

현장추적자시험과 실내주상실험을 이용한 복합토양층의 수리분산특성 연구

강동환 · 양성일* · 김태영 · 김성수 · 정상용

부경대학교 환경지질과학과

Hydrodynamic Dispersion Characteristics of Multi-soil Layer from a Field Tracer Test and Laboratory Column Experiments

Dong Hwan Kang · Sung Il Yang* · Tae Yeong Kim · Sung Soo Kim · Sang Yong Chung

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Korea

ABSTRACT

This study analyzed for hydrodynamic dispersion characteristics of multi-soil layer (Silt and clay, Fine sand, Coarse sand), data of a field tracer test on the multi-soil layer and data of laboratory column experiments on the samples on each soil layers. Through the analysis of permeability and flow, MS (Silt and clay) and FS (Fine sand), which were low effective porosity, were higher average linear velocity while CS (Coarse sand), which was high effective porosity, was higher hydraulic conductivity. Hydraulic conductivity function based on average soil particle diameter was assumed $Y = 3.49 \times 10^{-8} e^{1.5320x}$ and coefficient of determination was 0.90. Average linear velocity function based on average soil particle diameter was assumed $Y = 1.88 \times 10^{-7} e^{1.1459x}$ and coefficient of determination was 0.81. Longitudinal dispersivity function based on average soil particle diameter was $Y = 0.00256 e^{0.5971x}$ and coefficient of determination was 0.98. According to the linear regression analysis of average linear velocity and longitudinal dispersivity, assumed function was $Y = 21.7527x + 0.0063$, and coefficient of determination was 0.9979. The ratio of field scale/laboratory scale was 54.09, it exhibited scale-dependent effect of hydrodynamic dispersion. Field longitudinal dispersivity (1.39 m) was 7.47 times as higher than longitudinal dispersivity estimated by the methods of Xu and Eckstein (1995). Hydrodynamic dispersion on CS layer was occurred mainly by diffusion flow in the test aquifer.

Key words : Multi-soil layer deposit, Average soil particle diameter, Hydraulic conductivity, Average linear velocity, Longitudinal dispersivity, Scale dependent effect

요 약 문

본 연구에서는 복합토양층(조립질 모래, 세립질 모래, 실트·점토의 혼합토)에서 수행된 현장추적자시험과 3개 토양층에서 채취된 시료를 이용한 실내주상실험의 자료를 이용하여, 복합토양층의 수리분산특성을 분석하였다. 토양층별 투수성과 유동 분석에 의해, 유효공극률이 낮은 실트·점토의 혼합토와 세립질 모래에서 평균선형유속이 높고, 유효공극률이 큰 조립질 모래에서는 수리전도도가 높은 것을 알 수 있었다. 평균토양입경에 따른 수리전도도 함수는 $Y = 3.49 \times 10^{-8} e^{1.5320x}$ 로 추정되었으며 결정계수는 0.90이었다. 평균토양입경에 따른 평균선형유속 함수는 $Y = 1.88 \times 10^{-7} e^{1.1459x}$ 로 추정되었으며, 결정계수는 0.81이었다. 그리고 평균토양입경에 따른 종분산지수 함수는 $Y = 0.00256 e^{0.5971x}$ 이었으며, 결정계수는 0.98 정도로 나타났다. 평균선형유속과 종분산지수의 선형회귀분석 결과, 함수는 $Y = 21.7527x + 0.0063$ 로 추정되었으며 결정계수는 0.9979로서 매우 높게 나타났다. 본 연구에서 산정된 현장규모/실내주모의 종분산지수비는 54.09로서 규모종속효과를 나타내었다. 현장추적자시험을 실시하여 산정한 종분산지수(1.39 m)가 Xu와 Eckstein(1995)의 방법에 의해 산정된 종분산지수(0.186 m)에 비해 7.47배 정도 크게 나타났다. 이는 시험 대수층 내 중 조립질 모래층에서의 우세한 확산 흐름에 의한 것이다.

주제어 : 복합토양층, 평균토양입경, 수리전도도, 평균선형유속, 종분산지수, 규모종속효과

*Corresponding author : yangsi@pknu.ac.kr

원고접수일 : 2007. 5. 19 심사일 : 2007. 6. 21 게재승인일 : 2008. 6. 20

질의 및 토의 : 2008. 10. 31 까지

*본 논문은 2007년 춘계학술발표회 특별호 논문입니다.

