

## 透水層흐름에서의 摩擦係數 Friction Factor of Seepage Flow

유동훈\* · 권순국\*\*

Dong Hoon Yoo\* and Soon Kuk Kwun\*\*

**要 旨 :** 레이놀즈수에 대한 透水層흐름 摩擦係數의 關係式을 개발하고자 透水層水槽 實驗을 실시하였다. 사용된 透水層水槽는 물이 거의 수평으로 흐르도록 誘導하는 裝置이다. 각 區間마다 水頭의 變化로 한번의 實驗으로 다양한 수리조건을 재현할 수 있는 包括性을 갖고 있으며, 여러 組의 水理實驗을 실시하였다. 보다 광범위한 수리조건을 재현하기 위하여 여러 크기의 畚를 사용하였고, 流出量도 다양하게 송출하였다. 기존자료를 이용하여 形狀係數 算定式을 개발하였으며, 급변 수조실험의 결과를 이용하여 레이놀즈수가 1부터 600까지의 조건에서 透水層흐름 摩擦係數를 구하는 陽解法 算定式을 개발하였다. 관측된 마찰계수의 분포경향을 고려하였을 때, 레이놀즈수가 600보다 큰 난류조건에서도 동일 산정식을 사용할 수 있으리라 기대된다.

**Abstract** : The seepage flow has been investigated conducting laboratory experiments mainly in order to determine the relation of seepage flow friction factor against Reynolds number. The apparatus of seepage flow measurements has the water flow almost horizontally. Several sets of experiments were carried out, and various flow conditions were obtained in each set of flow. To cover wide range of flow conditions, used were various materials of different measurement sizes and various stages of water discharge in the seepage flow tests. Shape factor equation was developed using existing data, and based on the present laboratory data, an explicit equation was developed for the estimation of friction factor of seepage flow in the range of Reynolds number from about 1 to about 600. The same equation is expected for the flow condition of Reynolds number over 600, considering the trend of friction factor distribution.

### 1. 緒 論

최근 용수의 고갈과 청정수의 확보에 대한 비상한 관심으로 투수층 흐름 또는 지하수 흐름에 대한 연구는 다방면으로 이루어지고 있으며, 특히 지하수에 대한 환경오염문제로 이에 대한 관심은 범국민적인 이슈로 대두되고 있다. 한편 근년에 체질이 이루어진 시화방조제나 영종도 국제공항 개발 또는 현재 공사가 진행중인 새만금 방조제 사업에 있어 최종 체질시 방조제의 상당구간이 투수층으로 이루어지고 있으며, 최종 체질공사의 안전하고도 효과적인 수행을 위하여 투수층 흐름에 대한 정확한 이해는 매우 중요하다 할 것이다.

투수층 흐름에 대한 본격적인 연구는 Darcy(1856)로부터 연유하며, 그가 제안한 Darcy식은 거의 모든 지하수 흐름문제 해석에 기초가 되고 있다. Darcy식은 층류구간에서 상당히 만족할만한 해를 줄 것으로 기대되어 왔으며, 대부분의 지하수 흐름문제 해석에 있어서는 Darcy식에 사용된 투수계수를 일정하다고 가정하여 해를 구하고 있다. 즉, 지하수 흐름은 층류구간내에 포함되는 것으로 판단되며, 이러한 가정은 대부분의 지하수흐름 해석에서 타당하다. 그러나 방조제 체질시 발생하는 투수층 흐름은 매우 큰 수두차와 사용된 쇄석의 직경이 장대하기 때문에 거의 모든 통과시간시 투수층흐름의 특성이 난류특성을 갖게 된다. 따라서 더이상 Darcy의 층류방정식 적용이

\*아주대학교 공과대학 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea)  
\*\*서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 (Department of Agricultural Engineering, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea)

불가하며, 난류특성을 반영한 관계식이 요구된다.

