

단보

모세관 현상에 의한 토양 환경에서의 지하수 거동에 관한 연구

최수아 · 최은진 · 김동수[†]

이화여자대학교 환경학과

Studies on the Mobility of Groundwater in Soil Environment by Capillary Rise Observation

Sua Choi · Eun-Jin Choi · Dong-Su Kim[†]

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University
(Received 6 December 2010, Revised 20 January 2011, Accepted 21 January 2011)

Abstract

The mobility of groundwater in the soil environment has an important role in the soil environment and absorption of plant. Therefore, studies on the mobility of groundwater considering the physical and chemical properties of soil is very important. In this study, movement of water due to change in soil particle size were observed by capillary rise. The height of the capillaries was measured according to capillary diameter, temperature and solution concentration. The inner diameter of each capillary itself is 0.012, 0.016, 0.024, 0.027 cm, and experiments were performed at 22°C. As a result, the height of the capillaries decreased with increasing capillary diameter, and the solution temperature but increased with increasing concentration. Changes in the height of the capillaries are interpreted to related with surface tension by the Young-Laplace equation. Also on the mobility of groundwater, the increase of water and soil temperatures can be significant factors caused by ion strength and global warming as well as pores in the soil particles. The results of this study is considered to provide the basic data on the behavior of groundwater in the soil environment.

keywords : Capillary rise, Groundwater, Ionic strength, Mobility, Soil environment

1. 서론

토양 환경에서의 지하수의 거동은 거시적으로 토양 생태계의 성질을 결정하는데 직접적으로 관여할 뿐 아니라 미시적인 개념에서도 지하수에 용해된 상태로 존재하는 이온들의 이동 및 각종 용해성 물질들의 식물에 의한 흡수 측면에서도 중요한 역할을 한다. 특히 산업의 발달에 따른 다양한 유기 및 무기성 폐기물들이 완전히 처리되지 않은 상황에서 매립 등의 방법에 의해 토양 환경에 유입될 경우, 이들 폐기물들은 강수 등에 의해 용출되어 지하수를 따라 이동하면서 토양환경에 크게 영향을 미치게 된다(김태국 등, 2004). 토양에서 이들 용해성 물질의 거동은 토양 입자의 물리화학적 성질에 의해 직접적으로 결정되어 지는 바, 그 가운데 특히 토양 입자의 크기는 토양환경의 공극의 크기를 결정지음으로써 지하수의 움직임에 대한 특성과 연계된다고 할 수 있다(Macrae et al., 2004). 토양 환경에 매립된 폐기물들이 특히 독성이 있거나 자연 상태에서 그 분해 속도가 느린 난분해성물질(Refractory Substance)일 경우에는 이러한 지하수의 움직임에 의해 이들 물질이 생태계에 영향을 미치는 상황은 상대적으로 오랜 기간 동안 지속되

게 된다(김승현 등, 1998). 따라서 이들에 의한 환경에의 영향을 체계적으로 파악하기 위해서는 토양환경의 성질에 따른 지하수의 거동을 파악함이 필요할 것으로 사료된다.

토양에서의 지하수의 움직임을 결정짓는 토양의 물리화학적 성질들은 앞서 언급한 토양입자의 크기가 가장 중요한 요인으로 작용하는 것으로 간주할 수 있으며, 이와함께 용출된 물질들이 용해된 상태로 존재하고 있는 지하수의 온도를 고려할 수 있다. 그리고 또한 지하수에 용해되어 있는 물질의 농도 역시 지하수의 거동에 영향을 주는 중요한 인자일 것으로 생각할 수 있다. 즉, 지하수의 온도는 물의 점성력 및 표면장력의 크기에 관계됨으로써 토양 분위기에서의 물의 움직임을 결정짓는 중요한 요인으로 작용한다(Miller and Donahue, 1990). 특히, 지구 온난화 현상과 관련하여 토양의 온도 역시 이의 영향을 받게 되고 이의 결과로 지하수의 온도 또한 지속적으로 상승할 것으로 예측할 수 있는 바, 이에 대한 고찰은 향후 토양 생태계의 변화를 파악하는데 있어 필요할 것으로 사료된다. 지하수에 용해되어 있는 물질의 농도와 관련된 사항에서는 일반적으로 폐기물로부터 유래된 용해성 물질이 지하수에서의 농도가 증가할 경우 지하수의 이온강도(Ionic Strength)가 상승하게 되며 이의 결과로 물의 비중이 증가함으로써 지하수의 거동이 영향을 받게 될 것으로 예상할 수 있다(김도희 등, 2004). 또한 용해성 물질의 농도가 변화할 경우 물의