1. 서 론

공장폐수, 매립지의 침출수, 지하저장탱크의 유출 유류 등 독성유해물질의 토양층 누출로 인해 토양층과 지하수의 오염이 심각한 실정이다. 토양층에서 지하수의 오염 확산을 정량적으로 규명하기 위해서는 종분산지수의 산정이 필수적이며, 종분산지수의 산정을 위해서는 실내주상실험과 현장추적자시험이 수행되어야 한다.

강동환 등(2006)은 실내주상실험을 수행하여 불균일한 토양의 입도와 수리분산기작의 상관성을 연구하였으며, 정경영 등(1996)은 지하수 오염물질인 DNAPL의 연직 횡분산계수를 산정하기 위한 실내 DNAPL Pool 용해실험을 실시하였다. 그리고, 장연수와 임종주(1997)는 실내주상실험에 의해 산정된 분산지수 값을 배치실험의 결과와 비교·분석하여 매립지 지반의 침출수에 대한 흡착성을 규명하였다.

현장추적자시험 연구로서 이진용 등(2001)은 다공질 천층 대수층에서 자연구배 추적자시험을 실시하여, 규모가 증가함에 따라 종확산계수(longitudinal dispersivity)가 커지는 규모종속효과를 확인하였다. 강동환 등(2006)에 의해서는 복합토양층의 불포화대와 포화대에서 연속주입 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구가 수행되었다. 한정상 등(1991)은 지하수에 용해된 독성 유해물질이 주변 지질 매체에 미치는 영향성과 이동을 예측하였으며, 김용제 등(2005)은 열추적자(thermal tracer)를 이용한 추적자 시험을 수행하여 관측 온도 및 전기전도도의 변화를 통해 파쇄대 구간의 수리적인 연결성을 해석하였다.

Wheatcraft and Tyler(1988)는 불균질 대수층에 프랙털 기하학 개념을 적용하여, 관측 규모에 대한 프랙털 이동 거리의 지수 관계를 발전시켰고, 종분산지수의 규모종속효과를 해석하였다. Dirk (2005)와 Gelhar (1992)는 기존의 현장추적자시험 및 실내주상실험에 의해 산정된 종분산지수의 규모종속효과를 연구하였으며, Dirk et al. (1999)에 의해서는 불균질한 퇴적물과 고결암에서 측정 규모가 증가함에 따른 수리전도도의 규모종속효과가 규명되었다.

본 연구에서는 실내주상실험과 현장추적자시험을 통해 추정된 복합토양층의 수리전도도, 평균선형유속 및 종분산지수를 이용하여 평균토양입경에 따른 투수성과 지하수

유동을 분석하였다. 그리고 실내주상실험에 의해 산정된 3개 토양의 수리전도도, 평균선형유속 및 종분산지수를 이용하여 평균토양입경에 따른 함수 관계를 추정하였다. 또한, 현장추적자시험과 실내주상실험에 의한 종분산지수의 규모종속효과를 규명하였다.

2. 현장 및 실내 수리실험

연속주입 추적자시험을 실시한 연구지역은 부산광역시 남구 문현동으로 시험부지의 서쪽은 황령산이 위치한다. 연구지역의 지층은 평균 8 m 정도의 매립토로 구성된 토시층 하부에 약 8 m 내외의 해성퇴적층으로 구성되어 있으며, 그 하부에 풍화대와 기반암층이 분포되어 있다(농업기반공사, 2003). 불포화대 구간은 자갈과 모래로 이루어진 매립토층이 지표면하 2.5 m까지 구성되어 있으며, 포화대 구간에서 대수층의 두께는 상부로부터 세립질 모래 0.2 m, 실트·점토의 혼합토 1 m, 조립질 모래 0.5 m, 점토·조립질 모래 0.3 m, 점토 1.5 m로 구성되어 있다(정상용 등, 2006). 그리고, 현장토양 중 조립질 모래(CS 토양), 세립질 모래(FS 토양), 실트·점토의 혼합토(MS 토양)를 채취하여 입도분석, 실내변수위투수시험 및 실내주상실험이 수행되었다(강동환 등, 2006).