Darcy의 층류방정식은 단면평균유속이 수두경사에 단순히 선형비례한다는 가정하에 이때의 비례상수를 투수계수라 칭하였다. 이에 반하여 투수층 흐름도 난류특성을 갖게 되면 단면 평균유속이 수두경사에 더이상 선형비례하지 않고 수두경사의 2차원 함수나 수두경사의 지수승에 비례하는 것으로 나타났다. 이때 주목할 점은 비례상수가 층류방정식에서와 같이 하나만 도출되는 것이 아니라 2차원 함수일 때는 세개가 도출되므로 투수계수라는 개념이 더이상 타당성을 잃게 된다. 또한 지수함수일 때는 비례상수의 차원이 지수의 수치에 따라 흐름에 다양하게 사용되는 기존 경험식들의 문제점이 인식되며, 본 연구는 난류 투수층 흐름에 대한 이론전개를 면밀히 검토하고 투수계수 대신에 마찰계수를 도입하여 층류구간 뿐 아니라 난류구간에 적합한 마찰계수 산정식을 개발코자 한다. 이론 전개에 있어서는 기존 경험식들을 종합적으로 검토하였으며, 이론 연구에 기초하여 정밀 수조실험을 실시하였다. 마지막으로 본 연구에서 수행한 실험의 관측자료를 분석하여 양해법 마찰계수 산정식을 제시하였다.

## 2. 기존 경험식

Darcy는 투수층 입자가 세립이고 층류인 경우 동수경사  $i$ 와 투수속도  $V$ 사이에 다음과 같은 관계가 있음을 제안하였다.

$$U=Ki \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 모래의 단면적을 포함한 전체면적에서의 평균유속이므로 일반 유체역학이나 수리학에서의 속도개념과는 다르다. 일반적인 속도는 유량을 흐름 단면적으로 나눈 것을 정의하나 위의 식은 유속의 흐름 단면적 뿐만이 아니라 흙의 입자가 차지하고 있는 단면적까지 포함하고 있다.

상기식 (1)은 층류구간에 대한 투수층 통과유속의 산정식이며, 유속과 공극의 크기가 커서 투수흐름이 난류가 되면 이러한 선형관계가 성립하지 않음을 실험결과로부터 확인하였다. Forchheimer(1901)는 이러한 흐름에 대해서 다음과 같은 이차원 비선형방정식을 제안하였다.

$$i=aU+bU^2 \quad (2)$$

그밖에 여러 연구자들이 층류와 난류에 공히 적용할 수 있는 투수층 흐름 산정식을 층류식과 난류식이 조합으로 제시하였는데 다음과 같다.

Carman(1933):

$$i=\frac{180\alpha(1-f)^2v}{g^{\beta}\Phi^2}U+\frac{3\beta(1-f)}{4gf^{\beta}\Phi}U^2 \quad (3)$$

Ergun(1952):

$$i=\frac{150(1-f)^2v}{g^{\beta}\Phi^2}U+\frac{1.75(1-f)}{g^{\beta}\Phi}U^2 \quad (4)$$

Ward(1964):

$$i=\frac{360v}{g\Phi^2}U+\frac{10.4}{g\Phi}U^2 \quad (5)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $f$ 는 공극률,  $v$ 는 동점성계수,  $\Phi$ 는 입자의 직경이다. 위의 식들을 살펴보면 단순히 속도 일차항과 이차항의 합으로 나타낸 것을 알 수 있고, 또한 Forchheimer의 식에 각기 상황에 알맞은 factor를 구해서 조합한 값을 추론할 수 있다. Carman식 (3)에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 투수층 토사의 형상계수비이며, Ergun식 (4)에서 첫째항의 150은  $\alpha=0.83$ , 둘째항의 1.75는  $\beta=2.3$ 을 대입하여 얻어짐을 쉽게 추론할 수 있다. 또한 Word식 (5)에서 첫째항의 360과 둘째항의 10.4는  $f=0.48$ 로 가정하여 얻어진다. 또한 다음 절에서 논의할 이론식의 정밀유도과정으로부터 상기 세가지 산정식들의 조합과정을 추론할 수 있었다. 따라서 이러한 식들은 일반적이고 구체적인 값을 구하기는 어려우며 식 자체도 동수경사  $i$ 를 구하는 데 쫓점이 맞추어져 있으므로, 우리가 유량을 구하는 데 필요한 유속 또는 마찰계수를 바로 구하는 산정식의 개발이 요구된다.

