



An experimental study on the correlation of hydraulic mean radius and hydrodispersive parameters in rockfill porous media

Han, Ilyeong^{a*} · Lee, Jaejong^b · Kim, Gyoo Bum^c

^aDirector of Technical Research Center, Biryong Corporation, Seongnam, Korea

^bJunior researcher of Technical Research Center, Biryong Corporation, Seongnam, Korea

^cProfessor, Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University, Daejeon, Korea

Paper number: 20-058

Received: 12 July 2021; Revised: 30 August 2021; Accepted: 30 August 2021

Abstract

The mechanical dispersion which dominates solute transport in porous media is caused by the difference in flow velocity within pores. Longitudinal dispersion coefficient and longitudinal dispersivity that are hydro-dispersive parameters of advection-dispersion equation can only be obtained by experiment. Hydraulic mean radius that represents the amount and intensity of flowing water within pores can be obtained by the formula using the factors for physical properties. A slug injection test was conducted and a power type empirical formula for obtaining a longitudinal dispersivity using a hydraulic mean radius in rockfill porous media was derived. It is possible to obtain the longitudinal dispersivity depending on transport distance because it contains a formula for a scale constant, and expected to be applicable to waterways filled with homogeneous gravel and small flow rate.

Keywords: Longitudinal dispersion coefficient, Longitudinal dispersivity, Hydraulic mean radius, Slug injection test, Scale constant

자갈 다공성매질에서 수리평균반경과 수리분산 매개변수의 상관성에 관한 실험적 연구

한일영^{a*} · 이재정^b · 김규범^c

^a(주)비룡 기술연구소 연구소장, ^b(주)비룡 기술연구소 주임연구원, ^c대전대학교 건설안전방재공학과 교수

요 지

다공성 매질에서 오염물 이동에 지배적인 기작인 역학적 분산은 공극 내 유속 차이에 의해서 발생한다. 종분산계수와 종분산지수는 이송확산 모형의 수리분산 매개변수이며, 실험을 통하여 얻어야만 한다. 수리평균반경은 공극 내 물의 흐름 양의 크기와 강도를 표현할 수 있으며, 매질의 물리적 특성인자를 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구는 순간주입 추적자실험을 통하여 자갈 다공성매질에서 수리평균반경을 이용하여 종분산지수를 구할 수 있는 거듭제곱형의 경험식을 도출하였다. 경험식은 스케일상수 계산식이 포함되어 있어 이동거리에 따른 종분산지수의 산정이 가능하며, 소규모 유량의 균질한 자갈로 구성된 수로에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어: 종분산계수, 종분산지수, 수리평균반경, 순간주입 추적자실험, 스케일상수

1. 서 론

다공성 매질에서 오염물질의 시간적 및 공간적 농도변화를 예측하기 위하여 이송확산 모형을 사용하는데 가장 중요하

고도 어려운 문제는 종분산계수와 종분산지수와 같은 수리분산 매개변수의 산정이다. 수리분산 매개변수는 실험으로부터 구하게 되며, 매질의 조건이 바뀔 때 마다 매번 동일한 실험과 분석을 반복하여야 하므로, 많은 시간과 비용을 수반하게 된다. 자갈접촉산화수로와 같이 자갈을 채움재로 하는 수로에서는 조사, 설계단계에서 자갈의 기본적인 물리적 특성정보를 구하게 되는데, 기왕에 습득하게 되는 기본정보만으로

*Corresponding Author. Tel: +82-31-718-5106
E-mail: iyhan101@naver.com (I. Han)

수리분산 매개변수를 간편하게 산정할 수 있다면, 유입된 약품이나 오염물질의 시간과 거리에 따른 농도를 예측하는데 시간과 비용을 절약하게 될 것이다. 지표수 분야에서는 수로의 물리적 특성과 수리특성 정보로부터 종분산계수를 산정하는 많은 연구와 경험식들이 제안되어져 왔다. Seo and Chung (1998)은 자연하천에서 수심이 용이한 평균수심, 전단유속, 하폭 정보만으로 종분산계수를 산정하는 경험식을 개발하였다. 다공성매질 분야에서는 역학적분산과 선형평균유속과의 관계에서, 지질매체 고유의 특성을 나타내는 비례상수로써 종분산지수의 개념이 도입된다. 종분산지수는 대부분의 연구결과에서 이동거리에 따라 증가하는 것으로 밝혀졌다 (Pickens and Grisak, 1981; Gelhar *et al.*, 1985; Neuman, 1990; Schulze and Cherkauer, 1997; Neuman and Federico, 2003). 특히 Schulze (2005)은 기존연구에서 구한 307개의 종분산지수 값을 이동거리별로 작도하여 상관성을 관찰하고, 모래 대수층과 모래자갈혼합 대수층을 대상으로 이동거리, 매질상수, 스케일상수가 포함되는 거동제공형의 종분산지수 산정 경험식을 제안하였다.

다공성매질의 기본적인 물리적 특성인자로 흐름특성을 표현하는 수리평균반경은 수리반경에서 유래되었다. 수리반경은 관수로와 개수로의 평균유속을 계산하는 Manning 공식, Chezy 공식, Hagen-Williams 공식에 모두 사용되고 있으며, 관수로에서의 레이놀즈 수를 구할 때, 관의 직경 값을 대신하여 사용하기도 한다. Taylor (1948)에 의해 다공성매질에 최초로 사용되었고, Wilkins (1956) 이후, 수리평균반경이라는 용어를 사용하게 된다. McCorquodale *et al.* (1978)은 자갈매질에서의 공극유속을 계산하는 공식에 수리평균반경을 사용하였다. Sabin and Hansen (1994)은 Taylor (1948)가 유도한 다공성매질의 수리반경 계산식에 입자 표면의 거칠기와 편평도를 나타내는 형상계수를 포함시키는 수리평균반경 계산식을 제안하게 된다. 이 계산식에는 역학적분산 기작에 영향을 미치는 물리적 특성 인자들이 모두 포함된다.

본 연구는 자갈로 구성된 자갈접촉산화수로의 기본적인 물리적 특성정보를 이용하여 종분산지수를 산정할 수 있는 경험식을 도출하기 위해서 수행되었다. 이를 위해서 차원해석으로부터 역학적분산 기작과 관련 있는 변수들을 무차원 변수화하고, 변수들간의 함수관계의 가능성을 확인하였다. 강자갈을 대상으로 수리평균반경을 산정하였으며, 추적자실험을 실시하여 수리분산 매개변수를 산출하고, 수리평균반경과 종분산지수의 상관성에 관한 경험식을 도출하였다.