복합토양층에서 수행된 현장추적자시험에 의해 추정된 유효공극률(effective porosity)과 순간충격시험에 의해 산정된 수리전도도를 이용해 시험부지 내 평균선형유속(average linear velocity)을 산정하였다(Table 1).

본 연구에 이용된 자료들이 Table 2에 정리되어 있으며, 이러한 자료들은 복합토양층에서 수행된 현장추적자시험, 시험부지 내 3개 토양층에서 채취된 토양시료를 이용한 입도분석 및 실내변수위투수시험, 실내주상실험에 의해 산출되었다(강동환 등, 2006; 정상용 등, 2006). 실내주상실험을 통해 산정된 종분산지수의 산술평균은 6.23×10^{-2} m, 기하평균은 2.57×10^{-2} m, 조화평균은 8.58×10^{-3} m 이었다. 본 현장에서의 종분산지수와 수리전도도는 승수규모(order of magnitude)의 변화를 나타내었다. Dirk (2005)에 의하면 일반적으로 대수층 내 종분산지수는 기하평균(geometric mean)이 가장 적합한 것으로 보고되었으며, 따라서 본 연구에서도 기하평균(2.57×10^{-2} m)을 적용하였다.

Table 1. Hydraulic parameters estimated by field hydraulic tests

Hydraulic conductivity (m/sec)	Longitudinal dispersivity (m)	Effective porosity (%)	Average linear velocity (m/sec)
1.80×10^{-6}	1.39	9.75	1.39×10^{-6}

Table 2. Hydraulic parameters estimated by laboratory hydraulic experiments

Experiment method	Particle size analysis	Falling head permeameter	Column length	Laboratory column experiment	
Soil type	Average soil particle diameter (m)	Hydraulic conductivity (m/sec)	Test scale (m)	Average linear velocity (m/sec)	Longitudinal dispersivity (m)
CS (Coarse sand)	7.20×10^{-4}	9.27×10^{-4}	5.00×10^{-1}	7.31×10^{-4}	1.65×10^{-1}
FS (Fine sand)	2.90×10^{-4}	2.43×10^{-5}	5.00×10^{-1}	4.39×10^{-5}	2.02×10^{-2}
MS (Silt & clay)	1.89×10^{-6}	1.02×10^{-8}	1.00×10^{-1}	1.45×10^{-7}	2.12×10^{-3}
Arithmetic average	3.37×10^{-4}	3.17×10^{-4}	—	2.58×10^{-4}	6.23×10^{-2}
Geometric average	1.07×10^{-4}	1.64×10^{-5}	—	3.31×10^{-5}	2.57×10^{-2}
Harmonic average	9.15×10^{-6}	5.09×10^{-8}	—	7.19×10^{-7}	8.58×10^{-3}

3. 평균토양입경에 따른 토양층의 지하수유동 및 수리분산 특성

현장추적자시험과 실내주상실험에 의한 수리상수(중분산지수, 평균선형유속, 수리전도도)의 차이를 토양층별로 비교·분석하였다. 토양의 평균입경은 CS 토양 > FS 토양 > MS 토양 순이며, 수리전도도, 평균선형유속 및 중분산지수의 크기도 동일한 순서로 산정되었다. 토양층별 수리전도도와 평균선형유속을 비교한 결과, MS 토양과 FS 토양에서도 평균선형유속이, CS 토양에서는 수리전도도가 높게 나타났다. 그리고 본 연구의 시험부지에서는 수리전도도가 평균선형유속보다 크게 나타났다. MS 토양에서는 유효공극률이 낮고, CS 토양에서는 유효공극률이 높게 나타났다. 일반적으로 평균선형유속은 수리전도도와 수리수 두에 비례하고 유효공극률에 반비례하고, 평균선형유속은 수리전도도에 비해 크다. 따라서 유효공극률이 높은 CS 토양의 수리전도도가 평균선형유속보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

평균토양입경에 따른 수리전도도와 평균선형유속의 변화를 Fig. 1에 도시하였다. MS 토양에서 FS 토양으로 평균토양입경이 153.0배 증가할 때 수리전도도는 2382.4배, 평균선형유속은 302.8배 정도 증가하였고, FS 토양에서 CS 토양으로 평균토양입경이 2.5배 정도 증가할 때 수리전도도는 38.2배, 평균선형유속은 16.7배 정도 증가하였다. 따라서 CS 토양에서 평균선형유속은 급격히 높아짐을 알 수 있었다. 시험부지 내 평균토양입경에 따른 수리전도도(1.80×10^{-6} m/sec)와 평균선형유속(1.39×10^{-6} m/sec)은 모두 실내실험을 통한 조화평균값과 비슷하였다(한정상, 1998).

