



Experimental study on non-linear throughflow characteristics of rockfill gabion weir

Han, Ilyeong^{a*} · Lee, Jaejoung^b · Kim, Gyoo bum^c

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

^bJunior Researcher, Technical Research Center, Biryong Corporation, Seongnam, Korea

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

Paper number: 20-076

Received: 5 August 2020; Revised: 28 August 2020; Accepted: 28 August 2020

Abstract

As the flow velocity and Reynolds number increase in rockfill porous media, the flow deviates from Darcy conditions. In this study, the permeability tests of rock column specimen and laboratory gabion weir model were carried out to investigate a head loss behaviour of flow through rockfill deposition in small river artificial recharge. Through column test, the nonlinear relationships between flow velocity and hydraulic gradient and coefficients were determined and the correlation formula of hydraulic mean radius and coefficients was proposed. The flow velocities and discharges in voids estimated by proposed equations were well matched with the measured values of laboratory gabion weir model.

Keywords: Porous media, Permeability test, Rock column specimen, Laboratory gabion weir model, Hydraulic mean radius

돌망태 보 통과류의 비선형적 흐름 특성에 관한 실험적연구

한일영^{a*} · 이재정^b · 김규범^c

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

요 지

자갈 입자로 구성된 다공성매질에서는 유속이 증가하여 레이놀즈수가 커지게 되면 흐름은 Darcy의 영역을 벗어나게 된다. 본 연구는 인공함양 유역의 소하천에 설치예정인 돌망태 보의 채움재를 통과하는 비선형적인 흐름특성을 규명하기 위하여 자갈칼럼과 돌망태모형을 이용한 투수실험을 수행하였다. 칼럼실험을 통하여 공극유속과 수리경사의 관계식과 계수를 결정하고, 수리평균반경과의 상관관계식을 제안하였다. 제안식으로 부터 계산된 공극유속과 공극유량은 돌망태모형 투수실험의 측정치와 잘 일치하였다.

핵심용어: 다공성매질, 투수실험, 자갈칼럼, 돌망태 모형, 수리평균반경

1. 서 론

하천수를 함양원수로 하는 인공함양에서, 자연친화적인 하천수 취수방식으로 자연석이나 쇄석을 채움재로 하는 돌망태 보를 고려할 수 있다. 돌망태 보를 사용한다면, 토사퇴적량을 저감시키고, 유기오염물질의 정체에 의한 부영양화를 방

지할 수 있을뿐 만 아니라 오염물질들과 채움재 입자들과의 접촉에 의한 수질정화도 기대할 수 있다(Michioku *et al.*, 2005; Han and Kim, 2019; Shariq *et al.*, 2020). 이러한 방식으로 부터 인공함양 원수(Raw water)의 전처리의 부담을 크게 줄일 수 있을 것이다. 돌망태 보를 통과하는 흐름은 자갈크기의 입자로 구성된 다공성매질의 흐름과 같으며, 이러한 흐름에서 유속이 증가하면, 모래입자에서와 같이 유속과 수리경사의 관계가 투수계수에 선형적으로 비례하는 Darcy의 법칙

*Corresponding Author. Tel: +82-01-5304-8651
E-mail: iyhan101@naver.com (I. Han)

이 적용되지 않는 Non-Darcy 영역에 도달하게 된다. 이러한 흐름영역에서는 유속과 수리경사의 비선형적인 방정식을 구하고, 실험으로부터 계수를 결정하여야 한다(Mohammad *et al.*, 2013). 한편, 매질공극의 부피를 공극의 표면적으로 나눈 값으로 정의되는 수리평균반경(Hydraulic mean radius)은 공극 내를 흐르는 물의 양과 직접적인 관계가 있기 때문에 Non-Darcy 영역에서의 흐름특성을 표현하는데 매우 유용하다(Wilkins, 1956; Sabin and Hansen, 1994). 따라서, 수리평균반경과 수두손실방정식의 계수와와의 관계를 구하면, 매변 실험으로부터 계수를 결정해야하는 불편함으로부터 벗어날 수 있다(Hussein *et al.*, 1997).

본 연구는 인공함양 유역의 소하천에서 하천수 취수용 돌망태 보가 포함된 전처리시설의 설계를 위하여 수행되었으며, 수리평균반경과 수두손실방정식의 계수와와의 상관관계에 중점을 두고, 자갈칼럼과 돌망태모형을 이용한 투수실험을 실시하였다. 시료는 입자크기 0.75 mm ~ 3.51 mm의 쇄석과 자연석을 사용하였다. 수리평균반경 산정식(Sabin and Hansen, 1994)을 이용하여 입자크기, 형상, 배치상태에 따른 매질의 흐름특성을 계수화하였다. 자갈칼럼을 이용한 투수실험에서는 공극유속과 수리경사의 관계로부터 1차원 수두손실방정식과 계수를 결정하고, 계수와 수리평균반경과의 상관관계식을 도출하였다. 실험결과는 선행연구에서 제안된 방정식들과 비교하고, 돌망태 실내모형을 이용한 투수실험 측정데이터와 비교하여 2차원흐름에 적용성을 검토하였다.

2. 선행연구

돌망태 보와 같은 자갈 입자로 구성된 다공성매질의 흐름에서는 실험으로부터 비선형방정식의 계수를 구하여 해를 구하게 된다(Hansen, 1992). 1856년에 Darcy의 법칙이 발표된 이후, 이러한 수리구조물의 설계를 위하여, 새로운 지배방정식을 제안하거나, 제안된 방정식의 계수를 도출하기 위한 연구가 꾸준히 이루어져 왔다. Forchheimer (1901)는 Darcy 방정식에 유속의 관성효과를 2차항에 추가한 방정식 Eq. (1)을 제안하였다.

$$i = AV + BV^2 \quad (1)$$

여기서, i 는 수리경사, V 는 유속이며, A 는 매질과 물에 영향을 받는 계수, B 는 매질에만 영향을 받는 계수이다(Mohammad *et al.*, 2013). Ergun (1952)는 실험적 연구를 수행하여, Eq. (1)

의 계수 A, B 를 Eq. (2)와 같이 제안하였다.

