

## 실내주상실험에 의한 불균일한 토양의 입도와 수리분산기작의 상관성 연구

강동환 · 정상용\*

부경대학교 환경지질학과

### Correlation of Soil Particle Distribution and Hydrodynamic Dispersion Mechanism in Ununiformed Soils Through Laboratory Column Tests

Dong Hwan Kang · Sang Yong Chung\*

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

#### ABSTRACT

Laboratory column tests using  $Cl^-$  tracer were conducted to study the correlation of soil particle distribution and hydrodynamic dispersion mechanism with three kinds of ununiformed soil samples, in which the ratio of gravel and sand versus silt and clay is 24.5 for S-1 soil, 4.48 for S-2 soil, and 0.4 for S-3 soil. Chloride breakthrough curves with time were fitted with gaussian functions. The relative concentrations of chloride were converged to 1.0 after 0.7 hours for S-1, 6.3 hours for S-2, and 389 hours for S-3. Average linear velocity, longitudinal dispersion coefficient, and longitudinal dispersivity were calculated by chloride breakthrough curves. Longitudinal dispersion coefficients were  $1.20 \times 10^{-4} m^2/sec$  for S-1,  $8.87 \times 10^{-7} m^2/sec$  for S-2, and  $1.94 \times 10^{-9} m^2/sec$  for S-3. Peclet numbers calculated by the molecular diffusion coefficient of chloride and the mean grain diameters of soils were  $2.59 \times 10^2$  for S-1,  $6.27 \times 10^0$  for S-2, and  $1.35 \times 10^{-4}$  for S-3. Mechanical dispersion was dominant for the hydrodynamic dispersion mechanism of S-1. Both mechanical dispersion and molecular diffusion were dominant for the hydrodynamic dispersion mechanism of S-2, but mechanical dispersion was ascendant over molecular diffusion. Hydrodynamic dispersion in S-3 was occurred mainly by molecular diffusion. When plotting three soils on the graph of  $D_L/D_m$  versus Peclet number produced by Bijeljic and Blunt (2006), the values of  $D_L/D_m$  for S-1 and S-2 were more than 2.0 order compared to their graph. S-3 was not plotted on their graph because the Peclet number was as small as  $1.35 \times 10^{-4}$ .

**Key words :** Ununiformed soil, Laboratory column test, Hydrodynamic dispersion mechanism, Longitudinal dispersion coefficient, Longitudinal dispersivity, Molecular diffusion, Peclet number

#### 요 약 문

자갈, 모래, 실트 및 점토의 입도분포가 다른 3종류의 토양시료(자갈모래/실트점토의 비율 : S-1 토양 24.5, S-2 토양 4.48 및 S-3 토양 0.4)에서 염소이온( $Cl^-$ )을 이용한 실내주상실험이 수행되었다. 실내주상실험의 결과를 이용하여 3종류 토양의 입도와 수리분산기작의 상관성이 연구되었다. 실내주상실험에 의한 시간에 따른 염소이온의 농도이력은 가우시안 함수가 적합하였으며, 염소이온의 상대농도가 1.0으로 수렴하는데 경과된 시간은 S-1 토양에서 0.7시간, S-2 토양에서 6.3시간 및 S-3 토양에서는 389시간 이었다. 토양종류에 따른 농도이력곡선 함수에 의해 평균선형유속, 종분산계수 및 종분산지수가 산정되었다. 종분산계수는 S-1 토양에서  $1.20 \times 10^{-4} m^2/sec$ , S-2 토양에서  $8.87 \times 10^{-7} m^2/sec$ , S-3 토양에서는  $1.94 \times 10^{-9} m^2/sec$ 로 산정되었다. 염소이온의 분자확산계수와 토양평균입경에 의해 산정된 페클릿수는 S-1 토양에서  $2.59 \times 10^2$ , S-2 토양에서  $6.27 \times 10^0$ , S-3 토양에서는  $1.35 \times 10^{-4}$ 이었다. S-1 토양에서는 역학적인 분산이 지배적이며, S-3 토양에서는 분자확산이 지배적인 것으로 나타났다. S-2 토양에서는 역학적인 분산과 분자확산이 동시에 발생하지만, 역학적인 분산이 우세하였다. Bijeljic et al.(2004)에 의해 보고된 페클릿수 대  $D_L/D_m$ 의

\*Corresponding author : chungsy@pknu.ac.kr

원고접수일 : 2006. 7. 11 게재승인일 : 2006. 11. 24

질의 및 토의 : 2007. 2. 28 까지

그래프에 본 연구에서 산정된 값들을 도시하여 비교 분석한 결과, S-1 및 S-2 토양시료는 페클릿수에 대한  $D_L/D_m$ 의 값이 2.0 order 이상 높게 나타났으며, S-3 토양시료는 페클릿수가  $1.35 \times 10^{-4}$ 으로 매우 낮아 그래프에 표시되지 않았다.