평균토양입경에 따른 중분산지수의 변화를 Fig. 2에 도시하였다. MS 토양에서 FS 토양으로 평균토양입경이 153.0배 증가할 때 중분산지수는 9.5배 증가하였고, FS

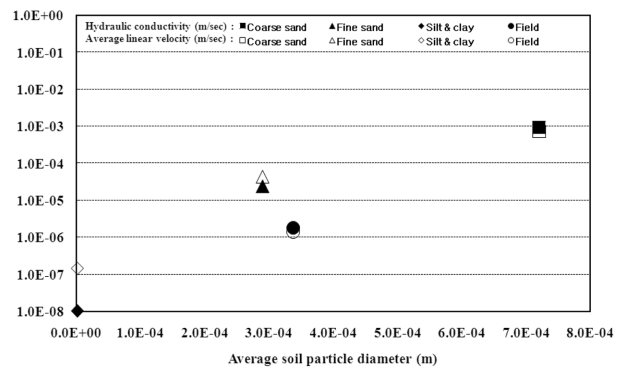


Fig. 1. Plots of hydraulic conductivity and average linear velocity with average soil particle diameter.

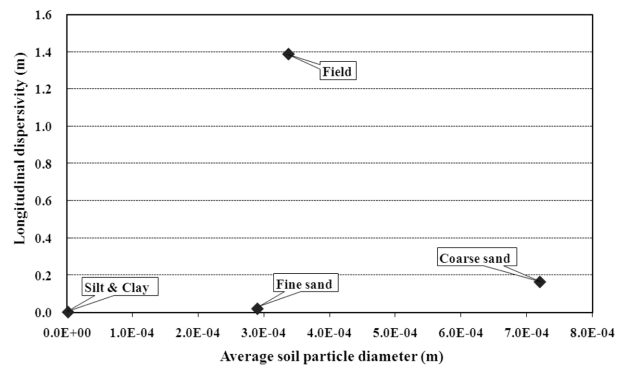


Fig. 2. Plots of longitudinal dispersivity versus average soil particle diameter estimated by field and laboratory experiments.

토양에서 CS 토양으로 평균토양입경이 2.5배 증가할 때 중분산지수는 8.2배 증가하였다. 따라서 CS 토양에서의 수리분산이 급격하게 높음을 알 수 있었다. 시험부지 내 평균토양입경이 CS 토양에 비해 2.1배 작지만 중분산지수가 2.8배 큰 이유는 시험규모가 67.2배 크기 때문이며, 또한 CS 토양에서의 우세한 확산에 의한 것이다.

평균선형유속에 따른 중분산지수의 함수를 추정하였다. Bromly et al.(2007)의 연구 결과에 의하면 평균선형유속

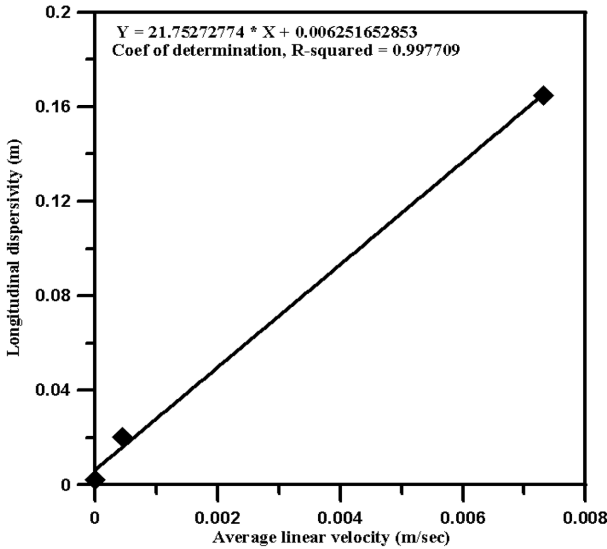


Fig. 3. The function of longitudinal dispersivity with average linear velocity for CS, FS, and MS soil samples.

