

《原著》

계면활성물질의 지하수적용에 의한 모관수대 두께의 감소

김헌기* · 신승엽 · 양해원

한림대학교 환경생명공학과, 한림대학교 에너지·환경 연구소

Decrease in the Thickness of Capillary Fringe Induced by Surface Active Chemicals in the Groundwater

Heonki Kim* · Seungyup Shin · Haewon Yang

Dept. of Environmental Sciences and Biotechnology, Hallym University
Institute of Energy and Environment, Hallym University

ABSTRACT

Capillary fringe divides the groundwater and the vadose zone controlling the diffusive mass transfer of contaminants and gases. The thickness of capillary fringe is of great importance for the rate of contaminant mass transfer across the capillary fringe. Application of surface active chemicals including surfactants and alcohol-based products into the subsurface environment changes the surface tension of the aqueous phase, which in turn, affects the thickness of the capillary fringe. In this study, a bench-scale model was used to assess the quantitative relationship between the surface tension and the thickness of the capillary fringe. An anionic surfactant (Sodium dodecylbenzene sulfonate, SDBS) and an aqueous solution of ethanol were used to control the surface tension of the groundwater. It was found that the thickness of the capillary fringe is directly proportional to the surface tension. The air entry pressures measured by the Tempe Pressure Cell at different surface tensions using SDBS (200 mg/L) and ethanol (20%, v/v) solutions were in good agreement with the thicknesses of the capillary fringe measured by the model. A simple method to correct the conventional Brooks-Corey model for estimating the air entry pressure was also presented.

Key words : Aquifer, Capillary fringe, Anionic surfactant, Groundwater, Remediation

1. 서 론

모관수대(capillary fringe)는 지반환경에서 포화층 및 불포화층과 함께 지반환경을 구성하는 주요한 부분이지만, 현재까지의 지반환경 오염에 대한 연구에서 모관수대는 포화층이나 불포화층에 비하여 크게 주목받지 못하였다. 모관수대는 포화층과 불포화층을 구분하는 경계층으로서 지반환경을 관리하는데 있어서 그 역할이 점차 부각되고 있으며, 지하수의 유동, 포화층에서의 오염물질의 유동, 포화층과 불포화층간에서 일어나는 오염물질의 이동에 영향을 미치며, 대수층의 미생물 활성화에 영향을 미치는 산소의 전달층으로서의 역할도 중요하게 인식되고 있다.

토양수층으로부터 모관수대를 관통하여 포화층으로 유

입된 유기오염물질은 포화층에서 오염물질의 농도를 증가시키는 것으로 알려져 있다(Baehr, 1987; McCarthy and Johnson, 1993). 수용액 상태의 오염물질의 확산에 대하여, 모관수대는 수직방향의 분산도(dispersion)를 증가시키며(Klenk and Grathwohl, 2002; Liu, 2008), 모관수대 내에서 발생하는 수평방향의 이동현상은 수평분산도(transverse dispersion)도 증가시키는 것으로 보고되고 있다(Klenk and Grathwohl, 2002). 대수층에서 유동하는 수용성 오염물질의 분산도는 오염물질의 확산에 결정적인 영향을 미치므로 모관수대는 대수층내 오염물질의 유동을 평가하는데 매우 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 모관수대는 오염물질 뿐 아니라 불포화층에서 포화층으로 투과되는 산소의 물질이동속도에도 깊은 영향을 미친다

*Corresponding author : heonki@hallym.ac.kr

원고접수일 : 2012. 10. 9 심사일 : 2012. 11. 27 게재승인일 : 2012. 11. 28
질의 및 토의 : 2013. 2. 28 까지

(Haberer et al., 2011). 산소를 포함한 가스상 물질의 모관수대 및 불포화층 투과속도는 토양내 물의 포화도 (degree of saturation)와 직접적인 상관관계가 있다. 물의 포화도가 증가할수록 토양내 가스상 확산계수가 줄어드는 것으로 알려져 있으며(Affek et al., 1998; Maier et al., 2007), 모관수대에서는 서로 연결된 상이 수용액이므로 가스상 확산은 대수층으로의 물질이동에 더 이상 영향을 미치지 않고, 오직 수용액을 통한 확산 또는 분산현상이 포화층으로의 물질이동 기작이 된다. 또한 토양층의 포화도가 증가할수록 가스상의 이류속도를 결정하는 요소인 gas permeability가 줄어들게 되며, 토양층이 포화상태에 접근하면 가스상(토양의 non-wetting phase)의 relative permeability는 0에 도달하여 이류에 의한 물질이동도 기대할 수 없게 된다(Corey, 1994). 모관수대를 통한 물질이동에 영향을 미치는 인자로서 토양공극률과 포화도를 들 수 있으며, 가장 큰 영향을 미치는 인자로서는 모관수대의 두께를 들 수 있겠다.