**주제어 :** 불균일한 토양, 실내주상실험, 수리분산기작, 종분산계수, 종분산지수, 분자확산, 페클릿수

## 1. 서 론

다공성매질에서 용질이송의 규모는 미시적인 규모 (microscopic scale)와 거시적인 규모(macroscopic scale)로 분류될 수 있다. 다공성매질 내 공극을 통한 미시적인 규모의 용질이송 연구는 실내주상실험(laboratory column experiment)에 의해 수행되는 것이 일반적이다. 실내주상실험은 다공성매질의 분산계수를 추정할 수 있는 간편하고 유용한 실내실험 방법이다. 실내주상실험의 해석은 추적자용액의 연속적인 주입과 함께 유출지점에서 경과시간에 따른 추적자의 농도이력(breakthrough)에 의해 해석된다(Charbeneau, 2000).

실내주상실험을 이용한 수리분산관련 연구는 토양의 분산지수 산정과 증속 흡착 및 반응능력 산출 등의 사례가 있다. 한정상 외(1991)는 석유화학공장 후보지에서 오염물질의 유출에 의한 지하수오염 가능성을 평가하기 위해 실내주상실험에 의한 다공성매질(토양시료)의 분산지수를 산정하였다. 장연수와 임종주(1997)는 매립지 지반의 침출수에 대한 흡착성을 파악하기 위해 실내주상실험에 의한 분산지수를 배치실험(batch test) 결과와 비교 연구하였다. 또한, 오염지하수 정화를 위한 투수성반응벽체(permeable reactive barriers, PRBs) 공법의 적용성을 평가하기 위하여 실내주상실험에 의한 환원과 흡착 능력이 연구되었다(이아라 외, 2006). 국외 연구로는 Berkowitz et al.(1995, 2000)이 실내주상실험에 의한 불균질한 다공성매질 내 용질의 예외적인 이송(anomalous transport)을 연구하였으며, Bijeljic et al.(2004), Bijeljic and Blunt (2006) 등은 실내주상실험에 의해 산정된 페클릿수와 분산계수값들을 이용하여 공극규모(pore-scale)에서 분산계수의 예측모델링을 연구하였다. 실내주상실험을 이용한 기존의 사례들은 다공성매질에서 종분산계수 산정, 오염용

질의 흡착/반응 능력 평가 및 페클릿수와 종분산계수의 함수적인 관계 등이 연구되었다.

본 연구에서는 현장에서 채취된 자갈, 모래, 실트와 점토의 함량이 다른 3 종류의 토양을 이용한 실내주상실험이 수행되었으며, 농도이력곡선의 함수에 의한 종분산계수를 산정하여 토양입도에 따른 수리분산특성을 연구하였다. 토양입도분석과 실내주상실험에 의해 산정된 페클릿수를 이용하여 수리분산기작을 규명하고, 페클릿수 대  $D_L/D_m$ 의 그래프를 작성하여 토양입도의 불균일성에 의한 수리분산특성을 파악하였다.

## 2. 토양 물성 및 투수성

부산광역시 남구 문현동에서 채취되었으며, 입도가 다른 3 종류의 토양 S-1, S-2 및 S-3에 대한 토양물성시험과 실내변수위투수시험이 실시되었다. 토양물성을 파악하기 위해 입도분석(습윤체분석), 비중시험 및 건조단위중량시험이 수행되었으며, 토양종류별 자갈, 모래, 실트 및 점토의 함량을 통일분류법(김영수 외, 2000)을 적용하여 Table 1에 정리하였다. S-1 시료는 자갈과 모래의 함량이 96% 이상인 사질토양이며, S-2 시료는 S-1 시료에 비해 자갈의 함량이 적었으나 실트와 점토의 함량은 6배 정도 많았다. S-3 시료는 실트와 토의 함량이 71.3%로서 다른 시료에 비해 토양입경이 매우 작았다. 자갈과 모래의 함

**Table 2.** Condition and result of falling-head permeability experiments

Soil type	S-1	S-2	S-3
Soil sample length(cm)	50	50	10
Column diameter(cm)	7.6	5.0	2.8
Experimental time(hr)	0.25	7.9	244.3
Hydraulic conductivity(cm/sec)	$9.27 \times 10^{-2}$	$2.43 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-6}$

