

상용관 마찰계수 근사식

유동훈* 강찬수**

1. 서론

Colebrook(1938)은 다양한 크기의 인발관, 역청주철관, 연철관 등 세 종류 관에 대하여 관측한 자료를 수집하여 분석한 바 있다. 그의 연구결과는 이미 유동훈(1995)에 의해 그 모순점이 발견되었으며, 유동훈과 원유승(1995)은 Colebrook의 수집자료를 재분석하여 거칠은 면의 등가조고와 분포율의 개념으로 상용관 마찰계수 산정식을 개발한 바 있다. 그러나 그들이 개발한 상용관 마찰계수 산정식은 마찰계수 그 자체를 산정하기에는 합당하리라 판단되나 직렬관, 병렬관, 다지관 등의 조합 형태로 나타나는 실제 관로설계에의 적용에는 그 식의 형태가 다소 까다로운 단점을 내포하고 있다. 이에 본고는 실제 관로설계에의 적용에 주안점을 두고 상용관의 마찰계수 분포가 관경레이놀즈수, 관의 크기 및 관의 종류와 밀접한 관계가 있음에 착안하여 그들의 관계를 실제 관로설계에 적용이 비교적 용이한 지수함수 형태의 마찰계수 산정식으로 도출하였다.

2. 상용관 마찰계수 근사식

Colebrook(1938)은 당시 F.Heywood, Saph and Schoder, J.R.Freeman, H.Mills, H.Smith 등이 Galvanized-Iron Pipe (인발관), Tar Coated Cast-Iron Pipe (역청주철관), Wrought-Iron Pipe (연철관) 등의 강관에 대해 행한 실험자료들을 분석하여 제시하였다. 그가 수집한 자료는 관경 0.35 inch(8.89mm)에서부터 61 inch(1549.4mm)까지 다양한 크기의 상용관에 대한 실험 자료인데 실제로 관의 이음방법 및 제조과정 등의 실험조건이 명확히 언급되어 있지 않기 때문에 자료해석에 제한은 있었다. 본고는 이상과 같은 Colebrook 자료의 회귀분석을 통하여 상용관 마찰계수의 분포가 레이놀즈수의 함수로 취해졌을 때 관경에 따라 대수선형분포임을 발견하였으며, 또한 상용관

* 아주대학교 토목공학과 부교수

** 아주대학교 토목공학과 석사과정

마찰계수를 레이놀즈수에 대한 지수함수로 취했을 때 각 계수치들이 관의 종류와 크기의 함수임을 발견하였다. 이와같은 상용관 마찰계수의 지수함수형태는 다음과 같이 표현된다.

$$f = \alpha R_D^\beta \quad (1)$$

여기서 f 는 관마찰계수이며, R_D 는 관경 레이놀즈수로서 VD/ν 이고 V 는 관내평균유속, D 는 관경, ν 는 유체의 동점성계수이다. 또한 α 와 β 는 관의 종류와 크기에 따라 변이할 수 있는 계수로서 Colebrook 수집자료를 분석한 결과 두 수치 모두 관경 D 와 연관되어 있는 것으로 확인되었다. 분석결과를 회귀분석하여 관경의 함수로 유도된 산정식들은 표 1에 제시된 바와 같다.

표 1. 관의 종류와 크기에 따른 계수치 α 와 β [D ; m]

| 관 종류 | | α | β |
|---------------------------------------|-----|------------------------|-------------------------|
| Galvanized-Iron Pipe (인발관) | 소형관 | $5.181D + 0.052$ | $0.031D^{-0.5} - 0.385$ |
| | 중형관 | $0.387D + 0.060$ | $-0.429D^{0.5} + 0.018$ |
| | 대형관 | - | - |
| Tar Coated Cast-Iron Pipe (역청 주철관) | 소형관 | - | - |
| | 중형관 | $0.285D + 0.017$ | $\ln(0.792D^{-0.081})$ |
| | 대형관 | $\exp(1.958D - 5.745)$ | $-0.165D + 0.132$ |
| Wrought-Iron Pipe (연철관) | 소형관 | $1.719D + 0.127$ | $-1.954D - 0.123$ |
| | 중형관 | $0.077D + 0.094$ | $-0.169D - 0.106$ |
| | 대형관 | - | - |