$$i = \frac{150\nu(1-n)^2}{d^2gn^3} V + \frac{1.75(1-n)}{dgn^3} V^2 \quad (2)$$

여기서, ν 는 동점성계수, n 은 공극율, d 는 입자의 직경, g 는 중력가속도이다. Wilkins (1956)은 수리평균반경 이론(Taylor, 1948)을 도입하여 자갈로 구성된 다공성매질의 수리특성을 계수화하고, 칼럼실험을 통하여 Eq. (3)과 같이, 입자의 형상과 거칠기 정도, 물의 점도를 나타내는 경험계수가 포함된 수두손실방정식을 제안하였다.

$$V_v = W m^{0.5} i^{0.54} \quad (3)$$

여기서, V_v 는 매질의 공극유속으로 유속 V 를 공극율 n 으로 나눈 값이며, W 는 입자의 형상과 거칠기, 물의 점도에 따른 경험계수로서 쇄석은 53, 매끈한 대리석은 73의 값을 갖는다. m 은 수리평균반경이며, 완전구형 입자 혹은 정육면체 입자의 직경이 d 이고, 매질의 간극비가 e 인 다공성 매질의 경우, Eq. (4)와 같이 표현된다고 하였다.

$$m = \frac{ed}{6} \quad (4)$$

Stephenson (1979)은 다공성매질에서의 난류를 나타내는 수두손실방정식을 Eq. (5)와 같이 제안하였다.

$$i = \frac{f V_v^2}{gd} \quad (5)$$

여기서, f 는 마찰인자이며, 매끄러운 구형 대리석은 1, 둥근 자갈은 2, 쇄석은 4의 값에 접근한다. Martins (1990)은 칼럼실험으로부터 입자의 형상과 크기에 따른 영향을 관찰하고, Eq. (6)과 같이 관수로의 Darcy-Weibach 방정식과 유사한 형태의 수두손실방정식을 제안하였다.

$$i = \frac{V_v^2}{2g c_s^2 f_c^2 e d} \quad (6)$$

여기서, c_s 는 입자의 형상에 따른 계수로서, 모난 입자는 0.56 *cms*, 둥근 입자는 0.75 *cms*의 값을 갖는다. f_c 는 입자의 균질 정도를 나타내는 함수로서, 입자가 균질하면 1의 값을 갖는다.

Garga *et al.* (1991)은 쇄석을 대상으로 니켈분말을 코팅하여 무게를 측정하고 표면적을 결정하는 방법을 연구하고, 균질한 입자로 구성된 매질에서의 수리평균반경과 공극율의 관계를 제시하였는데, Sabin and Hansen (1994)은 Garga *et al.* (1991)의 실험데이터를 이용하여, Eq. (4)에 형상인자를 추가하여, Eq. (7)과 같은 수리평균반경 산정식을 유도하였다.

$$m = \frac{eb}{6S_f} \quad (7)$$

여기서 b 는 매질 입자길이의 평균값이며, S_f 는 형상인자로서, 입자의 형상과 거칠기정도를 나타내며, Zingg 분류에 의한 입자형상인 판형(Disk), 구형(Sphere), 날개형(Blade), 막대기형(Rod)별로 고유한 값을 갖는다. Hussein *et al.* (1997)은 입자의 크기가 2.5 mm ~ 25 mm인 강자갈과 쇄석을 대상으로 칼럼실험을 통하여, Eq. (8)과 같은 거둬제공급형의 수두손실방정식을 제안하였다.

$$i = a_v V_v^{b_v} \quad (8)$$

여기서 a_v 와 b_v 는 거둬제공급형의 수두손실방정식에서 결정되는 계수이다. Hussein *et al.* (1997)은 Eq. (7)을 이용하여 구한 수리평균반경과 a_v 와 b_v 의 상관관계식을 도출하였다. Hussein *et al.* (1998)은 길이가 31.2 cm, 60.5 cm, 61.1 cm, 62.0 cm인 돌망태 보 실내모형을 제작하고, 입자 크기 2.5 mm ~ 25.0 mm의 강자갈을 대상으로 투수실험을 수행하여, Eq. (9)와 같은 무차원변수간의 관계식을 제안하였다.

$$i_{eq} = 0.5806 \left(\frac{h_u}{L} \right) \quad (9)$$

여기서, i_{eq} 는 등가수리경사, h_u 는 보 상류수심, L 은 보의 길이이다. Sidiropoulou *et al.* (2007)은 입자의 크기와 매질의 공극율이 흐름에 미치는 영향을 관찰하고, Eq. (1)에서, 계수와 영향인자들의 관계식을 Eqs. (10a) and (10b)와 같이 제안하였다.

$$A = 0.00333 d^{-1.5} n^{0.06} \quad (10a)$$

$$B = 0.1943 d^{-1.265} n^{-1.1414} \quad (10b)$$

Mohammad *et al.* (2013)은 2.8 mm ~ 56.8 mm 크기의 강자갈 칼럼의 실험데이터를 사용하여 제안된 수두손실방정식들

을 비교 평가하였다. Shariq *et al.* (2020)은 Ergun (1952)의 Eq. (2)로부터 돌망태 보 통과류의 방류량 산정식을 Eq. (11)과 같이 유도하였다.

$$\frac{QAL}{w} = \frac{h_u^2 - h_d^2}{2} - \frac{QB(h_u - h_d)}{wA} + \frac{Q^2 B^2}{w^2 A^2} \ln \left(\frac{QB/wA + h_u}{QB/wA + h_d} \right) \quad (11)$$

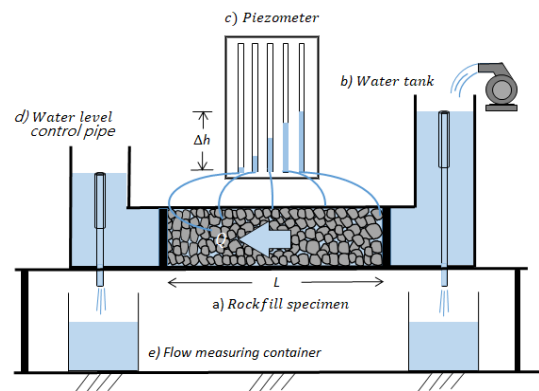
여기서, Q 는 유량, w 는 보의 폭, h_d 는 보 하류수심이다.