**Table 1.** Physical properties and grain distributions of soil samples

Soil No.	Gravity	Dry unit weight (N/m <sup>3</sup> )	Gravel (%)	Sand (%)	Silt & Clay (%)	$\frac{Gravel+Sand}{Silt+Clay}$
S-1	2.59	1.47	5.13	91.15	3.72	24.5
S-2	2.63	1.29	0.62	81.24	18.14	4.48
S-3	2.52	1.20	0.20	28.50	71.30	0.40

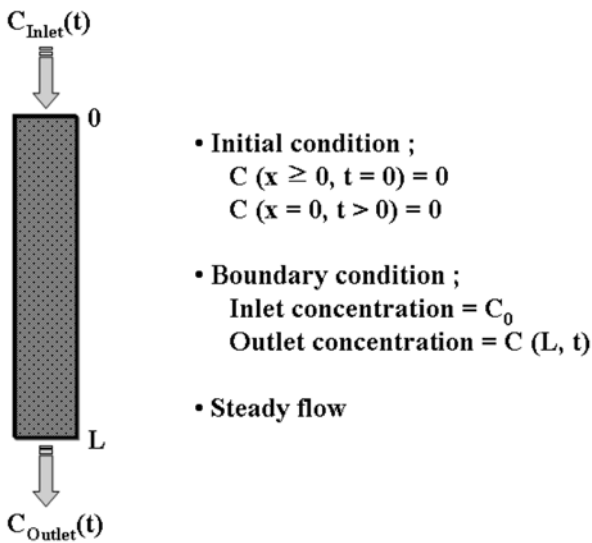


Fig. 1. Initial, boundary and flow conditions for 1-D laboratory column experiment.

Table 3. Condition and column design for laboratory column experiments

Soil type	S-1	S-2	S-3
Tracer	Chloride	Chloride	Chloride
Initial concentration(mg/L)	1,650	1,650	760
Column length(cm)	50	50	10
Column diameter(cm)	7.6	5.0	2.8
Experimental time(hr)	0.7	6.3	389

량 대 실트와 점토의 함량 비율이 S-1 토양은 24.5, S-2 토양은 4.48, S-3 토양은 0.4로 나타났다. 실내변수위투수 시험에 의한 토양종류별 수리전도도가 Table 2에 정리되어 있다. S-1 토양의 수리전도도가 가장 높고, S-3 토양이 가장 낮았으며, 그 차이는 10<sup>5</sup> 정도이었다.

### 3. 실내주상실험

#### 3.1. 실험 조건

1차원 실내주상실험은 다공성매질의 종분산계수(longitudinal dispersion coefficient)를 추정할 수 있는 가장 간단한 실험방법이며, 실험결과는 시간에 대한 상대농도의 함수로 나타난다. 본 연구에서는 S-1, S-2 및 S-3 토양칼럼에서 염소이온을 추적자로 이용한 실내주상실험이 수행되었다. Fig. 1에는 실내주상실험의 초기조건, 경계조건 및 흐름조건과 함께 모식도가 도시되어 있으며, Table 3에는 실내주상실험 시 염소이온용액의 주입농도, 칼럼 길이와 직경 및 실험시간이 정리되어 있다.

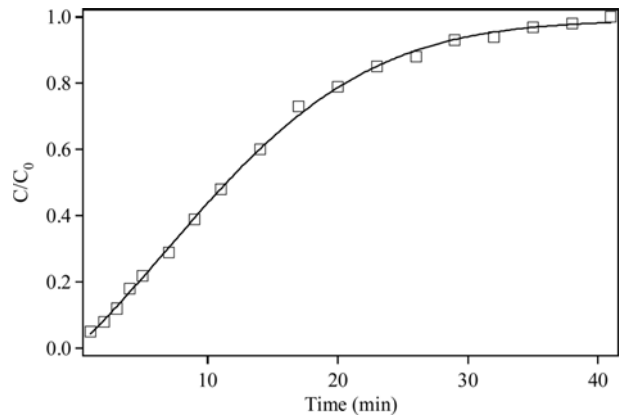


Fig. 2. Breakthrough curve of chloride for S-1 soil column.

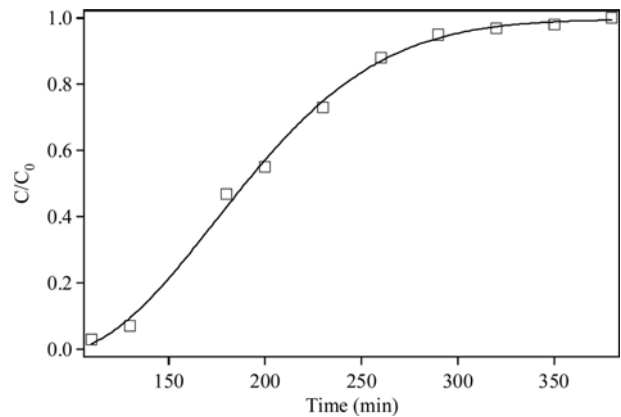


Fig. 3. Breakthrough curve of chloride for S-2 soil column.