[†] To whom correspondence should be addressed.
dongsu@ewha.ac.kr

표면장력에도 변화를 초래함으로써 지하수의 움직임이 달라질 것으로 고려할 수 있다.

본 연구에서는 지하수의 거동에 영향을 미치는 이러한 토양환경의 물리화학적 영향에 대해 기본적인 현상을 파악하고자 토양 입자의 크기의 변화에 따른 물의 움직임의 변화를 모세관을 이용하여 관찰하고자 하였다. 토양 입자의 크기에 따라 토양 간의 공극이 변하고, 그 공극 사이로 물질들이 거동하기 때문에 모세관의 내경을 변화함에 따른 수주의 높이를 측정하여 토양 환경의 공극의 크기가 물의 움직임에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 또한, 물의 온도와 물질의 이온강도를 변화시키면서 모세관에서의 수주의 높이 변화를 검토함으로써 이들 인자들이 지하수의 움직임에 미치는 영향을 파악하여 정량적인 해석을 시도하였다. 본 연구에서의 결과는 토양 환경에서의 지하수의 움직임에 대한 예측에 관한 의미있는 기본 자료를 제공할 것으로 사료되며 토양에서의 폐기물의 효과적인 처리에 대해서도 기초적인 개념을 설정하는데 활용될 수 있을 것으로 고려된다.

2. 연구방법

2.1. 모세관현상

모세관현상은 물위에 가는 관을 세우게 되면 모세관 내의 수위가 상승하게 되는 현상을 말한다. 이는 모세관에 대한 액체 입자의 부착력이 모세관 내 물의 중량보다 크기 때문이며 그 차이만큼 수위가 상승하게 된다. 토양환경에서 나타나는 모세관현상은 토양입자와 물분자간의 인력이 낮은 곳에서 높은 곳으로 진행되는 것이 일반적이다.

모세관 현상은 입자간의 응집력과 액체와 모세관 벽과의 부착력의 상대적인 크기에 의해 결정되어지는데 일반적으로 증류수는 표면에서 오목한 면을 가진다. 또한 모세관현상은 표면장력의 영향을 받는데 용해된 물질의 이온성에 따라 표면장력의 크기가 결정된다. 따라서 토양 내에 포함된 물질의 종류와 양에 따라 토양 수분의 이동속도 및 환경이 달라질 수 있다.

2.2. 실험방법

본 연구에서는 모세관의 내경, 온도 및 농도에 따른 모세관 수주의 높이 변화를 측정하였으며 이를 위한 모세관은 자체 제작하였다. 제작한 모세관의 각 내경은 0.012, 0.016, 0.024, 0.027 cm이며 온도에 따른 변화를 제외한 모든 실험은 실온 22°C에서 수행하였다.

모세관 내경에 따른 모세관 수주의 높이의 측정을 위해 토양의 온도(지하수의 온도) 및 수중 이온의 농도는 일정하게 유지하고 오직 토양 입자의 크기에 의한 공극변화를 변수로 두어 모세관 오목의 높이를 측정하였다. 각 모세관을 대상으로 1차 증류수를 페트리 접시에 담은 후 증류수가 모세관에 끝까지 올라갈 수 있도록 충분한 시간을 준 뒤, 각각의 수주를 측정 하였다.