3. 실험

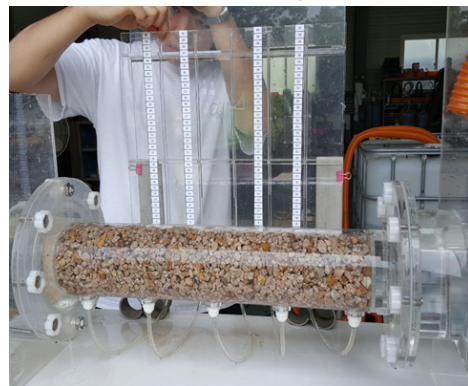
3.1 칼럼실험

3.1.1 장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 5가지로 구성되었다. (1)길이 50 cm의 아크릴 재질의 채움재 시료칼럼, (2)물 공급과 배수를 위한 물탱크, (3)흐름구간의 수두측정을 위한 피에조미터, (4)일정



(a) Schematic diagram



(b) Front view

Fig. 1. The column experiment set up

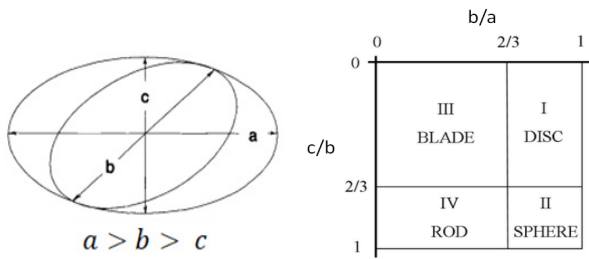


Fig. 2. Zingg shape classes (Zingg, 1935)

한 수리경사 유지를 위한 수위조절파이프, (5)유량측정 용기이다. 칼럼은 직경에 따른 영향을 줄이고, 많은 데이터 발생을 위하여 직경이 15 cm와 10 cm인 칼럼을 사용하였다.

3.1.2 재료

시료는 쇄석과 강자갈을 사용하였다. 입자의 크기분류는 Fig. 2와 같이 직교하는 방향으로 입자의 장축의 길이 a , 중간축의 길이 b , 단축의 길이 c 에서 중간축의 길이 b 를 기준으로 분류하

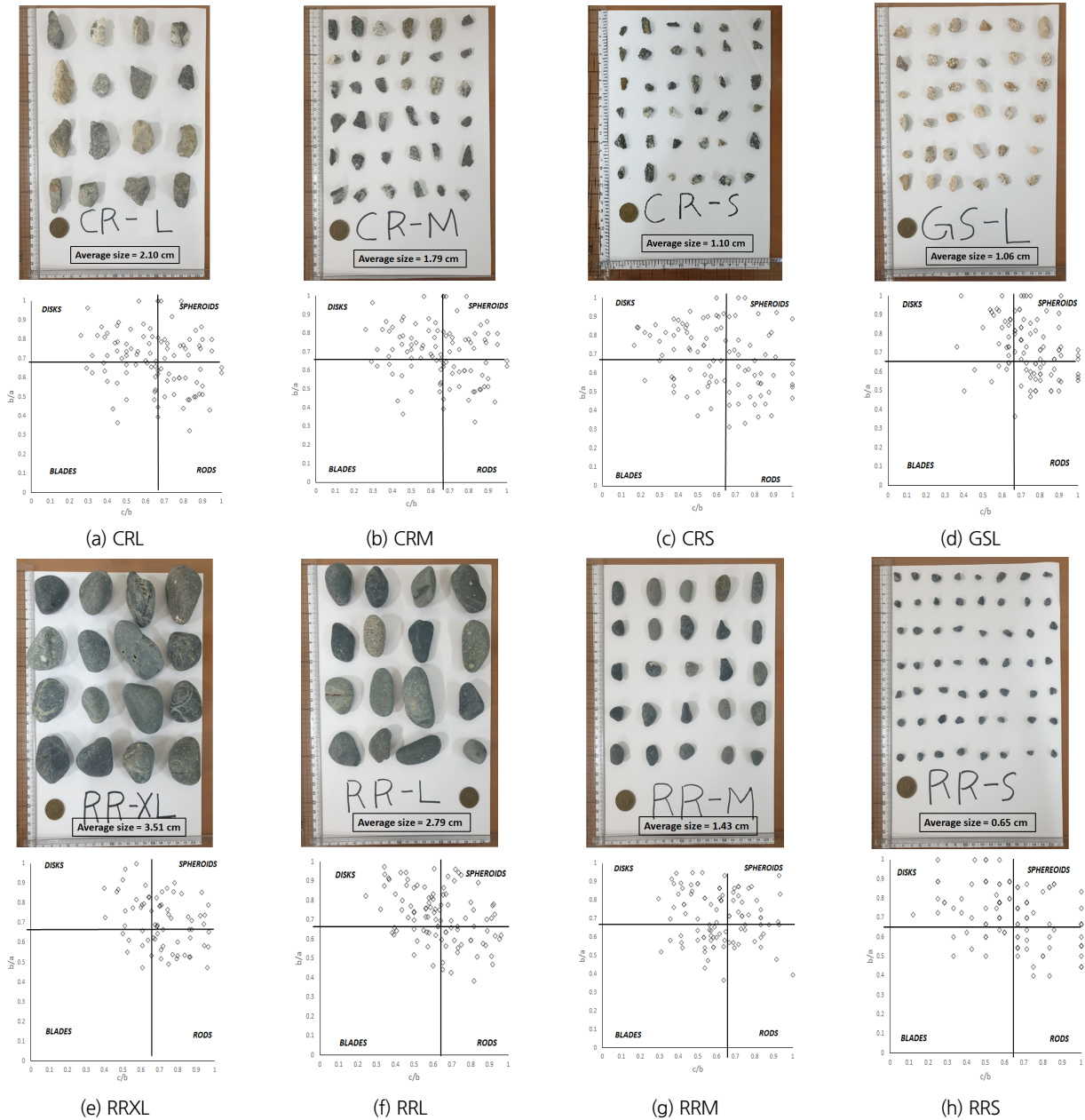


Fig. 3. Characterization of particle shapes for the sample of rockfill used in the experiments with the four basic shape classifications

