

土壤粒子的 特性 및 物理的 要因에 따른 地下水 通水性 變化에 대한 基礎 研究

崔秀雅 · 金智善 · 李商敦 · *金東秀

梨花女子大學校 環境工學科

Basic Study on the Variation of the Permeability of Groundwater Depending on the Characteristic of Soil Particles and Physical Factors

Sua Choi, Jisun Kim, Sangdon Lee and *Dongsu Kim

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

요 약

본 연구에서는 토양에서 지하수의 흐름에 영향을 미치는 주요한 인자인 토양입자의 크기 및 입자들의 혼합 패턴에 따라 Darcy의 법칙에서 제시되어 있는 투수계수가 변화하는 양상을 검토하여 토양 환경에서의 물의 흐름에 대한 해석을 시도하였다. 또한 물의 온도 및 농도 변화에 따른 투수계수의 양상을 파악하였다. 그 결과, 토양입자의 크기 및 혼합패턴에 대한 투수계수는 입자의 크기에 비례하는 경향을 보였으며, 조합에 따라 공극률의 영향을 많이 받았다. 특히 단일입자에 비해 크기가 다른 모래 시료를 혼합한 경우 크기가 작은 단일입자의 투수계수값보다 낮은 값을 나타내었다. 또한 온도 증가에 따라 지하수의 투수계수가 증가하였으며, 지하수 내 이온의 농도에 따라 투수계수가 감소하였다. 본 연구결과는 토양 환경에서 지하수의 거동을 해석하는데 있어 토양의 특성이 반영되는 현상에 의미있는 자료로 활용될 것으로 기대된다.

주제어 : 투수성, 지하수, 토양입자, Darcy의 법칙

Abstract

In this study, analysis of the flow of water in the soil environment was attempted to examine the changing patterns of permeability coefficient, k , presented in Darcy's law depending on soil particle size and the pattern of mixed soil that main factor affecting ground water flow in soil environment. In addition, permeability coefficient patterns depending on changes in water temperature and concentration were measured. As a result, the permeability for the soil particle size and mixing pattern is proportional to the size of the particles, and it was also influenced by the porosity depending on the mixed pattern and stratification. Especially compared with the single particle, mixing different sizes samples showed a lower k than the value of smaller single particles. In addition, permeability of groundwater increased with increasing temperature, also permeability decreased depending on the concentration of ions in groundwater. The results of this study were expected to use as meaningful data for the phenomenon reflects the characteristics of the soil to understand mobility of groundwater in soil environment.

Key word : Permeability, Groundwater, Soil Particles, Darcy's law

* Received : June 18, 2012 · Revised : August 3, 2012 · Accepted : August 20, 2012

*Corresponding Author : Dong-Su Kim (E-mail : dongsu@ewha.ac.kr)

Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, 11-1 Daehyundong, Seodaemun-gu, Seoul 120-750, Korea
Tel : +82-2-3277-2394 / Fax : +82-2-3277-3275

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

일반적으로 토양환경에서 지하수의 흐름은 토양 생태계 측면에서 매우 중요하다. 특히 우리나라는 급속한 산업발전과 경제성장에 따른 산업폐기물과 생활폐기물이 급격히 증가하고 있다는 측면에서 이러한 폐기물들이 매립 등으로 토양에 유입될 경우, 토양환경에 크게 영향을 미치게 된다.¹⁾ 토양 내 용해성 물질의 거동에 직접적인 영향을 주는 물리·화학적 성질 중 특히 토양입자의 크기는 토양의 공극율과 관계되는 주요한 요인이므로 지하수의 흐름성을 결정짓는데 연계된다. 따라서 토양의 성질에 따른 지하수 흐름 및 이를 통한 토양환경의 영향을 체계적으로 파악할 필요가 있다고 사료된다.

토양 내 지하수의 흐름의 가장 중요한 요인은 토양입자의 크기라 할 수 있으며 또한 지하수에 용해되어 있는 물질의 농도 및 지하수의 온도를 주요 요인으로 고려할 수 있다.²⁾ 지하수의 온도는 물의 점성 및 표면장력의 크기와 관계됨으로써 토양내 물의 움직임을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다.³⁾ 따라서 토양입자의 물리·화학적 성질을 고려한 토양의 투수계수의 연구는 매우 의미있다고 하겠다.