2. 이론적 배경

2.1 역학적 종분산

다공성매질의 공극 내 흐름은 공극의 크기, 이동경로의 길이, 공극 내 마찰정도에 좌우되어 평균선형유속보다 빠르거나 느리게 된다(Philip *et al.*, 1994). 이와 같이 공극 내 유속이 서로 다르기 때문에 용질혼합이 발생하며, 흐름방향으로 발생하는 혼합현상을 역학적 종분산이라고 한다. 역학적 종분산은 평균선형유속의 함수로 볼 수 있으며, 매질의 특성을 나타내는 종분산지수 개념을 도입하면 역학적 종분산계수는 종분산지수 α_L 와 평균선형유속의 곱 v_L 으로 표현할 수 있다(Fetter, 1993). 종분산지수는 역학적 종분산계수와 평균선형유속과의 관계에서 비례상수 역할을 하며, 다공성 매질의 종분산 특성을 결정하게 하는 경험값이다(Wikimedia foundation, 2021).

2.2 수리평균반경

수리반경은 흐름 단면적을 물과 접하고 있는 변의 길이로 나눈 값으로, 수로에서 물 흐름의 효율성을 나타낸다 (Trenchlesspedia, 2021). Taylor (1948)는 다공성매질에서 입자의 행상이 구와 같은 원형일 때의 표면적과 부피 계산식을 이용하여 모래입자로 구성된 매질에서의 수리반경을 Eq. (1)과 같이 유도하였다.

$$R_H = \frac{A}{P} = \frac{AL}{PL} = e \frac{V_s}{A_s} = e \frac{(1/6)\pi d^3}{\pi d^2} = e \frac{d}{6} \quad (1)$$

여기서, R_H 는 수리반경(동수반경, 경심), P 는 윤변, A 는 흐름 단면적, L 은 이동거리, e 는 간극비, V_s 는 입자의 부피, A_s 는 입자의 표면적, d 는 입경의 크기이다. 다공성 매질에서 수리평균반경은 공극직경 크기의 평균값이며, 공극의 부피를 매질 입자의 표면적으로 나눈 값으로 정의된다. 자갈매질일 경우, Eq. (1)에서 입경의 크기를 평균입경으로 하고, 입자의 형상계수를 추가하면 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다(Sabin and Hansen, 1994).

$$m = e \frac{b}{6} \times \frac{1}{S} \quad (2)$$

여기서, m 은 수리평균반경, b 는 입자의 평균입경의 크기, S 는 자갈입자의 형상계수로서, 편평도(0-4)와 거칠기(0-4)의 곱이며, 자갈의 형상(판형, 구형, 날개형, 막대기형)에 따라 고유의 값을 갖는다.

2.3 차원해석

분자확산을 무시할 경우, 다공성 매질의 종분산 기작을 지배하는 물리량 사이에는 Eq. (3)과 같은 함수관계가 있다.

$$D_L = F(\rho, \mu, v, e, d, L, S) \quad (3)$$

여기서, D_L 은 종분산계수, ρ 는 밀도 [ML^{-3}], μ 는 점성계수 [ML^{-3}], v 는 유속 [LT^{-1}], e 는 간극비, d 는 입자입경의 크기 [L], L 은 이동거리, S 는 입자의 형상과 거칠기이다. 무차원 변수의 함수형으로 표현하면 Eq. (4)를 얻을 수 있다.

$$\frac{D_L}{v_L L} = f_1\left(\frac{\rho v d}{\mu}, e, \frac{d}{L}, S\right) \quad (4)$$

여기서, v_L 는 종방향 유속, $D_L/v_L L$ 는 무차원 종분산계수로서, Peclet 수의 역수이며, 종분산과 이송의 비를 나타낸다. $\rho v d/\mu$ 는 레이놀즈 수이다. 나머지 무차원 변수들은 수리평균 반경 계산식 Eq. (2)에 적용하면 Eq. (4)는 Eq. (5)와 같다.

$$\frac{D_L}{v_L L} = f_1\left(\frac{\rho v d}{\mu}, \frac{m}{L}\right) \quad (5)$$

여기서, m/L 은 무차원 수리평균반경으로서, 단위 이동거리 당 공극 내 흐름 양의 크기를 나타낸다. 종분산과 매질의 특성만을 고려하면, Eq. (5)는 Eq. (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$D_L = m \times v_L \quad (6)$$

따라서 종분산지수 α_L 와 수리평균반경 m 은 공통적으로 매질의 특성을 나타내며 길이의 차원을 갖는 상수로서 Eq.(7)과 같은 함수관계가 있음을 알 수 있다.

$$\alpha_L = f_2(m) \quad (7)$$

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료 및 수리평균반경 산정

시료는 강자갈을 사용하였다. Zingg 분류 (Zingg, 1935)에 의하면, 입자 입경의 크기에 따른 분류는 직교하는 방향으로 입자의 장축의 길이 a , 중간축의 길이 b , 단축의 길이를 c 라고 할 때 중간축의 길이 b 를 기준으로 시료를 분류하며, 입자의 형상에 따른 분류는 b/a , c/b 의 값에 따라 그래프상에서 판형, 구형, 날개형, 막대기형으로 분류된다(Fig. 1). 본 실험에서는 시료 입자 입경크기에 따른 등급은 RGXL (3.51 cm), RGL (2.79 cm), RGM (1.43 cm), RGS (0.75 cm)의 4등급으로 분류되었다(Fig. 2). 입경크기에 따른 등급별로 약 100개 정도의 샘플을 선정하여 Zingg 그래프에 작도하고 형상을 분류하고, 형상별 빈도수와 비율을 계산하였다(Fig. 3). 분류된 형상에는 형상계수 값(Sabin and Hansen, 1994)을 적용하여 평균값을 구하고, Eq. (2)에 적용하여 수리평균반경을 계산하였다.