모관수대는 지하수면 위에 존재하는 포화영역으로 정의하며, 물의 퍼텐셜(water potential)이 대기압보다 낮다. 물의 퍼텐셜이 대기압보다 낮음에도 모관수대가 포화상태를 유지할 수 있는 이유는 모관수대에 존재하는 물에 작용하는 중력에 비하여 토양매질의 모세관압력이 더 크기 때문이며, 모관수대의 상부 경계면에서 이 두 가지 힘이 균형을 이루게 된다. 일반적으로 토양에서의 물의 포화도는 절대포화도(S_w)와 상대포화도(S_e)로 구분할 수 있는데, 각각 다음 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$S_w = \frac{\theta_w}{n} \quad (1)$$

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{n - \theta_r} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 θ_w 와 θ_r 는 각각 함수율과 잔류 함수율을 나타내며, n 은 토양공극률을 나타낸다. 함수율(θ_w)은 전체 토양부피에 대한 수용액 부피의 비율이며, 잔류 함수율(θ_r)은 외부압력이 충분히 증가하여 압력의 증가가 함수율의 변화를 거의 나타내지 않을 때(통상 field capacity조건), 전체 토양부피에 대한 수용액 부피의 비율로 정의된다. 토양에서 S_w 는 다음 식 (3)과 같이 모세관 압력의 함수로 표현할 수 있다(Brooks and Corey, 1966; Ronen et al., 1997).

$$S_w = (1 - S_r) \left(\frac{P_d}{P_c} \right)^\lambda + S_r \quad \text{for } P_c > P_d \quad (3)$$

여기에서 P_c (dyne/cm²)는 모세관 압력이며, P_d (dyne/cm²)는 해당 토양의 air-entry pressure(dyne/cm²)이고, λ 는 무차원상수이며, S_r 은 잔류포화도 ($= \theta_r/n$)을 나타낸다. 토양의 모세관 압력(P_c)은 토양입자에 대한 wetting fluid(여기에서는 수용액)와 non-wetting fluid(여기에서는 토양공기)의 압력차를 의미한다. P_d 값은 포화토양에 외부압력을 가하여 공기를 도입할 때(drainage cycle), 공기가 연속적인 상으로 존재하는 최소압력을 의미한다(Bear and Cheng, 2010). 식 (3)으로 표현된 Brooks and Corey 모델 외에 상대포화도를 평가할 수 있는 van Genuchten 모델은 다음 식 (4)와 같이 표현된다(van Genuchten, 1980).

$$S_e = (1 + |\alpha P_d|^n)^{-m} \quad \text{for } P_c > P_d \quad (4)$$

위 식 (4)에서 α (cm⁻¹)는 모세관압력과 관련된 계수이며, n 과 m 은 토양수분곡선(soil water retention curve)를 fitting하여 얻어지는 상수이다.

모세관 압력(P_c)은 물의 표면장력(σ , dyne/cm), 토양입자 표면에서의 물-공기 접촉각 (ϕ), 그리고 토양공극에 형성된 물-공기 접촉 굴곡면의 반경(r , cm)에 의하여 결정된다(식 (5)).

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \phi}{r} \quad (5)$$

물로 포화된 토양에 공기를 도입하기 위해 필요한 최소 압력의 의미를 갖는 P_d 도 역시 표면장력에 영향을 받는다. 즉 표면장력이 낮아지면 이에 비례하여 P_d 값도 작아진다(식 (6)).

$$P_d' = P_d \frac{\sigma'}{\sigma} \quad (6)$$

여기에서 P_d' 는 새로운 표면장력 σ' 에서의 air entry pressure를 나타낸다. 모관수대의 범위에 대한 정의에는 여러 가지 논란이 있으나(Berkowitz et al., 2004), 통상 실제 실험을 통하여 얻어진 토양수분곡선을 위 식 (3) 또는 식 (4)에 fitting하여 얻어진 air-entry pressure를 수두(water pressure head, 단위 cm)로 환산한 것이 해당 토양으로 구성된 모관수대의 두께로 본다.

