

상용관로의 간편설계(1)

유 동 훈 (아주대학교 환경도시공학부 교수)

1. 서론
2. 관로 마찰계수
3. 단일관로의 설계
3.1 유량 산정
3.2 관경 산정
3.3 요약
4. 복합관로의 설계
4.1 직렬관로
4.2 병렬관로
4.3 다지관로
4.4 요약
5. 결론

1. 서론

금번 기술강좌에서는 상용관로의 간편설계에 관한 저자와 여러 연구자들의 최근 연구를 소개하고 실제 적용사례를 기술하고자한다. 상수의 급·배수 및 송수는 전적으로 압력관로 시스템으로 이루어지며, 관로의 배치형태에 따라 수리조건이 달라지고 설계방법도 다양하다. 관로설계에 있어 관로 마찰계수의 산정은 가장 핵심되는 요소인데, 마찰계수의 크기는 여러 수리 조건의 함수이기 때문에 대부분의 설계에 있어 상당한 반복과정이 요구된다. 그러나 마찰계수 산정식의 형태를 지수형으로 취하면 양해적 해석이 가능하다. 단일관로 뿐 아니라 직렬관로나 병렬관로에 대한 설계에서도 간편한 설계기법 개발이 가능하다.

관로 설계시 주어진 조건에 따라 요구되는 통과유량이나 적정관경 등과 같은 관련 물리량을 산정함에 있어서 양해적으로 해를 구하는 기법 개발은 여러 연구자들에 의해 시도된 바 있다. Li (1974)는 적합관경을 구하는 문제에 있어 관련 물리량의 조합 형태인 세 개 무차원수들의 관계도표를 작성하여 직접해를 구할 수 있도록 유도하였으며, Swamee와 Jain (1976)은 유량을 산정하는 양해법 산정과 관경을 산정하는 양해법 경험식을 제시한 바 있다. 이디오피아의 Asthana는 유량을 직접 구할 수 있는 관계도표를 작성하였고, (Simon (1986)), 영국의 Hydraulic Laboratory(1990)도 관경이나 유량 등을 직접 구할 수 있는 표를 작성하여 제시한 바 있다. 그러나 이들의 연구결과에는 여러 가지 문제점이 내포되어 있는데 공통된 문제점으로는 근본적인 모순점을 갖고 있는 Colebrook-White (1937)식을 상용관 마찰계수 산정식으로 이용하였다는 점이며, 대부분 표나 그림으로 제시되어 있어 임의의 조건에서 해를 구하기 위하여는 별도의 내삽법에 의한 해석이 필요하거나 그림을 독취할 때 개인별로 약간씩 상이한 오차가 발생할 가능성이 있다는 점이다. 또한 상용관로 흐름에 있어서의 관마찰 계수가 관의 종류와 직경에 따른 거칠은 정도 그리고 레이놀즈수와 관련된 함수이기 때문에 오래전부터 쓰여진 전통적인 방법들은 그 해를 구하기 위해서 반복 시산적인 계산을 필요로 한다. 이러한 점들로 미루어 기존의 방법들은 여러 가지 개선해야 할 문제점이 많은 것으로 사료된다.

따라서 본 기술 강좌에서는 새로운 자료 분석을 통해 상용관에 적용할 수 있도록 개발된 마찰계수 산정

식을 소개하며 새로운 마찰계수 산정식을 적용하여 개발된 관로설계(펌프동력 또는 관내 통과유량이나 적정 관경의 산정)의 양해적 방식을 기술하고자 한다. 우선 기존의 상용관 마찰계수 산정식인 Colebrook-White 공식, Hazen-Williams 공식 등의 모순점을 밝히고 관로설계에 적합하도록 새롭게 개발된 마찰계수 평균법과 지수형 마찰계수 산정식에 대해서 기술하였다.

2. 관로 마찰계수

관마찰계수는 일반적으로 Darcy-Weisbach식에 도입되는 것으로 정의되며 이 이론식은 다음과 같다.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

여기서 h_f 는 마찰손실수두, L 은 관길이, D 는 관경, V 는 평균유속, g 는 중력가속도이고 f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수이다.

관 내벽의 조고를 균일하게 인위적으로 형성한 관을 균일조도 원형관이라 하면 흔히 상하수의 유송 및 송수, 배수 등에 사용할 목적으로 정해진 규격에 따라 제작된 관을 상용관이라 한다. 상용관은 관종이나 환경에 따른 이음 또는 접합방법 등의 차이에 의해 관내벽에 비균일한 조고가 발생하고, 접합부에서 생성되는 손실이 주된 원인으로 작용하여 균일조도관 마찰계수의 분포와는 상당히 다른 특징을 갖는다. 상용관에 관한 연구는 이미 여러 연구자들에 의해 수행된 바 있다. 그러나 대부분 상용관내 조고가 비균일하다는 점에는 동감하고 있으나 어떠한 상태로 분포하고 있는지에 대해서는 연구가 미흡하다.