였다. 쇄석은 CRL (2.10 cm), CRM (1.79 cm), CRS (1.10 cm)의 GSL (1.06 cm)의 4등급, 강자갈은 RRXL (3.51 cm), RRL (2.79 cm), RRM (1.43 cm), RRS (0.65 cm)의 4등급으로 분류하였다. 입자의 형상은 Zingg 분류기법으로, b/a , c/b 의 값에 따라 판형, 구형, 날개형, 막대기형으로 분류하였다(Fig. 3). 형상분류 후에는 형상별 빈도수와 비율을 계산하고, Sabin and Hansen (1994)의 형상인자값을 적용하여 평균값을 구하고, Eq. (7)에 적용하여 수리평균반경을 산정하였다. 시료별 입자의 크기, 간극비, 형상인자, 수리평균반경을 Table 1에 정리하였다.

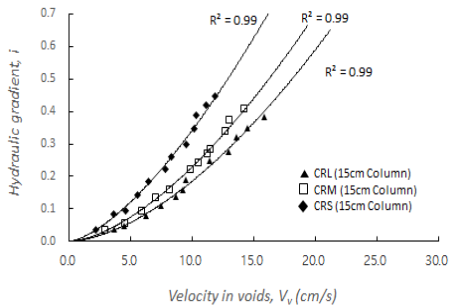
3.1.3 실험방법

실험은 시료별로 수리경사를 0.01부터 0.6까지 증가시키며 12단계로 수행하였다. 매단계마다 유입 물탱크의 유량을 증가시키면서, 유출 물탱크의 수위조절파이프를 조절하여 유출수위를 일정하게 유지시켜 수리경사를 조절하였다. 물이 물탱크에서 칼럼으로 유입, 유출되면서 마찰손실이 발생하므로, 칼럼과 연결된 피에조메타의 수위를 수리경사 계산에 적용하였다. 공극율은 시료를 담은 용기의 무게와 물과 시료를 담은 용기의 무게를 측정하여 물의 부피와 용기의 부

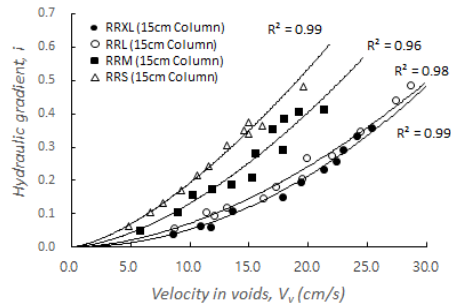
Table 1. Particle size and shape frequency data for shape factor and rockfill void ratio for hydraulic mean radius calculation

Materials		Particle								Rockfill	
		Average size (cm)			Shape frequency					e	m (cm)
		a	b	c	Disk	Rod	Blade	Sphere	S_f		
Crushed stone	CRL	3.13	2.10	1.34	34%	27%	15%	24%	1.87	0.85	0.158
	CRM	2.66	1.79	1.08	42%	22%	21%	14%	1.94	0.82	0.126
	CRS	1.65	1.10	0.64	38%	27%	18%	17%	1.90	0.81	0.078
	GSL	1.50	1.06	0.77	21%	29%	7%	43%	1.79	0.63	0.062
River gravel	RRXL	5.07	3.51	2.47	26%	26%	9%	36%	1.82	0.64	0.206
	RRL	3.99	2.79	1.73	44%	21%	15%	20%	1.91	0.41	0.101
	RRM	2.07	1.43	0.88	35%	12%	27%	26%	1.96	0.39	0.048
	RRS	0.93	0.75	0.40	41%	24%	10%	25%	1.87	0.45	0.003

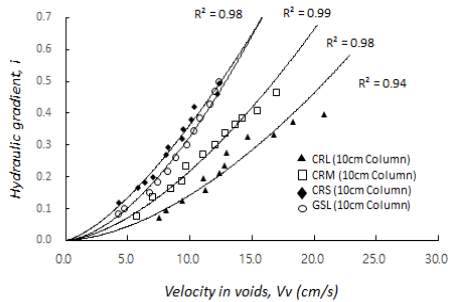
a = major axis, b = intermediate axis, c = minor axis



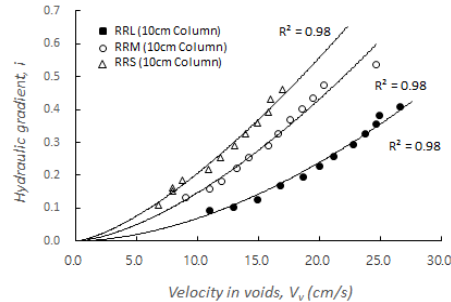
(a) Crushed stone ($d = 15$ cm Column)



(b) River gravel ($d = 15$ cm Column)



(c) Crushed stone ($d = 10$ cm Column)



(d) River gravel ($d = 10$ cm Column)

Fig. 4. Results of the column tests showing the nonlinear relation between the velocity in voids and the hydraulic gradient

피로부터 산정하였다. 레이놀즈수 계산을 위해서 실험단계마다 시료를 통과한 물의 온도를 측정하였다. 쇄석은 데이터 발생을 위하여 마사토(GSL)에 대해서 직경 10 cm 칼럼실험을 추가로 실시하였으며, 강자갈 RRXL은 입자크기를 고려하여 직경 15 cm 칼럼실험만을 실시하였다.