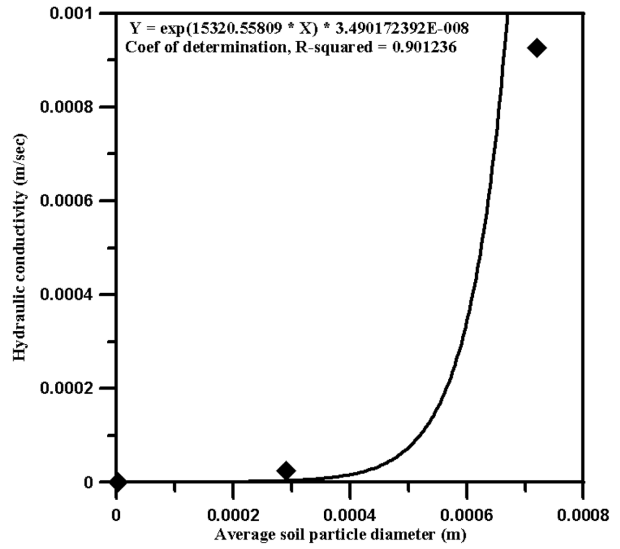


Fig. 4. The function of hydraulic conductivity with average soil particle diameter for CS, FS and MS soil samples.

은 중분산지수와 선형적인 양의 상관성을 보여주며, 이는 토양층에서의 수리분산이 이류(advection)에 의해 지배되기 때문임을 보고하였다. 본 연구지역 내 3개 토양층에서 산정된 평균선형유속과 중분산지수에 가장 적합한 선형함수의 기울기는 21.75, 원자료와 추정된 선형함수 간의 결정계수는 0.998 정도로 나타났다(Fig. 3).

토양층의 평균입경에 따른 수리전도도 함수를 추정된 결과, 수리전도도가 평균토양입경이 커짐에 따라 지수형태로 증가함을 보였다(Fig. 4). MS 토양에서 FS 토양으로의 수리전도도 증가 기울기는 82.60, FS 토양에서 CS 토양으로의 수리전도도 증가 기울기는 726.21이었다. 평균토양입경이 0.0005 m 이상의 토양층에는 모래 크기의 입자들이 다량 함유되어 있기 때문에, 수리전도도의 증가 기울기가 급격하게 상승한 것이다.

토양층별 평균토양입경에 따른 평균선형유속 함수는 지수형태가 가장 적합한 것으로 추정되었으며, 이는 평균토양입경에 대한 수리전도도 함수와 유사한 형태이다(Fig. 5). MS 토양에서 FS 토양으로 평균토양입경이 증가할 때의 평균선형유속 증가 기울기는 27.15, FS 토양에서 CS 토양으로 평균토양입경이 증가할 때의 평균선형유속 증가 기울기는 138.02이었다. Farenhorst와 Bryan (1995)는 토양입경이 커질수록 평균선형유속이 증가한다고 보고하였으며, 본 연구에서는 평균토양입경이 0.0005 m 이상인 토양층에서의 평균선형유속이 급격하게 증가함을 보였다. 이는 수리전도도 함수와 동일한 형태로서, 토양층에 모래 성분이 다량 함유되어 평균선형유속이 높게

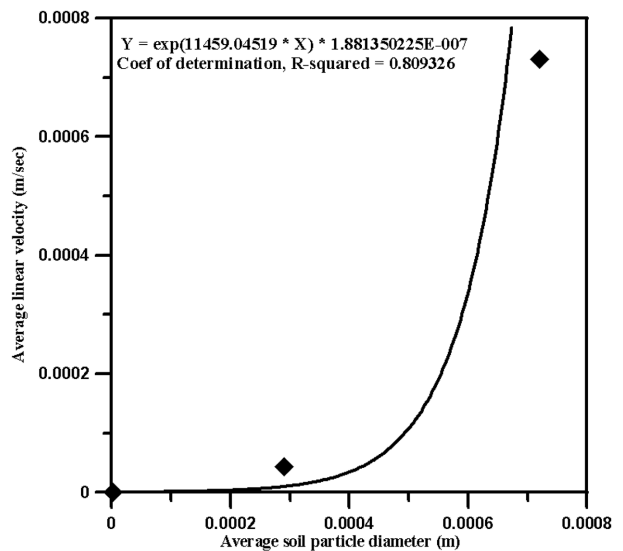


Fig. 5. The function of average linear velocity with average soil particle diameter for CS, FS and MS soil samples.