온도에 따른 모세관 수주의 높이 측정을 위한 시료는 증류수이며 실험온도의 범위를 6°C에서 97°C로 정하였다. 실

온보다 낮은 온도에서의 측정의 경우 실험 2시간 전 냉동실에 사용할 증류수를 넣어 둔 후, 온도계로 증류수의 온도를 측정 후 모세관의 내경별 수주의 높이를 측정하였다. 실온 이상의 온도에 대해서는 증류수를 Hot Plate로 가열하여 사용하였으며, 측정된 온도는 6°C, 20°C, 35°C, 85°C, 97°C이다. 실제 토양환경내의 온도변화는 10°C 안팎으로 일어나는 것이 일반적이거나 전반적인 온도에 의한 경향성을 알아보는 것은 매우 중요하다고 판단되어 넓은 범위의 온도에 대해 실험을 수행하였다.

또한 무기성 염류의 농도에 따른 모세관 수주의 높이를 측정하였으며 무기성 염류의 농도에 대한 변수는 NaCl로 조절하였다. 이는 지하수의 이온강도의 변화에만 초점을 둔 것이며 실험방법은 측정 5시간전 NaCl 용액의 농도를 각각 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 1 M로 조제하여 충분한 시간동안 교반한 후 페트리 접시에 담아 내경별로 모세관의 수주의 높이를 측정하였다.

2.3. Young-Laplace equation

일반적으로 모세관의 이동거리는 관이 가능수록 길다. 모세관 내의 액체의 이동과 그 표면장력 측정은 두 상간 곡면에서의 역학적 평형에 대한 조건을 유도한 Young-Laplace equation을 통해서 알아볼 수 있다.

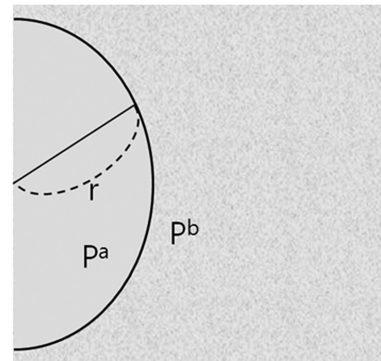


Fig. 1. Pressure difference of phase boundary equilibrium in the curved surface.

곡률반지름이 r 인 구표면에 대하여 구의 안 쪽 상 a 의 압력을 P^a , 바깥쪽 상 b 의 압력을 P^b 라 하자. 이 때, 상 a 의 부피가 dV 만큼 가역팽창 한다고 가정하면 필요한 일은 $dW = (P^a - P^b) dV$ 이며 이는 γdA 와 동일한 값이다.

이 값들에 대해 구의 부피와 표면적에 대해 적용하여 정리하면 다음과 같은 식이 성립하며,

$$(P^a - P^b) \times \frac{d}{dr} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) = \gamma \frac{d}{dr} (4\pi r^2) \quad (1)$$

이는 다음의 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta P = P^a - P^b = \frac{2\gamma}{r} \quad (2)$$

이 식 (2)가 곡률반지름이 r 인 구표면에 대한 Young-Laplace equation이다(Atkins and de Paula, 2006).

Young-Laplace equation을 기본으로 하여 모세관 내 액체 이동과 표면장력에 관해 수치화 할 수 있다. Fig. 2는 표면의 곡률반지름이 r 인 모세관이며 이 모세관에서, $\cos\theta = \frac{R}{r}$, $\Delta P = (2\gamma\cos\theta)/R$ (dyens/cm²)으로 나타낼 수 있다. 또한 모세관오름에 대해 상승한 액체의 무게는 $\pi R^2 gh \Delta\rho$ (dyens)이고, 이에 대한 단위넓이 당 작용하는 힘은 $gh\Delta\rho$ (dyens/cm²)이다.

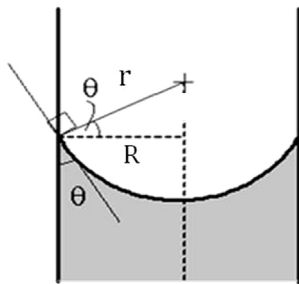


Fig. 2. Capillary meniscus depending on contact angle.