근래에 유기물, 특히 물과 섞이지 않는 유류(NAPL, nonaqueous phase liquid)로 오염된 지하수를 정화하는데 계면활성제 또는 계면활성을 갖는 알코올(예: 에탄올)의 수용액을 대수층에 도입하는 기술이 개발되고 있다(Zhong et al., 2003; Brooks et al., 2004). 이와 같은 유기물

수용액이 지반환경에 도입되면 모관수대를 포함한 포화층의 수용액 표면장력을 현저하게 저감하는 효과가 있다. 식 (6)에 따라 해당 토양의 air entry pressure는 저감된 표면장력에 비례하여 감소하게 되고, 따라서 모관수대의 두께도 변화하게 된다. 대수층에 계면활성제 수용액이 도입되는 과정에서 나타나는 모관수대의 붕괴현상과 이에 따른 오염물질의 유동현상 변화도 보고된 바 있다(Henry and Smith, 2002).

본 연구에서는 계면활성제로서 SDBS(sodium dodecylbenzene sulfonate) 그리고 계면활성물질로서 에탄올 수용액을 사용하여 토양 포화층의 표면장력변화와 모관수대의 두께변화 간 상관관계를 정량적으로 규명하는 것을 목적으로 하며, Brooks and Corey 모델을 사용할 때 보다 정확하게 air entry pressure를 결정토록하는 보정방법을 제시하여 모관수대의 두께를 정확하게 예측할 수 있게 한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 실험재료

실험에 사용된 다공성 매질로 직경이 300~500 μm 범위를 갖는 석영질 모래를 사용하였다. 지하수의 표면장력을 조절하기 위한 계면활성제는 음이온 계면활성제인 SDBS(sodium dodecylbenzene sulfonate, Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd., Reagent grade)를 사용하였고, 에탄올(Reagent grade)은 Junsei Co. Ltd.에서 공급되었으며, 이들 시약은 공급된 대로 사용되었다. 모든 수용액은 증류수를 이용하여 제조되었다. 모든 실험은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수행되었다.

2.2. 실험방법: Tempe Cell 실험

본 연구에 사용된 토양(모래)의 토양수분곡선은 Tempe Cell(Soil Moisture Equipment Co.)을 사용하여 측정하였다. Tempe Cell의 내부는 직경 5.0 cm, 높이 3.0 cm이며 1.0 bar의 air entry pressure를 갖는 capillary barrier(두께 0.5 cm)가 Cell 하부에 설치되었다. 먼저 표면장력이 조절되지 않은 상태에서 토양수분곡선을 측정하기 위하여 Cell의 내부를 순수한 증류수로 채운 후, 모래를 충전하였다. Cell 하단부에 연결된, 증류수로 채워진 튜브의 높이를 조절하여 Cell에 가해지는 압력을 조절하였다. 정해진 압력에서 Cell로부터 더 이상 물이 유출되지 않으면 전체 Cell의 무게를 측정하여 포화도를 측정하였다. 표면장력이 저감된 상태에서 토양수분곡선을 측정하기 위해 200 mg/L 농도의 SDBS 수용액, 또는 20%(v/v) 에탄올

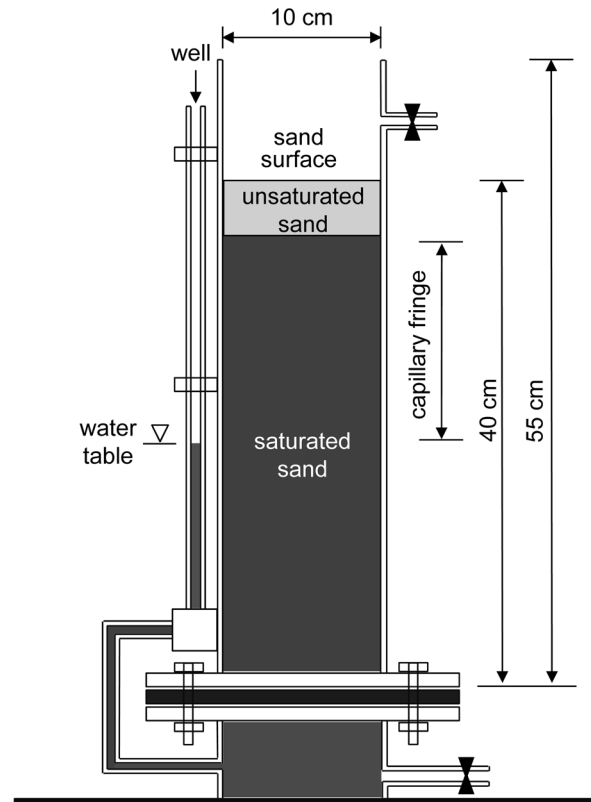


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up used in this study.