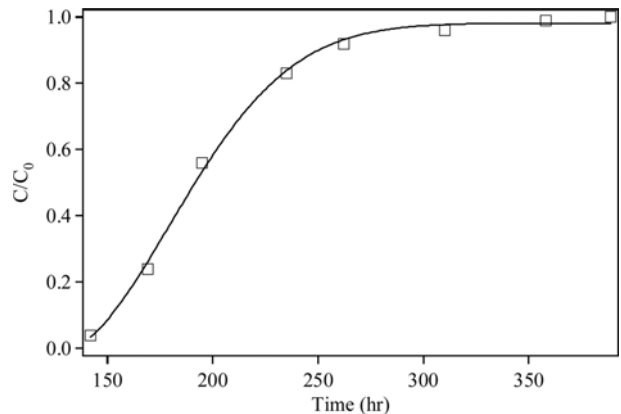


Fig. 4. Breakthrough curve of chloride for S-3 soil column.

#### 3.2. 농도이력곡선

S-1, S-2 및 S-3 토양의 시간에 따른 염소이온농도 자료를 가우시안(Gaussian) 모델에 적용하여 작성된 농도이력곡선이 Fig. 2~4에 있다. 실내주상실험에서 염소이온이 칼럼을 통과하여 유출구(outlet)에 도달하는데 걸린 초기 도달시간은 S-1 토양에서 0.02시간, S-2 토양에서 1.67시

간, S-3 토양에서는 140시간 정도 이었다. 유출구에서 측정된 염소이온의 상대농도가 1.0으로 수렴하는데 S-1 토양에서 0.7시간, S-2 토양에서 6.3시간, S-3 토양에서는 389시간이 경과되었다.

#### 4. 수리분산기작

##### 4.1. 수리분산 이론

균질한 다공성매질에서 용질이 비반응성인 경우의 1차원 정상류 흐름 지배식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - v_l \frac{\partial C}{\partial l} \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 농도[ML<sup>-3</sup>],  $t$ 는 시간[T],  $D_L$ 은 종분산계수[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>],  $n$ 는 지하수의 평균선형유속[LT<sup>-1</sup>],  $l$ 은 거리[L]이다. 본 연구에서 수행된 실내주상실험의 초기 및 경계조건 하에서, 방정식 (1)에 대한 해석학적인 해는 아래와 같다 (Ogata, 1970; Ogata and Banks, 1961).

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{l - \bar{v}_l t}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp\left(\frac{\bar{v}_l l}{D_L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{l + \bar{v}_l t}{2\sqrt{D_L t}}\right) \right] \quad (2)$$

여기서  $\operatorname{erfc}$ 는 보상오차함수(complementary error function)이다. 다공성매질에서 용질이송은 역학적 분산(mechanical dispersion)과 유효분자확산(effective molecular diffusion)에 의해 지배된다. 따라서, 종분산계수는 다음의 식으로 표현된다(Fetter, 1999).

$$D_L = \alpha_L \bar{v}_l + D_s \quad (3)$$

여기서  $\alpha_L$ 는 종분산지수[L],  $D_s$ 는 유효확산계수[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]이다. 추적자용액이 다공성 매질을 통과하여 확산되는 유효 확산계수(effective diffusion coefficient,  $D_s$ )는 굴곡도와 분자확산계수를 이용하여 식 (4)와 같이 산정된다(Charbeneau, 2000). 25°C에서 염소이온의 분자확산계수(molecular diffusion coefficient,  $D_m$ )는 기존의 문헌(Domenico and Schwartz, 1997; 김강진 외, 2001)에서 적용되었다.

$$D_s = \tau D_m \quad (4)$$

여기서  $\tau$ 는 굴곡도[무차원],  $D_m$ 은 분자확산계수[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]이다. 식 (4)의 굴곡도(tortuosity)는 포화된 다공성매질의 공극율을 이용하여 아래의 식으로 산정될 수 있다(Millington, 1959; Millington and Quirk, 1961).

$$\tau = E \left[ \left( \frac{L}{L_c} \right)^2 \right] = n^{1/3} \quad (5)$$

여기서  $L$ 은 추적자의 유입지점과 유출지점의 직선거리[L],  $L_c$ 는 유입지점에서 유출지점까지 추적자가 토양공극을 따라 이동한 거리[L],  $n$ 은 공극율이다. 본 연구에 이용된 토양종류별 공극율은 비중시험과 건조단위중량시험을 통해 산정되었다(천병식 및 유한규, 2001; 김영수 외, 2000).