국외의 경우 이러한 토양의 물리적 성질에 대한 연구로서 농업분야를 중심으로 토양 중에 존재하는 중금속 분석 및 식물체의 성장에 영향을 주는 토양 흡착에 대한 연구가 수행되어져 왔다.⁴⁻⁶⁾ 또한 지하수의 오염에 직접적으로 영향을 주는 매립지를 고려하여 환경오염과 관련된 폐기물 매립지 차수재에 대한 연구 또한 활발히 이루어 지고 있다.⁷⁻⁹⁾

국내에서는 수질정화용 콘크리트의 골재입도에 따른 공극율과 투수계수의 상관성을 파악하는 연구,¹⁰⁾ 모래와 실트에 박테리아 접종을 통한 투수계수의 감소여부에 대한 조사,¹¹⁾ 벤토나이트 혼합토 등의 혼합 차수층에 대한 투수 특성의 영향¹²⁻¹³⁾ 및 비위생 매립지에 대한 공법의 적용성을 알아보기 위한 흙의 입도분포에 따른 다짐특성에 관한 연구¹⁴⁾ 등 토양의 성질에 대해 매립지 현장에서의 토양에 대한 지반연구에 치우쳐 있어 토양의 기본 물리화학적 성질에 따른 지하수의 거동에 대한 고찰이 부족한 실정이다.

한편 토양 환경에서 물의 흐름에 대한 영향은 주로 Darcy의 법칙에 의해 해석된다. 이는 토양의 정성적인 특성들이 반영되어 제시된 것이라기보다는 지하수 흐름의 경사도와 수두 등이 현상적으로 제시된 식이라고 할 수 있다.¹⁵⁻¹⁶⁾

실제로 토양은 다양한 크기의 입자들로 이루어져 있으며 상황에 따라 이러한 입자들이 혼합되어 있는 형태 또한 달라진다. 따라서, 토양의 이러한 성질들이 반영된 형태로 Darcy의 법칙을 표현할 경우 지하수의 흐름을 예측하는데 있어 더욱 구체적인 해석이 가능할 뿐만 아니라 용해성 오염물의 거동을 예측하고 이를 처리하는데 있어 체계적인 접근이 이루어질 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 토양에서 지하수의 흐름에 영향을 미치는 주요한 인자인 토양 입자의 크기 및 입자들의 혼합 패턴에 따라 Darcy의 법칙에서 제시되어 있는 투수계수가 변화하는 양상을 검토하여 토양 환경에서의 물의 흐름에 대한 해석의 구체화에 대한 기초조사를 수행하였다.

또한, 물의 온도에 따른 투수계수의 변화 정도를 입자의 크기를 달리하여 검토함으로써 지하수의 흐름에 대한 온도 및 토양입자의 크기의 상관성에 대해 조사하였으며 물에 용해되어 있는 용질의 농도가 투수계수의 변화에 영향을 주는 양상을 파악하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. Darcy의 법칙

Darcy의 법칙은 토양 내 흐르는 물의 침투수량에 관한 식으로 물의 속도가 농도구배에 비례한다는 경험식이다.

$$q = kiA \tag{1}$$

$$v = ki \tag{2}$$

이를 살펴보면 A는 단면 체적이고 단위시간당 침투수량 q는 동수경사(i)에 비례한다는 것을 알 수 있으며, 투수계수 k는 속도와 같은 단위를 가진다(cm/sec). 이와 같이 침투수량은 투수계수의 영향을 받으므로 다양한 조건에서 투수계수를 측정하여 토양 내 물의 침투수량의 영향을 알아보려고 하였다. 본 연구에서는 Darcy의 법칙에 기초하여 정수두 투수시험방법을 이용하여 투수계수 k를 산출하였다.

2.2. 실험재료 및 방법

2.2.1. 실험재료

투수계수의 측정을 위해 국내 주문된 산 모래시료를 미국표준체로 체거름하여 크기별로 분류한 후 사용하였다. 비중병을 사용하여 측정된 시료의 비중은 약 2.7

Table 1. Distribution of soil size

Number	Size(μm)
①	125~300
②	300~425
③	500~1000
④	1000~1400
⑤	1400~2000

정도로 파악되었다. 체거름한 각각의 크기별 분리 및 크기 숫자 (Size Number) 는 Table 1에 제시하였다. 투수계수 산정을 위한 정수두 투수시험에서 용수로는 수돗물을 사용하였으며, 이온강도에 따른 투수계수 산정을 위한 NaCl 용액은 1차 증류수를 이용하여 각 농도별 NaCl 용액을 조제하였다.