Fig. 1. Size classification of particle of rockfill used in the experiment

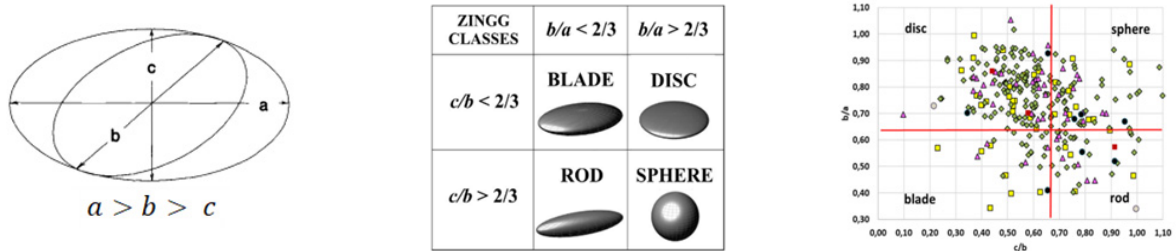


Fig. 2. Zingg shape classes (Zingg, 1935)

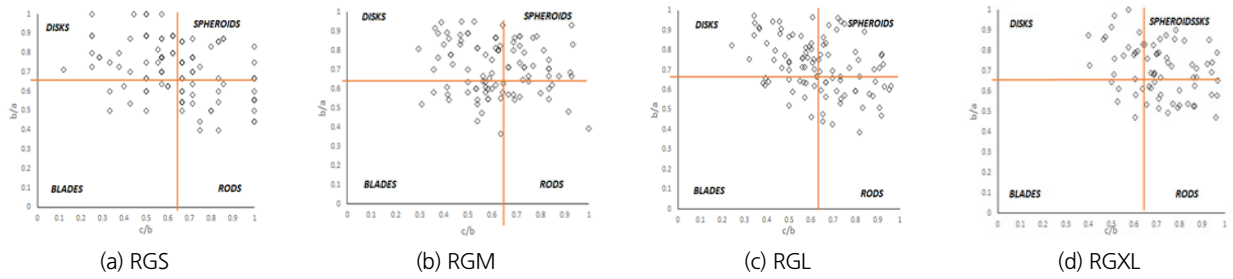


Fig. 3. Characterization of particle shapes for the sample of rockfill

Table 1. Input parameters and the results of hydraulic mean radius calculation

Materials		Particle								Rockfill	
		Mean size (cm)			Shape frequency					<i>e</i>	<i>m</i> (cm)
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Disk	Rod	Blade	Sphere	<i>S</i>		
River gravel	RGS	0.93	0.75	0.40	41%	24%	10%	25%	1.87	0.45	0.003
	RGM	2.07	1.43	0.88	35%	12%	27%	26%	1.96	0.39	0.048
	RGL	3.99	2.79	1.73	44%	21%	15%	20%	1.91	0.41	0.101
	RGXL	5.07	3.51	2.47	26%	26%	9%	36%	1.82	0.64	0.206

a = major axis, *b* = intermediate axis, *c* = minor axis

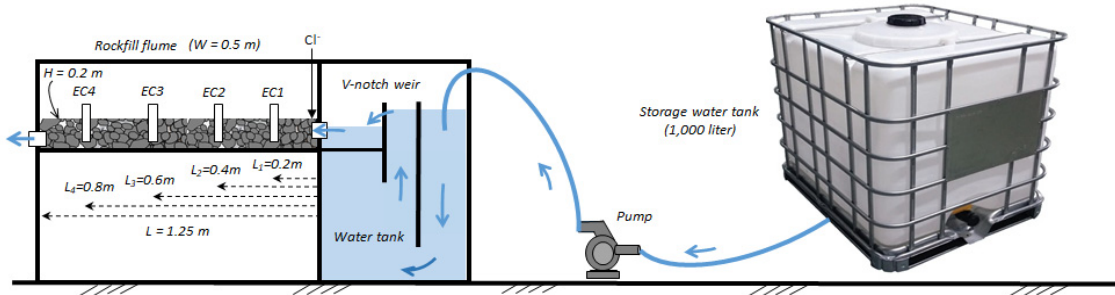


Fig. 4. Overview of experimental setup

수리평균반경 계산에 사용된 입자의 크기, 간극비, 형상계수와 수리평균반경 산정 결과를 Table 1에 정리하였다.

3.2 실험방법

수리분산 매개변수 산정을 위해서 강자갈 그룹(RGXL, RGL, RGM, RGS) 별 순간주입 추적자 실험을 실시하였다. 실험장치는 1,000 리터용량의 물 저장탱크, 펌프, V-notch가 구비된 유입수 탱크와 아크릴수조이다. 수조는 충남 홍성군 신곡천에 설치되는 자갈점축산화수로의 1/12 축소모형으로 제원은 길이 $L = 1.25\text{ m}$, 폭 $W = 0.5\text{ m}$, 깊이 $H = 0.2\text{ m}$ 이다. 수조에 강자갈을 0.1 m 높이로 채우고, 4개의 전기전도도계를 추적자 (Cl⁻)주입지점으로 부터 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m에 설치하였다(Fig. 4). 유입 유량은 $1.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 이 값은 신곡천의 갈수기 유량에 해당한다. 본 실험 전에 전기전도도 값을 농

도값으로 환산하기 위한 관계곡선을 작성하였다. 매 실험마다 배경농도를 측정하였으며, 100 mg (2,000 mg/l)의 Cl⁻을 순간 주입하고 4개의 전기전도도계로 부터 1초 단위의 전기전도도 값을 측정한 후에, 작성된 관계곡선을 이용하여 농도값으로 환산하고 농도값은 배경농도 값을 제외하여 사용하였다. 등급별 이동거리별 시간에 따른 농도의 변화는 농도이력곡선으로 나타내었다.

3.3 수리분산 매개변수 계산방법

일반적으로 수학적모형의 수리분산 매개변수는 시행착오에 의한 방법으로 구하거나, 표준곡선을 작성하여 측정 농도이력곡선과의 곡선맞춤에 의해 구할 수 있다. Eq. (8)은 균질 등방조건의 다공성매질에서의 1차원 이송확산모형이다 (Fetter, 1993).

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_L \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (8)$$

여기서, C 는 농도(mg/l)이다. Eq. (9)는 오염물이 순간적으로 유입될 경우, Eq. (8)의 해를 구하는 식이며, 시행착오에 의한 방법으로 수리분산 매개변수를 구할 수 있다(Liang *et al.*, 2018).

$$C(x, t) = \frac{M}{An(4\pi D_L t)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x - v_L t)^2}{4D_L t}\right] \quad (9)$$

여기서, M 은 흐름단면적당 오염물의 질량, A 는 흐름단면적이며, n 은 공극율이다. Sauty (1980)는 오염물이 순간적으로 유입될 경우, Eq. (8)의 해를 구하는 식을 Eq. (10)과 같이 무차원수로 표현하였다.

$$C_R(t_R, Pe) = \frac{H}{(t_R)^{1/2}} \exp\left[-\frac{Pe}{4t_R}(1-t_R)^2\right] \quad (10)$$

여기서, $C_R = C/C_{\max}$ 이며, $H = (t_{R\max})^{1/2} \exp\left[-\frac{Pe}{4t_{R\max}}(1-t_{R\max})^2\right]$ 이다.