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w} \quad (6)$$

여기서  $\gamma_d$ 는 흙의 건조단위중량[N/m<sup>3</sup>],  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량[N/m<sup>3</sup>],  $G_s$ 는 흙의 비중[무차원]이다.

용질이송거리( $l$ )나 시간( $t$ )이 큰 경우에는 식 (2)의 오른쪽 2번째 항은 무시될 수 있으며, 상대농도는 아래의 식으로 표현된다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{l - \bar{v}_l t}{2\sqrt{D_L t}}\right) \quad (7)$$

실내주상실험에 의해 산출된 염소이온의 농도이력곡선에서  $t_{0.16}$ ,  $t_{0.50}$ ,  $t_{0.84}$ 를 산정하여, 평균선형유속과 역학적인 분산계수(mechanical dispersion coefficient)를 구할 수 있다. 평균선형유속은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\bar{v}_l = \frac{l}{t_{0.5}} \quad (8)$$

역학적인 분산계수  $\alpha_L \bar{v}_l$ 는 식 (9)와 같이 표현되어진 다(Pickens and Grisak, 1981).

$$\alpha_L \bar{v}_l = \frac{\bar{v}_l^2 (t_{0.84} - t_{0.16})^2}{8t_{0.5}} \quad (9)$$

여기서  $l$ 은 실내주상실험 시 시료의 길이[L],  $t_{0.16}$ ,  $t_{0.50}$ ,  $t_{0.84}$ 는 추적자의 상대농도( $C/C_0$ )가 0.16, 0.50, 0.84 일 때의 경과시간[T]이다.

##### 4.2. 토양종류별 수리분산계수

Table 4에는 토양입도분석과 실내주상실험에 의해 산정된 토양종류별 수리분산계수들이 정리되어 있다. 실내주상실험 시 칼럼을 통한 염소이온의 유효확산계수는 토양의 굴곡도와 분자확산계수를 식 (4)에 대입하여 산정되었다. 산정된 유효확산계수의 범위는  $1.54 \times 10^{-9} \sim 1.64 \times 10^{-9}$  으로서 큰 차이는 없었다.

농도이력곡선에 의해 산정된  $t_{0.16}$ ,  $t_{0.50}$ ,  $t_{0.84}$ 의 값을 이용하여 구한 평균선형유속은 식 (8)이 적용되었으며, 역학적인 분산계수는 식 (9)를 적용하여 산정하였다. S-1 토양에서의 역학적인 분산은 S-2 토양에 비해 10<sup>2</sup>배 정도 높

**Table 4.** Hydro-dispersion coefficients with each of soil types

Soil type	S-1	S-2	S-3
Porosity	0.433	0.511	0.523
Tortuosity	0.757	0.799	0.806
Molecular diffusioncoefficient(m <sup>2</sup> /sec)	2.03 × 10 <sup>-9</sup>	2.03 × 10 <sup>-9</sup>	2.03 × 10 <sup>-9</sup>
Effective diffusioncoefficient(m <sup>2</sup> /sec)	1.54 × 10 <sup>-9</sup>	1.62 × 10 <sup>-9</sup>	1.64 × 10 <sup>-9</sup>
Elapsed time(min)	<i>t</i> <sub>0.16</sub>	3.8	142
	<i>t</i> <sub>0.50</sub>	11.4	190
	<i>t</i> <sub>0.84</sub>	22.3	250
Average linear velocity(m/sec)	7.31 × 10 <sup>-4</sup>	4.39 × 10 <sup>-5</sup>	1.45 × 10 <sup>-7</sup>
Mechanical dispersioncoefficient(m <sup>2</sup> /sec)	1.20 × 10 <sup>-4</sup>	8.86 × 10 <sup>-7</sup>	3.06 × 10 <sup>-10</sup>
Longitudinal dispersioncoefficient(m <sup>2</sup> /sec)	1.20 × 10 <sup>-4</sup>	8.87 × 10 <sup>-7</sup>	1.94 × 10 <sup>-9</sup>
Longitudinal dispersivity(m)	1.65 × 10 <sup>-1</sup>	2.02 × 10 <sup>-2</sup>	2.12 × 10 <sup>-3</sup>

있으며, S-3 토양에 비해서는 10<sup>5</sup>배 이상 높았다.