수용액으로 Cell 내부의 모래가 포화되도록 한 후, 동일한 방식으로 여러 압력에서 포화도를 측정하였다.

2.3. 실험방법: 모관수대의 두께 측정

모관수대의 두께를 측정하기 위하여 투명한 PMMA(poly methylmetacrylate)재질로 상자형 모델을 제작하였다(Fig. 1). 모델의 크기는 가로, 높이, 내부의 폭이 각각 10.0 cm, 55.0 cm(토양충진부), 2.0 cm이며, 왼쪽에 직경 1.0 cm의 수위관이 설치되었다. 모래가 도입되는 부분의 하부에 약 0.25 mm의 공극크기를 갖는 PE(polyethylene)체가 설치되어 모래충진부분과 하부의 수용액 탱크와 구분하였다. 모델은 총 높이 40 cm로 충전되었으며, 공극율은 0.41이었다. 모래 충전부의 하부 5 cm는 1-2 mm의 굵은 모래를 충전하여 상부에 충전된 모래가 모델의 하부에 설치된 수용액탱크로 유입되지 않도록 하였다.

실험하고자 하는 수용액을 모델에 충분히 채운 뒤, 모래의 충진을 시작하였다. 모델 상부로 투입된 모래가 항상 수면아래에서 충전되도록 함으로써 충전 후 매질 내에 공기방울이 혼입되는 것을 방지하였다. 충진이 완료된 후에도 수용액의 수위가 모래표면보다 위에 위치하도록 하

Table 1. Surface tensions for the aqueous solutions of SDBS and ethanol used in this study

| Description | Concentration SDBS: mg/L ethanol: % (v/v) | Surface tension (dyne/cm) |
|------------------|---|------------------------------|
| SDBS solution | 0.0 | 72.10 |
| | 25.0 | 57.88 |
| | 50.0 | 48.76 |
| | 100.0 | 46.44 |
| | 150.0 | 43.46 |
| | 200.0 | 41.78 |
| Ethanol solution | 0.0 | 72.16 |
| | 5.0 | 57.58 |
| | 10.0 | 51.04 |
| | 15.0 | 47.02 |
| | 20.0 | 43.96 |
| | 30.0 | 38.20 |

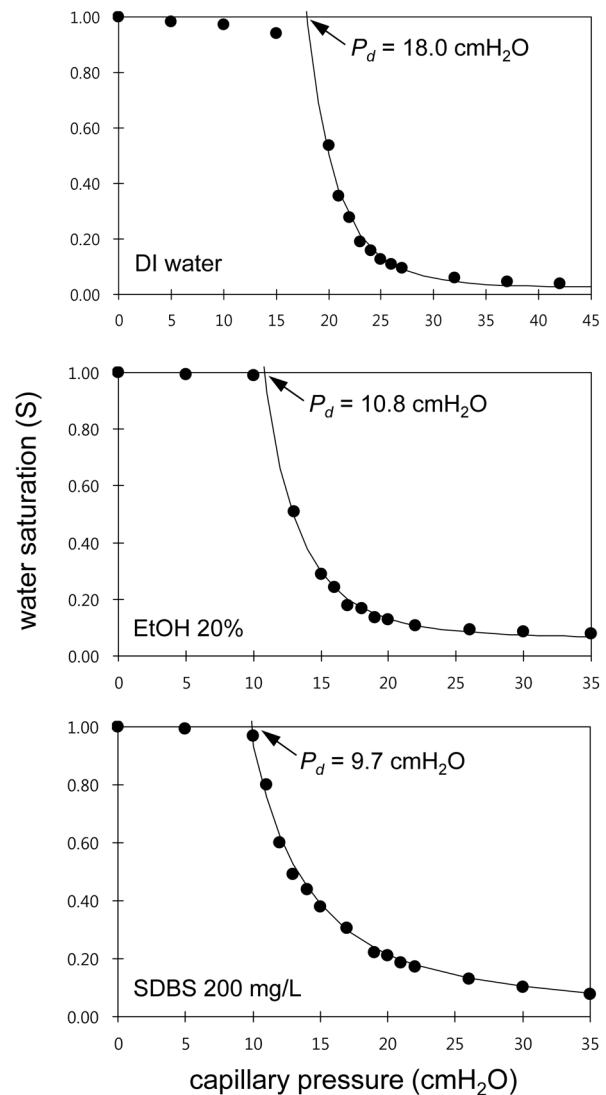
였으며, 이 상태에서 해당 수용액을 모델하부에 수용액탱크에 연결된 밸브를 통하여 공급하고 모래표면 상부에 설치된 유출공을 통하여 상등액을 제거하였다. 이 과정은 충진모래내부에 포화된 수용액이 균일한 농도를 갖게 하도록 하기 위하여 실시되었으며, 계면활성제(물질)의 유입 및 유출농도가 동일해 질 때까지 계속되었다. 모델실험에 사용된 수용액의 SDBS 및 에탄올의 농도와 해당 농도에서의 표면장력을 Table 1에 나타내었다. 표면장력은 DeNouy ring을 이용한 방법(Tensiomat 21, Fisher Scientific Co. Ltd.)을 사용하여 측정하였다.