따라서 반경이 R 인 모세관에서 관을 따라 상승하는 액체의 높이와 기둥의 접촉각에 의한 표면장력을 다음과 같이 표현할 수 있다(Finn, 1999; Pellicer et al., 2000).

$$\frac{2\gamma \cos\theta}{R} = gh \Delta\rho \tag{3}$$

식 (3)을 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\gamma = \frac{Rh \Delta\rho g}{2 \cos\theta} \tag{4}$$

여기서,

- γ = surface tension (dynes/cm),
- R = diameter of capillary (cm),

- h = rising height (cm),
- ρ = density (g/cm³),
- g = acceleration of gravity (dynes/g)

3. 결과 및 고찰

3.1. 모세관현상에 대한 해석

실험방법에 제시한 바와 같이 모세관의 내경, 용액의 농도 및 온도에 따른 모세관 수주의 높이를 측정하여 그 결과를 제시하고 이에 대해 고찰하였다. 식 (4)에서 제시한 식에 대입하여 모세관 수주로부터 계산된 표면장력의 값은 Table 1에 나타내었다.

3.1.1. 내경의 변화에 따른 모세관현상

각각의 모세관에 대해 증류수가 이동한 수주의 높이를 측정된 결과는 Fig. 3에 제시한 바와 같다.

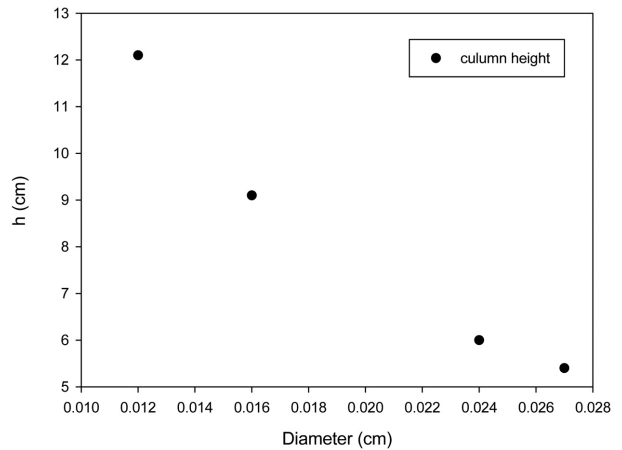


Fig. 3. Capillary rise depending on tube diameter.

Fig. 3을 살펴보면 모세관의 내경의 크기와 측정된 모세관 수주의 높이가 반비례함을 알 수 있다. 일반적으로 모세관의 내경이 작을수록 액체의 이동거리는 길며 이는 앞서 살펴본 식 (4)를 통해서도 알 수 있다. 또한 모세관에서

Table 1. Surface tension depending on solution concentration and temperature

variable		diameter (cm)				
		0	0.012	0.016	0.024	0.027
concentration (M)	0	-	-	-	-	59.070
	0.0001	69.795	62.324	88.364	60.510	
	0.001	71.076	62.751	89.004	-	
	0.01	-	64.032	-	-	
	0.1	74.277	66.593	91.566	69.155	
temperature (°C)	6	-	85.376	113.977	82.121	
	16	-	-	-	79.240	
	20	71.716	84.522	-	77.799	
	27	70.435	83.668	103.732	-	
	35	69.795	82.815	-	-	
	82	67.234	81.107	96.048	-	
	97	-	-	93.487	69.155	

의 이동거리가 길 때, 액체의 이동속도는 느리고 관의 내경이 크면 액체의 이동거리가 짧은 반면 이동속도는 빠르다. 따라서 지하수 내 토양의 입자의 크기에 따른 공극의 크기에 따라 지하수의 이동속도를 결정하는 요인이 될 수 있다.

3.1.2. 농도의 변화에 따른 모세관현상

Fig. 4는 농도에 대한 모세관 수주의 높이를 각 모세관의 내경별로 나타낸 것이다.

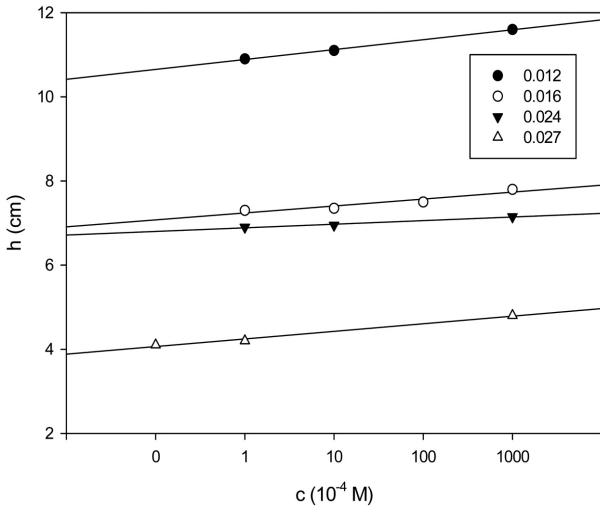


Fig. 4. Capillary rise depending on solution concentration.