나타난 것이다.

입도분석에 의해 산정된 평균토양입경과 실내주상실험에 의해 산정된 토양층별 중분산지수를 이용하여 Grapher 4.0 프로그램을 통해 토양층별 중분산지수 함수를 추정하였다(Fig. 6). 가장 적합하게 추정된 함수는 $Y = 0.00256 \times e^{5971x}$ 이었으며, 결정계수는 0.98 정도로서 매우 높았다. MS 토양에서 FS 토양으로 평균토양입경이 증가할 때의 중분산지수 증가 기울기는 5.59, FS 토양에서 CS 토양으로 평균토양입경이 증가할 때의 중분산지수 증가 기울기

는 13.03이었다. 전체적으로 볼 때, FS 토양에서 CS 토양으로 수리분산이 증가 높게 나타나는데, 이는 CS 토양에서의 빠른 유동에 의해 수리분산이 매우 높게 발생하였기 때문이다(강동환 등, 2006).

4. 종분산지수의 규모종속효과

실내주상실험에서 토양에 따라 칼럼길이가 다르기 때문에 시험규모를 동일하게 하기 위해, 실내주상실험의 칼럼길이를 0.5 m로 동일하게 적용하여 종분산지수를 재산정하였다. 그리고 3개 실내주상실험에 의한 규모종속효과를

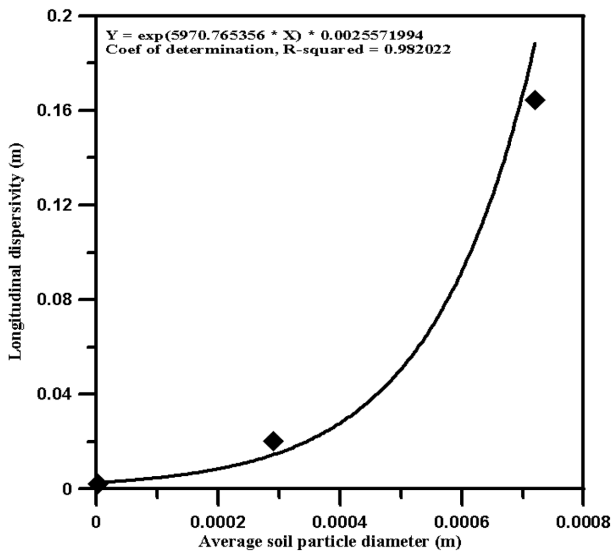


Fig. 6. The function of longitudinal dispersivity with average soil particle diameter for CS, FS and MS soil samples.

분석하였다.

현장은 규모가 1.39 m로 실내주상실험 규모 0.5 m 비해 매우 크기 때문에, 불균질성(heterogeneity)이 실내에 비해 매우 크다(Wheatcraft and Tyler, 1988; Dirk et al., 2005). Dirk(2005)에 의해 제시된 회귀직선에 본 연구의 시험규모를 적용한 결과, 현장추적자시험에 의한 종분산지수는 1.39 m, 실내주상실험에 의한 종분산지수는 2.57×10^{-2} m로 산정되었다. Dirk(2005)의 연구에 적용하여 산정된 현장규모/실내규모의 종분산지수 비는 11.25배이었으며, 본 연구에서 산정된 현장규모/실내규모의 종분산지수 비는 54.09이었다. 이는 종분산지수의 규모종속을 나타내는 것이며(Wheatcraft and tyler, 1988; Dirk, 2005; Gelhar et al., 1992; Neuman, 1990), 또한 현장추적자시험 시 CS 토양층에서 우세한 확산흐름이 발생하였음을 의미하는 것이다(강동환 등, 2006).