표 1에 제시된 바와 같이 Colebrook 자료의 회귀분석을 통하여 산정된 α 와 β 는 관의 종류와 크기에 따라 그 식의 형태가 상이하지만 공통된 특징은 관경만의 함수라는 것이다. 즉 상용관 마찰계수의 분포는 관의 종류에 따라 달라지며, 같은 종류의 관이라 하더라도 그 크기가 다르면 마찰계수의 분포도 달라짐을 알 수 있다. 상기 표 1에서 인발관과 연철관의 경우는 소형관에 대한 자료가, 역청주철관의 경우는 대형관에 대한 자료가 없어 분석에서 제외되었다.

Colebrook의 자료를 식 (1)과 같이 나타낼 때 계수치 α 와 β 의 실제값은 표 2에 제시된 바와 같다. 제시된 바와 같이 α 와 β 는 관 종류 즉 조면의 상태에 따라 그 수치가 변하며, 또한 관경에 따라서도 각기 다른 수치를 갖는다. 그리고 전반적으로 α 와 β 의 경향을 살펴보면 α 는 관경

이 증가함에 따라 점차로 증가하는 경향을 보이며, β 는 점차로 감소하는 경향을 보인다. 간혹 이러한 경향에서 벗어나는 자료도 있었지만 그러한 경우는 실험상의 오차나 실험방법상의 차이에 의한 영향으로 추정되어 분석시 제외하였다.

표 2. Colebrook 자료에 대한 α 와 β 의 실제값

| 구분 | 인발관 | | | 역청주철관 | | | 연철관 | | |
|-----------------------------|--------------------|----------|---------|------------------|----------|---------|-----------------|----------|---------|
| | 실험자 (관경 m) | α | β | 실험자 (관경 m) | α | β | 실험자 (관경 m) | α | β |
| 소형 (0.025m 이하) | S. & S. (0.009) | 0.099 | -0.053 | - | - | - | F. (0.009) | 0.143 | -0.140 |
| | S. & S. (0.012) | 0.095 | -0.090 | | | | F. (0.016) | 0.155 | -0.153 |
| | S. & S. (0.016) | 0.130 | -0.134 | | | | H.S. (0.016) | 0.497 | -0.292 |
| | S. & S. (0.022) | 0.162 | -0.169 | | | | - | - | - |
| 중형 (0.025m ~ 1.0m) | S. & S. (0.026) | 0.070 | -0.052 | F. (0.102) | 0.040 | -0.039 | F. (0.041) | 0.098 | -0.113 |
| | H. (0.051) | 0.074 | -0.073 | N.E. (0.203) | 0.075 | -0.105 | F. (0.053) | 0.091 | -0.122 |
| | H. (0.102) | 0.100 | -0.119 | I. (0.305) | 0.104 | -0.136 | F. (0.079) | 0.090 | -0.124 |
| | - | - | - | WH.F. (0.406) | 0.108 | -0.152 | F. (0.127) | 0.066 | -0.100 |
| | - | - | - | S. (0.610) | 0.191 | -0.194 | F. (0.152) | 0.100 | -0.134 |
| | - | - | - | - | - | - | F. (0.203) | 0.110 | -0.141 |
| 대형 (1.0m 이상) | - | - | - | T. (1.016) | 0.023 | -0.034 | - | - | - |
| | - | - | - | T. (1.219) | 0.035 | -0.071 | | | |
| | - | - | - | F. (1.549) | 0.067 | -0.123 | | | |

