



ORIGINAL PAPER

원저

## 토양 칼럼의 경계흐름과 계면활성제가 수리전도도에 미치는 영향연구

정승우<sup>†</sup>, 주병규

군산대학교 환경공학과

(2009년 3월 5일 접수, 2009년 3월 22일 채택)

### Effects of Column Boundary Flow and Surfactant Contents on Soil Hydraulic Conductivity

Seung-Woo Jeong, Byung-Kyu Ju

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

#### ABSTRACT

The hydraulic conductivity of porous media is the most important property in soil characteristics. The hydraulic conductivity is determined by outdoor and indoor methods.

Indoor methods normally use soil columns for flow test. Assumption of the column test is that fluid one-dimensionally flows through the column. However, fluids may flow toward the wall of the column, resulting in "boundary flow". This study investigated the effect of boundary flow on the hydraulic conductivity by using a permeameter excluding boundary flow. The results showed that the hydraulic conductivity excluding boundary flow was much smaller than the hydraulic conductivity employing the conventional determination method. This study also investigated the effects of particle size and surfactant on the hydraulic conductivity. As the particle size increased, the hydraulic conductivity was increased. The hydraulic conductivity was reduced by increasing surfactant concentration. The result showed that the viscosity of fluid significantly affected the determination of hydraulic conductivity.

Keywords : hydraulic conductivity, permeability, permeameter, boundary flow, surfactant

#### 초 록

수리전도도는 다공성매체 시스템의 중요한 특성인자이다. 수리전도도를 측정하는 방법은 실외측정방법과 실내측정방법이 있다. 수리전도도의 실내측정은 일반적으로 투수측정기를 이용한다. 기존의 투수측정방

<sup>†</sup>Corresponding author : swjeong@kunsan.ac.kr

식으로 산정한 수리전도도는 경계흐름의 영향을 고려하지 않고 모든 유체가 수직으로 이동한다는 가정으로 결정되었다. 하지만 실제 토양에서 유체는 수직, 좌우 방향으로 이동할 수 있다. 본 연구에서는 경계흐름을 배제한 투수계를 이용하여 경계흐름이 수리전도도에 미치는 영향을 평가하였다. 실험결과 기존방식으로 산정한 수리전도도에 비해 경계흐름을 배제한 수리전도도가 약 1/3에 해당하였다. 투수측정기를 이용한 수리전도도 측정에 있어 경계흐름에 대한 영향을 고려한 수리전도도 결정이 필요하다. 또한 토양 입경과 계면활성제가 수리전도도에 미치는 영향을 파악하였다. 토양입경과 수리전도도는 비례하는 것으로 나타났으며 계면활성제는 수리전도도를 감소시키는 것으로 확인되었다. 계면활성제 농도가 증가할수록 수리전도도는 보다 많이 감소하였다. 수리전도도를 결정하는 물리적 특성을 평가한 결과 유체의 점도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 수리전도도, 투수계수, 투수측정기, 경계흐름, 계면활성제

## 1. 서론

수리전도도는 토양 및 지하수환경의 해석 및 공학적 문제 해결에 있어 중요한 설계인자이다. 농경지 토양에 있어 수리전도는 농작물의 생육에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 환경공학분야에서는 토양 및 지하수 오염정화 설계를 위하여 꼭 필요한 정보이다. 수리전도도 또는 투수계수의 측정은 현장에서 직접 측정하는 방법이 있으나 토양시료 및 코아샘플을 취한 후 실험실에서 칼럼을 이용하여 수리전도도를 측정하는 방법 혹은 토양의 물리·화학적 특성을 이용하여 예측하는 방법이 있다.

현장에서의 대수층 수리전도도 측정방법으로 사용되는 양수시험, slug 테스트, 추적자 시험 등이 있으며, 불포화토양층의 침투속도 측정을 위해 Guelph투수계측정법이 널리 사용되고 있다<sup>1),2)</sup>. Guelph 투수계는 현장토양에 깊이 20~60cm정도로 오거홀을 만들어 수리전도도를 측정한다. Guelph 투수계는 가운데의 원통에 물을 채워 토양층으로 충전되는 물의 유량을 측정하여 수리전도도를 산정하는 방식이다. 실험실에서는 일반적으로 정수위, 변수위 측정방식의 칼럼 투수계를 사용하고 있다<sup>3)</sup>.