S-1 토양에서는 역학적인 분산계수가 유효확산계수보다 10<sup>5</sup>배 정도 높았으며, S-2 토양에서는 18배 정도 높았다. 그러나, S-3 토양에서는 유효확산계수가 역학적인 분산계수보다 5배 정도 높았다. 따라서, S-1과 S-2 토양에서의 수리분산은 역학적인 분산이 우세하고, S-3 토양에서는 분자확산이 우세한 것으로 나타났다.

역학적인 분산계수와 유효확산계수의 합인 종분산계수는 S-1 토양이 S-2 토양에 비해서 10<sup>2</sup> 배 이상, S-3 토양에 비해서는 10<sup>4</sup> 배 이상 높은 것으로 나타났다. 또한, 토양종류에 따른 수리분산기작 중 유효분자확산의 비율은 S-1 토양에서는 0.001%, S-2 토양에서는 0.18% 및 S-3 토양에서는 85% 정도인 것으로 나타났다.

종분산계수와 유효확산계수를 식 (3)에 대입하여 구한 종분산지수는 S-1 토양에서 16.5 cm로서 가장 높았으며, S-3 토양에서 0.21 cm로서 가장 낮았다. S-1 토양에서의 종분산지수는 S-2 토양에 비해 8배 정도 높았으며, S-3 토양에 비해서는 78배 정도 높게 나타났다.

**4.3. 토양입도에 따른 수리분산기작**

본 연구에서 다공성매질 내 염소이온의 수리분산기작 규명을 위한 페클릿수(*P<sub>ec</sub>*)의 산정은 아래의 식이 적용되었다(Fetter, 1999).

$$P_{ec} = \frac{\bar{v}_l d_m}{D_m} \approx \frac{\bar{v}_l l}{D_L} \tag{10}$$

여기서  $\bar{v}_l$ 는 지하수의 평균선형유속[LT<sup>-1</sup>], *d<sub>m</sub>*은 토양의 평균입경[L], *D<sub>m</sub>*은 분자확산계수[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>], *D<sub>L</sub>*은 종분산계수

**Table 5.** Mean grain diameter, Peclet number and with soil types

Soil type	S-1	S-2	S-3
Mean grain diameter(mm)	0.72	0.29	0.0019
Peclet number	2.59 × 10 <sup>2</sup>	6.27 × 10 <sup>0</sup>	1.35 × 10 <sup>-4</sup>
<i>D<sub>L</sub></i> / <i>D<sub>m</sub></i>	5.93 × 10 <sup>4</sup>	4.36 × 10 <sup>2</sup>	1.51 × 10 <sup>-1</sup>

[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>], *l*은 거리[L]이다.

토양종류별 평균입경, 평균선형유속 및 분자확산계수에 의한 페클릿수를 산정하여 Sahimi(1995)가 제시한 방법에 의해 수리분산기작이 규명되었다. Table 5에는 S-1, S-2 및 S-3 토양의 평균입경과 식 (10)을 적용하여 산정된 페클릿수가 정리되어 있다. S-1 토양에서는 페클릿수가 2.59 × 10<sup>2</sup>으로서 Sahimi(1995)의 수리분산계 중 순수이류계(250 < *P<sub>es</sub>* < 18,000)에 해당하며, S-2 토양에서는 6.27 × 10<sup>0</sup>로서 power law 계(5 < *P<sub>es</sub>* < 250)에 해당하고, S-3 토양에서는 페클릿수가 1.35 × 10<sup>-4</sup> 으로서 분자확산계(*P<sub>es</sub>* < 0.3)에 해당되었다.

S-1 토양에서는 토양의 형상이나 공극율에 의한 염소이온의 수리분산은 무시할 만큼 적은 것으로 판단되며, 이류에 의한 확산이 지배적이다. 이때에 종분산계수와 페클릿수는 선형비례관계에 있다. S-2 토양에서는 수리분산 시 확산경계층(diffusive boundary layer)이 형성되어 횡방향의 분자확산이 발생된 것으로 보인다(Koch and Brady, 1985; Saffmann, 1959). S-3 토양에서는 매우 느린 분자확산으로 인해 염소이온의 확산이 모든 방향에서 동일하게(isotropic dispersion) 발생할 것이다(Brigham et al., 1961; Koplík et al., 1988).