Xu and Eckstein(1995)은 Gelhar et al.(1992)의 신뢰성(reliability) 분류 방법을 이용해 신뢰도를 차등한 후, 가중최소자승법(weighted least squares method)을 이용하여 분산지수를 산출하는 회귀식을 개발하였다. 회귀식 중 본 연구에 적합한 가중치는 1:1:1 이었으며, 유추된 회귀식은 다음과 같다.

$$a_L = 1.20 (\log_{10} L)^{2.958} \quad (1)$$

여기서 a_L 은 종분산지수[L], L은 시험규모[L]이다. 식(1)을 적용하여 산정한 종분산지수는 0.186 m으로 나타났다. 현장추적자시험을 실시하여 산정한 종분산지수(1.39 m)가 Xu and Eckstein(1995)의 방법에 의해 산정된 종분산지

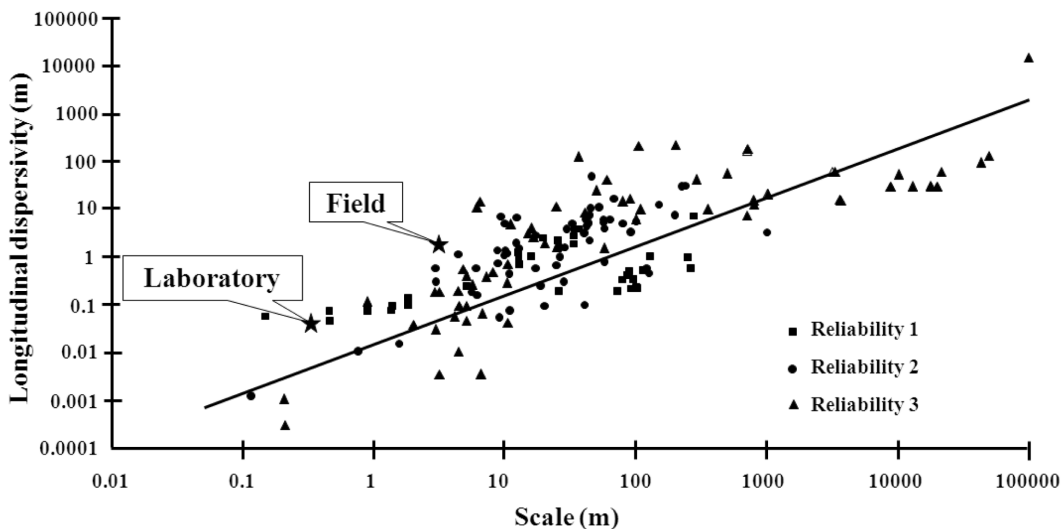


Fig. 7. Dispersivity to scale in laboratory column experiments and field tracer test (modified by Dirk, 2005).

수에 비해 7.47배 정도 크게 나타났다. 이는 본 현장의 시험 대수층에서 투수성이 높은 CS 토양층에 의한 우세 흐름 확산이 발생하였기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 현장추적자시험과 실내주상실험을 통해 복합토양층의 수리분산특성을 비교·분석하였으며, 그 결과는 아래와 같이 도출되었다.

토양의 평균입경은 CS 토양 > FS 토양 > MS 토양 순이며, 수리상수(수리전도도, 평균선형유속 및 종분산지수)의 크기도 동일한 순서로 산정되었다. 유효공극률이 높은 CS 토양의 수리전도도가 평균선형유속보다 크게 나타났으며, 시험부지 내 평균토양입경에 따른 수리전도도(1.80×10^{-6} m/sec)와 평균선형유속(1.39×10^{-6} m/sec)은 모두 실내실험을 통한 조화평균값과 비슷하게 나타났다. 시험부지 내 평균토양입경이 CS 토양에 비해 2.1배 작지만 종분산지수가 2.8배 큰 이유는 시험규모가 67.2배 크기 때문이며, 이는 CS 토양에서의 우세한 확산에 의한 것이다.