칼럼을 사용한 수리전도도 측정방법에서 칼럼벽면을 타고 흐르는 경계흐름(boundary flow) 등의 현상이 발생하므로 실제현장의 상황과 매우 상이한 결과를 나타낼 수 있다<sup>4)</sup>. 즉 x축으로 전달되는 유체의 흐름이 칼럼의 벽에 의해 y축으로 전달되

어 실제의 유출량보다 많은 양의 결과를 얻을 수 있다. 지금까지 많은 수리전도도 측정실험에서 칼럼을 사용하고 있지만 칼럼 사용의 한계에 대한 연구가 미진한 것이 사실이다. 대부분 칼럼 실험의 가정은 1차원 흐름을 가정하고 있으나, 칼럼의 직경이 커질수록 또는 불균질한 토양을 충전하여 실험할 경우 유체의 흐름방향과 다른 흐름이 형성될 가능성이 크다<sup>5)</sup>.

칼럼 벽면과 수직 또는 접촉되는 방향의 물의 흐름은 경계면에 의해 흐름의 방향이 수정되므로 칼럼으로 부터의 유출량은 실제 유출량보다 많은 양의 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 경계흐름과 내부흐름을 구분한 칼럼 실험장치를 사용하여 경계흐름이 전체유량과 궁극적인 수리전도도 결정에 미치는 영향을 조사하였다.

근래 비수용성용매(Nonaqueous phase liquid)로 오염된 토양 복원을 위하여 계면활성제 세정법의 사용이 증가하고 있다. 계면활성제 세정법의 중요한 설계인자는 복원유체인 계면활성제 용액의 수리전도도인 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>. 본 연구에서는 또한 토양입자 크기에 따라 계면활성제가 수리전도도에 미치는 영향에 대하여 아울러 조사하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 토양시료 및 계면활성제

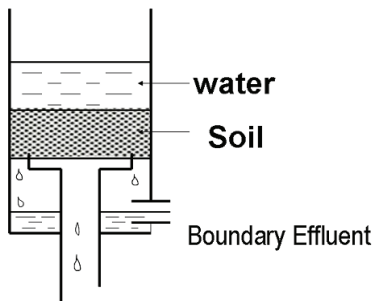
토양시료는 군산대학교 인근에서 채취하였다. 채

취된 토양시료는 체분석을(ASTM Testing Seive) 통하여 3가지로 입경크기 분포(53~106 $\mu$ m, 106~250 $\mu$ m, 250~600 $\mu$ m)별로 분리하여 실험에 사용하였다. 입경크기 별로 토성분석표(C. W. Fetter., 1994)에 의하여 53~106 $\mu$ m는 Very fine, 106~250 $\mu$ m는 Fine, 250~600 $\mu$ m는 Medium으로 분류된다. 따라서 실험에 이용한 토양시료는 사질토양이었다.

계면활성제가 수리전도도에 미치는 영향을 평가하기 위해 실험에 이용한 계면활성제는 Sodium Alpha Olefin Sulfonate :  $RCH=CH(CH_2)_nSO_3Na$ 로 (주)애경정밀화학에서 제공받았다. Sodium Alpha Olefin Sulfonate는 음이온 계면활성제로서 약 23℃에서 원액의 점도는 35.56 $\pm$ 0.06(cp), 밀도는 1.017 $\pm$ 0.003(g/ml)이다. 계면활성제 농도 0.5%, 1.5%, 3% 용액은 증류수와 부피비로 혼합하여 조제하였다.