즉, S-1 토양에서의 수리분산기작은 역학적인 분산이 지

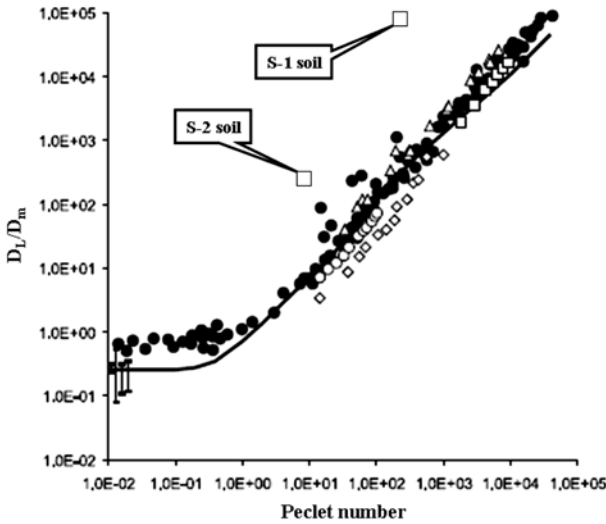


Fig. 5. Plot of soil samples on the graph of versus Peclet number produced by Bijeljic et al.(2004).

배적이며, S-2 토양에서는 역학적인 분산과 분자확산이 동시에 발생하나 역학적인 분산이 우세하다. S-3 토양에서는 분자확산에 의해 수리분산이 지배된다.

Bijeljic et al.(2004) 및 Bijeljic and Blunt(2006)에 의해 보고된 페클릿수( $P_{es}$ ) 대  $D_L/D_M$ 의 그래프에 본 연구에서 산정된 값들을 도시하여 토양종류별 수리분산특성을 비교 분석하였다. Fig. 5에서 원(open circles)으로 표기된 자료는 구슬(bead packs) 혹은 모래(sand packs)를 이용한 주상실험이며, 수직적인 점선라인(dashed vertical lines)은 균질한 사암(homogeneous sandstone)에서 수행된 주상실험의 결과이다. 그리고, 직선(solid line)은 이러한 자료들을 이용한 공극규모 모델링(pore-scale modeling)에 의해 예측된 것이다(Bijeljic et al., 2004).

Fig. 5에서 보면, S-1 토양의 페클릿수에 대한  $D_L/D_M$ 의 값이 Bijeljic et al.(2004)의 연구에 비해 2.2 order 정도 높았으며, S-2 토양에서는 2.0 order 정도 높게 나타났다. 그 이유는 불균일한 입도를 가진 S-1과 S-2 토양 내에서의 용질이송은 토양공극이 발달된 경로들을 통해 역학적인 분산이 우세하게 나타났기 때문이다. S-3 토양은 Fig. 5의 그래프에 도시되지 못하였는데, 그 이유는 토양의 70% 이상이 실트와 점토로 구성되어 평균입경이  $1.89 \mu\text{m}$ 로 매우 작아서 페클릿수가  $1.35 \times 10^{-4}$ 으로 낮았기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 자갈, 모래, 실트 및 점토가 혼합된 3종류 토양에 대한 토양입도와 수리분산기작의 상관성이 연

구되었으며, 다음의 결과들이 도출되었다. 이러한 결과들은 불균일한 입도를 가진 실제 현장 토양층의 수리분산특성 연구에 있어 좋은 사례가 될 것으로 판단된다.

1. 자갈, 모래, 실트 및 점토의 함량비가 다른 3종류 토양시료(자갈·모래/실트·점토의 비율 : S-1 토양 24.5, S-2 토양 4.48 및 S-3 토양 0.4)의 살내주상실험 결과, 종분산계수는 S-1 토양이 S-2 토양에 비해서는  $10^2$  배 이상, S-3 토양에 비해서는  $10^5$  배 이상 높은 것으로 나타났다. 토양종류에 따른 수리분산기작 중 분자확산에 의한 영향성은 S-1 토양에서는 0.001%, S-2 토양에서는 0.18% 및 S-3 토양에서는 85% 정도인 것으로 나타났다. 종분산지수는 S-1 토양에서 16.5 cm, S-2 토양에서 2.02 cm, S-3 토양에서는 0.21 cm 정도이다. 따라서, S-1 토양에서의 종분산은 S-2 토양에 비해 8배 정도 높았으며, S-3 토양에 비해서는 78배 정도 높게 나타났다. 이러한 종분산의 차이는 토양종류에 따른 모래와 자갈의 함량비(S-1 토양 96%, S-2 토양 82% 및 S-3 토양 29%)에 의한 것이다.

2. 토양물성시험 및 살내주상실험에 의해 산정된 페클릿수는 S-1 토양에서  $2.59 \times 10^2$ , S-2 토양에서  $6.27 \times 10^0$ , S-3 토양에서는  $1.35 \times 10^{-4}$ 이었다. 페클릿수를 이용하여 토양종류별 수리분산체제를 분석한 결과, S-1 토양에서는 순수이류체제, S-2 토양에서는 power law 체제, S-3 토양에서는 확산체제가 형성된 것으로 나타났다. 따라서, S-1 토양에서 수리분산은 역학적인 분산이 지배적이며, S-2 토양에서는 역학적인 분산과 분자확산이 동시에 발생하나 역학적인 분산이 우세한 수리분산기작으로 나타났다. S-3 토양에서의 수리분산기작은 분자확산이 지배적으로 작용하였다.