2.2.2. 실험방법

분류한 모래시료에 대한 투수계수를 산정하기 위해 정수두 투수시험법을 이용하였으며 시료의 크기별 투수계수 및 모래시료의 다양한 조합에 따른 투수의 영향을 관찰하였다. 실험에서 사용한 정수두 투수계수 측정장치는 Fig. 1에 제시한 바와 같다.

먼저 모래시료의 입자 크기변화에 따른 투수계수 산정을 위해 5가지로 분류한 모래 시료에 대해 투수계수 변화를 산정하였다. 제작한 정수두 투수계수 측정기 (Constant Head Permeameter) 를 이용하여 일정시간 (30 sec)에 따라 투수되는 물의 양을 측정하였으며 유출수의 양을 Darcy 의 법칙에 대입하여 투수계수를 산출하였다. 이 때 물의 온도는 22°C 정도이었다.

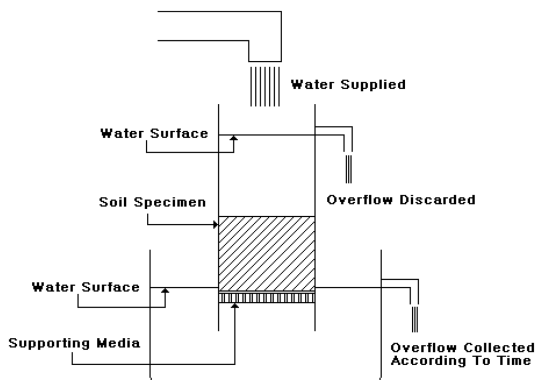


Fig. 1. The scheme of the constant head permeameter used in the experiment.

또한 지하수의 흐름에서 중요한 요소가 되는 토양의 공극에 대한 다양성을 살펴보기 위해 모래시료를 여러 방법으로 조합하여 투수계수를 산정하였으며 이에 대한 방법은 분류한 모래시료의 혼합을 통해 공극의 차이를 변형하는 것과 층별로 다른 크기의 모래시료를 배치한 것이다. 크기가 다른 모래를 섞어 조합별 투수계수를 분석하기 위해 분류한 5가지 모래시료를 섞어 10가지 조합을 나누어 실험을 수행하였으며 가장 작은 크기의 모래시료와 가장 큰 크기의 모래 시료를 Fig. 3와 같이 층별로 분류하여 투수계수를 추가로 도출하였다.

온도에 따른 투수계수의 변화를 살펴보기 위해 가장 작은 크기의 모래시료(125~300 μm)와 가장 큰 크기의 모래시료(1400~2000 μm)에 대해 온도변화에 따른 투수계수에 대한 실험을 수행하였으며, 각 온도는 25°C, 40°C, 60°C, 100°C로 조절하였다. 또한 투수계수의 이온강도에 따른 영향을 검토하기 위해 분류한 시료 중간 크기인 300~425 μm 의 모래시료를 사용하여 NaCl 용액의 몰 농도를 0.1 M, 1 M, 2 M 로 변화시킴에 따른 투수계수의 변화를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

정수두 투수계수 측정기를 이용하여 일정시간에 따라 투수되는 양을 측정 후 시료에 대한 각각의 투수계수 k 를 Darcy 의 법칙에 적용하여 산정하였다.

k 값을 산출하기 위한 식을 다음과 같다.¹⁷⁾

$$k = vL / \Delta h = QL / \Delta hAt \quad (3)$$

where, k ; 투수계수 (cm/sec)

v ; 걸보기 속도 (cm/sec)

L ; 토양 시편의 길이 (cm)

h ; 총수두손실 (cm)

Q ; 시간 t 동안의 월류 부피 (mL)

A ; 토양 시편의 단면적 (cm^2)

3.1. 입자의 크기에 따른 투수계수

모래시료의 입자 크기에 따른 단일입자의 크기별 투수계수의 변화는 Fig. 2에 제시한 바와 같다. 이를 살펴보면 모래입자의 크기가 커짐에 따라 투수계수 k 값이 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 일반적으로 토양의 단일입자에 대해 공극이 크면 유속이 빨라지고 지하수의 흐름이 원활해지는 것과 일치함을 알 수 있다.