$t_{R\max} = (1 + Pe^{-2})^{1/2} - Pe^{-1}$ 는 최고농도에 도달하는 무차원 시간이며, t_{\max} 는 최고농도에 도달할 때의 시간이다. Eq. (10)은 무차원 시간 t_R 과 Peclet 수 Pe 를 독립변수로 사용하여 종속변수인 무차원 농도 C_R 을 구하는 식이다. 무차원 농도이력곡선($C_R - t_R$ curve)인 Pe 표준곡선을 측정 농도이력곡선과의 곡선맞춤하여 수리분산 매개변수를 구할 수 있다. 즉, 측정 농도이력곡선과 가장 잘 맞는 Pe 표준곡선이 선택되면, $t_{R\max}$ 와 t_{\max} 를 Eq. (11)에 적용하여 선형평균유속을 구하고, Eq. (12)를 이용하여 종분산계수를 구한 후에 Eq. (13)을 이용하여 종분산지수를 구하게 된다(Shih *et al.*, 2009).

$$v_L = \frac{t_{R\max} L}{t_{\max}} \quad (11)$$

$$D_L = \frac{v_L L}{Pe} \quad (12)$$

$$\alpha_L = \frac{D_L}{v_L} \quad (13)$$

본 연구에서는 Eqs. (10)~(13)은 측정값으로부터 수리분산 매개변수를 구하고, 수리평균반경과 종분산지수의 관계를 나타내는 경험식을 도출하는데 이용하였으며, Eq. (9)는 경험식을 검증하기 위하여, 경험식으로부터 구한 종분산지수와 종분산계수를 적용하여 농도를 계산하는데 이용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 농도이력곡선

자갈 등급별, 이동거리별로 관측된 농도이력곡선은 Fig. 5와 같다. 최고농도는 514 mg/l~116 mg/l이며, 동일지점에서의 최고농도는 RGS에서 RGXL로 갈수록 감소한다. 주입농도가 일정함에도 불구하고, 자갈등급마다 최초의 관측지점 ($L = 0.2$ m)에서의 최고농도가 일정하지 않은 것은 자갈공극 구조의 불균질성으로 인하여 유속이 일정하지 않기 때문인 것으로 보인다. 관측지점별 최고농도 발생시간은 RGXL $L = 0.2$ m에서 18초로 가장 빠르며, RGS $L = 0.8$ m에서 127초로 가장 느리다. 최고농도 발생시간은 RGS에서 RGXL로 갈수록 대체적으로 빨라진다. Table 2에 자갈등급별 이동거리별 최고농도와 최고농도 발생시간을 정리하였다.

4.2 수리분산 매개변수

Fig. 6은 수리분산매개변수를 구하기 위해서 농도이력곡선(RGM, $L = 0.4$ m)과 무차원 표준곡선의 곡선맞춤을 보여주는 그림이다. Pe 는 $v_L L / D_L$ 로 정의되며, 값이 커질수록 분산효과보다 상대적으로 이송효과가 커짐을 의미한다(Sauty, 1980). Fig. 7과 같이, 본 실험에서는 동일등급에서는 이동거리가 증가할수록 Pe 값도 증가하는 것으로 나타나, 분산보다는 이송효과가 지배적이며, RGS에서 RGXL로 갈수록 Pe 값은 작게 나타나, 이송효과보다는 분산효과가 커짐을 알 수 있다. Table 3에 자갈등급별 입력자료와 Eqs. (11)~(13)을 이용하여 계산한 수리분산 매개변수 값들을 정리하였다.

4.3 수리평균반경과 수리분산 매개변수의 관계

Table 4에 레이놀즈 수, 무차원 종분산계수, 무차원 수리평균반경 계산값을 정리하였다. 실험은 갈수기 기준유량 규모이기 때문에 레이놀즈 수는 600 미만으로 산출되었다. 레이놀즈 수와 무차원 종분산계수는 거듭제곱형 관계가 있으며, RGS에서 RGXL로 갈수록, 즉 수리평균반경이 커질수록 레이놀즈 수가 증가하며, 레이놀즈 수가 증가할수록 무차원 종분산계수는 증가하고, 증가정도는 이동거리가 증가함에 따라 감소

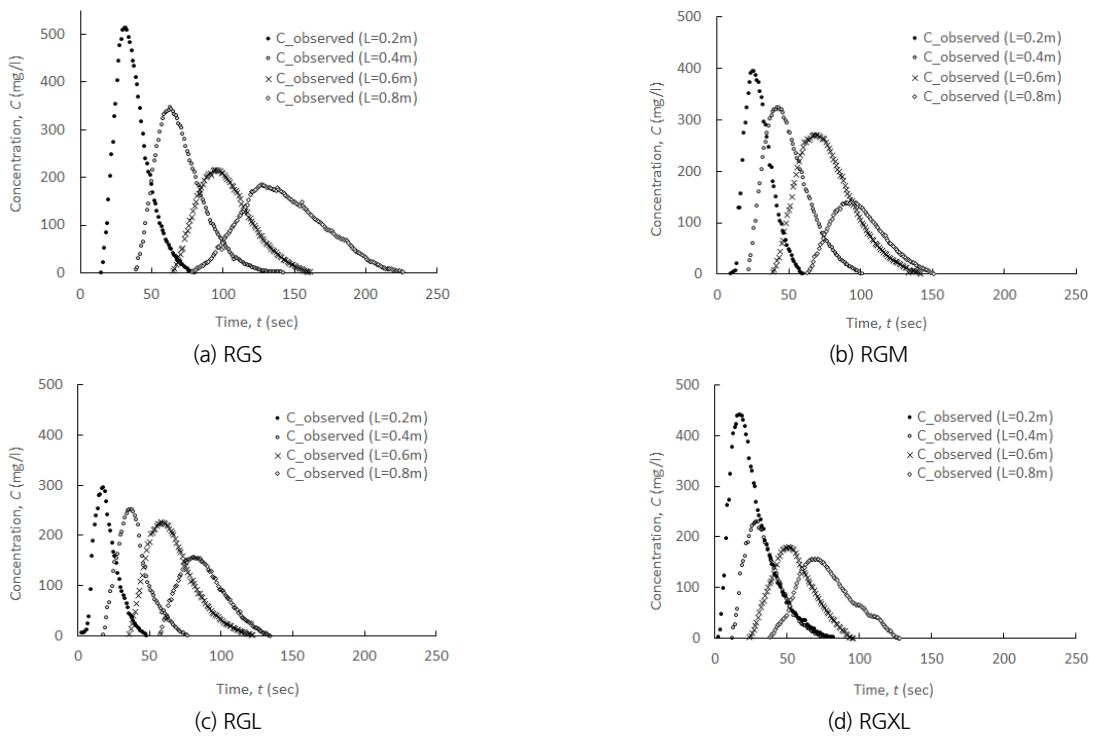


Fig. 5. Observed c-t curves

Table 2. Peak concentration, arrival time to peak concentration and variance of c-t curves