모래표면으로부터 충분한 거리만큼 수위를 내려 초기에 포화된 모래로부터 증류수(또는 계면활성물질 수용액)가 자연스럽게 배수되도록 하였다. 수위를 일정한 위치에 고정시킨 후 불포화영역의 크기(즉 모관수대의 두께)가 더 이상 늘어나지 않을 때 까지 방치하였으며, 더 이상 모관수대의 두께가 변화하지 않을 때, 모델의 표면에 부착된 투명필름에 모관수대와 불포화대의 경계선을 그대로 옮긴 후, 수위관의 수위와 불포화대와 포화대의 경계까지의 거리를 측정하였다. 본 연구에 사용된 매질(모래)에 대하여 포화상태의 토양층과 불포화상태의 토양층 경계가 육안으로 뚜렷하게 식별되었다. 특정 농도에서 실험이 종료되면 모델 내의 매질을 꺼내어 세척한 후 다른 농도에서 위의 충전과정과 실험과정을 반복하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모관수대의 두께와 표면장력

본 연구에서 사용된 모래의 토양수분곡선을 Fig. 2에

**Fig. 2.** Water retention curves for the sands used in this study.

나타내었다. 증류수로 충전된 모래의 토양수분곡선과 계면활성물질을 포함하는 수용액으로 충전된 모래의 토양수분곡선은 거의 유사한 패턴을 나타내고 있으며, 단지 계면활성물질이 포함된 수용액으로 충전된 모래의 경우 표면장력이 낮아짐으로써 air entry pressure가 낮아진 효과로 인하여(식 (6)) 전체적인 토양수분곡선이 표면장력 감소비율만큼 모세관압력이 낮은 쪽으로 평행이동한 것을 확인할 수 있다. 본 연구결과는 유사한 조건에서 실시된 이전 연구결과와 부합한다(Kim et al., 2006). 토양수분곡선이 표면장력의 변화에 따라 수평이동하는 정도는 식 (3)을 통하여 예측할 수 있다. air-entry pressure(수두단위로서는 증류수를 충전한 모래가 18.0 cmH₂O, 20%(v/v) 에탄올 수용액이 10.8 cmH₂O, 그리고 200 mg/L의 SDBS

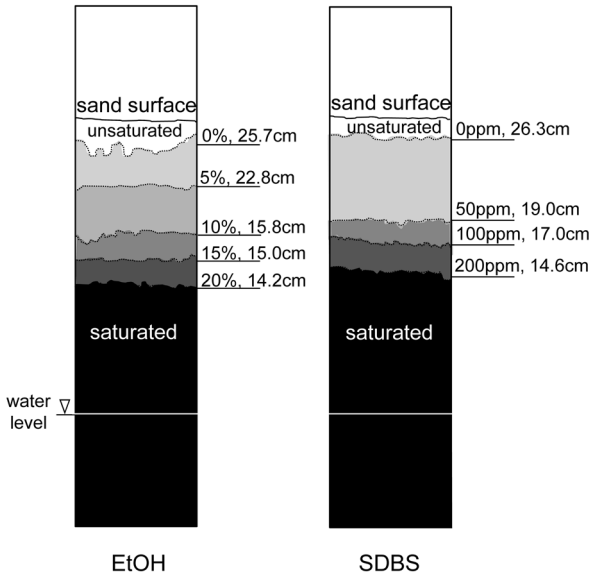


Fig. 3. Changes in the capillary fringe at different concentrations of the surface-active chemicals.