이상의 2차원 형태의 방정식들은 다음 절에서 논의하는 바와 같이 상당히 이론적인 배경을 갖고 유도된 식이나, 일반적으로 토사의 대표입경 산정의 어려움 때문에 Forchheimer식 (2)와 같이 상기식들에서 각 항의 유속을 제외한 전체치수를 하나의 계수로 표현하는 것이 아직도 일반화되고 있다. 김채수(1988)는 삼교호와 대호호의 현장관측자료를 이용하

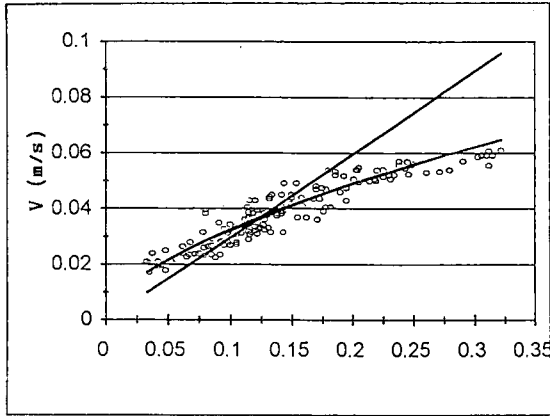


Fig. 1. Seepage flow velocity against surface slope in Sapyo Lake and Dacho Lake(after Kim, 1988).

용 동수경사로부터 단면평균유속을 바로 산정할 수 있는 다음과 같은 경험식을 제시하였다(김과 남(1989)과 Fig.1 참조).

Darcy:

$$U = 0.298i \quad (6)$$

Exponential Formula:

$$U = 0.126i^{0.585} \quad (7)$$

Binomial Formula:

$$U = 0.007 + 0.287i - 0.366i^2 \quad (8)$$

상기식에 제시된 상수들은 SI 단위계를 사용하였을 때의 수치이며, 이때 채석장의 공극률은 0.27~0.40, 채석장의 공극환산 직경은 0.05 m로 가정하여 속도의 최소치가 0.02 m/sec, 레이놀즈수가 299 이상일 때 난류에 해당된다고 판단하였다. 그러나 이상의 식들은 특정 방조제 단면에만 적용할 수 있는 것이며, 일반성이 확보되지 않아 장소에 따라 축조 방법이나 사석의 크기와 조상방법이 다를 때 적용할 수 없다. 상기 세가지 산정식 (6), (7), (8)은 전자와 달리 단면평균 유속을 바로 구할 수 있는 이점이 있으므로 사용에 편리하나, 입자의 직경, 공극률, 점성계수 등 투수층 흐름에 영향을 줄 것으로 예상되는 인자들의 함수로 표 되어 있지 않기 때문에 일반성을 상실하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 층류구간과 난류구간을 포괄적으로 포함하고, 투수층 흐름에 영향을 미치는 인자를 1 하여 일반성을 확보한 수식의 개발이 요

구된다.

### 3. 이론식의 보완 및 준이론식의 검토

Chezy식은 모든 흐름의 단면평균유속을 산정하는데 적용할 수 있으며, 포화상태의 투수층 지하수 흐름도 예외가 아니다. 그러나 Chezy식을 투수층 흐름에 적용하는데 있어 각 변수는 공극내의 유속, 공극내의 동수반경, 공극을 통과하는 흐름의 동수경사 등으로 대치하여야 하며 이때 마찰계수  $C_f$ 는 공극내 입자 표면과의 마찰을 대표하는 마찰계수이다. 따라서 관로나 개수로에 적용하는 일반적인 Chezy식은 다음과 같이 수정하여 표기될 수 있다.

$$U_f = \sqrt{\frac{g}{C_f}} H_f i_f \quad (9)$$

여기서 첨자  $f$ 는 공극내를 칭하며,  $U_f$ 는 공극내 유속,  $i_f$ 는 공극내의 동수경사,  $H_f$ 는 공극내의 동수반경이다. 토립자를 포함하는 단면적인 평균유속을  $U$ 라 할 때 공극률을  $f$ 라 하면  $U_f = U/f$ 이다.