이 결과로 알 수 있듯이 용액의 농도가 증가할 때 모세관의 수주의 높이는 증가하며 이는 앞서 설명한 증가된 표면장력의 영향인 것으로 사료된다. 이는 토양 내 이온성 물질이 유입되면 지하수의 이온강도를 변화시켜 지하수의 거동에 영향을 줄 수 있다. 또한 증가된 기울기기를 보면, 네 개의 모세관 중 내경이 가장 큰 것(0.027 cm)과 가장 작은 것(0.012 cm)의 기울기가 가장 큰 것으로 나타났으며 이는 토양 내 지하수의 거동이 이온강도의 차이 뿐 아니라 토양 입자의 공극 등 여러 요인에 의해 결정되기 때문인 것으로 사료된다.

3.1.3. 온도의 변화에 따른 모세관현상

온도에 따른 모세관 수주의 높이 변화를 측정한 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 이는 hot plate를 이용해 증류수의 온도를 조절하고 제작한 네 개의 모세관에 대해 각각 실험을 수행한 결과이다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 온도가 높아짐에 따라 모세관 수주의 높이가 감소하였다. 이는 용액의 온도가 높아질수록 표면장력은 감소하며 이를 따라 모세관 수주의 높이도 감소한 때문인 것으로 보인다. 또한 위에서 살펴본 농도의 변화에 따른 모세관 수주의 높이변화의 결과와 비교하여 볼 때, 각각의 결과가 모세관 내경에 따라 차례대로 나타났으며 이는 3.1.1에서 살펴본 결과와 일치함을 알 수 있다.

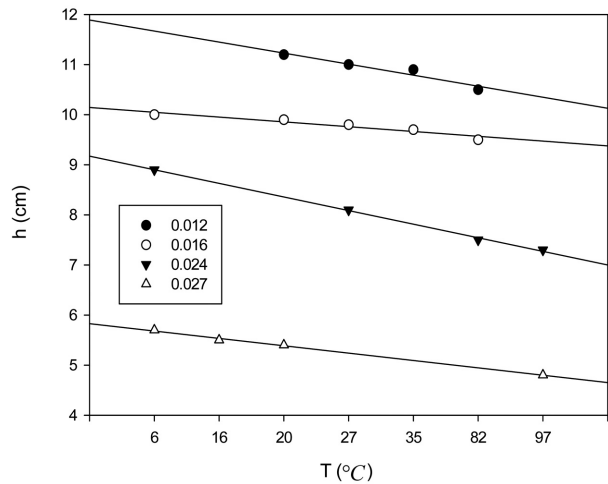


Fig. 5. Capillary rise depending on temperature.

3.2. 토양환경에서의 지하수 거동

앞서 살펴본 바와 같이 모세관의 수주의 높이는 모세관 내경이 작을수록, 용액의 농도가 높을수록, 그리고 용액의 온도가 낮을수록 높게 나타나는 것으로 나타났다. 모세관에서의 용액의 이동은 액체분자간의 응집력과 액체분자와 모세관 벽의 부착력에 의해 결정된다. 지하수 내에 오염물질이 유입되면 지하수의 표면장력을 변화시킨다. 만약 이온성 염과 같은 용질이 유입된다면 이온의 인력에 의해 물분자를 끌어당겨 지하수의 표면장력을 증가시키고 이에 따라 지하수의 이동속도는 저하될 것이다. 이와 반대로 지방산 등의 유기물질이 유입되면 표면장력은 감소하고 지하수의 흐름을 증가시킬 것이다. 따라서 토양에서의 폐기물에 의한 지하수로의 물질의 유입은 지하수의 거동에 중요한 요인이 되며 수용성 물질의 효과적인 처리를 통해 그 영향을 줄이는 것이 필요하다 하겠다.