수용액이 9.7 cmH₂O로 각각 측정되었다. 식 (6)을 이용하여 예측된 air entry pressure는 20%(v/v) 에탄올 수용액은 9.6 cmH₂O이며, SDBS 200 mg/L의 경우 10.4 cmH₂O 이고, 이들 예측치는 측정치와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

모델 실험결과, 에탄올의 농도가 증가할수록, 그리고 SDBS의 농도가 증가할수록 표면장력이 감소하게 되며 (Table 1), 표면장력이 감소할수록 모관수대의 두께도 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 에탄올 30%(v/v)는 20%(v/v)일 때와 모관수대의 차이가 거의 없으므로 Fig. 3에 나타내지 않았다. 모관수대의 두께가 안정되었을 때, 불포화대와 모관수대의 상부는 비교적 균일한 경계를 나타내었으며, 이는 본 실험에서 사용한 매질(모래)이 매우 균일한 입경을 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다.

표면장력의 변화에 따른 모관수대 두께간의 상관관계를 Fig. 4에 나타내었다. 계면활성물질의 종류에 관계없이 모관수대의 두께는 표면장력과 비례관계에 있음을 알 수 있으며, 에탄올이 충전된 모래의 경우 SDBS 충전 모래에 비하여 모관수대의 두께가 조금 더 줄어드는 경향을 보이나, 일부 측정치를 제외하고는 두 가지 계면활성물질이 동일한 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 모관수대의 두께 비(r_f)와 표면장력비(r_s)의 상관관계는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 1:1 비례선을 만족하고 있다. 이 결과에 따라 계면활성물질이 포함된 수용액을 투입할 때의 모관수대 두께(h_s)를 계면활성물질이 투입되지 않았을 때의 모관수대의 두께(h_o)와 표면장력의 비($r_s = \sigma_s / \sigma_o$, σ_s , σ_o 는 각각

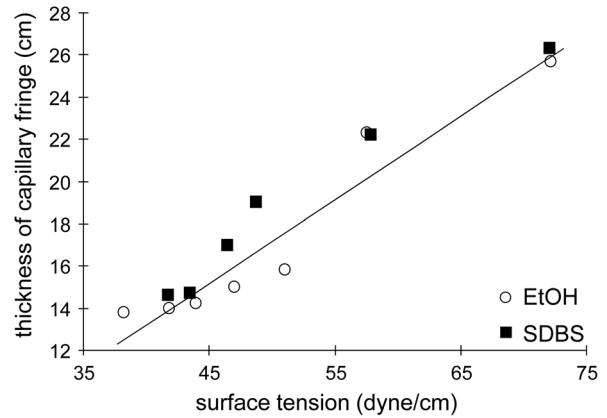


Fig. 4. Surface tension-capillary fringe thickness relationship for sand.

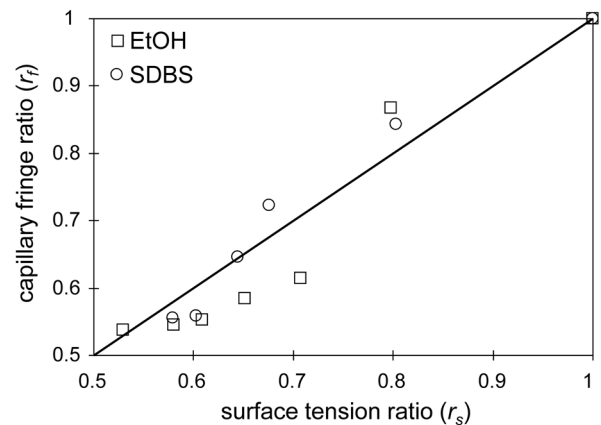


Fig. 5. The normalized relationship between surface tension and the thickness of the capillary fringe.

계면활성물질이 투입된 수용액의 표면장력, 계면활성물질이 없을 때 표면장력)를 이용하여 예측할 수 있다. 토양층에 알코올이나 MTBE(methyl *tert*-butyl ether)등이 다량 포함된 유류가 도입될 경우, capillary fringe의 두께는 이들 유류첨가제에 영향을 받을 수 있다(Freitas and Barker, 2011). 본 연구에서 관측되지는 않았으나 모관수대의 두께가 본 실험결과보다 매우 큰 매질의 경우(예: 점토나 실트질이 포함된 실제 토양), 동일한 표면장력에서 에탄올 수용액이 포화된 모관수대는 밀도가 순수한 물과 유사한 조건(예: SDBS 수용액)의 모관수대 두께보다 더 클 가능성이 있다. 그 이유는 표면장력과 균형을 이루는 힘인 모관수대 수용액에 대한 중력이 에탄올 수용액의 경우 낮은 밀도 때문에 줄어들기 때문이다.