공극내의 동수경사는 토립자가 투수층 흐름을 우회시킨다고 생각하여 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$i_f = \frac{i}{\delta} \quad (10)$$

여기서  $\delta$ 는 토립자로 인한 수립자의 경로증가율이다. 토립자의 저지에 의한 수립자의 경로증가율  $\delta$ 는 토립자의 형성과 크기 그리고 공극률에 따라 상당한 변이를 보일 것으로 판단된다. 대개 경로증가율은 1.5에서 2.5사이의 범위에 드는 것으로 알려져 있으며, 공극률과는 다음과 같은 관계가 성립하는 것으로 알려져 있다.

$$\delta = f^{-0.5} \quad (11)$$

투수층 흐름의 유속 산정에 있어 수류의 경로증가율과 함께 매우 중요한 요인은 동수반경이며, 공극내의 동수반경  $H_f$ 는 3차원 형상을 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$H_f = \frac{V_f}{A_f} \quad (12)$$

여기서  $A_f$ 는 공극이 접하는 총표면적이며,  $V_f$ 는 공극이 차지하는 총체적이다. 수조실험에서 공극이 접하는 표면적중 수조의 유리벽면을 무시하면  $A_f$ 는  $A_s$  즉 입자 하나의 표면적으로 대표할 수 있으며, 공극의 표면적은 공극비  $e$ 와 입자 하나의 체적  $V_s$ 를 도입하여  $eV_s$ 로 대표할 수 있다. 즉,

$$H_f = \frac{eV_s}{A_s} \quad (13)$$

$e$ 는 공극비  $e=f/(1-f)$ 이다. 만일 공극이 접하는 총 표면적중 수조벽면을 고려하면 다음과 같다.

$$H_f = \frac{neV_s}{A_w + nA_s} \quad (14)$$

$A_w$ 는 수조벽면의 표면적이며,  $n$ 는 입자의 개수이다. 보통 수조벽면은 유리로 만들어져 있으며, 유리벽면의 마찰력은 입자와의 마찰력에 비하여 작을 뿐더러 면적도 상대적으로 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 동수반경은 식 (13)으로 산정하여도 충분한 정밀도를 유지할 수 있을 것이다. 입자 표면적과 직경을 곱한 것의 입자 체적에 대한 비를 형상계수  $\xi$ 라 하며, 이를 식 (13)에 도입하면 다음과 같다.

$$H_f = \frac{e\Phi}{\xi} \quad (15)$$

형상계수  $\xi$ 는  $\xi = A_s\Phi/V_s$ 로 정의된다.

식 (10)과 식 (15)를 식 (9)에 대입하면 총단면의 평균유속은

$$U = \sqrt{\frac{gfe\Phi i}{\xi \delta C_f}} \quad (16)$$

이며, 마찰계수 산정식

$$C_f = \frac{gfe\Phi i}{\xi \delta U^2} \quad (17)$$

**Table 1.** 토립자 크기에 따른 형상계수의 변이(Kovacs, 1981)

직경(mm)	잘 마모된 토사	일반토사
10.0	8.0	8~11
1.0	9.2	8~12
0.1	10.6	10~13
0.01	12.1	12~15
0.001	14.4	15~18

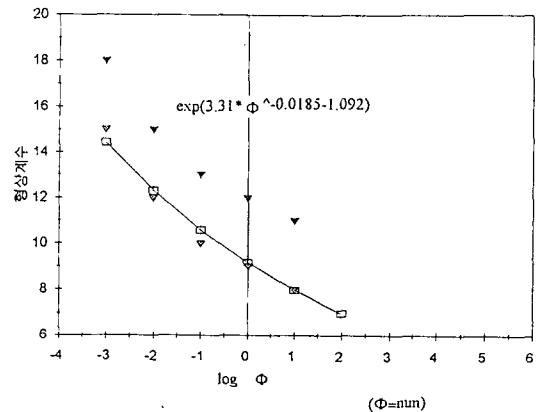
가 구해진다.

완전히 매끄러운 구형체인 경우 입자 표면적인  $\pi\phi^2$ 이며, 입자 체적은  $\pi\phi^3/6$ 이다. 따라서 형상계수는 6이다. 같은 방법으로 이상적으로 매끄러운 원통실린더인 경우 4이며, 정육면체와 정팔면체일 때는  $\xi = 10.4$ 으로 산정된다. 그러나 일반 토사나 쇠석인 경우에는 상당히 다양한 변이 양상을 보이고 있다. Kovacs (1981)는 잘 마모된 토사의 투수층 흐름에서 관측된 자료와 일반토사의 투수층 흐름에서 관측된 자료를 이용하여 산정된 결과로부터 토립자 크기에 따라 변이하는 형상계수  $\xi$ 의 수치를 구하였는데 Table 1에 제시된 바와 같다.