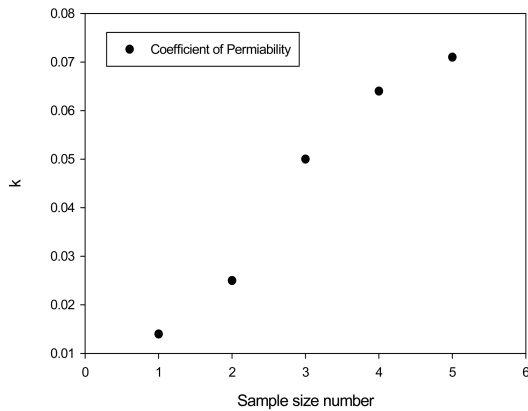


Fig. 2. Permeability depending on soil particle size.

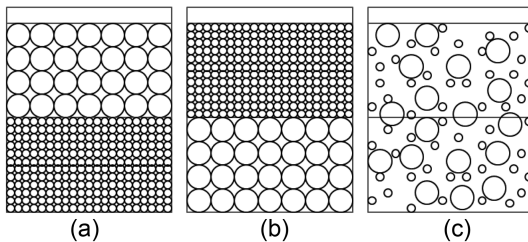


Fig. 3. Measure of permeability for stratified soil.

3.2. 입자의 크기 조합에 따른 투수계수

크기가 다른 모래시료를 섞어 조합별 투수계수를 알아보기 위해 5가지 분류된 모래시료를 임의로 혼합하여 10가지 조합을 제조하였으며 그에 따른 투수계수의 결과를 Table 2에 나타내었다.

실험결과, 입자크기의 조합에 따른 투수계수가 달라짐을 알 수 있으며 앞서 실험에서 수행한 입자크기와 k 값이 비례한다는 결론과 비교할 수 있다. 단일입자의 결과와 비교할 때 입자크기가 서로 다른 시료를 조합할 경우 공극률이 줄어들어 나타난 결과로 유추할 수 있으며, 일반적으로 입자크기의 차이가 클수록 공극률이 줄어드는 경향을 보인다. 그 예로 가장 작은 입자(①, 125~300 μm)와의 조합을 살펴보면 ②, ③, ④와의 조합에 대해 단일입자에 대한 투수계수 보다 k값이 작게 나타났다. 단일입자일 경우보다 혼합에 의한 공극의 압축이 상당히 일어나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 각각의 크기별 입자에 대해서도 동일한 결과를 나타내었다.

한편 특정입자를 기준으로 하였을 경우, 차이가 적은 입자들의 조합의 투수계수가 더 작은 것을 볼 수 있는데, 이것은 두 입자의 조합이 특히 공극의 크기를 줄인 것으로 사료된다.

Table 2. Permeability for mixed soil

mixed soil number	k (cm/sec)
① + ②	0.003
① + ③	0.007
① + ④	0.004
① + ⑤	0.023
② + ③	0.006
② + ④	0.013
② + ⑤	0.019
③ + ④	0.028
③ + ⑤	0.032
④ + ⑤	0.058

Table 3. permeability for stratified soil

Soil size	Stratified soil	k (cm/sec)
125~300 μm + 1400~2000 μm	(a)	0.023
	(b)	0.016
	(c)	0.017
500~100 μm + 1400~2000 μm	(a)	0.032
	(b)	0.021
	(c)	0.029

3.3. 입자의 층별 분리에 따른 투수계수

가장 작은 크기의 모래와 가장 큰 크기의 모래를 섞은 조합(①+⑤) 및 중간 크기의 모래와 가장 큰 모래를 섞은 조합(③+⑤)은 1:1로 섞지 않고 층을 분류하여 투수계수를 추가로 알아보았으며 그에 따른 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 나타낸 (a), (b), (c)는 Fig. 3에서 제시한 층별 분리를 구별하여 나타낸 것이다.

제시된 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 크기가 큰 입자가 위층, 그리고 크기가 작은 입자가 아래층에 위치하고 있을 경우와 이와는 반대로 작은 입자가 위층, 그리고 크기가 큰 입자가 아래층에 위치하고 있을 경우를 비교하여 볼 때 그 투수계수의 값이 상호 다른 것으로 파악되었다. 또한, 크기가 상호 다른 입자가 혼합되어 있을 시 입자들이 전체적으로 균질하게 분포되어 있을 경우와 비교하여 크기가 상호 다른 입자들이 층을 형성하고 있을 경우에서의 투수계수가 다른 것으로 관찰되었다. 즉, 크기가 작은 입자들이 위층을 형성하고 있을 경우의 투수계수는 크기가 서로 다른 입자들이 균질하게 혼합되어 있을 경우에 비해 투수계수는 감소하

는 것으로 조사되었으며, 이와는 반대로 크기가 큰 입자들이 위층에 존재하고 있을 경우에는 투수계수가 2배 가까이 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

3.4. 온도변화에 따른 투수계수

가장 작은 크기의 모래(125~300 μm)와 가장 큰 크기의 모래(1400~2000 μm)의 온도별 투수계수를 구하기 위해 모래 시료를 분류하고 설정한 온도별로 투수계수를 산정하였다. 이에 대한 결과를 Fig. 4에 제시하였다.

