

관망해석을 통한 마찰계수 산정식 비교

유 동 훈* 원 유 승** 윤 계 섭***

YOO, DONG HOON WUN, YOO SEUNG YOON, KYE SUB

1. 서 론

상용관 마찰계수 산정을 위해 기존의 Hazen-Williams식, Colebrook-White식과 유동훈(1995)이 제안한 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법을 관망해석에 적용, 수행하여 각 격점에서 압력변화를 제시하였다. 간단한 관망에 대하여 관종류, 관경, 유속을 변화시켜 네가지 상용관 마찰계수 산정식에 적용하여 구한 압력분포를 비교하여 각각의 산정식들이 가지는 특징을 논하였고, 입력자료의 변화에 따라 마찰손실에 대한 계산 차이로 압력산정 결과를 살펴보았다. 관경을 소형관 및 대형관으로 변화시켰을 때의 분석결과와 중형관일 때의 분석결과를 두 종류의 강관에 대하여 비교하였고, 유속의 변화와 압력변화와의 비교를 통하여 기존의 상용관 마찰계수 산정식의 단점에 대하여 논하였다.

2. 적용 방법

관망설계시 설계 주안점은 각 격점에서의 요구 유량과 압력을 적정 수준에서 유지시키는 것이며, 유량 및 압력에 크게 영향을 미치는 것이 마찰손실이다. 마찰손실은 각 관의 특성제원과 마찰계수에 의해 결정되며 마찰계수를 구하는 방법으로 Hazen-Williams식, Colebrook-White식 등의 기존식과 유동훈(1995)이 제안한 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법 등이 있다.

상용관 마찰계수를 산정하기 위해 유동훈(1995)은 상용관 내 조고는 불균일하다고 파악하였으며, 불균일 조고에 의해 매끈한 면과 거칠은 면의 분포율이 관경, 관의 종류와 관의 연결방법에 따라 서로 다를 것이라 판단하였다. 이에 따라 상용관 마찰계수는 각각의 수리조건에 의하여 결정되며, 이들 수리조건 전체를 대표하는 마찰계수를 평균하여 구하는 방법으로 분포율 개념을 도입한 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법을 제안하였으며, 마찰계수 평균법은 다음과 같다.

$$C_m = P_s C_s + P_r C_r \quad (1)$$

여기서 C_m 은 평균 마찰계수, C_s 는 매끈한 면의 마찰계수, C_r 은 거칠은 면의 마찰계수, P_s 는 매끈한 면의 분포율, P_r 은 거칠은 면의 분포율이며 $P_s + P_r = 1$ 이다. C_r 은 레이놀즈수와 조고비에 의해

* 정회원. 아주대학교 공과대학 토목공학과 부교수

** 아주대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

*** (주) 대우엔지니어링 환경사업본부 전무

완난류, 전난류, 천이난류, 천이층류로 구분되고, C_s 는 Colebrook 자료분석시 자세한 자료가 없었고 조고가 상당히 작은 것이 예상되어 유동훈(1993b)이 제안한 완난류식을 적용하였다.

상용관의 마찰계수 분포는 Nikuradse의 균일조고 원형관 실험결과와 상당히 다른 양상을 보이며 이는 Colebrook이 수집한 자료의 분석결과에 잘 나타나 있다. 이에 Colebrook 자료를 분석하였으며, 분석된 결과는 등가조고와 분포율이 관경과 밀접한 관계가 있으며, 관의 종류에도 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 등가조고와 분포율 산정식은 크게 αd , $\beta d + \gamma$, $\tanh(\delta d + \epsilon)$ 등의 세가지 형태로 구분되며 각각의 상수 α , β , γ , δ , ϵ 는 관경에 따른 분류된다. 즉, 1 in 이하의 소형관, 40 in 이하의 중형관, 40 in 이상의 대형관에 따라 다른 값을 가지는 상수이고, d 는 관경이며, 마찰계수 평균법에 의해 산정된 각각의 상수는 표 1에 제시되어 있다.

표 1 마찰계수 평균법에 의한 분포율 및 등가조고 산정

구 분		Colebrook	소형관 ($d < 1$ in)	중형관 ($1 \text{ in} < d < 40$ in)	대형관 ($d > 40$ in)
Galvanized -Iron	등가조고	0.15 mm	0.763 mm	$\alpha = 0.033$	-
	분포율	-	$\delta = 0.057$, $\epsilon = 0.157$	$\delta = 0.008$, $\epsilon = 0.376$	-
Tar Coated Cast-Iron	등가조고	0.13 mm	-	$\alpha = 0.005$	0.68 mm
	분포율	-	-	$\delta = 0.002$, $\epsilon = 0.409$	$\delta = 0.00154$, $\epsilon = -1.123$
Wrought -Iron	등가조고	0.04 mm	$\beta = 0.084$, $\gamma = -0.248$	$\alpha = 0.025$	-
	분포율	-	$\delta = 0.0234$, $\epsilon = 0.916$	$\delta = 0.002$, $\epsilon = 1.130$	-

매설된 상수도관은 물의 온도 변화가 기상의 영향을 덜 받지만 여름과 겨울 등의 계절적 영향은 무시할 수 없을 것으로 판단되어 동점성계수(kinematic viscosity)는 다음의 식을 적용하였다.

$$\nu = \nu_N \left(-0.14 + \frac{0.19}{M - 0.833} \right) \quad (2)$$

여기서 $\nu_N = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $M = T/N$, T 는 절대온도, 기준온도 $N = 293.2\text{K}$ 이다.