평균선형유속에 따른 종분산지수의 추정된 함수는 $Y = 21.7527x + 0.00625$ 이었으며, 결정계수는 0.99 정도로 나타났다. 평균선형유속이 증가함에 따라 종분산지수가 증가하는 선형적인 비례관계를 나타내었으며, 이는 토양층에서의 수리분산이 이류에 의해 지배되기 때문이다. 토양층별 수리전도도, 평균선형유속 및 종분산지수의 함수와 결정계수를 추정하였다. 토양층별 수리전도도 함수는 $Y = 3.49017 \times 10^{-8} \times e^{1.5320x}$, 평균선형유속 함수는 $Y = 1.88135 \times 10^{-7} \times e^{11.459x}$ 그리고 종분산지수 함수는 $Y = 0.00256 \times e^{5.971x}$ 이었으며, 토양층별 수리전도도의 결정계수는 0.90, 평균선형유속의 결정계수는 0.81 그리고 종분산지수의 결정계수는 0.98 정도로 나타났다. 토양 입경이 증가함에 따라 유속이 증가함을 알 수 있었으며, CS 토양에서의 빠른 유동에 의해 수리분산이 매우 높게 나타남을 알 수 있었다.

Dirk(2005)의 연구에 적용하여 산정된 현장규모/실내규모의 종분산지수 비는 11.25배이었으며, 본 연구에서 산정된 현장규모/실내규모의 종분산지수 비는 54.09배이었다. 이는 종분산지수의 규모종속효과와 CS 토양층에서 발생된 우세한 확산흐름에 의한 것이다. 또한 현장추적자시험을 실시하여 산정한 종분산지수(1.39 m)가 Xu와 Eckstein(1995)의 방법에 의해 산정된 종분산지수(0.186 m)에 비해 7.47배 정도 크게 나타났다. 이는 본 현장의 시험 대수층에서 투수성이 높은 CS 토양층에 의한 우세흐름 확산이 발생하였기 때문이다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-3-3)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강동환, 정상용, 2006, 실내주상실험에 의한 불균일한 토양의 입도와 수리분산기작의 상관성 연구, 한국지하수토양환경학회지, **11**(6), 28-34.
- 김용제, 김태희, 김구용, 황세호, 채명곤, 2005, 파쇄대 응회암 대수층의 지하수 유동 특성화 기법, 한국지하수토양환경학회지, **10**(4), 33-44.
- 농업기반공사, 2003, 문현지구 오염부지정화사업, p. 249.
- 이진용, 천정용, 이강근, 이민희, 윤정기, 2001, 다공질 천층 대수층에서의 추적자 이동 연구, 지질학회지, **37**(2), 309-316.
- 장연수, 임종주, 1997, 해상점토와 풍화토의 오염물 흡착능에 관한 실험 연구, 한국지하수토양환경학회지, **4**(2), 78-84.
- 정경영, 배열호, 최상일, 1996, DNAPL Pool의 용해실험에 의한 분산계수 산정, 한국지하수토양환경학회지, **1**(1), 19-27.
- 정상용, 강동환, 이민희, 손주형, 2006, 복합토양층의 불포화대와 포화대에서 연속주입 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구, 한국지하수토양학회지, **11**(4), 48-56.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, p. 1071.
- 한정상, 장호완, 한규상, 고경석, 이영동, 유대호, 1991, 울산 공업단지 지하수 오염 예측을 위한 정량적 수리분산 연구, 지질학회지, **27**(1), 98-116.
- Bromly, M., Hinz, C., and Aylmore, L.A.G., 2007, Relation of dispersivity to properties of homogeneous saturated repacked soil columns, *European Journal of Soil Science*, **58**, 293-301.
- Dirk, S.M., 2005, Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior, *groundwater*, **43**(3), 443-456.
- Dirk, S.M., Carlson, D.A., Cherkauer, D.S., and Malik, P., 1999, Scale dependency of hydraulic conductivity in heterogeneous media, *Ground Water*, **37**(6), 904-919.
- Farenhorst, A. and Bryan, R.B., 1995, Particle size distribution of sediment transported by shallow flow, *Catena*, **25**, 47-62.
- Gelhar, L.W., Welty Claire, and Rehfeldt Kenneth R., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, **28**(7), 1955-1974.
- Neuman, S.P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, *Water Resources Research*, **26**(8), 1749-1758.
- Wheatcraft, S.W. and Tyler, S.W., 1988, An explanation of

scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry, *Water Resources Research*, **24**(4), 566-578.

Xu, M. and Eckstein, Y., 1995, Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale, *Ground Water*, **33**(6), 905-908.