온도변화에 따른 k 값의 변화를 살펴보면 온도가 증가함에 따라 투수계수 값이 증가하는 경향을 보임을 관찰할 수 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 물의 점성도가 낮아지기 때문인 것과 토양입자의 열적교반에 의해 토양입자의 운동성이 커지기 때문인 것으로 사료된다. 투수계수는 물의 점성도에 반비례하지만 물의 점성도는 온도에 따라 변화한다. 즉, 온도가 증가함에 따라 물의 점성도가 Arrhenius 식($\eta = Ae^{-B/T}$)을 따르면서 감소하므로 온도가 높아짐에 따라 물의 점성도가 감소하고 k 값은 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다.

3.5. 이온강도에 따른 투수계수

투수계수의 이온에 따른 영향을 검토하기 위하여 NaCl 용액의 몰농도를 변화시켜가며 이온에 따른 투수계수의 변화를 관찰하였으며 그 결과는 Fig. 5에 제시하였다.

이 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 실험 조건에서 이온의 농도가 증가함에 따라 투수계수 값이 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 토양 내 이온성 물질이 유입되면 지하수의 이온강도를 변화시켜 지하수의 거동에 영향을 줄 수 있는데 이온농도가 증가하면 이에 따른 물의 점성도가 증가하게 된다. 따라서 앞의 3.4에서 언급한 바와 같이 용액의 점성도의 증가에 따라 k 값이 감소하는 경향을 보인 것으로 사료된다.

4. 결 론

토양에서의 지하수의 흐름에 영향을 미치는 주요 인자로 토양의 입자 크기 및 입자들의 혼합 패턴에 따른 투수계수의 변화 양상을 검토하기 위하여 크기별로 분류한 모래시료를 대상으로 정수위 투수계수 측정기를 이용하여 정수위 투수시험법으로 투수량을 측정하였다. 이를 Darcy의 법칙에 적용하여 투수계수를 산정하고 토양입자의 패턴, 물의 온도변화 및 NaCl의 농도변화에

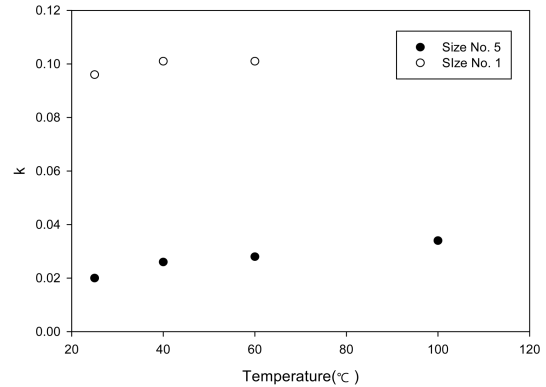


Fig. 4. Permeability depending on temperature.

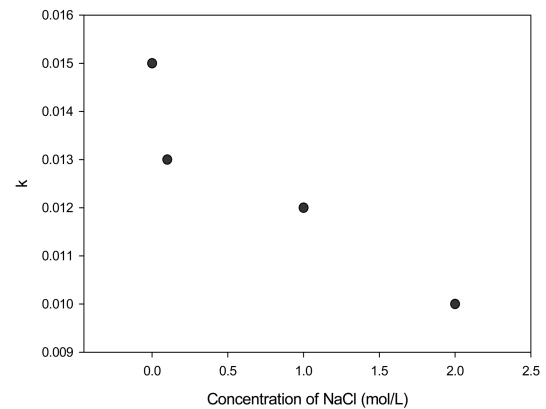


Fig. 5. Permeability for ion concentration.

따른 투수계수의 변화를 고찰하였다.

그 결과, 이상에서 살펴본 바와 같이 토양입자의 크기 및 혼합패턴에 대한 투수계수는 입자의 크기에 비례하는 경향을 보였으며, 조합에 따라 공극률의 영향을 많이 받았다. 특히 단일입자에 비해 크기가 다른 모래시료를 혼합한 경우 크기가 작은 단일입자의 k 값보다 낮은 값을 나타내었다. 또한 온도 증가에 따라 용매의 점성도가 감소하여 지하수의 투수계수가 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 한편 지하수 내 이온의 농도에 따라 투수계수가 감소하였으며, 특히 Na^+ 이온의 양에 따라 투수계수가 상호 관계가 있다고 사료된다.