한편, Hazen과 Williams(Williams, G.S. and Hazen, A., 1933)도 지수함수형태의 경험식을 제시하였는데 마찰계수로 변환할 때 그 산정식은 다음과 같다.

$$f = 1060 C_{HW}^{-1.85} R_D^{-0.15} \quad (2)$$

여기서 C_{HW} 는 Hazen-Williams 계수이며, 관의 종류 즉 관내 조면의 상태에 따라 일정한 수치를 갖는다. 상기식 (2)를 식 (1)과 같은 형태로 표현하면 $\alpha = 1060 C_{HW}^{-1.85}$ 이고, $\beta = -0.15$ 이다. 이와같이 Hazen-Williams식에서 α 값은 오직 C_{HW} 만의 함수로서 관 종류 즉 조면의 상태에 따라서만 그 수치가 변할뿐 관경의 변화에 따른 영향은 고려되지 않았음을 알 수 있다. 또한 β 값이 -0.15로 고정되어 있으므로 역시 관경에 따른 마찰계수의 변화는 전혀 고려되지 않았다.

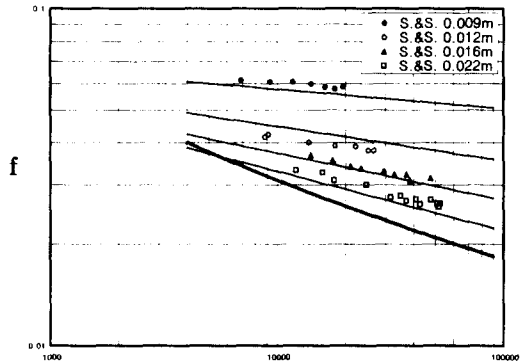
그림 1~3에는 본고에서 도출한 지수함수 형태의 근사식으로 산정된 마찰계수와 Colebrook이 수집한 실험자료가 비교·도시되어 있다. 도시된 그림 1~3에 표기된 영문 약자는 관측자를 지칭하며 수치는 관경을 나타낸다. 그리고 굵은 실선으로 도시된 선은 Nikuradse(1933)가 제시한 매끈한 관 또는 완난류조건에 적용되는 Darcy-Weisbach 관마찰계수 산정식 (3)에 의한 마찰계수의 분포이다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log R_D \sqrt{f} - 0.8 \quad (3)$$

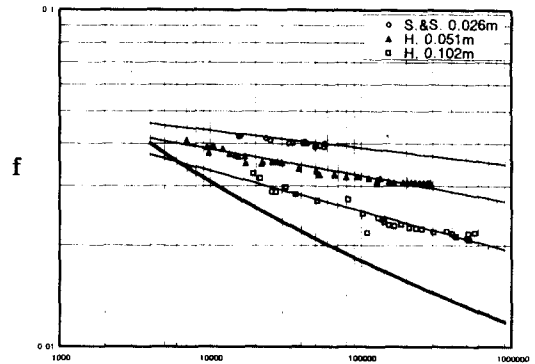
그림 1~3에 도시된 바와 같이 본고에서 도출한 마찰계수 근사식은 대부분이 실험자료와 잘 일치한다. 각 관 중별 관경에 따른 마찰계수의 변이양상을 살펴보면, 그림 1과 3에 도시된 인발관과 연철관의 경우는 레이놀즈수에 따른 마찰계수의 분포가 관경이 증가함에 따라 비교적 완만한 기울기를 갖고 변이하지만, 그림 2에 도시된 역청주철관의 경우는 비교적 급한 기울기로 변이하는 양상을 보인다. 즉 관경의 변화에 따른 β 값의 변이폭이 역청주철관의 경우가 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 β 값의 변화를 Hazen-Williams 식의 경우는 전혀 고려하지 않고 일정한 값으로 고정하였는데 그로 인한 오차는 관마찰계수의 과다산정 또는 과소산정을 야기할 소지가 크다고 판단된다.