2.1 기존의 산정식

Colebrook (1938)은 다양한 크기의 세 종류 강관에 대한 관측자료를 수집하여 분석하였으며, 이로부터 그는 상용관 마찰계수를 산정하는 Colebrook-White (1937)식을 제안하였다. 그러나 그의 연구결과에 대하여는 이미 여러 가지 모순점이 발견되었으

며, Colebrook 이후에 Moody (1944)는 Colebrook-White식을 토대로 상용관 마찰계수를 구하는 도표로서 Moody Diagram을 제안한 바 있다. 그러나 이 역시 근본적인 모순점을 내포하고 있으며, 도표로 작성되었기 때문에 이용하는데 불편하다. 한편 Williams와 Hazen (1933)은 실험자료와 현장관측자료를 분석하여 지수형 경험식을 제시하였는데, 수식의 단순함으로 인하여 널리 이용되고 있다. 이상과 같은 기존의 여러 가지 상용관 마찰계수 산정식들중 대표적으로 Colebrook-White식, Hazen-Williams식, Weston식, Manning식, Wood식 등에 대해서 기술하면 다음과 같다.

(1) Colebrook-White 공식

Colebrook (1938)은 당시 Heywood, Saph and Schoeder, Freeman, Mills, Smith 등 여러 연구자들이 인발관(Galvanized-Iron Pipe), 역청주철관(Tar-Coated Cast-Iron Pipe), 연철관(Wrought-Iron Pipe) 등의 강관에 대해 행한 실험자료들을 수집하여 분석하였다. 이로부터 Colebrook과 White는 Nikuradse 실험결과와 완난류(hydraulically smooth turbulent flow)와 전난류(hydraulically rough turbulent flow)에 적용되는 두 식을 같은 비율로 단순 조합한 형태로 다음과 같은 상용관 마찰계수 산정식을 제안하였다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log \left(\frac{k_c}{3.7D} + \frac{2.53}{R\sqrt{f}} \right) \quad (1)$$

여기서 f 는 상용관 마찰계수, D 는 관경, R 은 관경 레이놀즈수로서 $R=VD/\nu$ 이며, k_c 는 Colebrook이 실험자료로부터 추정된 대표 등가조고로서 관의 크기와는 상관없이 관의 종류에 따라 일정한 수치를 갖는 것으로 제한하였으며, 다음과 같다.

인발관	$k_c = 0.15\text{mm}$
아스팔트 도장 주철관	$k_c = 0.13\text{mm}$
무도장 주철관	$k_c = 0.25\text{mm}$
연철관	$k_c = 0.04\text{mm}$

Colebrook-White 산정식 (1)에 대한 양해법 산정식도 여러 종류가 개발되었으며 Barr(1975) 산정식을 제시하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log \left[\frac{k_c}{3.7D} + \frac{5.13}{R^{0.89}} \right] \quad (2)$$

그러나, 이상의 Colebrook-White 접근 방법은 다음과 같은 모순이 있다.

1. 매끈한 면과 거칠은 면의 총합이 200%라는 논리적 모순
2. 매끈한 면이 등가조고 0mm, 즉 완벽하게 매끈하다는 가정으로 매끈한 면은 항상 수리학적적으로 매끈한 흐름이고 거칠은 면은 항상 수리학적적으로 거칠은 흐름이라는 가정
3. 등가조고는 동종관에 동일하다는 가설

이상과 같이 Colebrook-White식은 그 자체적인 모순을 많이 내포하고 있기 때문에 식을 적용함에 있어서 큰 주의를 기울여야 할 것이다.

(2) Hazen-Williams 공식

Williams와 Hazen(1933)은 광범위한 수리조건

에서 관마찰실험을 실시하여 관마찰계수 또는 단면 평균유속을 산정하기 위한 지수함수 형태의 경험식을 제시하였다. Hazen-Williams 식은 이론적인 근거가 취약함에도 불구하고 아직까지 많은 국가에서 널리 이용되고 있는데, 이는 수식의 단순함에도 기인하지만 역설적으로 어느 정도 이론에 근거하고 있으나 개념적으로 불충분한 Colebrook-White 식에 사용되는 등가조고의 불확실성과 대구경관 실험 자료와 비교하여 밝혀진 Colebrook-White 식의 비적합성에도 기인한다. 대구경관에 대하여 Hazen-Williams 식이 Colebrook-White 식 보다 더 정확하다는 연구 결과는 없으나, 확실한 우열을 판별할 수 없는 경우에 실무에서 단순한 형태의 식에 대한 선호는 당연한지 모르겠다.