3.1.4 실험결과

공극유속과 수리경사의 비선형적인 관계는 Fig. 4와 같다. 동일한 공극유속에서 수리경사는 입자의 크기가 커질수록 작아지며, 쇄석이 강자갈보다 상대적으로 큰 수리경사 값을 보

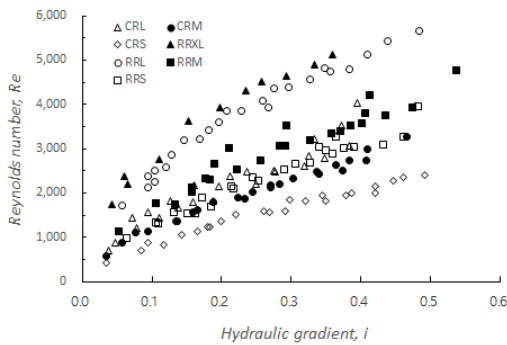


Fig. 5. The relation between hydraulic gradient and Reynolds number

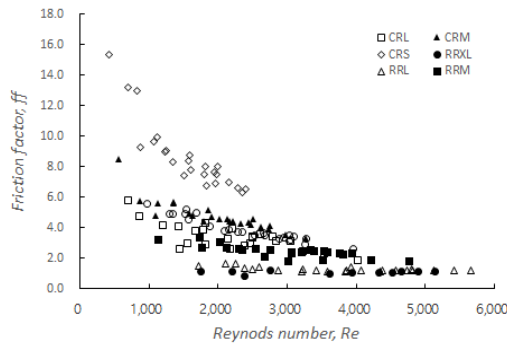


Fig. 6. The relation between Reynolds number and friction factor

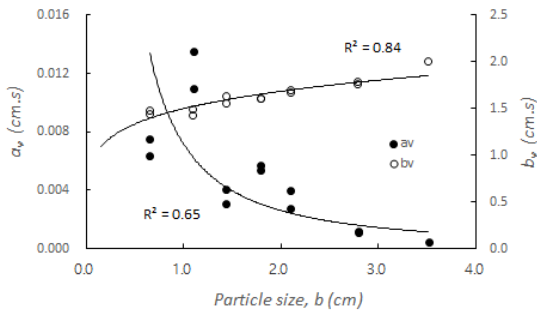


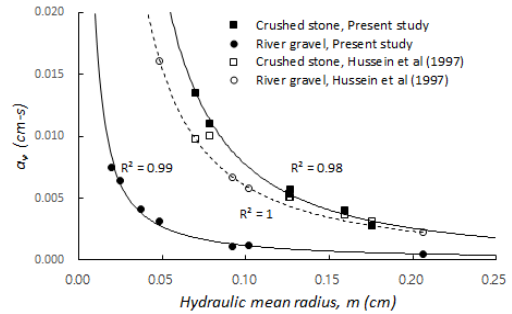
Fig. 7. The relation between particle size and a_v , b_v

여준다. Fig. 5는 수리경사와 레이놀즈수와의 관계이다. 수리경사가 증가할수록 레이놀즈 수가 증가하여 난류의 정도가 커짐을 알 수 있는데, 동일한 수리경사에서 강자갈의 레이놀즈 수가 쇄석보다 큰 값으로 나타난다. 이것은 Fig. 4와 같이, 동일한 수리경사에서 공극유속이 증가하는 것과 같은 현상이다. 이와 같은 이유는 Fig. 6과 같이 쇄석은 거칠기 정도가 커서 마찰의 영향을 크게 받고 있기 때문이다. 강자갈은 레이놀즈 수가 증가하여도 마찰의 영향을 많이 받지 않으며, 입자의 크기가 커질수록 마찰인자의 값이 거의 일정함을 알 수 있다.

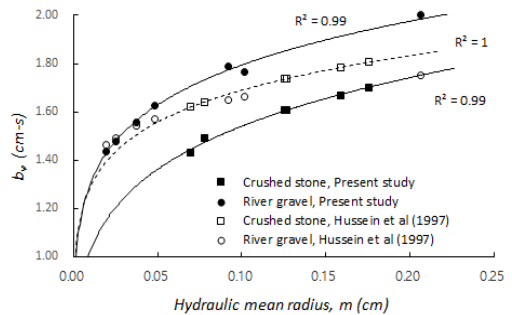
Fig. 4의 공극유속과 수리경사의 관계로부터 거둬제공형의 수두손실방정식과 상수 a_v , b_v 가 도출되었다. 입자의 크기가 커질수록 a_v 는 감소하며, b_v 는 증가한다. 입자의 크기와 상수 a_v , b_v 의 관계는 Fig. 7에 나타내었다.

3.1.5 수리평균반경 m과 a_v , b_v 의 관계

Table 1의 수리평균반경 m과 a_v , b_v 의 관계를 도식화한 결과는 Fig. 8과 같다. Hussein et al. (1997)은 쇄석과 강자갈이 거의 동일한 곡선을 보여주는 반면, 본 실험에서는 쇄석과 강자갈이 극명한 차이를 보여 서로 다른 곡선으로 나타나고 있다. 형상인자 S_f 는 완전한 타원체(Perfect ellipsoid) 대비 편평 정도(Oblateness)와 거칠기정도(Roughness)의 곱으로 정의된다(Sabin and Hansen, 1994). 본 실험에 사용된 쇄석은 강자



(a) m vs. a_v



(b) m vs. b_v

Fig. 8. Relation of the coefficients a_v , b_v to the hydraulic mean radius

갈에 비하여 거칠기가 상대적으로 크며 이것은 흐름에 상당한 영향을 주고 있고, 이러한 현상은 Figs. 5 and 6에서 잘 나타나고 있다. 따라서, 쇄석과 강자갈은 형상과 거칠기 정도가 다르기 때문에 동일한 형상인자와 수리평균반경에서는 서로 다른 계수 a_v, b_v 값을 보여주는 것이 타당한 것으로 판단된다.