3. 결론

본 연구에서 도출된 지수함수 형태의 상용관 마찰계수 근사식은 Colebrook 수집자료의 재분석을 통하여 이루어졌으며, 그 형태는 $f = \alpha R_D^\beta$ 으로 표현된다. 본 연구결과를 이용하여 상용관 마찰계수를 산정하였을 때 Colebrook이 수집한 대부분의 관측자료와 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 본 연구결과로 상용관으로 구성된 직렬관로, 병렬관로, 다지관로 및 관망해석이 기존의 방법에 비해 정밀도를 높이면서도 계산과정이 상당히 간단해지리라 판단된다.

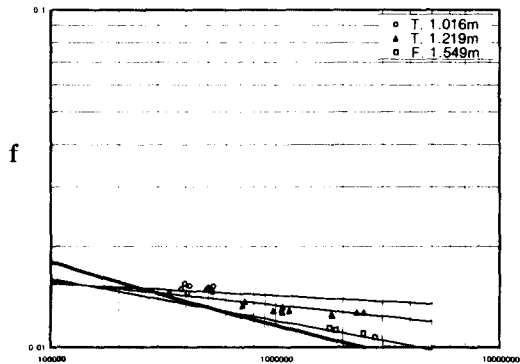


(a) 소형

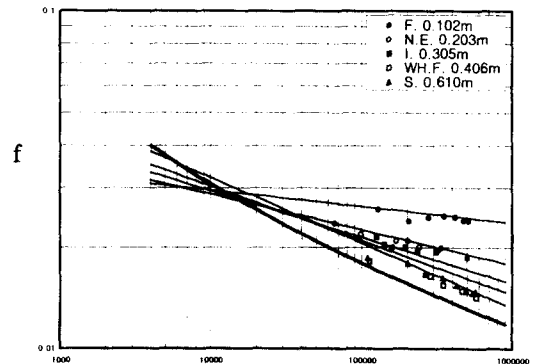


(b) 중형

그림 1. 인발관

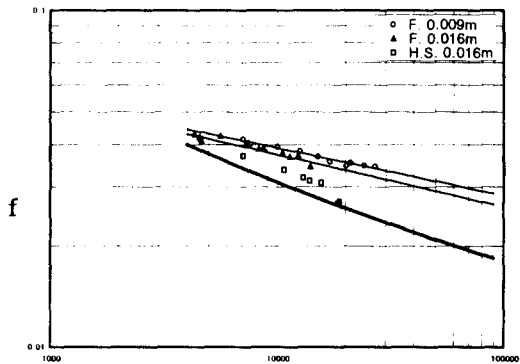


(a) 대형

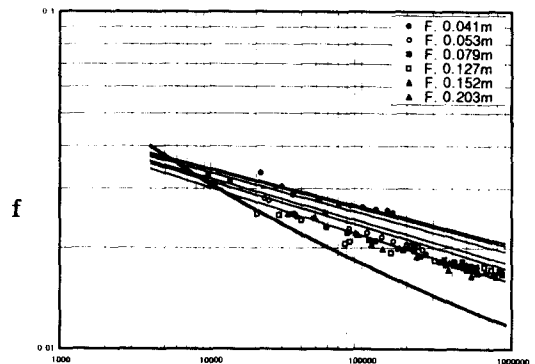


(b) 중형

그림 2. 역청주철관



(a) 소형



(b) 중형

그림 3. 연철관

4. 참고문헌

유동훈 (1995), “복합면 마찰계수” 대한토목학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 134-145.

유동훈, 원유승 (1995), “상용관 마찰계수”, 대한토목학회 논문집, 제15권, 제6호, pp. 1593-1606.

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.

Nikuradse, J.(1933), “Strömungsgesetze in rauhen Rohren”, Ver. Dtsch. Ing. Forsch., Vol.361.

Williams, G. S. and Hazen, A.(1933), Hydraulic Tables, John Wiley & Sons, Inc.