2.2 투수실험장치 및 실험방법

칼럼의 경계흐름을 분류할 수 있도록 (Fig. 1)과 같은 투수실험장치를 제작하였다. 제작된 투수실험장치는 경계흐름에 의한 유출수와 내부 유출수 별도로 분리할 수 있도록 하였다. 따라서 내부 유출수만에 의해서 계산되는 수리전도도는 내부 수리전도도 (actual K)라고 정의하였고, 내부유출수와 경계흐름에 의한 유출수 모두를 고려하여 계산된 수리전도도는 총수리전도도 (apparent K)로 정의하였다.



(Fig. 1) Permeameter used for determining hydraulic conductivity.

토양시료는 앞서 언급한 바와 같이 체분석을 통하여 3가지 입경크기 분포(53~106 $\mu$ m, 106~250 $\mu$ m, 250~600 $\mu$ m)별로 분리하여 실험에 사용하였다. 투수계에 유리솜을 깔고 토양시료를 투수실험장치에 위치시킨 후 투수실험장치의 넓이와 유사한 고무마개(#13)를 토양위에 20번 떨어뜨려 토양 다짐을 하였다.

투수계의 유출관(내부유출관, 외부유출관)에 각각 250ml 비커를 위치시켜 유출관을 통하여 배출되는 유출수의 유량을 측정하였다. 유량펌프를 이용하여 투수실험장치에 일정하게 준비된 용액을 주입하였다. 주입용액은 증류수에 0.01N CaSO<sub>4</sub> 첨가시켜 물의 activity를 맞추주었으며, 계면활성제 실험의 경우 sodium olefin sulfonate AOS 0.5, 1.5, 3%용액을 제조하여 사용하였다. 토양위의 수위는 일정하게 (정수위측정방법) 유지하여 일정한 수리구배가 형성되도록 하였다. 시간이 경과한 후 유출량의 변화가 비교적 적은 시점을 시스템이 안정화 된 것으로 보고, 내부유출량과 외부유출량을 측정하였다. 모든 실험은 3번의 반복실험을 통하여 평균 결과를 얻었다.

2.3 수리전도도 산정

수리전도도는 다공성매체를 통한 물의 이동과 수리구배와의 관계를 설정한 Darcy's law에 의하여 구해진다.

$$J = -K \cdot dH/dZ \dots\dots\dots (1)$$

J : 일정한 면적을 통해 흐르는 물의 부피를 단위시간으로 나눈 값 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>·sec

K : 수리전도도 cm/sec

dH/dZ : 수리 구배 또는 동수 구배

제작된 투수계(permeameter)는 칼럼경계흐름 현상이 미치는 영향을 배제할 수 있을 뿐 아니라 경계흐름양 또한 동시에 평가할 수 있도록 제작되었다. 이 투수계에 적절한 식은 다음과 같다.

$$J = \frac{Q}{A} = \frac{V}{At} = -K \frac{(h+z)}{z} \dots\dots\dots (2)$$

$$K = \frac{Vz}{At(h+z)} \dots\dots\dots (3)$$

- K : 수리전도도 cm/sec
- V : 유출수 부피, cm<sup>3</sup>
- t : 유출수 수집시간, sec
- A : 토양 단면적, 내부유출관의 단면적 cm<sup>2</sup>
- h : 토양층위 물 높이
- z : 토양 높이

**2.4 밀도와 점도 측정방법**

실험에 사용된 용액의 밀도와 점도를 측정하였다. 밀도와 점도측정은 23°C±0.5에서 측정하였고 물질당 각각 3회씩 측정하였다. 밀도측정은 마이크로피펫(Biohit m1000)을 이용하여 1ml당 무게(g)를 전자저울(OHAUS)을 이용하여 측정하였다. 점도측정은 점도계(Brookfield, DV-II)를 이용하여 측정하였다.