Williams와 Hazen(1933)은 관경 50mm 이상, 유속 3m/s이하의 제한된 조건에서의 실험자료들을 분석하여 평균유속을 산정하는 지수형 경험식을 제시하였으며, 다음과 같다.

$$V = 0.85C_{HW}H^{0.63}i^{0.54} \quad (3)$$

여기서 H는 동수반경이고 i는 에너지 경사이며, C_{HW} 는 주로 조도에 따라 결정되는 Hazen-

표 1 Hazen-Williams 공식의 CHW 값

재 료			C_{HW}	K_w
보통 코올타르 도장한 주철관		신품	130 - 135	0.02-0.04
"	통수	5년	120	0.11
"		10년	110	0.25
"		15년	105	0.37
"		20년	95	0.75
"		30년	85	1.48
"		40년	80	2.08
보통주철관		(古)	100	0.53
연철관			110 - 120	0.11 - 0.25
놋쇠관, 유리관			140 - 150	0.001 - 0.007
내면 고무 도장한 소화용 호오스			110 - 140	0.007 - 0.25
흙관 100 - 600 mm			150	0.001
100 mm 이하			120 - 140	0.007 - 0.11
보통 콘크리트관			120 - 140	0.007 - 0.11

Williams 계수로서 관의 종류나 관의 크기에 따라 일정한 수치를 갖는다. 상기식 (3)에 i 를 손실수두대 관길이의 비로 표현하고 원형관의 동수반경 $H=D/4$ 를 취하여 정리하면 다음과 같은 마찰계수 산정식이 유도된다.

$$f = 1060 C_{HW}^{-1.85} R^{-0.15} \quad (4)$$

Hazen-Williams식은 이론적인 근거가 미흡하며, 비례상수와 지수가 관경과 관중에 따라 다양하게 변이하는 점을 명확하게 해석하지 않은 결점이 있다. 그럼에도 불구하고 형식이 단순하고 경험계수의 선정이 여러 다양한 조건에 대하여 명확하게 제시되어 있다는 점에서 Hazen-Williams식은 기존의 어느 산정식보다 우호적으로 광범위하게 이용되어 왔다. 특히 형식이 단순함에도 불구하고 Hazen-Williams 식은 상용관 마찰계수의 분포특성을 대체적으로 양호하게 반영하고 있다. 식 (4)로 표기된 것과 같이 Hazen-Williams 식은 지수형 산정식으로 전환되는데, 그들이 주장한 바와 같이 관경 50 mm, 유속 3% 이하의 조건에서는 대체적으로 관측결과와 유사하다. 그러나 이 조건 밖에서는 오차가 과도하게 커지는데 다음절에 기술한 바와 같이 최근에 개발된 지수형 산정식에서는 보다 다양한 조건에서 정밀도를 높이고자 관련 상수들을 조건에 따라 약간씩 조정하였다.

(3) 기타

상기 제시된 Colebrook-White식과 Hazen-Williams식 이외에도 여러 종류의 경험식들이 제안되었는데, 그 중 Manning식, Weston식, Wood식 등이 자주 인용되는 경험식들이다. Manning (1890)식은 주로 개수로 평균유속 산정에 이용되고 있는데 상수관 설계에도 가끔 인용되고 있으며, Hazen-Williams식의 유효범위 밖에 대한 검증용으로 채택되고 있다. 한편 Manning식을 Darcy-Weisbach식으로 전환하여 마찰계수 산정식으로 표기하면 다음과 같다.

잘 알려진 바와 같이 Manning식은 다음과 같이

표기된다.

$$V = \frac{1}{n} H^{2/3} i^{1/2} \quad (5)$$

$$f = \frac{124.6n^2}{D^{1/3}} \quad \text{또는} \quad f = 0.229 \times D_r^{-1/3} \quad (6)$$

여기서 $D_r = D/k_w$ 이며 D 는 관의 내경[m], k_w 는 Nikuradse 등가조고이다. 식 (4)로 표기한 바와 같이 Hazen-Williams 식은 완난류 형태를 단지 조고에 따라 상향으로 또는 하향으로 평행 이동하는 특성을 보이는데 반하여 Manning식은 전난류 형태를 유지하고 있다. 일반적으로 완난류 형태의 산정식이 전난류 형태의 산정식보다 마찰계수는 작게 산정하는 것으로 알려져 있는데, 꼭 그렇지만은 않다는데 주목할 필요가 있다. 레이놀즈수가 작을 경우, 즉 유속 또는 관경이 작을 경우에는 전난류 형태의 산정식이 완난류 형태의 산정식보다 마찰계수를 작게 산정하게 된다. 다음 절에 소개된 마찰계수 평균법이나 지수형 산정식은 관측 결과에서 확인된 바와 같이 수리조건과 관경, 관중에 따라 다양하게 변이하는 분포 특성을 적절히 반영하였다.