층류수가 포화된 조건에서 Tempe Cell로 측정된 air entry pressure는 18 cm로 측정된 반면, 모델을 이용하여 측정된 air entry pressure는 약 26 cm 였다. 따라서 두

측정방법 간에 뚜렷한 차이가 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 Tempe Cell 측정 시 모세관압력의 기준이 되는 지점이 충전매질 하부에 설치된 Capillary barrier(세라믹 디스크의 형태임)의 하단부이고, 모델에서는 대수층과 모관수대의 경계면이 기준이 되기 때문으로 판단된다. 즉 Tempe Cell의 air entry pressure는 cell에 압력을 가할 때 토양(모래)의 표면에 공기가 유입되기 시작하는 시점에서의 압력이라 볼 수 있다. 이 때 매질 상단에 적용되는 압력은 cell에 연결된 수관의 높이에 의한 압력(hydraulic pressure)에 capillary barrier의 두께와 cell 내부에 충전된 매질의 높이까지 포함한 압력이어야 한다. Tempe Cell에 의하여 측정된 토양수분곡선 상에 표시된 모세관압력은 cell에 연결된 수관의 높이를 표현하므로, 실제 매질상부의 토양(모래)에 적용되는 압력은 이보다 6-7 cm 큰 압력이 작용한다고 볼 수 있다. 따라서 실제 모관수대의 두께를 측정하기 위해서는 일반적인 Tempe Cell로 측정된 air entry pressure에 cell 내부에 충전된 매질의 높이(이는 Tempe Cell 모델마다 상이함)와 모세관압력이 0으로 지정된 수관의 높이와 매질의 하단부(또는 capillary barrier와 매질의 경계면)사이의 거리(즉 수두)를 더하여 모관수대의 두께를 예측하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 증류수로 충전된 Tempe Cell의 air entry pressure가 18 cm이었으므로 여기에 충전모래의 깊이 (5 cm)와 모래하단부와 0 pressure로 설정된 수관까지의 거리 3 cm를 더하면 약 26 cm이며, 이는 모관수대의 두께와 일치한다.

3.2. Brooks and Corey 모델에서 air entry pressure 추정치의 보정

본 연구에서는 Brooks and Corey 모델 (식 (3))을 사용하여 Tempe Cell을 사용하여 측정된 토양수분곡선을 fitting 하고, 상대포화도(S_e) 값이 1이 되는 점에서 air entry pressure (P_d)를 계산하였다. Brooks and Corey 모델은 양변에 대수를 취함으로써 air entry pressure 이상의 모세관압력에서 측정된 포화도를 정확하게 fitting 할 수 있는 모델로 알려져 있으며, 이와 같은 용도로 흔히 사용되고 있다. 그러나 이 모델은 실제 포화도(S_w)가 아닌 상대포화도(S_e)를 사용하여 S_e - P_c 그래프를 fitting함으로써 정확하게 air entry pressure를 추정하는데 문제점이 있다. 실제로 37.8 cmH₂O의 air entry pressure를 갖는 어떤 가상적인 토양의 실제 포화도와 상대포화도 곡선을 Fig. 6에 나타내었다.

해당 토양의 실제 포화도 (S_w)를 나타낸 토양수분곡선

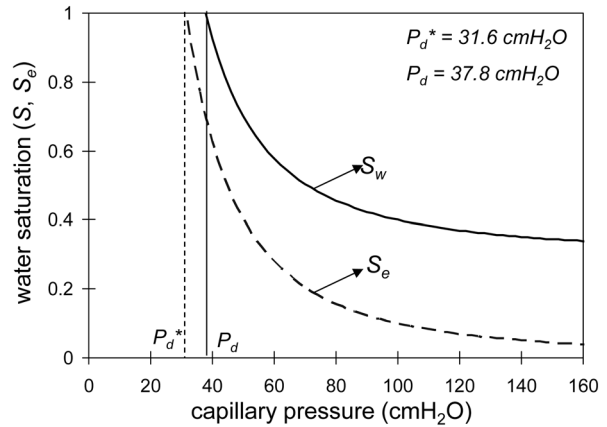


Fig. 6. Soil water retention curves for a hypothetical soil with a residual water saturation of 0.3.