잘 마모된 토사의 투수층 관측자료를 이용하여 구한 형상계수 수치로부터 대체적으로 매끈한 토사인 경우 다음과 같은 산정식을 구할 수 있다.

$$\xi_0 = \exp(3.31\phi^{0.0185} - 1.092) \quad (18)$$

여기서 입자직경의 단위는 mm이며, 형상계수  $\xi_0$ 는 무차원수이다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 형상계수 산정식 (18)은 마모토사 관측자료로부터 유도한 수치와 매우 유사하며 일반토사 관측자료의 산정결과로부터 구한 수치의 최저치와 유사하다. 상기식은 차원이 일치하지 않는데, 기준입경을 도입하면 차원의 일치를 기할 수 있다. 완벽히 매끈한 구형체일 때 형상계수는 6이며, 입경 약 1000 mm일 때 식 (18)로 산정된 형상계수도 약 6이 된다. 따라서 입경 1000 mm를 기준입경으로 취하여 식 (18)을 수정하면 다음과 같다.



**Fig. 2.** Distribution of shape factor.

$$\xi_0 = \exp\left[2.9\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^{0.019} - 1.1\right] \quad (19)$$

상기식에  $\phi_0$ 는 기준입경으로서 1000 mm이며, 정밀도 1% 이내를 유지하는 범위에서 계산편의를 위하여 유효숫자 개수를 하나씩 줄였다.

Table 1과 Fig. 2에 제시된 바와 같이 토립자의 거칠음에 따라 형상계수가 최저치로부터 증가하는데 이를 고려하여 최종 형상계수는 다음과 같이 산정될 수 있을 것이다.

$$\xi = \xi_0 + \xi \quad (20)$$

여기서  $\xi$ 는 토립자의 거칠음 상태에 따라 증분되는 수치인데 최소 0으로부터 최대 3까지이다.

층류인 경우 식 (16) 또는 (17)에 일반적인 관수로 마찰계수 산정식

$$C_f = 2/R_f \quad (21)$$

를 대입하면,

$$i = \frac{\xi \delta U^2 (2/R_f)}{g f^e \Phi} \quad (22)$$

여기서  $R_f$ 는 공극내의 공수반경과 관련된 레이놀즈 수로서 다음과 같다.

$$R_f = \frac{U_f H_f}{\nu} = \frac{U e \Phi}{f \xi \nu} \quad (23)$$

따라서 식 (23)을 식 (22)에 대입하면

$$i = \frac{2\xi^2 \delta (1-f)^2 \nu U}{g f^3 \Phi^2} \quad (24)$$

상기식에  $\xi = 6$ ,  $\delta = 2.5$  또는  $\xi = 7.75$ ,  $\delta = 1.5$ 을 대입하면,

$$i = 180\alpha \frac{(1-f)^2 \nu}{g f^3 \Phi^2} V \quad (25)$$

여기서  $\alpha$ 는 형상계수  $\xi_0 = 6$  또는  $\xi_0 = 7.75$ 을 기준으로 한 형상계수의 비로서  $\alpha = (\xi/\xi_0)^2$ 이다. 상기식 (25)는 Carman 식 (3)의 첫째항과 동일함을 알 수 있다.

또한 난류인 경우 식 (16) 또는 (17)에서  $\xi \delta C_f$ 를 일정한 수치  $3\beta/4$ 로 가정하고 이를 식 (16)에 대입하면

$$i = \frac{3\beta(1-f)}{4g f^e \Phi} U^2 \quad (26)$$

이 되며, 상기식 (26)도 Carman식 (3)의 둘째항과 동일함을 알 수 있다. 즉, Carman식 (3), Ergun식 (4), Ward식 (5) 등은 이론으로 유도된 층류식과 난류식의 조합으로 이루어진 식이며, 각 연구자의 관측조건과 분석 방법, 그리고 단순화 과정에 따라 약간의 계수 변화를 보이고 있음을 알 수 있다.