**3. 결과 및 고찰**

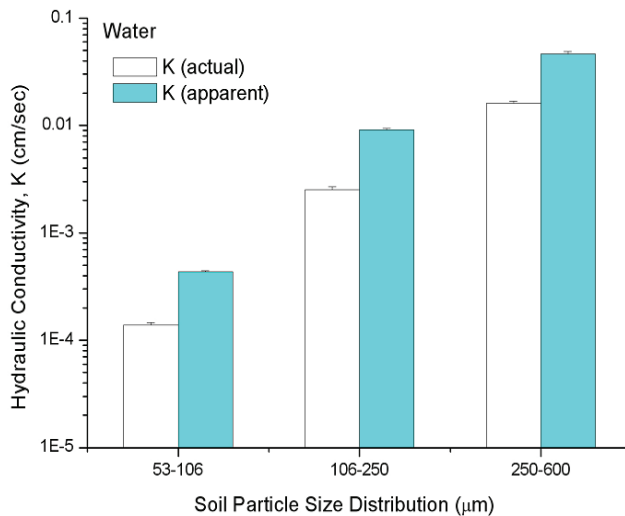
**3.1 토양의 입경과 칼럼의 경계흐름이 수리전도도에 미치는 영향**

내부유출과 외부유출을 구분하여 측정할 수 있는

투수계를 이용하여 수리전도도 실험을 진행하였다. 평가인자는 입경크기가 수리전도도에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하였다. 물을 사용한 토양입자 크기별 수리전도도의 차이는 [Fig. 1]에 도시한 바와 같다. 토양 입자 크기가 작아질수록 일반적으로 수리전도도는 감소하였다. 또한 [Fig. 1]은 내부수리전도도(actual K)와 총수리전도도(apparent K)를 대비시켜 비교하였다.

내부수리전도도는 칼럼 경계흐름을 제거하기 위하여 설치한 내부유출관을 통하여 배출되는 유출수의 양만을 측정하여 수리전도도를 측정한 값이다. 반면, 총수리전도도는 기존의 칼럼 실험방법대로 내부유출관을 통한 유출수 뿐만 아니라 경계흐름에 의한 외부유출수량도 포함하여 계산된 수리전도도이다. 실험결과, 내부수리전도도와 총수리전도도는 상당히 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

[Fig. 2]의 y축은 log scale로 표기되어 있어 그 차이가 적은 것으로 보이지만 총수리전도도 대비 내부수리전도도 값은 53~160 μm, 160~250 μm, 250~600 μm 분포별로 각각 0.32, 0.28, 0.35에 이르는 등 거의 1/3에 해당하였다. 이는 칼럼내 물의 흐름방향과 수직방향으로 진행할 수 있는 물의 흐름이 모두 칼럼의 boundary에 의하여



[Fig. 2] Effect of boundary flow on hydraulic conductivity.

물과 평행한 방향으로 물이 진행되어 칼럼으로 유출되어 나오기 때문이다.

본 연구에서 사용한 Eq. (3)의 A는 칼럼의 전체 단면적이 아닌 내부 유출관으로 연결된 부위의 토양 단면적만을 계산하여 수리전도도를 계산한 것이다. 기존의 수리전도도 방법에 비하여 이와 같이 큰 차이를 나타낸다는 것은 수리전도도 값의 응용에 주의와 관심이 필요하다는 점을 시사한다. 즉 투수성이 좋은 토양으로 판단하여 조성한 농경지에서 투수성이 원하는 만큼 나오지 않을 수 있으며, 지하수 관정에서 원하는 만큼의 지하수를 얻지 못할 수도 있을 것이다. 또한 환경복원분야의 양수처리법과 같은 복원방법에 있어 신뢰되는 수리전도도의 취득은 설계와 운영에 있어 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다.