온도에 대한 모세관현상의 측정 결과, 토양내 지하수의 온도가 증가하면 표면장력이 감소해 그 흐름이 증가될 것으로 보이며, 이는 온폐수의 유입, 또는 토양전체의 환경이 온도 상승되었을 때의 상황을 예측하게 한다. 지구온난화로 인한 대기온도의 상승과 더불어 토양의 온도가 상승되면 이는 지하수의 온도상승을 야기하고 이로 인해 지하수의 거동은 변화할 것으로 사료된다.

4. 결론

토양환경에서의 지하수의 거동의 물리화학적인 영향에 대한 기본적 현상을 파악하고자 모세관현상을 관찰하였다. 자체제작한 모세관을 이용해 모세관의 내경, 농도변화, 온도변화에 따른 모세관 수주의 높이를 측정한 결과, 모세관 내경이 증가함에 따라 모세관 수주의 높이가 감소하였으며 이는 Young-Laplace equation에 의해 동일한 시료에 대해 표면장력이 일정할 때 모세관 수주의 높이는 모세관의 내경과 반비례하는 것을 알 수 있었으며 토양의 입자의 크기에 따라 지하수의 흐름이 달라짐을 적용할 수 있었다. 또한 용액의 농도가 증가함에 따라 모세관 수주의 높이가 증

가하였으며 이는 지하수 내 이온의 유입에 따른 이온강도에 의해 표면장력이 달라지며 이에 따라 지하수의 흐름이 달라질 수 있음을 의미한다 하겠다. 온도에 따른 모세관 수주의 높이 변화는 온도변화와 반비례하는 결과를 나타냈으며 토양 및 지하수의 온도 변화가 지하수의 거동에 영향을 줄 수 있으며 이는 지구온난화에 의한 영향을 고려할 수 있음을 시사한다.

지하수의 거동에 있어 농도와 온도 및 토양입자의 공극은 중요한 요인이 되며 따라서 본 연구가 지하수의 거동을 해석함에 있어 가치있다 하겠다. 한편 앞서 언급한 바와 같이 지하수의 흐름은 단순한 토양입자 간 공극의 차이, 온도변화, 농도의 차이 등 하나의 요인으로 해석되지 않으므로 차후 다른 요인들과 복합적인 연구를 추가로 수행한다면 의미있는 연구의 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 2009년 서울지역 환경기술개발센터의 연구개발사업(과제번호: SEST2009-0927072) 및 지질자원연구원/ERC(No. 2009-0093461)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김도희, 안효원, 조재원(2004). Flow Field Flow Fraction (FI-FFF)를 이용한 멤브레인 전하 및 이온강도가 자연유기물 분리 및 멤브레인 오염에 미치는 영향. *대한환경공학회지*, **26**(7), pp. 798-803.
- 김승현, 이영득, 하원숙, 노희명(1998). 비포화 무기성 다공매질에서 잔류농약의 계면거동 및 지하수 오염현상 연구. *대한환경공학회지*, **20**(11), pp. 1545-1553.
- 김태국, 이영희, 강일식, 홍대석, 조한석, 손종식(2004). 방사성 오염토양의 세척처리 연구. *추계학술연구발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 1531-1537.
- Atkins, P. and de Paula, J. (2006). *Physical Chemistry*. Oxford.
- Finn, R. (1999). Capillary surface interfaces. *Notices of AMS*, **46**(7), pp. 770-781.
- Macrae, M. L., Redding, T. E., Creed, I. F., Bell, W. R., and Devito, K. J. (2004). Soil, surface water and ground water phosphorus relationships in a partially harvested Boreal Plain aspen catchment. *Forest Ecology and Management*, **206**(2005), pp. 315-329.
- Miller, R. W. and Donahue, R. L. (1990). *Soils. An Introduction to Soils and Plant Growth*, Prentice-Hall.
- Pellicer, J., Garcia-Morales, V., and hernández, M. J. (2000). On the demonstration of the Young-Laplace equation in introductory physics courses. *Phys. Educ.*, **35**(2) pp. 126-129.