이상의 이론 연구로부터 투수층 흐름에 대한 이해를 충분히 가질 수 있었으나 제 경험식이나 준이론식의 계수들이 통일되어 있지 않을 뿐만 아니라 산정식의 해를 구하는 데 어려움이 많다. 즉, 우리가 구하고자 하는 수치는 통과단면의 단면평균유속인데 식 (3)~(5) 등의 경험식이나 준이론식들은 단면평균 유속으로부터 동수경사를 구하는 형태로 제시되어 있기 때문에 많은 반복과정을 거쳐야 해를 구할 수 있다. 따라서 Chezy식으로부터 유도된 기준식 (9)에 마찰계수  $C_f$ 를 바로 대입하여 단면평균 유속을 산정하는 방법이 보다 편리하고 수치모형의 적용에 유리할 것이다. 이러한 측면에서 마찰계수  $C_f$ 의 산정에 주안점을 두고 본 연구에 관련된 투수실험을 실시하였다.

#### 4. 투수실험 및 자료분석

본 실험연구에 사용된 실험장치는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 철골후레임내에 유리벽 투명수조가 설치된 투명투수실험장치이며, 투수실험 기구의 측면 상세도는 Fig. 4에 도시된 바와 같다. 이와같은 수평투수실험장치는 Darcy는 수직투수실험장치에 비하여 방조제

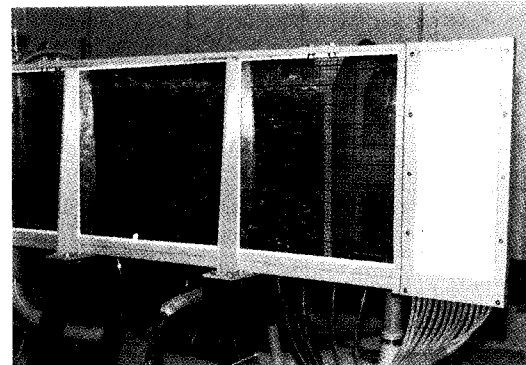


Fig. 3. Apparatus of seepage flow measurement.

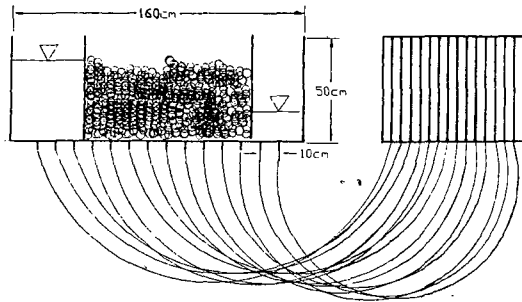


Fig. 4. Side view of seepage flow apparatus.

공사시의 현장조건과 보다 유사할 뿐만 아니라, 한번의 투수실험으로 많은 관측자료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 수위변화가 계속적으로 일어나는 관계로 수위의 정확한 측정이 요망되며, Piezometer와 연결된 Manometer로 수위를 측정할 시 Piezometer 유입구의 상태를 매번 꼼꼼히 검사해야 되는 단점이 있다. 본 실험에서는 이러한 문제점이 야기되지 않도록 면밀히 점검한 후 실험을 실시하였다.

투수실험장치의 제원은 폭 20 cm, 높이 52 cm, 총 길이 160 cm이며, 바닥면에 설치된 각각의 Piezometer 간격은 10 cm이고 Piezometer 총 갯수는 14개이다. 실험방법은 체분석된 동일입径의 모래 또는 쇄석을 채운 후 물을 흐르게 한 다음, 배수공으로 흘러나온 물을 같은 높이에서 받아 단위시간당 무게를 측정한다. 실험중 유량계측은 3번 실시하였으며 이들의 평균치를 구하여 각 단면의 평균유속을 산출하였고, 이와 동시에 각 Manometer의 수두차를 읽어 동수경사를 구하였다. 이때 단면평균 유속이라 함은 토사입자의 면적까지를 포함한 단면의 평균유속이며, 실제 공극을 통과하는 유속은 공극률을 측정하여 구한다.