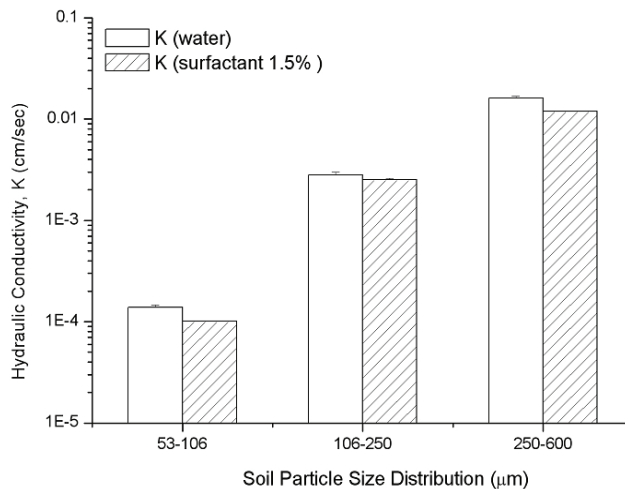
### 3.2 계면활성제가 수리전도도에 미치는 영향

[Fig. 3]은 계면활성제가 수리전도도에 미치는 영향을 도시한 것이다. 계면활성제용액 부피비 1.5% 농도로 희석된 용액을 수리전도도 실험에 사용하여 물만 사용한 수리전도도 값과 비교 분석하였다. 계면활성제가 유체에 포함될 경우 수리전도

도는 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다. [Fig. 2]의 y축이 log scale로 표시되어 그 차이가 미묘하게 나타났지만 K(water)대비 K(surfactant 1.5%) 값은 53~160 μm, 160~250 μm, 250~600 μm 분포별로 각각 0.73, 0.89, 0.74에 이르렀다. 계면활성제가 함유될 경우 토양입자크기에 상관없이 수리전도도가 감소하는 특징을 지니고 있다.

[Fig. 4]는 계면활성제 농도변화에 따른 수리전도도의 감소를 나타낸 것이다. 계면활성제 농도가 0%일 때의 수리전도도를 1로 가정하면 계면활성제 농도 0.5%의 수리전도도는 0.81, 농도 1.5%는 0.74, 농도 3%는 0.65로 계면활성제의 농도가 증가할수록 수리전도도는 보다 많이 감소하였다. 계면활성제는 critical micelle concentration을 초과하는 농도범위에서는 micelle을 형성한다. micelle은 토양표면에 흡착하여 물의 흐름을 방해하므로 수리전도도를 감소시키는 것으로 판단된다. 또한 계면활성제 농도가 증가할수록 점도가 증가할 수 있으며 이는 수리전도도의 감소를 초래한다<sup>7)</sup>.

일반적으로 수리전도도는 Eq. (4)과 같은 물리적 인자에 의해 값이 결정된다<sup>8)</sup>.



[Fig. 3] Comparison of water-hydraulic conductivities with surfactant-hydraulic conductivities.

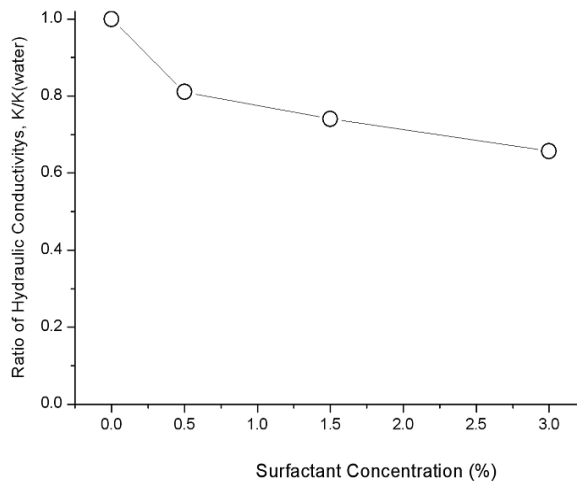
$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \dots\dots\dots (4)$$

Eq.(4)에서 K는 수리전도도, k는 투수계수,  $\mu$ 는 점도,  $\rho$ 는 밀도, g는 중력가속도이다. 투수계수 k는 다공성 매체의 특성을 나타내고  $\rho$ ,  $\mu$ 는 유체의 특성을 나타낸다. Eq.(4)에 의하면 수리전도도는 다공성 매체와 유체의 특성에 의해 달라진다는 것을 알 수 있다. 수리전도도는 점도와 반비례 관계이므로 점도가 증가하게 되면 수리전도도는 감소한다. [Table 1]에 나타낸 바와 같이 계면활성제의 구성비율이 높아질 수록 밀도와 점도가 증가한다. [Fig. 4]결과와 같이 계면활성제 농도가 증가할수록 수리전도도는 감소하였다. 수리전도도 영향인자인 밀도와 점도 중 계면활성제용액의 경

우 점도가 보다 수리전도도 결정에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 계면활성제 사용에 따른 투수계수의 감소의 영향으로는 미생물 증식 및 흡착에 의한 막힘현상, 계면활성제와 수중에서 이온결합으로 인한 침전물 형성 등에 의해 수리전도도가 감소한다고 알려져 있다<sup>9),10),11)</sup>.