소형관의 마찰계수 산정에는 Weston식이 많이 인용되고 있는데 SI Unit로 표기할 때 다음과 같다.

$$f = 0.0126 + \frac{0.01739 - 0.1087D}{\sqrt{V}} \quad (7)$$

여기서, V : 관내 평균유속[m/s], D : 관의 내경 [m] 유속과 관경이 증가함에 따라 즉 레이놀즈수가 증가함에 따라 관마찰계수가 감소하는 특성을 보이는 Weston식도 Hazen-Williams식과 유사하다. 그러나 Weston식은 형식이 임의적이고 차원일치가 결여되어 광범위한 조건에 대비한 확장 가능성과 유용성이 상당히 떨어진다.

마지막으로 소개되는 Wood (1966)식도 Hazen-Williams식이나 Weston식과 같이 레이놀즈수의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 보이고 있으며 차원일치도 기하였기 때문에 상당히 우호적으로

사용될 수 있으리라 믿는다. 다만 관중에 따라 결정해야할 등가조고의 선정이 미흡하다.

$$f = a + \frac{b}{R^c} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } a &= 0.094 D_r^{-0.225} + 0.53 D_r^{-1} \\ b &= 88 D_r^{-0.44} \\ c &= 1.62 D_r^{-0.134} \end{aligned}$$

2.2 최신의 산정법

상용관내 조고가 불균일하다는 점에는 많은 연구자들이 동감하고 있으나 거칠은 면이 어떤 상태로 분포하고 있으며, 상용관의 조도가 Nikuradse의 조도와 어떠한 특성 차이를 보이고 있는지에 대하여는 거의 연구된 바가 없다. 그러나 적어도 여러 가지 조면의 분포율이 동일하지는 않을 것이라는 것을 예상할 수 있으며, 각 조면의 분포율을 고려하지 않은 Colebrook-White식이나 이론적인 근거가 취약한 Hazen-Williams식에 있어 개선의 여지는 다분히

있다. 한편 Manning식을 제외하고 거의 모든 경험식들이 레이놀즈수의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 뚜렷이 나타내고 있다. 단지 Colebrook-White식이나 Wood식은 조고비 D_r 에 따라 상향으로 평행이동하는 특성을 보이고 있다.

본 기술강좌에서는 이들 경험식들의 우열을 검토하고자 시도하지는 않았다. 단지 새롭게 개발된 마찰계수 산정법으로 **마찰계수 평균법**(유동훈, 1995b)과 마찰계수를 양해적으로 구할 수 있는 **지수형 마찰계수 산정식**(유동훈과 강찬수, 1998)을 소개하였으며, 두 방법 모두 기존에 제시된 기법을 포괄할 수 있음을 밝힌다. 즉 마찰계수 평균법은 Colebrook-White식의 일반형이며, 지수형 산정식은 Hazen-Williams식이나 Wood식의 일반형으로 기존 산정식들의 특징을 포괄한다.

다음에 소개될 마찰계수 평균법은 균일조도 원형관 마찰계수 산정식을 적극적으로 이용하는 기법이기에 때문에 먼저 이에 대한 최근 연구 결과를 기술한다. 균일조도 원형관 마찰계수에 대하여는

표 2 균일조도 원형관 마찰계수의 양해법 산정식

조고 - 관경비	수리특성분류	마찰계수 양해법 산정식
$50 < D_r$	층류 $R < 2,100$ r_m	$f_L = 64 R^{-1}$
	천이 층류 $2,100 < R < 4,000$	$f_{TL} = 0.0012R^{0.42}$
	완 난류 $4,000 < R < R_{ST}$	$f_{HS} = \exp(6.72 R^{-0.1} - 6.151)$
	천이 난류 $R_{ST} < R < R_{TR}$ $R_{ST} = 81.5D_r$ $R_{TR} = 1140D_r$	$f_{TR} = f_{HR} - f_A \cos(0.8 \ln R - 4.06)$ $f_A = 0.06 D_r^{-0.5}$ f_{HR} = 전난류에서의 f
$D_r < 50$	천이류 $2100 < R < R_{TR}$	$f_{TF} = f_{LT} + (f_{HR} - f_{LT}) \tanh(\beta \lambda)$ $f_{LT} = R$ 가 2100 일 때의 f $= 0.03$ f_{HR} = 전난류에서의 f $\lambda = \frac{\ln R_D - 7.64}{\ln 0.543 D_r}$ $\beta = -0.05 D_r + 3.5$
	전난류 $R_{TR} < R$	$f = f_{HR} = (0.87 \ln D_r + 1.14)^{-2}$

Nikuradse (1932,1933)의 실험결과로부터 명확히 밝혀졌는데, 이는 모든 형태의 수로에서의 마찰흐름을 해석하는데 있어 기준이 되며 상용관 마찰계수 산정식 개발에도 이용되고 있다. 유동훈(1995a)은 마찰흐름을 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류 등 5개의 특성흐름으로 분류하였는데, 각 구간별로 양해법 산정식을 개발하였으며 표 2에 제시된 바와 같다.