Rockfill group	Transport distance (L)	Peak concentration, C_{max} (mg/l)	Arrival time to peak concentration, t_{max} (sec)
RGS	0.2 m	514	31
	0.4 m	348	63
	0.6 m	215	95
	0.8 m	184	127
RGM	0.2 m	394	25
	0.4 m	324	50
	0.6 m	271	77
	0.8 m	139	101
RGL	0.2 m	296	18
	0.4 m	251	37
	0.6 m	227	58
	0.8 m	112	111
RGXL	0.2 m	442	18
	0.4 m	229	36
	0.6 m	146	54
	0.8 m	116	73

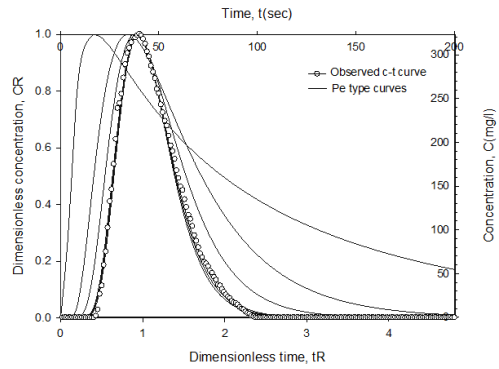


Fig. 6. Curve fittings of type curve ($Pe = 24$) and observations (RGM, $L = 0.4$ m)

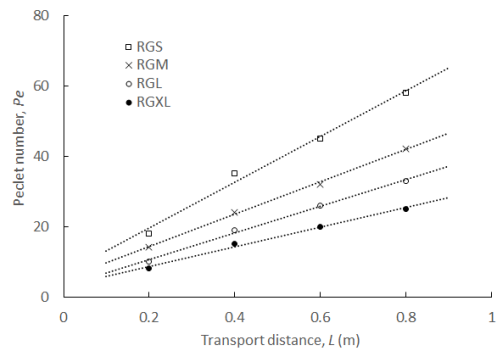


Fig. 7. Pe variations with transport distance

Table 3. Input values and the results of calculation for hydro-dispersive parameters

Rockfill group	Transport distance (<i>L</i>)	Dimensionless input variables			Calculation results		
		<i>Pe</i>	<i>t_{max}</i>	<i>t_{Rmax}</i>	<i>v_L</i> (m/sec)	<i>D_L</i> (m ² /sec)	<i>α_L</i> (m)
RGS	0.2 m	18	31	0.945	0.00610	0.000067	0.011111
	0.4 m	35	63	0.971	0.00617	0.000070	0.011428
	0.6 m	45	95	0.978	0.00617	0.000082	0.013333
	0.8 m	58	118	0.982	0.00666	0.000091	0.013793
RGM	0.2 m	14	25	0.931	0.00744	0.000106	0.014285
	0.4 m	24	40	0.959	0.00959	0.000159	0.016666
	0.6 m	32	65	0.969	0.00894	0.000167	0.018750
	0.8 m	42	87	0.976	0.00897	0.000171	0.019047
RGL	0.2 m	10	18	0.904	0.01005	0.000201	0.020000
	0.4 m	19	35	0.948	0.01084	0.000228	0.021052
	0.6 m	26	54	0.962	0.01069	0.000246	0.023076
	0.8 m	33	75	0.970	0.01034	0.000250	0.024242
RGXL	0.2 m	8	18	0.882	0.00980	0.000245	0.025000
	0.4 m	15	28	0.935	0.01336	0.000356	0.026666
	0.6 m	20	44	0.951	0.01297	0.000389	0.030000
	0.8 m	25	62	0.960	0.01239	0.000396	0.032000

Table 4. Input values and the calculation results of dimensionless variables

Rockfill group	<i>b</i> (m)	<i>m</i> (m)	<i>T</i> (°C)	<i>ν</i> (m ² /sec)	<i>L</i> (m)	<i>v_L</i> (m/sec)	Dimensionless variables		
							<i>Re</i>	<i>D_L/v_LL</i>	<i>m / L</i>
RGS	0.0093	0.000248	14.9	1.0888	0.2	0.00610	52.1	0.055	0.0012
					0.4	0.00617	52.7	0.028	0.0006
					0.6	0.00617	52.7	0.022	0.0004
					0.8	0.00666	56.9	0.017	0.0003
RGM	0.0207	0.00048	12.2	1.274	0.2	0.00744	121.0	0.071	0.0024
					0.4	0.00959	155.8	0.041	0.0012
					0.6	0.00894	145.3	0.031	0.0008
					0.8	0.00897	145.8	0.023	0.0006
RGL	0.0399	0.00102	14.2	1.1457	0.2	0.01005	350.1	0.100	0.0050
					0.4	0.01084	377.6	0.052	0.0025
					0.6	0.01069	372.3	0.038	0.0016
					0.8	0.01034	360.3	0.030	0.0012
RGXL	0.0507	0.00207	15.3	1.1457	0.2	0.00980	434.0	0.125	0.0103
					0.4	0.01336	591.4	0.066	0.0051
					0.6	0.01297	574.0	0.050	0.0034
					0.8	0.01239	548.6	0.040	0.0025

하였다(Fig. 8(a)). 수리평균반경이 커질수록 이송효과보다는 종분산효과가 커지며, 이동거리가 증가함에 따라서 종분산효과는 감소함을 의미한다. Fig. 8(b)는 무차원 수리평균반경과 무차원 종분산계수의 관계를 보여주고 있다. 무차원 수

리평균반경이 커질수록 무차원 종분산계수는 증가한다. 무차원 수리평균반경은 단위 이동거리의 공극 내 흐름 양의 크기를 의미하므로, 무차원 수리평균반경이 커질수록 이송효과보다 종분산효과가 상대적으로 커진다는 것을 나타내는 것