에서 잔류포화도 0.3(가상치)을 뺀 것이 상대포화도 (S_e)이며, S_w 로 나타낸 곡선과 S_e 로 나타낸 곡선이 포화상태가 되는 모세관 압력이 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 잔류포화도가 클수록, 그리고 air entry pressure가 클수록 이와 같은 차이가 더욱 커지게 되므로, Brooks and Corey 모델을 사용하여 air entry pressure를 측정할 때 주의가 필요하다. 즉, 토양수분곡선을 직선화하기 위하여 식 (3)의 양변을 대수화 하면;

$$\log S_e = \lambda \log P_d - C \tag{7}$$

여기에서 C 는 상수이다. 정확한 P_d 값을 구하기 위해서 S_e 가 아닌 S_w 가 1이어야 하므로, 이 조건을 만족하는 식은 다음 식 (8)과 같다.

$$10^{(-\lambda \log P_d + C)} + S_r = 1 \tag{8}$$

식 (7)과 식 (8)에 의하여 각각 구한 air entry pressure를 Fig. 6에 나타내었으며, Fig. 2에 표시된 air entry pressure는 모두 식 (8)을 이용하여 구하였다.

4. 결 론

본 연구는 간단한 모델실험을 통하여 모관수대의 두께와 표면장력간의 상관관계를 정량적으로 입증하였다. 지반환경의 정화를 위하여 계면활성물질(예; 계면활성제, 알코올 등)을 사용하면 모관수대의 두께가 감소할 수 있다는 사실을 인식하고, 이를 예측하고 대응할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 토양수분곡선을 측정하기 위하여 사용되는 Tempe Cell을 통한 air entry

pressure 측정치는 모관수대의 두께와 일치하지 않으며, Tempe Cell 내부의 토양시료 용기의 크기(높이)와 Cell의 모세관 압력 측정 기점의 위치를 면밀히 측정하여 이를 보정할 필요가 있다. Brooks and Corey 모델을 이용하여 추정된 air entry pressure에 잔류포화도를 보정하여야 정확한 air entry pressure를 계산할 수 있으며, 결과적으로 정확한 모관수대의 두께를 계산할 수 있다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임 (2010-0023617).

참 고 문 헌

- Affek, H.P., Ronen, D., and Yakir, D., 1998, Production of CO₂ in the capillary fringe of a deep phreatic aquifer, *Water Resour. Res.*, **34**, 989-996.
- Baehr, A.L., 1987, Selective transport of hydrocarbons in the unsaturated zone due to aqueous and vapor-phase partitioning, *Water Resour. Res.*, **23**, 1926-1938.
- Bear, J. and Cheng, A.H.-D., 2010, Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, 23rd Volume, Springer, New York.
- Brooks, M.C., Annable, M.D., Suresh, P.S.C., Hatfield, K., Jawitz, J.W., Wise, W.R., Wood, A.L., and Enfield, C.G., 2004, Controlled release, blind test of DNAPL remediation by ethanol flushing, *J. Contam. Hydrol.*, **69**, 281-287.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T., 1966, Properties of porous media affecting fluid flow, *J. Irrig. and Drainage Div.*, Proc. ASCE, **92**, 61-88.
- Corey, A.T., 1994, Mechanics of Immiscible Fluids in Porous Media, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, p. 104.
- Freitas, J.F. and Barker, J.F., 2011, Oxygenated gasoline release in the unsaturated zone-Part 1: Source zone behavior, *J. Contam. Hydrol.*, **126**, 153-166.
- Henry, E.J. and Smith, J.E., 2002, The effect of surface-active solutes on water flow and contaminant transport in variably saturated porous media with capillary fringe effect, *J. Contam. Hydrol.*, **56**, 247-270.
- Kim, H., Choi, K., -M., Moon, J. -W., and Annable, M.D., 2006, Changes in air saturation and air-water interfacial area during surfactant-enhanced air sparging in saturated sand, *J. Contam. Hydrol.*, **88**, 23-35.
- Klenk, I.D. and Grathwohl, P., 2002, Transvers vertical dispersion in groundwater and the capillary fringe, *J. Contam. Hydrol.*, **58**, 111-128.
- Maier, U., Rugner, H., and Grathwohl, P., 2007, Gradients controlling natural attenuation of ammonia, *Applied Geochemistry*, **22**, 2606-2617.
- McCarty, K.A. and Johnson, R.L., 1993, Transport of volatile organic compounds across the capillary fringe, *Water Resour. Res.*, **29**, 1675-1683.
- Ronen, D., Scher, H., and Blunt, M., 1997, On the structure and flow processes in the capillary fringe of phreatic aquifer, *Transport in Porous Media*, **28**, 159-180.
- van Genuchten, M. Th., 1980, A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892-898.
- Zhong, L., Mayer, A.S., and Pope, G.A., 2003, The effects of surfactant formulation on nonequilibrium NAPL solubilization, *J. Contam. Hydrol.*, **60**, 55-75.