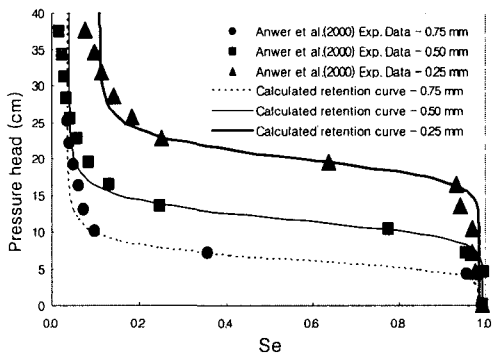
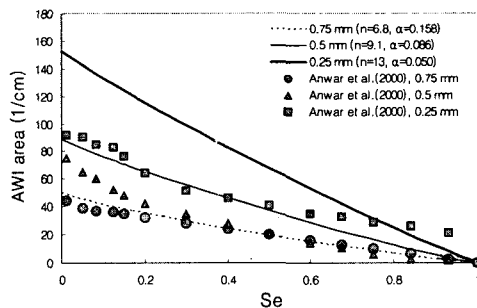


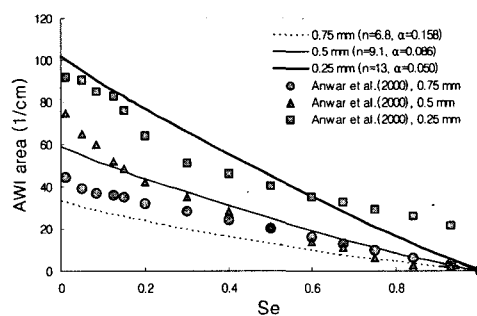
Fig. 6 Comparison of retention curve data from Anwar et al.(2000) with calculated retention curve using RETC and parameters presented in Table 2

Table 2 Fitted van Genuchten(1980) parameters(α , n), saturated water content(θ_s), and residual water content(θ_r) to retention curve data from Anwar et al.(2000) using RETC

Mean particle diameter	α	n	θ_s	θ_r
0.25 mm	0.050	13.0	0.3769	0.0422
0.50 mm	0.086	9.1	0.3682	0.0148
0.75 mm	0.158	6.8	0.3674	0.0136



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison of Anwar et al.(2000)'s experimental data with (a) original and (b) modified Niemet et al.(2002)'s model

et al.(2000)의 실험값과 차이가 있음을 알 수 있다. 평균입경 0.75 mm의 경우 AWI의 비표면적이 거의 일치하였으나 평균입경 0.50 mm, 0.25 mm의 실험값에 비해 모델의 결과가 크게 나타났다. Niemet et al.(2002)은 다공질 매체 안에서의 공기 공극부피와 비표면적을 계산함에 있어서 Cary(1994)가 사용한 원통 모양의 가정이 아닌 구체를 가정하여 식을 유도하였다. 그 결과 Niemet et al.(2002)은 그들의 모델이 Cary(1994)의 모델보다 1.5배 큰 AWI의 비표면적을 예측하게 된다고 하였다. Fig. 7의 결과는 Niemet et al.(2002)의 모델이 평균입경이 작은(0.25 mm, 0.50 mm) 토양에서 AWI의 비표면적을 과다하게 추정하고 있음을 보여준다.

따라서, Cary(1994)처럼 원통형의 공기공극을 가정하여 모세관압과 공극지름의 관계를 결정하고

Niemet et al.(2002)의 방법을 따라서 모세관압과 유효포화도의 관계를 유도할 경우 식 (12)는 식 (13)과 같이 수정할 수 있는데, 이때 식 (13)은 식 (12)에 비하여 1.5배 작은 값을 갖게 된다.

$$A_{AWI} = \frac{\rho_w g \theta_s}{\sigma} \frac{m}{\alpha} [B(w, z) - I_u(w, z)] \dots\dots (13)$$

식 (13)을 이용하여 AWI의 비표면적을 계산한 결과를 Anwar et al.(2000)의 실험데이터와 다시 비교하여 Fig. 7b에 나타내었다. 실험값과 계산모델 값의 결정계수(coefficient of determinant)는 각각 0.25 mm에서 0.93, 0.50 mm에서 0.91, 0.75 mm에서 0.75로 비교적 작은 평균입경을 갖는 토양의 경우 상당히 정확한 추정을 하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 식 (13)은 불포화 다공성 매질체에서 AWI의 비표면적 계산에 적합한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 불포화 다공성 매질체내에 존재하는 AWI의 비표면적을 계산하기 위해 제시된 4가지의 모델을 비교분석하여 적합한 모델을 선정한 후, 선정된 모델을 문헌조사를 통해 얻어진 실험결과를 이용하여 검증하고 수정하여 최종적인 AWI의 비표면적 계산모델을 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 Niemet et al.(2002)의 수정모델은 널리 이용되는 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선식 파라미터인 α , n 값이 결정되면 쉽게 AWI의 비표면적을 계산할 수 있는 모델로서, 유효포화도의 감소에 따라 AWI의 비표면적이 증가한다는 실험결과를 잘 반영하고 있다. 선정된 모델은 추후 연구를 통해 이루어질 불포화대에서의 병원성 미생물이나 박테리아 등 바이오콜로이드의 이동 모델링 과정에서 이동물질의 AWI에 대한 부착을 정량적으로 반영하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로

기대된다.