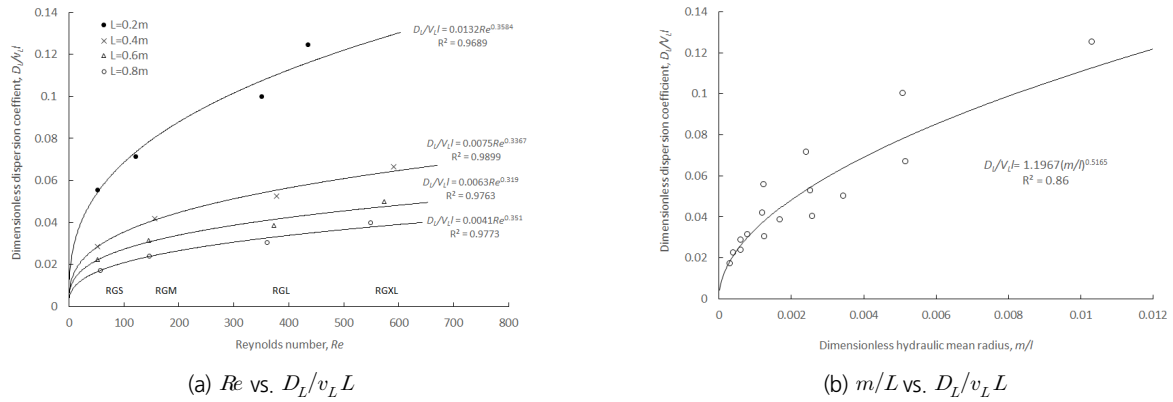


Fig. 8. Correlation curves among dimensionless variables

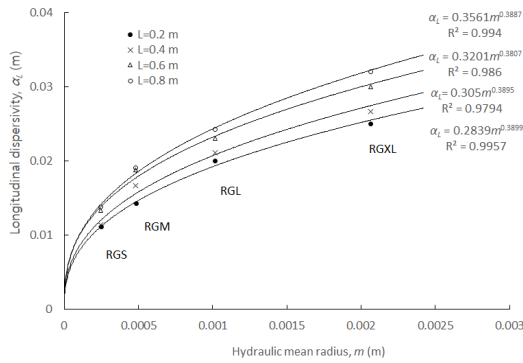


Fig. 9. Correlation of m and α_L

이다. 종분산지수는 수리평균반경이 커질수록 커지며, 이동 거리가 증가할수록 증가하며, 증가폭 또한 커지는 것으로 나타났다(Fig. 9).

5. 경험식 도출 및 검증

종분산지수와 수리평균반경의 관계는 Fig. 9와 같이 거듭제곱형의 함수관계가 있다. 따라서 Eq. (14)를 이용하면 수리평균반경을 이용하여 종분산지수를 구할 수 있다.

$$\alpha_L = am^b \tag{14}$$

여기서, a 는 이동거리 규모를 나타내는 스케일상수이며, Fig. 9에서 $L = 0.2$ m에서 0.283, $L = 0.4$ m에서 0.305, $L = 0.6$ m에서 0.320, $L = 0.8$ m에서 0.356 이다. 따라서 스케일상수 a 는 이동거리 L 에 따라 결정되며, Fig. 10(a)와 같이 $a = 0.3564L^{0.1506}$ 을 적용하여 구할 수 있다. 거듭제곱지수 b 는 경험적 회귀

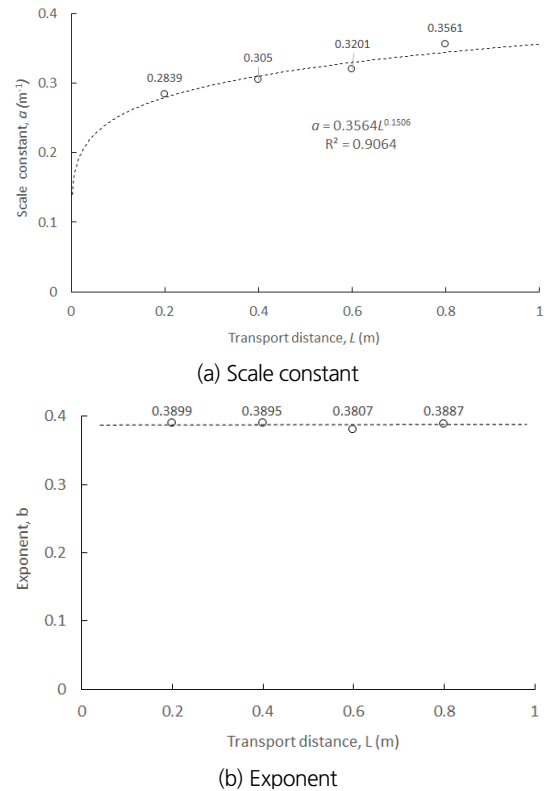


Fig. 10. Constants with transport distance

상수로서, Fig. 9에서 $L = 0.2$ m에서 0.3899, $L = 0.4$ m에서 0.3895, $L = 0.6$ m에서 0.3807, $L = 0.8$ m에서 0.3887이다. 따라서 Fig. 10(b)와 같이 이동거리에 무관하게 0.38을 적용할 수 있다.

Fig. 11은 Eq. (14)를 이용하여 구한 종분산지수 값과 Eq. (13)을 이용하여 구한 종분산지수 값을 비교한 그림이다. RMSE (Root mean square error) 0.001 m로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 Eq. (14)로부터 구한 종분산지수와 선형평균

유속을 이용하여 구한 종분산계수를 Eq. (9)에 적용하여 계산한 농도값과 실측농도값으로 부터 작성한 농도이력곡선이 다. 전체 농도값의 RMSE는 13.6 mg/l~72.5 mg/l이며, 최고 농도에 대한 RMSE는 59.2 mg/l이다. 최고농도는 RGS는 $L = 0.4\text{ m}$ 까지 계산값이 측정값보다 작게 나타났다(Fig. 12(a)). RGM은 일부지점에서 계산값이 측정값보다 작게 나타났다

(Fig. 12(b)). RGL은 초기에는 계산값이 측정값보다 크게 나타났으나, 나머지 구간에서는 잘 일치하였다(Fig. 12(c)). RGXL은 초기에는 잘 일치하나, 이후 $L = 0.8\text{ m}$ 에서 계산값이 측정값보다 크게 나타났다(Fig. 12(d)). 최고농도 발생시간에 대한 RMSE는 7.7초이다. 최고농도 발생시간은 RGM과 RGXL의 일부 관측지점을 제외하고는 전반적으로 잘 일치한다. 이와 같이 일부지점에서 계산값과 실측값이 큰 차이를 보이는 이유는 Eqs. (8) ~ (10)은 매질이 균질하고, 공극유속이 균일한 조건에서 유도(Sauty, 1980; Fetter, 1993; Philip *et al.*, 1994) 되었으나, Eq. (11)로부터 계산한 유속은 거리별로 값이 다르기 때문이다(Table 3). 또한 Table 5의 흐름단면적 A 와 공극율 n 과 같은 입력변수의 정확도에도 기인한다고 볼 수 있다. 이와 같이, 매질 고유의 특성을 나타내는 종분산지수는 수리량의 강도를 표현할 수 있는 수리평균반경과 상관성이 있음이 명확한 반면(Fig. 11), 종분산계수는 매질의 고유 특성 외에도 유속과 흐름조건에 좌우됨을 알 수 있다. Table 5에 Eq. (9)에 적용된 입력변수 값들을 정리하였으며, Table 6에 전체 농도값의 RMSE, 최고농도와 최고농도 발생시간에 대한 실측값, 계산값, RMSE값을 정리하였다.