공극률은 다음과 같은 방법에 의하여 구하였다. 무게를 미리 측정한 실린더 통에 물을 채워 무게를 잰 후, 물을 빼고 다시 표면건조 포화상태의 쇄석을 채워 무게를 측정한다. 여기에 다시 물을 가득 채워 무게를 측정한다. 처음에 구한 물 무게에서 원통 전체의 부피를 구할 수 있으며, 물과 쇄석 무게에서 쇄석 무게를 빼면 쇄석 사이 공극의 부피를 알 수 있으므로 공극률을 구할 수 있다. 이상의 계측으로부터 공극률  $f$ 는 대체로 0.4~0.5 범위의 값이 많았다. 동수경사  $i$ 는 10 cm 간격으로 위치한 Manometer의

Table 2. 실측된 입경크기별 공극률

입경(mm)	1.4	3.4	7.35	11.1	17.1	22.3
공극률( $f$ )	0.45	0.49	0.46	0.47	0.45	0.49

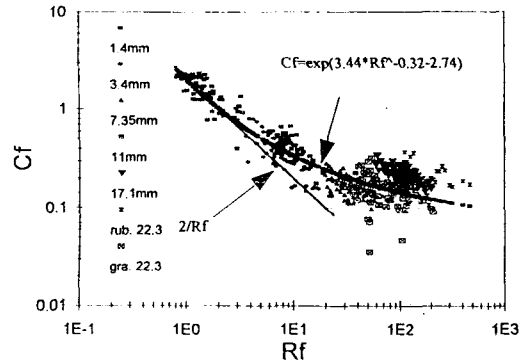


Fig. 5. Seepage flow friction factor against Reynolds number.

수두차를 읽어서 이용하였으며, 단면평균유속은 10 cm 간격의 두 지점 평균 유속이다. 이밖에 형상계수는 마모토사 관측자료로부터 유도된 산정식 (19)을 사용하여 구하였으며,  $f$ 는 실측치를 이용하였고, 경로증가율  $\delta$ 는 1.5로 가정하였다. 이는 실측된 평균공극률  $f=0.45$ 를 식 (11)에 대입하여 구한 수치와 유사하다. 모래 및 쇄석은 크기에 따라 평균입径의 크기가 1.4 mm, 3.4 mm, 7.35 mm, 11.1 mm, 17.1 mm, 22.3 mm 등 총 6가지를 사용하였다. 직경 1.4 mm와 3.4 mm의 모래는 해변에 채취된 자연사이므로 대체적으로 마모의 정도가 큰 것으로 판단되며, 7.35 mm 이상의 쇄석은 인공분쇄기로 만든 것이기 때문에 마모가 거의 없는 상태이다. 단 가장 큰 입경 22.3 mm에 대하여는 인공분쇄기로 만든 쇄석과 강변에서 채취한 자연자갈을 각각 사용하여 형상계수의 영향을 살펴보았다. 각각의 경우에 공극률을 실측하였으며, 실측된 공극률은 Table 2와 같다. 직경 22.3 mm의 경우 쇄석과 강변자갈 모두 우연히 공극률은 약 0.49이었다.

이러한 방법으로 구한 투수층의 마찰계수  $C_f$ 의 분포가 레이놀즈수(식 (23)으로 산정)에 대하여 Fig. 5에 도시되어 있다. 여러 입径의 토사와 유출량을 사용하여 관측범위는  $0.7 < R_f < 600$ 이다. 도시된 바와 같이 공극의 동수안정과 연관된 레이놀즈수 약 3까지는 층류에서의 관계식  $2/R_f$ 의 직선식과 유사한 분포를

보이고 있으며, 이후 난류 구간에 접어들면서 마찰 계수의 감소율이 점차 작아져 레이놀즈수가 70 정도 까지 계속 작아지다가 최대 입경의 쇄석에서 약간 상승한 후 다시 감소하는 경향이 있으나 이후 거의 일정해지는 것을 예상할 수 있다. 입경 22.3 mm 쇄석의 마찰계수와 입경 17.1 mm 쇄석의 마찰계수가 크게 나오는 이유는 형상계수 산정의 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 마모토사 관측자료로부터 유도된 형상계수 산정식 (19)는 자연 토사나 자갈과 같이 어느 정도 매끄러운 면을 가진 형상인 것으로 판단되며, 방조제 축조시 사용하는 사석이나 본 실험연구에서 사용한 쇄석인 경우 형상계수는 식 (19)로 산정된 수치보다 좀더 클 것으로 예상된다. 즉, 식 (20)에 제시된 바와 같이 거칠음에 의한 증분치  $C_f$ 를 추가하여 형상계수를 산정하여야 되나 증분치를 정확히 알 수 없기 때문에 추가 계산은 생략하였다. 이러한 판단기준으로 레이놀즈수 1000 이상에서는 마찰계수가 약 0.1로 수렴하는 것으로 판단된다.