(1) 마찰계수 평균법

상용관 마찰흐름은 여러 다른 조면을 가진 관내 마찰흐름의 조합으로 파악되며 관 매설시 각관의 연결에 필요한 접합부가 뚜렷하게 나타나는 거칠은 면이다 (유동훈과 한상호, 1996). 그러나 상용관은 여러 조면의 분포율이 동일하지 않을 것으로 예상되며, Colebrook-White식과 같이 완난류 산정식과 전난류 산정식의 단순조합이 아니라 조고와 레이놀즈수에 따라 각 지점의 수리 조건이 결정되면 각 면의 영점 높이나 마찰계수를 분포율에 따라 평균하여 대표마찰계수를 구하는 방법이 합리적이다. 이러한 산정방법으로 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법이 있다. 이 중 마찰계수 평균법은 여러 개의관이 접합되어 있는 경우 관 내부에 매끄러운 면과 거칠은 면이 혼재해 있다고 보고 거칠은 면의 조고를 한가지 수치로 대표할 수 있는 등가조고로 가정하여 마찰계수는 각 면에서 결정되는 마찰계수를 평균하여 구한다. 마찰계수 평균법에 의하면 상용관 마찰계수는 다음과 같이 산정한다 (유동훈 원유승 1995, 유동훈 1995a, 유동훈 1997).

$$f = P_S f_S + P_R f_R \quad (9)$$

여기서 f_S 는 매끄러운 면의 마찰계수, f_R 은 거칠은 면의 마찰계수이고 P_S 와 P_R 은 각각 매끄러운 면과 거칠은 면의 분포율을 의미하며, $P_R = 1 - P_S$ 이다.

관경이 주어지고 매끄러운 면과 거칠은 면의 조고가

결정되었을 때, 레이놀즈수에 따라 수리 조건이 결정되면 표 2에 제시된 각 영역에 알맞는 마찰계수 산정식을 이용하여 상용관 마찰계수를 구할 수 있다. 이때 접합하지 않은 상용관내 조면 즉, 매끈한 면의 등가조고 k_S 와 상용관내 접합부 즉, 거칠은 면의 등가조고 k_R 은 Colebrook(1938)이 수집한 상용관 마찰계수 실험 결과를 재분석하여 추정하였으며 결과는 표 3에 제시하였고 그림 1에 도시된 바와 같다. 또한 거칠은 면의 분포율 P_R 은 관경에 대한 1차함수 형태로 추정되었으며, 다음과 같다.

$$P_R = a + b \left(\frac{D}{D_0} \right) \quad (10)$$

여기서 D_0 는 기준관경으로서 1m이고, a 와 b 는 각각 관종과 관경에 따른 상수로서 표 4에 제시된 바와 같다. 이상의 추정된 조면 분포율이 $0.1 \leq P_R \leq 0.6$ 의 범위를 벗어날 때는 이 범위의 경계치를 취한다. 그림 2에는 Colebrook이 수집한 실험 자료에 대해서 마찰계수 평균법에 위한 산정결과가 비교 도시되어 있다. 도시된 그림의 범례에서 영문은 관측자를 지칭하며, 수치는 관경을 나타낸다. 도시된 바와 같이 마찰계수 평균법은 Colebrook이 수집한 관측자료와 비교적 잘 일치한다.

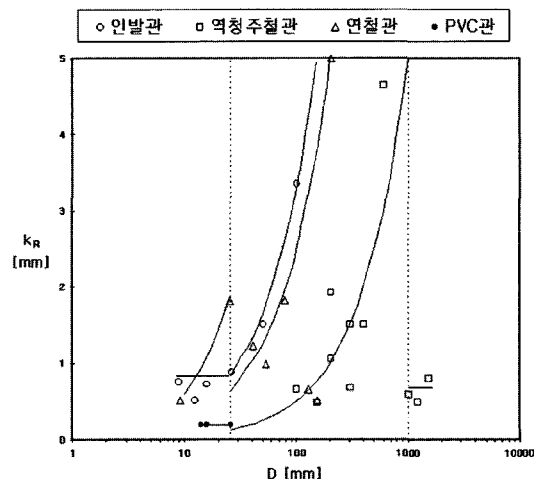


그림1. 관경 D에 대한 k_R 의 분포

■ 학술/기술강좌

상용관로의 간편설계(1)

표 3 상용관의 매끈한 면 등가조고 k_S 와 거칠은 면 등가조고 k_R (mm)

관 종		인발관	역청주철관	연철관 또는 주철관	PVC관
k_S		0.03	0.035	0.04	0.02
k_R	소형관 (D<25mm)	0.83	-	0.07D	0.21
	중형관 (25mm<D(Dm))	0.033D	0.005D	0.025D	-
	대형관 (1000mm<D)	-	0.68	-	-