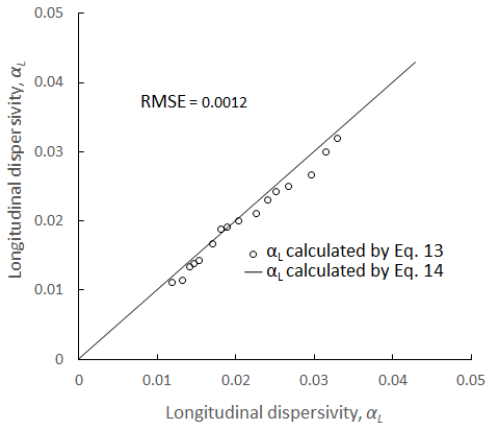


Fig. 11. Comparison of α_L calculated by Eq. (13) and α_L by Eq. (14)

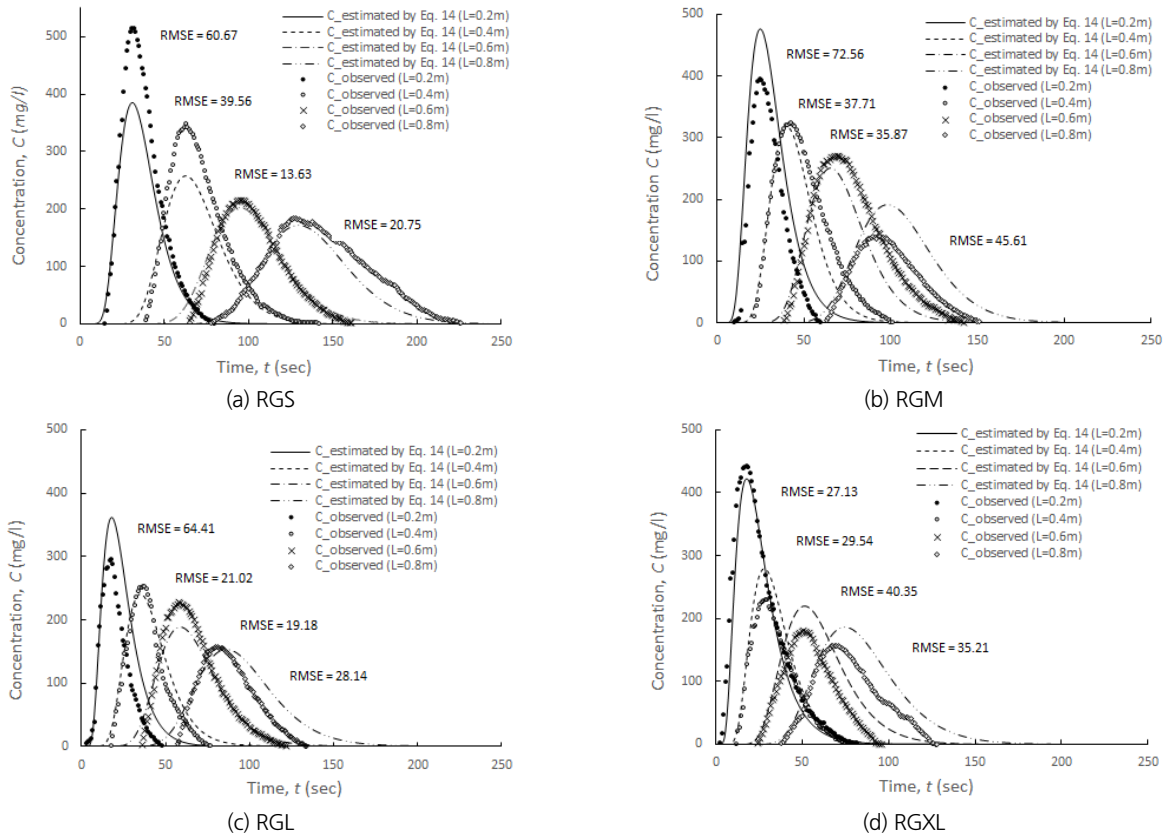


Fig. 12. Comparisons of the calculated c-t curves and the observed

Table 5. Input values for calculation of concentration by Eq. (9)

Rockfill group	n	m	L	Calculated				Observed	Remark	
				α_L (m)	v_L (m/sec)	D_L (m ² /sec)	A (m ²)	h (m)	W (m)	M (g)
RGS	0.39	0.000248	0.2 m	0.011928	0.00610	7.28E-05	0.00546	0.006	0.5	0.1
			0.4 m	0.013240	0.00617	8.17E-05	0.00546	0.006		
			0.6 m	0.014074	0.00617	8.69E-05	0.00546	0.006		
			0.8 m	0.014697	0.00666	9.79E-05	0.00546	0.006		
RGM	0.33	0.00048	0.2 m	0.015366	0.00744	0.000114	0.00396	0.009		
			0.4 m	0.017057	0.00959	0.000164	0.00396	0.009		
			0.6 m	0.018131	0.00894	0.000162	0.00396	0.008		
			0.8 m	0.018934	0.00897	0.000170	0.00396	0.008		
RGL	0.33	0.00102	0.2 m	0.020392	0.01005	0.000205	0.00363	0.010		
			0.4 m	0.022635	0.01084	0.000245	0.00363	0.010		
			0.6 m	0.024061	0.01069	0.000257	0.00363	0.010		
			0.8 m	0.025126	0.01034	0.000260	0.00363	0.010		
RGXL	0.3	0.00207	0.2 m	0.026690	0.00980	0.000262	0.00270	0.013		
			0.4 m	0.029626	0.01336	0.000396	0.00270	0.013		
			0.6 m	0.031492	0.01297	0.000408	0.00270	0.012		
			0.8 m	0.032886	0.01239	0.000408	0.00270	0.012		