References

1. Anwar, A. H. M. F., Bettahar, M., Matsubayashi, U. 2000. A method for determining air-water interfacial area in variably saturated porous media, *Journal of Contaminant Hydrology*, 43: 129-146.
2. Berkowitz, B., Hansen, D. P. 2001. A numerical study of the distribution of water in partially saturated porous rock, *Transport in Porous Media*, 45: 303-319.
3. Bradford, S. A., Leij, F. J. 1997. Estimating interfacial areas for multi-fluid soil systems, *Journal of Contaminant Hydrology*, 27: 83-105.
4. Cary, J. W. 1994. Estimating the surface area of fluid phase interfaces in porous media, *Journal of Contaminant Hydrology*, 15: 243-248.
5. Costanza-Robinson, M. S., Brusseau, M. L. 2002. Air-water interfacial areas in unsaturated soils: Evaluation of interfacial domains, *Water Resources Research*, 38:doi:10.1029/2001WR000738.
6. Culligan, K. A., Wildenschild, D., Christensen, B. S. B., Gray, W. G., Rivers, M. L. 2006. Pore-scale characteristics of multiphase flow in porous media: A comparison of air-water and oil-water experiments, *Advances in Water Resources*, 29: 227-238.
7. Dalla, E., Hilpert, M., Miller, C. T. 2002. Computation of the interfacial area for two-fluid porous medium systems, *Journal of Contaminant Hydrology*, 56: 25-48.
8. Faulkner, B. R., Lyon, W. G., Khan, F. A., Chattopadhyay, S. 2003. Modeling leaching of viruses by the Monte Carlo method, *Water Research*, 37: 4719-4729.
9. Huysman, F., and W. Verstraete. 1993. Water-facilitated transport of bacteria in unsaturated soil columns: influence of cell

- surface hydrophobicity and soil properties, *Soil Biology and Biochemistry*, 25: 83–90.
10. Kim, H., P. S. C. Rao, and M. D. Annable. 1997. Determination of effective air–water interfacial area in partially saturated porous media using surfactant adsorption, *Water Resources Research*, 33: 2705–2711.
 11. Kim, H., P. S. C. Rao, and M. D. Annable. 1999. Gaseous tracer technique for estimating air–water interfacial areas and interface mobility, *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1554–1560.
 12. McMurry, S. W., M. S. Coyne, and E. Perfet. 1998. Fecal coliform transport through intact soil blocks amended with poultry manure, *Journal of Environmental Quality*, 27: 86–92.
 13. Niemet, M. R., Rlckhold, M. L., Weisbrod, N., Selker, J. S. 2002. Relationships between gas–liquid interfacial surface area, liquid saturation, and light transmission in variably saturated porous media, *Water Resources Research*, 38:doi:38:10.1029/2001WR000785.
 14. Oostrom, M., White, M. D., Brusseau, M. L. 2001. Theoretical estimation of free and entrapped nonwetting–wetting fluid interfacial areas in porous media, *Advances in Water Resources*, 24: 887–898.
 15. Peng, S., and Brusseau, M. L. 2005. Impact of soil texture on air–water interfacial areas in unsaturated sandy porous media, *Water Resources Research*, 41: w03021.
 16. Powelson, D. K., and A. L. Mills. 2001. Transport of *Escherichia coli* in sand columns with constant and changing water contents, *Journal of Environmental Quality*, 30: 238–245.
 17. Powelson, D. K., and C. P. Gerba. 1994. Virus removal from sewage effluents during saturated and unsaturated flow through soil columns, *Water Research*, 28: 2175–2181.
 18. Quanrud, D. M., S. M. Carroll, C. P. Gerba, and R. G. Arnold. 2003. Virus removal during simulated soil–aquifer treatment, *Water Research*, 37: 753–762.
 19. Reeves, P. C., Celia, M. A. 1996. A functional relationship between capillary pressure, saturation, and interfacial area as revealed by a pore–scale network model, *Water Resources Research*, 32: 2345–2358.
 20. Rose, W., Bruce, W. A. 1949. Evaluation of capillary character in petroleum reservoir rock, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 186: 127–142.
 21. Thompson, S. S., M. Flury, M. V. Yates, and W. A. Jury. 1998. Role of the air–water–solid interface in bacteriophage sorption experiments, *Applied and Environmental Microbiology*, 64: 304–309.
 22. van Genuchten, M. Th. 1980. A closed–form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892–898.
 23. Wan, J., J. L. Wilson, and T. L. Kieft. 1994. Influence of the gas–water interface on transport of microorganisms through unsaturated porous media, *Applied and Environmental Microbiology*, 60: 509–516.