Dm : 중형관의 최대 적용범위 (인발관: 150mm, 역청주철관: 1000mm, 연철관: 200mm)

표 4 상용관의 거칠은 면의 분포율 PR 산정을 위한 상수 a와 b

관 크기	관 종류	a	b
소형관	인발관	0.12	-3.28
	연철관	0.18	-2.86
	PVC관	0.10	0.00
중형관	인발관	0.57	-3.28
	연철관	0.66	-10.00
	역청주철관	0.67	-1.77
대형관	역청주철관	1.35	-0.78

(2) 지수형 산정식

지수형 상용관 마찰계수 산정식은 Colebrook (1938)이 수집한 실험자료의 회귀분석을 통하여 상용관 마찰계수의 분포가 레이놀즈수의 함수로 취해졌을 때 관경에 따라 대수지상 선형분포임에 착안하여 개발되었으며 간편 설계식 개발에 유리하기 때문에 적극적으로 개발할 필요가 있다. 이에 따라 상용관 마찰계수를 레이놀즈수에 대한 지수함수로 취했을 때 각 계수치들이 관의 종류와 크기의 함수로 유도되었다. 이와 같은 상용관 마찰계수의 지수형 산정식은 다음과 같다.

$$f = \alpha R^\beta \quad (11)$$

여기서 α 와 β 는 관의 종류와 크기에 따라 변이할

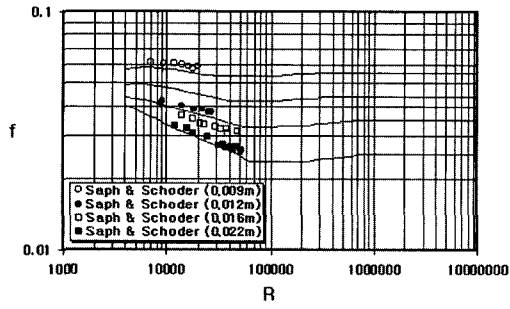
수 있는 계수로서 Colebrook 수집자료를 분석한 결과 두 수치 모두 관경 D와 밀접히 연관되어 있는 것으로 확인되었다.

지수형 산정식은 관의 크기를 소형관, 중형관, 대형관으로 삼분하고 각 구간별로 관중에 따라 지수 β 를 일정하게 유지한 후 비례상수 α 만이 관경의 함수로 유추하였다. 이는 식 (12)와 표 5에 제시된 바와 같다.

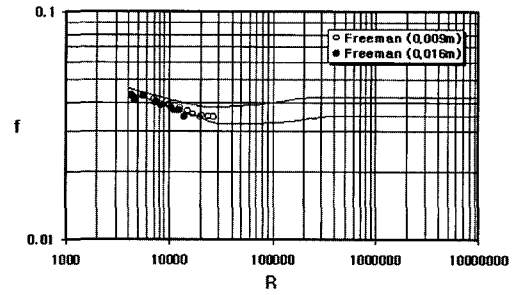
$$\alpha = \omega \left(\frac{D}{D_0} \right)^\zeta \quad (12)$$

여기서 ω 와 ζ 는 관의 크기와 관의 종류에 따라 변하는 계수이며, D_0 는 기준관경으로서 1m이다.

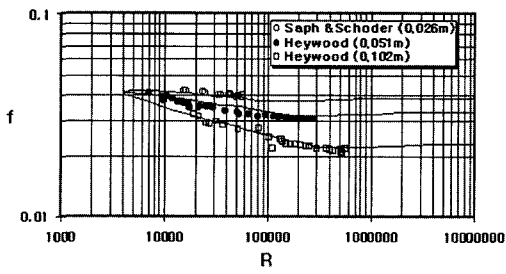
한편 레이놀즈수가 매우 클 때 관경이 작을수록 매끈한 면의 흐름도 거칠은 면에서의 흐름과 같이 전난