수리평균반경 m 과 a_v, b_v 의 상관 관계식은 Eq. (12)와 같다. 여기서 α, β 는 쇄석과 강자갈에 따른 계수이다. Table 2에 Hussein *et al.* (1997)과 본 실험의 결과를 비교하여 정리하였다.

$$a_v, b_v = \alpha \times m^\beta \quad (12)$$

3.1.6 공극유속 계산

수두손실방정식을 공극유속 V_v 를 구하는 식으로 전개하면 Eq. (13)과 같으며, 여기서 수리경사 i 는 Fig. 1의 피에조메

타를 통하여 측정되는 $\Delta h/L$ 값이며, 상수 a_v, b_v 는 Table 2의 상관관계식으로 부터 구하는 값이다.

$$V_v = \left(\frac{i}{a_v} \right)^{\frac{1}{b_v}} \quad (13)$$

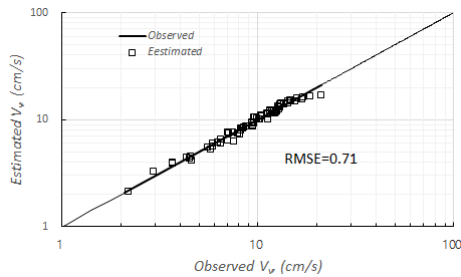
유량을 측정하여 구한 공극유속 계산식은 Eq. (14)와 같다.

$$V_v = \frac{Q}{A_c n} \quad (14)$$

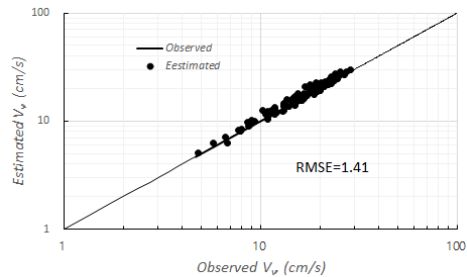
여기서, A_c 는 칼럼의 흐름단면적이다. Eqs. (13) and (14)에 의해서 각각 구한 공극유속 계산값과 측정값을 Fig. 9에 나타내었다. 그림과 같이 쇄석과 강자갈의 계산값은 측정값과 잘

Table 2. The relation between hydraulic mean radius m and a_v, b_v

Material	Coefficients	Present study		Hussein <i>et al.</i> (1997)	
		α	β	α	β
Crushed stone	a_v	2.0×10^{-4}	-1.582	2.6799×10^{-4}	-1.4223
	b_v	2.3169	0.1773	2.2137	0.1173
River gravel	a_v	7.0×10^{-5}	-1.194	2.5810×10^{-4}	-1.3638
	b_v	2.4701	0.1389	1.9765	0.0758

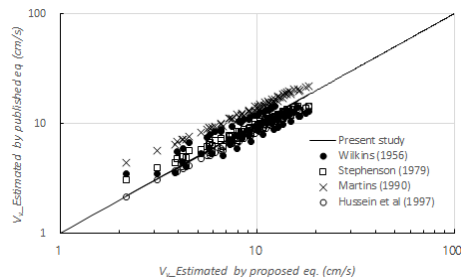


(a) Crushed stone

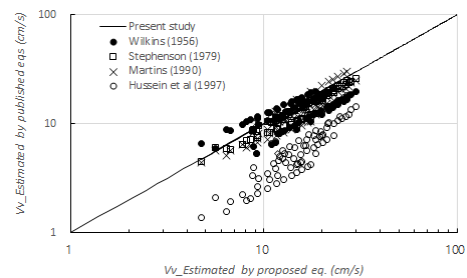


(b) River gravel

Fig. 9. Comparison of the velocity in voids, V_v estimated by the proposed equation with the one measured in the rock column tests



(a) Crushed stone



(b) River gravel

Fig. 10. Comparison of the velocity in voids, V_v calculated by the proposed equation with the ones calculated by the published equations

일치하여, RMSE (Root mean square error)는 쇄석은 0.71, 강자갈은 1.41의 값을 보여주었다.

Fig. 10은 Eq. (13)으로 부터 계산한 공극유속을 Wilkins (1956), Stephenson (1979), Martins (1990), Hussein *et al.* (1997)의 식들로 계산한 공극유속 값과 비교한 그림이다. 쇄석의 경우는 Martin (1990)과 가장 큰 차이를 보이며, RMSE는 3.76이며, Wilkins (1956)는 2.16, Hussein *et al.* (1997)은 1.65이고, Stephenson (1979)이 1.26으로 가장 근사하게 계산되었다. 강자갈의 RMSE는 Hussein *et al.* (1997)은 9.84, Wilkins (1956)는 4.74, Martins (1990)는 3.53, Stephenson (1979) 2.52로 줄어드는데, 가장 큰 차이를 보이는 Hussein *et al.* (1997)은 Fig. 8과 Table 2에서와 같이 강자갈의 수리평균반경과 계수의 상관곡선에서 본 실험결과와 차이를 보이기 때문이다.

3.2 돌망태모형 수로실험

3.2.1 장치

돌망태모형 수로실험은 칼럼투수실험에서 도출된 수리평균반경과 수두손실방정식의 계수의 상관관계식을 2차원흐

름에의 적용성을 평가하고, 돌망태 보 설계에 필요한 유량과 상류수심의 관계를 도출하기 위하여 수행되었다. 실험장치의 주 구성은 Fig. 11과 같이, (1) 물 공급을 위한 높이 1.0 m의 아크릴 재질의 물탱크, (2) 정류 및 유량측정을 위한 V-notch 위어 (3) 최대길이 30 cm의 돌망태 모형, (4) 돌망태가 설치된 폭 50 cm의 수조이다. 돌망태 채움재는 컬럼실험에서 사용한 강자갈 RRS를 사용하였다.

3.2.2 실험방법

실험은 돌망태 보의 길이 $L = 20$ cm, $L = 30$ cm의 2가지 경우에 대해서 실시하였다. 수리경사는 칼럼실험과 마찬가지로 0.01부터 0.6까지 증가시켜 가며 12단계로 수행하였다. 매단계마다 물탱크의 유량을 증가시키면서, 유출수심을 일정하게 유지시켜 수리경사를 조절하였다. 수심은 돌망태 보 직상류와 직하류를 측정하여 수리경사 계산에 이용하였다. 유량은 실험 전에 V-notch 위어의 월류높이에 따른 유량곡선을 작도하여, 유량측정 시에는 위어의 월류높이를 측정하여 산정하고, 단위 폭 당 공극유량을 계산하였다. 단위 폭 당 공극 유량 q_v 은 단위폭당 유량을 공극율로 나눈 값이다