본 연구에서 제시된 결과는 토양 환경에서의 지하수의 거동을 해석하는데 있어 토양의 특성이 반영되는 현상에 의미 있는 자료로 활용될 것으로 사료되며, 또한 지하수에 용해되어 있는 오염물의 이동 및 처리에 실질적으로 응용될 수 있는 개념을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 2009년 서울지역 환경기술개발센터의 연구개발사업(과제번호:SEST2009-0927072) 및 한국연구재단 (No. 2009-0093461) 과 KIGAM 의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ji-Hoon Hong, Nam Woong Lim, Hyung-Jin Kim, 2008: A Study on the Hydraulic conductivity and Fixations of Heavy Metals with Addition of Active Diatomite to sand clay, Korea Society of Environmental Management, **14**(2), pp. 55-62
2. Alaoui, A., Lipiec, J., and Gerke, H.H., 2011: A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation, Soil & Tillage Research, **115-116**, pp. 1-15
3. Miller, R.W., Donahue, R.L., 1990: Soils an introduction to soils and plant growth, Prentice-Hall
4. Daniel, D.E., 1984: Predicting hydraulic conductivity of clay liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **110**(2), pp.285-300
5. Hu Jung, 1993: The Effect of Landfill Leachate Constituents on the Permeability of Clay Soils, Department of Environmental Engineering Industrial Graduate School Kon-Kuk University
6. Mi-Hee Yim, Ji Hwan Ann, 2011: Chemical Remediation and Recirculation Technologies of waste water from Metal-Contaminated soil washing, The Korean Institute of Resources Recycling, **20**(3), pp. 28-39
7. Pojasek, R.B., 1978: Stabilization, solidification of hazardous waste, *Environmental Science & Technology*, **12**(4), pp. 382-386
8. Shivery, W., et al., 1986: Leaching test of heavy metals stabilized with portland cement, *Journal WPCF*, **58**(3), pp. 234-241
9. Fung, R., 1980: Protective barriers for containment of toxic materials, Noyes Data
10. Kee Hoan Kim, JnWoo Lee, MooSoo Lee, Hee cheul Kim, Ki Teong Park, Kwon Hyug Moon, 2002: Permeability Coefficient of concrete for water purification, Korean Society of Water and Wastewater ·Korean Society on Water Environment, Daegu, pp. 43-46
11. Young-woo Song, Dong-yong Ku, Kyung-hun Jung, 1999: Hydraulic conductivity of sand and silt Treated by Biofilm, Korea Society of Civil Engineers(KSCE) Journal submission, KSCE, pp. 189-192
12. Hak Moon Kim, 2003: The permeability Characteristics of Reactive Soil-Bentonite Land fill Liner, Korea Society of Waste Management, **20**(8), pp. 800-806
13. Jae Woo Ju, Kyeh Won Suh, Jong Beom Park, 2006: A Study for Permeability as Mixing Ratio at Bentonite-mixed Soil, Korean Geotechnical Society, **22**(1), pp. 45-52
14. Seung Hwan Baek, Sung Wook Yun, Jin Chul Park, Chan Yu, 2007: Characteristic of Compaction and Permeability of soils with the Variation of Particle Distribution and Compaction Energy, *Journal of Agriculture & Life Science*, **41**(2), pp.45-50
15. Majid Hassanizadeh, 1986: Derivation of basic equation of mass transport in porous media, part 2. Generalized Darcy's and Fick's laws, *adv. Water Resources*, **9**, pp. 207-222
16. Tivadar Farkas, Guoming Zhong, Georges Guiochon, 1999: Validity of Darcy's law at low flow rates in liquid chromatography, *Journal of Chromatography A*, **849**, pp. 35-43
17. Day, R.W., 2001: Soil Testing Manual, McGraw Hill(New York, USA), pp. 370~371

崔 秀 雅

• 현재 이화여자대학교 환경공학과 학생

金 智 善

• 현재 이화여자대학교 환경공학과 학생

李 商 敦

• 현재 이화여자대학교 환경공학과 교수

金 東 秀

• 현재 이화여자대학교 환경공학과 교수
• 당 학회지 제8권 5호 참조