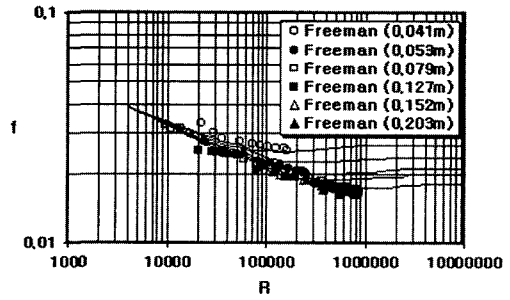
(1) 인발관 소형



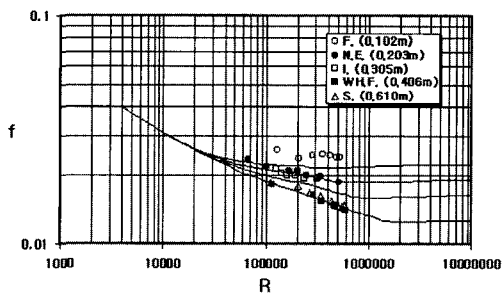
(2) 연철관 소형



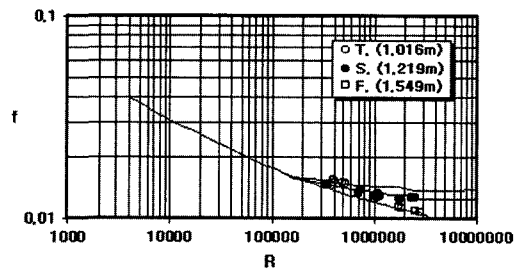
(3) 인발관 중형



(4) 연철관 중형



(5) 역청주철관 중형



(6) 역청주철관 대형

그림 2. MFF 방법으로 추정된 상용관 마찰계수의 분포

류 특성을 반영하기 때문에 마찰계수 분포가 전반적으로 일정해진다. 따라서 관경 조건에 따라 임계 레이놀즈수 R_C 를 산정하고 R 이 R_C 보다 클 때 $\beta=0$ 으로 고정하며 마찰계수를 산정한 임계 레이놀즈수는 관경에 따라 정해지며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{소형관} : R_C &= 3.9 \times 10^7 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1.52} \\ \text{중형관} : R_C &= 1.7 \times 10^7 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1.46} \\ \text{대형관} : R_C &= 1.93 \times 10^6 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{0.87} \end{aligned} \quad (13)$$

Hazen-Williams 식은 적용가능 유효범위를 $V \leq 3\%$, $D \geq 50\text{mm}$ 로 제한하고 있는데, 이는 사용된 관측 자료의 결핍보다는 형식의 단순성에 기인한다. 식 (13)으로 산정되는 임계 레이놀즈수를 도입하여 유속이 3%를 초과할 경우에 대한 유효범위를 증진시킬 수 있으며, $D < 50\text{mm}$ 인 소형관에 대하여는 관측 자료의 재분석으로 관련 상수들을 조정하여 적합한 수치를 표 5에 제시하였다. 그림 3에는 Colebrook이 수집한 실험 자료에 대해서 지수형 산정식의 산정결과가 비교 도시되어 있다. 도시된 바와 같이 지수형

산정식은 Colebrook이 수집한 관측자료에 비교적 잘 일치한다.

한편 사용기간이 경과되면 관내부에 이물질이 부착하거나 부식하여 통수능이 감소되며, 이러한 영향은 등가조교의 증가나 마찰계수의 증가로 반영할 수 있다. 표 1에 제시된 바와 같이 C_{HW} 값은 주철관 신품인 경우 130-135이고, 통수년수가 경과할수록 작아지는 경향을 보인다. Hazen-Williams 마찰계수 산정식 (4)와 지수형 산정식 (11)을 비교하였을 때 α 는 $1060 C_{HW}^{-1.85}$ 와 비례관계에 있다.

통수년수의 경과에 따른 CHW 값의 감소 또는 조도의 증가 경향을 α 와 ω 로 표현할 경우 다음과 같다.

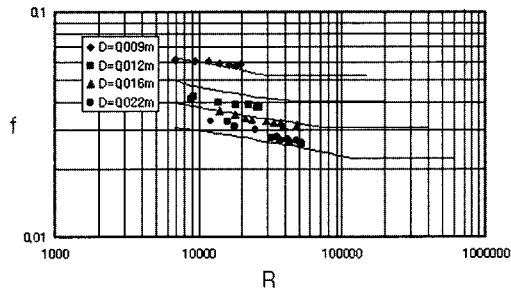
$$\alpha = (1 + 0.04y) \alpha_0 \quad (14)$$

$$\omega = (1 + 0.04y) \omega_0 \quad (15)$$

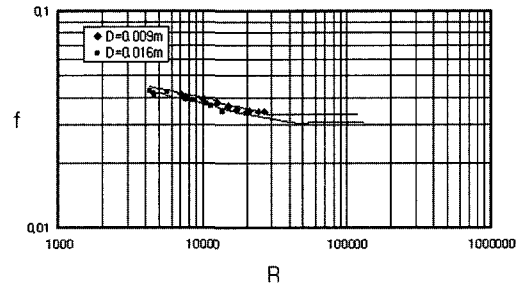
위 식은 주철관 자료에 대한 수치를 분석한 것이며 여기서 y 는 통수년수이며 α_0 와 ω_0 는 신설관의 비례상수로서 α_0 는 식(12)의 α , ω_0 는 표 5의 ω 에 상응한다. 지수형 마찰계수 산정식의 관련 상수로 제시된 표 5의 수치는 신품에 대한 것이며, 식 (14)과 (15)를 이용하여 관의 노후에 따른 마찰계수의 증가 경향을 충분히 반영할 수 있다. ●