Table 6. Peak concentration, arrival time to peak concentration and variance of c-t curves

Rockfill group	Transport distance (L)	RMSE of concentrations (mg/l)	Peak concentration, C_{max} (mg/l)			Arrival time to peak concentration, t_{max} (sec)		
			Observed	Calculated	RMSE	Observed	Calculated	RMSE
RGS	0.2 m	60.67	514	385	59.2	31	31	7.7
	0.4 m	39.56	348	257		63	63	
	0.6 m	13.63	215	203		95	95	
	0.8 m	20.75	184	171		127	130	
RGM	0.2 m	72.56	394	476		25	25	
	0.4 m	37.71	324	317		50	40	
	0.6 m	35.87	271	250		77	65	
	0.8 m	45.61	139	192		101	98	
RGL	0.2 m	64.41	296	362		18	18	
	0.4 m	21.02	251	240		37	35	
	0.6 m	19.18	227	189		58	59	
	0.8 m	28.14	112	153		111	86	
RGXL	0.2 m	27.13	442	422		18	18	
	0.4 m	29.54	229	279		36	28	
	0.6 m	40.35	146	220		54	51	
	0.8 m	35.21	116	186		73	74	

6. 결론

자갈 다공성매질의 수리평균반경과 수리분산 매개변수의

상관성을 관찰하고, 두 변수간의 관계식을 도출하기 위하여, 소하천의 축소모형 수로를 제작하고 순간주입 추적자 실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 산출하였다.

수리평균반경이 커질수록 레이놀즈수가 증가하며, 레이놀즈 수가 증가할수록 이송효과보다는 상대적으로 종분산효과가 커지며, 증가량은 이동거리가 증가함에 따라 감소하였다. 무차원 수리평균반경이 커질수록, 즉 단위 이동거리의 공극 내 흐름 양의 크기가 커질수록 이송효과보다는 종분산효과가 상대적으로 커지는 것으로 나타났다. 수리평균반경 m 과 종분산지수 α_L 는 $\alpha_L = am^b$ 으로 나타나는 거듭제곱형의 함수 관계가 있고, 여기서 스케일 상수 a 는 이동거리 L 에 따라 달라지며, $a = 0.3564L^{0.1506}$ 의 식으로 구할 수 있다. 거듭제곱지수인 b 는 회귀상수로서 이동 거리에 무관하게 0.38의 일정한 값을 갖는다.

본 실험을 통하여 도출된 경험식은 자갈접촉산화수로와 같이 일정구간에 자갈을 채움재로 하는 수로에 약품이나 오염물질이 유입되었을 때, 수리분산 매개변수에 관한 정보가 없는 사용자가 채움재의 기본적인 물리적 특성정보만 가지고 시간과 거리에 따른 농도변화를 예비적으로 예측하는데 사용될 수 있다. 즉, 채움재의 평균형상, 평균입경 크기와 간극비만 알면 종분산지수를 추정할 수 있고, 종분산지수와 유속으로부터 종분산계수를 구할 수 있는 것이다. 다만 본 연구결과는 평균 입경을 적용할 수 있는 균질한 자갈로 구성된 12.0 m 내외의 수로와 층류를 형성하는 소규모 유량에 제한적으로 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부가 출연하고 한국환경산업기술원에서 위탁 시행한 2021년 수요대응형 물공급사업의 연구비 지원(과제 번호 2018002650002)에 의해 수행되었습니다.

References

- Fetter, C.W. (1993). *Contaminant hydrogeology*. Macmillan Publishing Company, NY, U.S., p. 50.
- Gelhar, L.W., Mantoglou, A., Welty, C., and Rehfeldt, K.R. (1985). *A review of field-scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porous media*. EPRI EA-4190 Project 2485-5, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, U.S., pp. 1-48.
- Liang, X., Zhan, H., Liu, J. Dong, G., Zhang, Y. (2018). "A simple method of transport parameter estimation for slug injecting tracer tests in porous media." *Science of Total Environment*, Vol. 644, pp. 1536-1546.
- McCorquodale, J.A., Hannoura, A.A., and Naser, M.S. (1978). "Hydraulic conductivity of rockfill." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 16, pp. 123-137.
- Neuman, S.P. (1990). "Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 8, pp. 1749-1758.
- Neuman, S.P., and Federico, V.D. (2003). "Multifaceted nature of hydrogeologic scaling and its interpretation." *Review of Geophysics*, Vol. 41, No. 3, pp. 4.1-4.31.
- Philip, B.B., Hanadi, S.R., and Charles, J.N. (1994). *Ground water contamination*. PTR prentice-hall Englewood Cliffs, New Jersey, U.S., pp. 121-123.
- Pickens, J.F., and Grisak, G.E. (1981). "Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer." *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 1191-1211.
- Sabin, C.W., and Hansen, D. (1994). "The effects of particle shape and surface roughness on the hydraulic mean radius of a porous medium consisting of quarried rock." *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 17, No. 1, pp. 43-49.
- Sauty, J.P. (1980). "An analysis of hydrodispersive transfer in aquifers." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 145-158.
- Schulze, M.D. (2005). "Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior." *Ground Water*, Vol. 43, No. 3, pp. 443-456.
- Schulze, M.D., and Cherkauer, D.S. (1997). "Method developed for extrapolating scale behavior." *EOS, Transactions, AGU*, Vol. 78, No. 1, p. 3.
- Seo, I. W., and Cheong, T.S (1998). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural stream." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 25-32.
- Shih, D.C., Chen, Y.G., Lin, G.F., and Wu, Y.M. (2009). "Uncertainty propagation of hydrodispersive transfer in an aquifer: An illustration of one-dimensional contaminant transport with slug injection." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 23, pp. 613-620.
- Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. Wiley, NY, U.S., p. 122.
- Trenchlesspedia (2021). Hydraulic radius, accessed 8 July 2021, <<https://www.trenchlesspedia.com/definition/2808/hydraulic-radius>>
- Wikimedia foundation (2021). USA, accessed 8 July 2021, <<https://wikidiff.com/dispersivity/dispersion>>.
- Wilkins, J.K. (1956). "Flow of water through rock fill and its application to the design of dams." *Proceedings, Second Australian-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Zealand Institution of Engineers, Christchurch, New Zealand, pp. 141-149.
- Zingg, T. (1935). "Contribution to the gravel analysis." *Petrographic Messages*, Vol. 15, pp. 39-140.