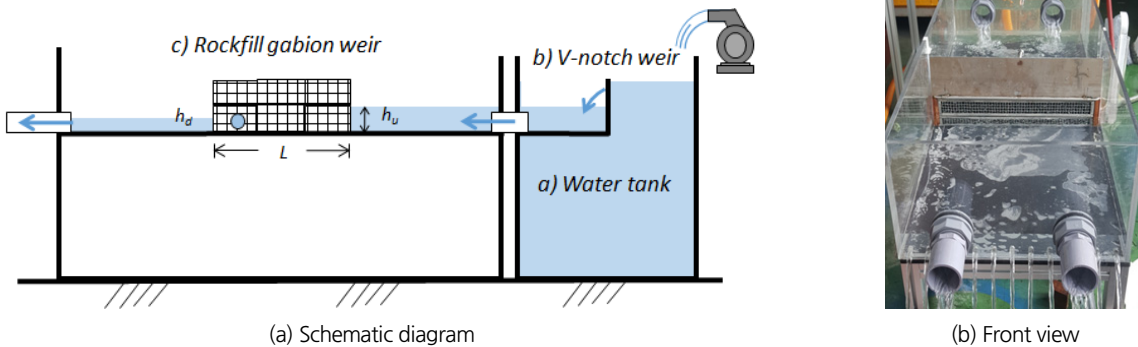


Fig. 11. Laboratory gabion weir model experimental set up

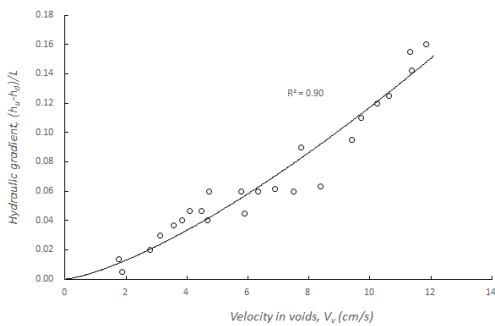


Fig. 12. The relation between V_v and $(h_u - h_d)/L$

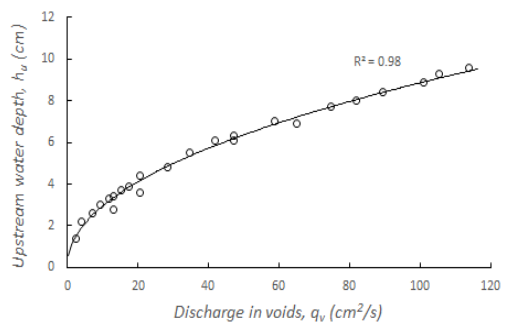


Fig. 13. The relation between q_v and h_u

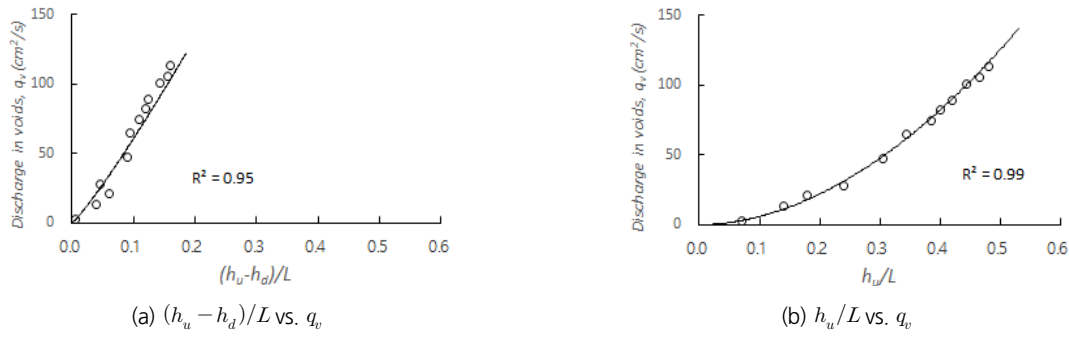


Fig. 14. The relations among $(h_u - h_d)/L$, h_u/L and q_v

3.2.3 실험결과

공극유속과 수리경사 $(h_u - h_d)/L$ 의 관계는 Fig. 12와 같다. 그림에서 곡선맞춤 정도가 낮은 이유는 수리경사 계산에 적용된 수심 측정구간이 채움재 내부가 아니라 외부구간인 상류수심과 하류수심이기 때문이며, 특히 하류수심은 상류수심보다 상대적으로 유량의 영향을 작게 받기 때문이다. 공극유량과 상류수심의 관계는 Fig. 13과 같다. 상류수심은 공극유량이 증가함에 따라 직접적으로 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 무차원변수 $(h_u - h_d)/L$ 과 h_u/L 의 공극유량과의 상관성을 비교하기 위한 것으로, $(h_u - h_d)/L$ 보다 h_u/L 이 더 좋은 상관성을 보여주었다.

Eq. (13)으로부터 계산되는 수리경사를 $(h_u - h_d)/L$ 와 구별하기 위하여 등가수리경사 i_{eq} 라 정의하고, h_u/L 과의 무차원변수 간의 관계식을 구하게 되면, h_u/L 정보만으로도 유량을 구할 수 있게 된다. Fig. 15는 h_u/L 과 등가수리경사 i_{eq} 와의 관계이며, 관계식은 Eq. (15)와 같다.

$$i_{eq} = 0.3879 \left(\frac{h_u}{L} \right) \tag{15}$$

3.2.4 공극유량 계산

2차원흐름의 공극유량 계산식은 $q_v = h_u V_v$ 이므로, V_v 를 수두손실방정식으로 표현하고, 수리경사를 Eq. (15)로 대체하면 공극유량 계산식은 Eq. (16)과 같다.

$$q_v = h_u \left(\frac{0.3879 \frac{h_u}{L}}{a_v} \right)^{\frac{1}{b_v}} \tag{16}$$