#### 4. 결론

- 1) 칼럼 경계흐름(Boundary flow)은 과도한 수리전도도 결과를 야기할 수 있었다.
- 2) 칼럼 경계흐름의 영향을 최소화한 실험장치로부터 얻은 수리전도도는 그렇지 않은 수리전도도에 비하여 1/3값에 불과하였다.



[Fig. 4] Effect of surfactant concentration on hydraulic conductivity (soil particle size distribution : 250-600 $\mu$ m).

[Table 1] Density and Viscosity of Solutions

	Density(g/ml)	Viscosity(cp)
Water	1.0007 $\pm$ 0.0024	0.94 $\pm$ 0.01
Surfactant, AOS 0.5%*	0.9996 $\pm$ 0.0003	0.9433 $\pm$ 0.0152
Surfactant, AOS 1.5%*	1.0053 $\pm$ 0.0033	0.9766 $\pm$ 0.0057
Surfactant, AOS 3%*	1.0066 $\pm$ 0.002	1.0033 $\pm$ 0.0057

\* volume basis

- 3) 계면활성제의 사용은 토양입자크기와 상관없이 전반적으로 수리전도도를 감소시킨다. 또한 사용된 계면활성제의 농도가 증가할수록 수리전도도가 감소한다.
- 4) 수리전도도의 결정에 영향을 미치는 유체특성인자인 밀도와 점도중 계면활성제용액의 경우 점도가 보다 수리전도도 결정에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 5) 올바른 수리전도도의 획득은 다공성매체 시스템 해석 및 적용에 있어 가장 중요한 설계인자이므로 정확한 실험방법과 해석을 통하여 그 값을 적용해야 할 것으로 판단된다.

## 사사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2007-000-21106-0)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 이민효, 최상일, 이재영, 이강근, 박재우, 토양 지하수환경, 동화기술, pp. 80~92 (2006).
2. 박승기, "Guelph 투수계의 수문학 분야 활용", 한국관계배수, 7(1), pp. 74~78 (2000).
3. Bedient P.B, Rifai H.S., and Newell C.J., Groundwater Contamination: Transport and Remediation, Prentice Hall Inc., p. 20 (1994).
4. Mcneal B. L. and Reeve R. C., "Elimination of boundary-flow errors in laboratory hydraulic conductivity measurements", Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28, pp. 713~714 (1964).
5. Tokenuga T.K., "Laboratory permeability errors from annular wall flow", Soil Sci. Soc. America J., 52, pp. 24~28 (1988).
6. NAVFAC, Surfactant Enhanced Aquifer Remediation Design Manual, Naval Facilities Engineering Command, pp. 5~7 (2002).
7. Vivek J. and Demond A. H., "Impact of surfactants for aquifer remediation on physical properties of the aqueous phase", J. Contam. Hydrol., 40, pp. 25~35 (1999).
8. 정승우, 안윤주, 이병진, 토양복원공학, 동화기술, pp. 95~96 (2009).
9. Renshaw C.E., Zynda G.D., and Fountain J.C., "Permeability reductions induced by sorption of surfactant", Water Resour. Res., 33, pp. 371~378 (1997).
10. Wiesner M.R., Grant M.C., and Huchins S.R., "Reduced permeability in groundwater remediation systems: Role of mobilized colloids and injected chemicals", Environ. Sci. Tech., 30, pp. 3184~3191 (1996).
11. Gardner K.H. and Arias M.S., "Clay swelling and formation permeability reductions induced by a nonionic surfactant", Environ. Sci. Technol., 34, pp. 160~166 (2000).