3. Bijeljic et al.(2004)에 의해 보고된 페클릿수 대  $D_L/D_M$ 의 그래프에 본 연구에서 산정된 값들을 도시하여 비교 분석한 결과, S-1 및 S-2 토양의 페클릿수에 대한  $D_L/D_M$ 의 값이 2.0 order 이상 높게 나타났다. 그 이유는 토양시료의 불균일성으로 토양공극이 발달된 경로들을 통해 역학적인 분산이 우세하게 나타났기 때문이다. S-3 토양은 평균입경이  $1.89 \mu\text{m}$ 인 실트와 점토로 구성되어 페클릿수가  $1.35 \times 10^{-4}$ 으로 매우 낮아 그래프에 표시되지 않았다.

사 사

이 논문은 부경대학교 BK21 지구환경시스템 사업단에 의하여 연구비가 지원되었으며, 지원기관에 감사한다.

## 참 고 문 헌

- 김강진, 김하석, 이대운, 이원, 2001, (5)분석화학, 자유아카데미, p. 1141.
- 김영수, 김종열, 김홍택, 이영휘, 홍원표, 2000, 토질역학, 사이텍 미디어, p. 764.
- 농업기반공사, 2002, 육군 구2정비창 오염부지 정화사업 공법실증시험, p. 833.
- 이이라, 이승학, 박준범, 2006, Fe-loaded zeolite를 이용한 칼럼 실험에서의 Cd & Cr(VI) 동시제거 반응성 평가, 한국지하수도양환경학회, **11**(1), 14-22.
- 장연수, 임종주, 1997, 해상점토와 풍화토의 오염물 흡착능에 관한 실험 연구, 한국지하수환경학회, **4**(2), 78-84.
- 천병식, 유한규, 2001, 토질실험 및 지반조사-실내·외 시험법과 그 결과의 이용-, (주)건설연구사, p. 404.
- 한정상, 장호완, 한규상, 고경석, 이영동, 유대호, 1991, 울산 공업단지 지하수 오염 예측을 위한 정량적 수리분산 연구, 한국지하수환경학회, **27**(1), 98-116.
- Berkowitz, B., Scher, H., and Silliman, S.E., 2000, Anomalous transport in laboratory-scale, heterogeneous porous media, *Water Resources Research*, **36**(1), 149-158.
- Bijeljic, B. and Blunt, M.J., 2006, Pore-scale modeling and continuous time random walk analysis of dispersion in porous media, *Water Resources Research*, **42**, W01202.
- Bijeljic, B., Muggeridge, A.H., and Blunt, M.J., 2004, Pore-scale modeling of longitudinal dispersion, *Water Resources Research*, **40**, W11501.
- Brigham, W.E., Reed, P.W., and Dew, J.N., 1961, Experiments on mixing during miscible displacements in porous media, *SPE J.*, **1**, 1-8.
- Charbeneau, R.J., 2000, Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport, Prentice Hall Inc., p. 593.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1997, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, Inc., p. 506.
- Ftter, C.W., 1999, Contaminant Hydrogeology, Prentice Hall Inc., p. 500.
- Koch, D.L. and Brady, J.F., 1985, Dispersion in fixed beds, *J. Fluid Mech.*, **154**, 399-427.
- Koplik, J., Redner, S., and Wilkinson, D., 1988, Transport and dispersion in random networks with percolation disorder, *Phys. Rev. A*, **37**(7), 2619-2636.
- Millington, R.J., 1959, Gas diffusion in porous media, *Science*, **130**, 100-102.
- Millington, R.J. and Quirk, J.M., 1961, Permeability of porous solids, *Trans. Faraday Soc.*, **57**, 1200-1207.
- Ogata, A., 1970, Theory of dispersion in a granular medium, USGS Professional Paper 411-I, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Ogata, A. and Banks, R.B., 1961, A solution of differential equation of longitudinal dispersion in porous media, USGS Professional Paper 411-A, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Pickens, J.F. and Grisak, G.E., 1981, Scale-Dependent Dispersion in a Stratified Granular Aquifer, *Water Resources Research*, **17**(4), 1191-1211.
- Saffman, P.G., 1959, A theory of dispersion in a porous media, *J. Fluid Mech.*, **6**(3), 321-349.
- Sahimi M., 1995, Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock, Weinheim Inc., p. 482.