여기서, 상류수심 h_u 와 보의 길이 L 은 측정값이며, 상수 a_v , b_v 는 Table 2의 상관식으로부터 구하는 값이다. 유량, 칼럼

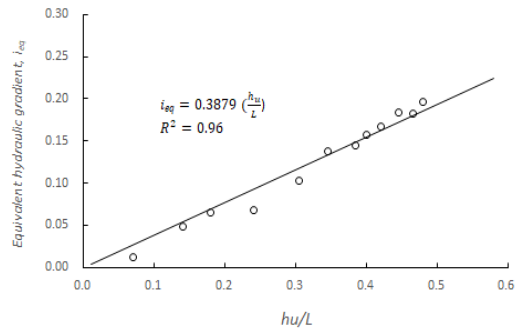


Fig. 15. The relation between h_u/L and equivalent hydraulic gradient i_{eq}

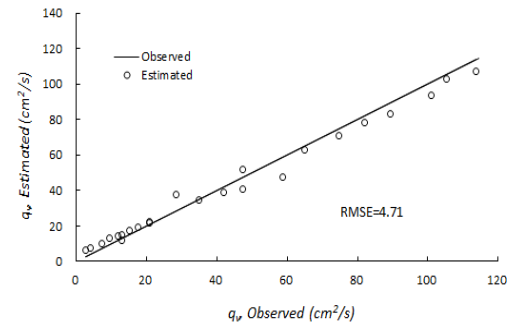


Fig. 16. Comparison of the discharge in voids q_v observed in experiments with the one calculated by using Eq. (16)

단면적, 공극율을 측정하여 구한 공극유량 계산식은 Eq. (17)과 같다.

$$q_v = \frac{Q}{h_u n} \tag{17}$$

Fig. 16은 Eqs. (16) and (17)에 의해 계산된 공극유량 계산값과 측정값을 비교한 것으로 RMSE는 4.71의 값을 보여주었다.

4. 결론

본 연구에서는 자갈칼럼과 돌망태 보 실내모형의 투수실험을 통하여 다음과 같은 결과를 산출하였다.

- 1) 형상인자 S_f (Sabin and Hansen, 1994)를 이용하여 수리평균반경 m 을 산정하였다.
- 2) 공극유속과 수리경사와의 비선형적인 관계는 거듭제곱형 곡선으로 맞춤되었다.
- 3) 수리평균반경 m 과 계수 a_v, b_v 의 상관관계는 Hussein et al. (1997)과 달리, 쇄석과 강자갈이 서로 다른 상관관계 곡선을 나타내었다.
- 4) 쇄석과 강자갈의 수리평균반경 m 과 계수 a_v, b_v 의 상관관계식을 적용한 공극유속 계산값은 칼럼실험에서 측정된 공극유속값과 잘 일치하였다.
- 5) h_u/L 과 등가수리경사 i_{eq} 의 관계식을 적용한 공극유량 계산값은 돌망태 모형 투수실험에서 측정된 공극유량값과 잘 일치하였다.

본 연구 결과는 돌망태 보의 채움재 종류의 결정, 입자크기의 선정, 보의 길이를 결정하는 설계와, 돌망태 수리구조물이 설치되어 있는 하천의 유지관리에 활용할 수 있을 것으로 보인다. 다만 본 연구에서 적용된 형상인자 S_f 는 주어진 값(Sabin and Hansen, 1994)을 사용하였으나, 형상과 거칠기 정도의 산정방법에 따라 수리평균반경이 달라질 수 있다. 또한 돌망태 모형 투수실험에 의한 공극유량 계산식은 실험조건의 한계로 $0 < h_u/L < 0.5$, $0 < i_{eq} < 0.25$ 일 경우에 적용이 가능하며, 본 실험은 돌망태 보를 통과하는 흐름만을 다루었으므로, 하천유량이 증가하여 통과류와 월류가 동시에 일어나는 흐름은 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 환경부가 출연하고 한국환경산업기술원에서 위탁 시행한 2020년 수요대응형 물공급사업의 연구비 지원(과제번호 2018002650002)에 의해 수행되었습니다.

References

Ergun, S. (1952). "Fluid flow through packed columns." *Chemical*

Engineering Progress, Vol. 48, pp. 89-94.

Forchheimer, P. (1901). *Wasserbewegung durch Boden*. 45th Edition, Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Germany, pp. 1781-1788.

Garga, V.K., Townsend, R., and Hansen, D. (1991). "A method for determining the surface area of quarried rocks." *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 35-45.

Han, I.Y., and Kim, G.B. (2019). "Water storage and intake performance of gabion weirs during recharge." *The journal of Engineering geology*, Vol. 29, No. 4, pp. 393-403.

Hansen, D. (1992). *The behavior of flowthrough rockfill dams*. Ph.D. dissertation, University of Ottawa, Canada, pp. 7-36.

Hussein, A.K., Morii, T., and Hattori, K. (1997). "Determination of nonlinear head loss equation of flow through rockfill by one dimensional column tests." *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, JSIDRE, No. 192, pp. 59-69.

Hussein, A.K., Morii, T., and Hattori, K. (1998). "Determination of discharge flow through rockfill gabion weir." *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, JSIDRE, No. 195, pp. 123-131.

Martins, M. (1990). "Principle of rockfill hydraulics." *Advances in rockfill structures*, Edited by Maranha das Neves, E., Kluwer Academic Publishers, Boston, M.A., U.S., pp. 523-570.

Michioku, K., Maeni, S., Furasawa, T., and Haneda, M. (2005). "Discharge through a permeable rubble mound weir." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 1, pp. 1-10.

Mohammad, S., Hassan, R., and Reza, S. (2013). "Non-darcy flow of water through a packed column test." *Article in Transport in porous media*, Springer Science+Business Media, Switzerland, pp. 215-227.

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.

Shariq, A., Hussain A., and Ahmad, Z. (2020). "Discharge equation for the gabion weir under through flow condition." *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, Elsevier, Vol. 74, pp. 1-8.

Sidiropoulou, M.G., Moutsopoulos, K.N., and Tsihrintzis, V.A. (2007). "Determination of Forchheimer equation coefficients a and b." *Hydrological Processes*, Vol. 21, No. 4, pp. 534-554.

Stephenson, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam, Netherlands, pp. 19-37.

Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. Wiley, N.Y., U.S., pp. 122.

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*, Canterbury, New Zealand, pp. 141-149.

Zingg, T. (1935). "Contribution to the gravel analysis." *Petrographic Messages*, Vol. 15, pp. 39-140.