표 5 지수형 상용관 마찰계수 산정식의 경험 계수

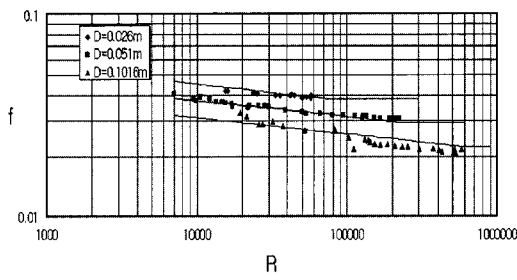
관크기	관 종류	ω	ζ	β	a	b
소형관	인발관	0.004	-0.790	-0.11	39.0×10^6	1.52
	연철관	0.101	-0.096	-0.15		
	PVC 관	0.269	-0.067	-0.256		
중형관	연철관	0.067	-0.135	-0.121	7.0×10^6	1.46
	역청주철관	0.071	-0.255	-0.13		
대형관	역청주철관	0.042	-0.366	-0.08	1.93×10^6	0.87



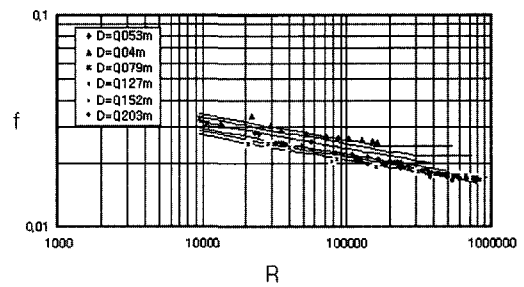
(1) 인발관 소형



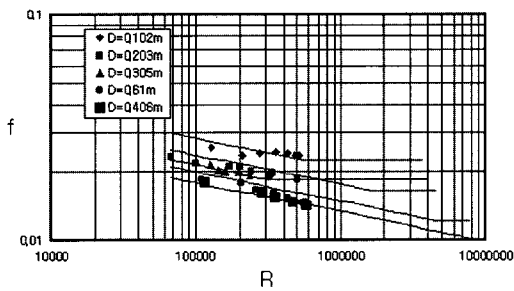
(2) 연철관 소형



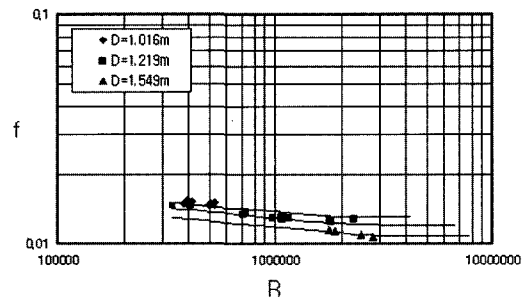
(3) 인발관 중형



(4) 연철관 중형



(5) 역청주철관 중형



(6) 역청주철관 대형

그림 3. 지수형 관로 마찰계수 산정식의 산정결과

〈 참고문헌 〉

- 유동훈 (1995a), "복합면 마찰계수", 대한토목학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 633-644.
- 유동훈 (1995b), "균일조도관의 양해법 설계 기준식", 한국수자원학회지, 제28권, 제5호, pp. 175-189.
- 유동훈 (1997), 유체역학의 공학원리, 도서출판 새론, 서울.
- 유동훈 (2000), 수리학, 도서출판 새론, 서울
- 유동훈, 한상호 (1996), "상용관 마찰흐름에 관한 실험연구", 대한토목학회 논문집, 제16권, 제II-1호, pp. 1-12.
- Barr (1975)
- Colebrook, C.F. (1938), "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws", J. Inst. Civil Eng., London, Vol. 11, pp. 133-156.
- Colebrook - White (1937)
- Li, W.-H. (1974), "Direct determination of pipe size", J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 44, No. 6, pp. 567-575.
- Moody, L. F. (1944), "Friction factors for pipe flow", Trans. ASME, Vol. 66, pp. 671-684.
- Nikuradse, J. (1932). "Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Stromung in glatten Röhren", Ver. Dtsch. Ing. Forsch., No. 356.
- Nikuradse, J. (1933), "Strömungsgesetze in rauhen Röhren", Ver. Dtsch. Ing. Forsch., No. 361.
- Prandtl, L. (1925). "Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz", Z. Angew. Math. Mech., Vol. 5, No. 2, pp. 136.
- Simon, A. L. (1986), Hydraulics, John Wiley & Sons.
- Swamee, P. K. and Jain, A. K. (1976), "Explicit equations for pipe-flow problems", Journal of Hydraulic Div., Proc. ASCE, pp. 657-664.
- Williams, G.S. and Hazen, A. (1933), Hydraulic Tables, John Wiley & Sons, Inc.