이상의 실험자료 분석결과는 층류, 난류 등 각 구간별로 나누어서 마찰계수 산정식을 개발할 수도 있으나, Fig. 5에 도시된 바와 같이 마찰계수 분포가 각 구간의 경계층에서 뚜렷한 불연속성 없이 완만한 곡선분포를 보이므로 모든 난류구간을 포함하는 단일 식으로의 유도가 가능하다. 이러한 분포는 형상계수 산정식 (19)와 같은 형태로 나타낼 수 있으며, 회귀 분석에 의하여 다음과 같은 관계식을 구하였다.

$$C_f = \exp(3.44R_f^{0.32} - 2.74) \quad (27)$$

Fig. 5에는 실험자료 분석결과와 함께 식 (27)로 산정된 결과가 도시되어 있는데 전 구간에 걸쳐 양호한 산정결과를 보여줌을 알 수 있다. 입경이 22.3 mm일 때 레이놀즈수는 70 이상이며, 이때 실험자료의 분석결과는 식 (27)로 산정된 결과보다 약간 큰 수치로 나타났다. 이는 입경이 클 때 식 (19)로 산정된 형상계수가 실제보다 작은 것으로 판단되어 식 (27)은 레이놀즈수가 큰 난류구간에서도 합당한 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

이상의 연구결과로 투수층을 통과하는 수류의 마

찰계수는 층류 구간에서는 식 (21)로 산정하나 레이놀즈수가 1이상일 때는 더이상의 흐름조건에 관계없이 전 난류구간을 포괄하는 단일식 (27)을 이용하여 상당히 정확한 산정이 가능하다. 이는 수치모형의 이용에 있어 조건식을 사용하지 않아도 되는 편리성과 효율성을 부여한다. 그러나 산정식 유도과정에서 나타난 바와 같이 단면평균 유속 산정에 있어 마찰계수 산정의 정확도 못지 않게 형상계수나 경로증가율 산정의 정확도가 크게 좌우하므로 이들 계수 선정에 상당한 주의를 기울여야 될 것이다. 방조제 체절에 사용되는 쇄석은 자연마모에 의하여 형상이 결정된 것이 아니라 인위적인 발파에 의하여서 결정된 것이므로 형상계수 산정에 있어 특히 쇄석의 크기가 클 때 식 (20)에 제시된 바와 같이 식 (19)로 산정된 수치보다 약 3정도 증가시킬 것을 추천한다.

### 사 사

본 연구는 농어촌진흥공사의 연구사업 “조류예측 유한요소 수치모형 개발(III)” 중의 일부로 이루어진 것이며, 당 공사의 연구지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

김채수, 1988. 하구둑 최종물막이시에 내수위 예측을 위한 유량계수 결정, 동국대 박사학위 논문.  
 김채수, 남선우, 1989. Discharge coefficient of flow through gate piers, 한국수문학회지, 22: 91-98  
 Carman, P.C., 1937. Fluid flow through a granular bed, *Trans. Instn Chem. Engrs (London)*, 15: 150-156.  
 Darcy, H. 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris.  
 Ergun, S., 1952. Fluid flow through packed columns, *Chem. Eng. Prog.*, 48: 88-94.  
 Forchheimer, p.H., 1901. *Hydraulics(in German)*. Teubner, Leipzig, Berlin.  
 Kovacs, G., 1981. *Seepage hydraulics*, Elsevier Scientific Publ. Company.  
 Kozeny, J., 1953. *Hydraulics(in German)*. Springer, Wien.  
 Ward, J. C., 1964. Turbulent flow in poros media, *J. Hydr. Eng., ASCE*, 90(5): 1-12.