3. 적용 예

Hazen-Williams식, Colebrook-White식, 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법으로 대표 마찰계수를 산정하는 방법을 이용하여 미국 토목학회지에 실린 예의 관망에 대하여 관의 종류를 달리 하여 각각의 관망에 대하여 분석하였으며, 각각의 식들의 특징을 논하였다.

관망의 구성은 그림 1에 도시되어 있고, 각 관의 입력자료는 표 2에 제시되어 있다. 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우 거칠은 면의 조고는 표 1에 의해 산정하였고, 매끈한 면의 조고는 무시하고 이때 마찰계수는 유동훈(1993b)이 제안한 완난류식을 이용하여 산정하였다. 분포율 산정 역시 표 1에 제시된 관계식을 이용하였다.

표 2 적용예의 입력자료

Cole* : Colebrook (Tar Coated Cast-Iron Pipe)

요소번호	결점번호		요소길이 (m)	C _{HW}	등가조고 (mm)		P _r	관경 (cm)
	시점	종점			Cole*	평균법		
1	1	2	457.2	130	0.13	1.525	0.770	30.5
2	2	3	304.8	130	0.13	1.025	0.672	20.3
3	3	4	365.8	120	0.13	1.025	0.672	20.3
4	5	4	609.6	120	0.13	1.025	0.672	20.3
5	5	6	853.4	120	0.13	1.025	0.672	20.3
6	6	7	335.3	120	0.13	1.025	0.672	20.3
7	7	8	304.8	120	0.13	1.025	0.672	20.3
8	8	9	762.0	120	0.13	1.025	0.672	20.3
9	9	1	243.8	100	0.13	1.025	0.672	20.3
10	9	10	396.2	100	0.13	0.760	0.613	15.2
11	10	11	304.8	100	0.13	0.760	0.613	15.2
12	11	12	335.3	130	0.13	1.270	0.725	25.4
13	12	5	304.8	120	0.13	1.270	0.725	25.4
14	10	8	548.6	120	0.13	0.760	0.613	15.2
15	10	2	335.3	120	0.13	0.760	0.613	15.2
16	11	7	548.6	120	0.13	0.760	0.613	15.2
17	11	3	365.9	130	0.13	1.270	0.725	25.4
18	12	6	548.6	120	0.13	1.270	0.613	15.2
19	12	4	396.2	120	0.13	0.760	0.613	15.2

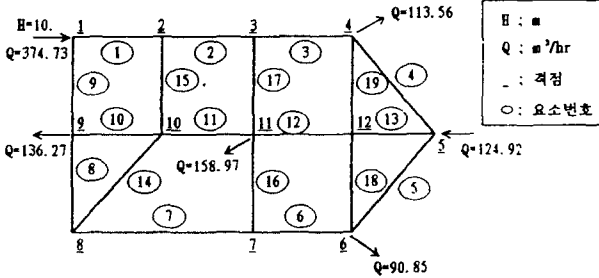


그림 1 적용예의 관망 구성도

표 2에 제시된 입력자료는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우 Tar Coated Cast-Iron Pipe에 한하여 계산된 등가조고와 매끈한 면의 분포율이며, Galvanized-Iron Pipe의 경우도 표 1에 의해 계산되었으며 같은 관망에 적용하였다. 이 결과를 대입하고 각 관에 대하여 각각의 식 또는 방법에 의해 산출된 유량은 네가지 식 모두 비슷하였다. 즉, 유량은 관경의 영향이 크므로 마찰계수 차이에 의해 생기는 손실량이 관 요소에 흐르는 유량에 큰 영향을 주지는 못하는 것으로 판단된다. 그림 1의 적용예 관망에 대하여 네가지 식들이 가지는 특징을 알아보기 위해 압력을 출력하여 각 격점에서의 압력을 도시하여 보면 그림 2와 같다.

그림 2(a)는 Galvanized-Iron Pipe에 관하여 네가지 식 또는 방법에 의해 해석된 결과이며, 그림에 도시된 바와 같이 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우가 압력의 변화가 가장 적었으며, 표 2에 제시된 바와 같이 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 등가조고가 Colebrook-White에 비해 상대적으로 크게 나타남에도 불구하고 압력저하가 가장 적은 것으로 출력되었다. 이는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법이 등가조고와 분포율 두가지 미지수의 영향을 받아 1:1 단순 조합된 Colebrook-White식에 비해 압력의 변화가 적은 것으로 판단된다.

Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우에 압력변화는 그림 2(b)에 제시된 바와 같으며 다른 두 종류의 관에 비하여 각 식들에 의해 계산된 압력 차이의 폭이 가장 적었다. Hazen-Williams식의 경우 C_{HW}에 110 ~ 130이 적용되었고 Colebrook-White식의 경우 등가조고는 Galvanized-Iron Pipe과 비슷한 0.13 mm가 적용되었다. Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 Galvanized-Iron Pipe에 비해 등가조고는 작으나, 매끈한 면의 분포율 또한 작아 압력저하가 Galvanized-Iron Pipe 보다 크게 분석되었다. 즉 Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우 피복이 되어 등가조고는 작으나 매끈한 면의 분포율도 작아져 Galvanized-Iron Pipe 보다 큰 손실

을 유발하는 것으로 판단된다.

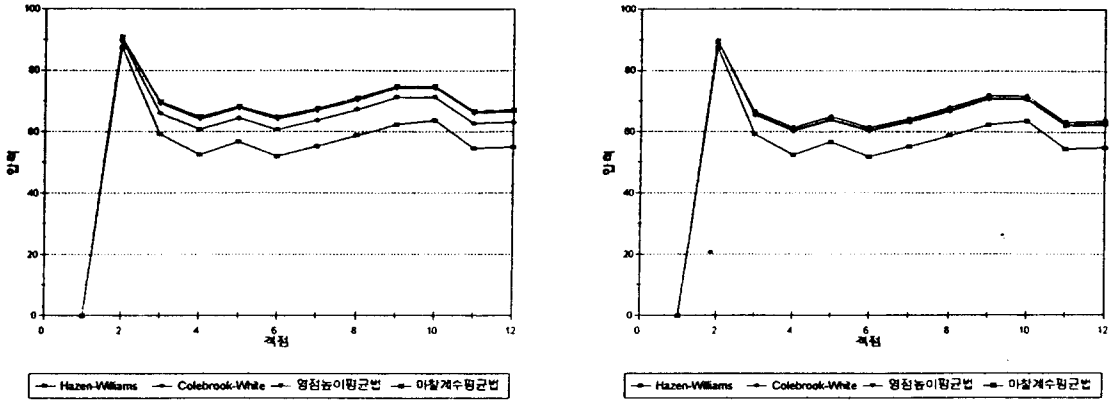


그림 2 적용예의 관망에 대해 각 식으로 산정된 유량-입력과의 관계

(a) Galvanized-Iron Pipe 의 경우 (b) Tar Coated Cast-Iron Pipe 의 경우

Colebrook-White식과 새로운 상용관 마찰계수 산정식들을 비교하며 보면 Galvanized-Iron Pipe의 경우 Colebrook-White식에 의한 압력저하가 다른 산정법에 의한 수치보다 크게 산정되었으며, Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우는 비슷하게 산정되었다. Hazen-Williams식은 적용된 두 종류의 강관에 대하여 압력저하가 가장 크다. 즉, C_{HW} 가 적용예에 적용된 것보다 작게 적용되어야 함을 알 수 있고, 보통 관망해석에 적용되는 110은 상당한 안전율을 포함하고 있어 펌프 용량 및 설치개소 증가로 시공비용의 증가를 초래하는 것으로 생각된다. 그림 2에서 Hazen-Williams 경험계수는 표 2에 제시한 바와 같이 관의 종류에 관계없이 원자료에 대해 적용하여 Hazen-Williams식에 의한 압력저하는 모두 같게 나타났으므로 이를 기준으로 각 식들의 압력저하를 비교하면 강관의 종류를 달리하였을 때 각 식들이 가지는 특징을 알 수 있다.

4. 입력자료의 변화와 지점압력

그림 2는 표 2의 입력자료에 의해 관망해석을 수행한 압력변화가 도시되어 있으며 적용예의 각 관 즉, Galvanized-Iron Pipe, Tar Coated Cast-Iron Pipe에 대하여 관경 및 유량의 입력자료를 변화시켜 압력저하를 도시한 그림이 그림 3에 제시되어 있다.

그림 3(a)는 관경이 소형관이라 가정하고 원래 관경의 1/10로 가정하였으며, Hazen-Williams계수, Colebrook-White식의 등가조고는 적용예와 같고 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우 등가조고는 0.763 mm, 매끈한 면의 분포율은 표 2에 의해 산정되었다. 같은 Galvanized-Iron Pipe에 대해 소형관과 중형관 즉, 관경을 변화시켜 관망해석을 수행한 결과를 각각 그림 2(a)와 그림 3(a)에 도시하였는데 이를 비교하면 Hazen-Williams식은 전자의 경우 다른 식들에 비해 압력저하가 큰데 반하여 후자의 경우는 압력저하가 가장 작다. 이는 Hazen-Williams식이 소형관일 때 압력을 과대산정할 우려가 있는 것으로 판단되며, Colebrook-White식의 경우에는 그림에 제시된 바와 같이 압력을 과소산정할 우려가 있는 것으로 분석되었다.

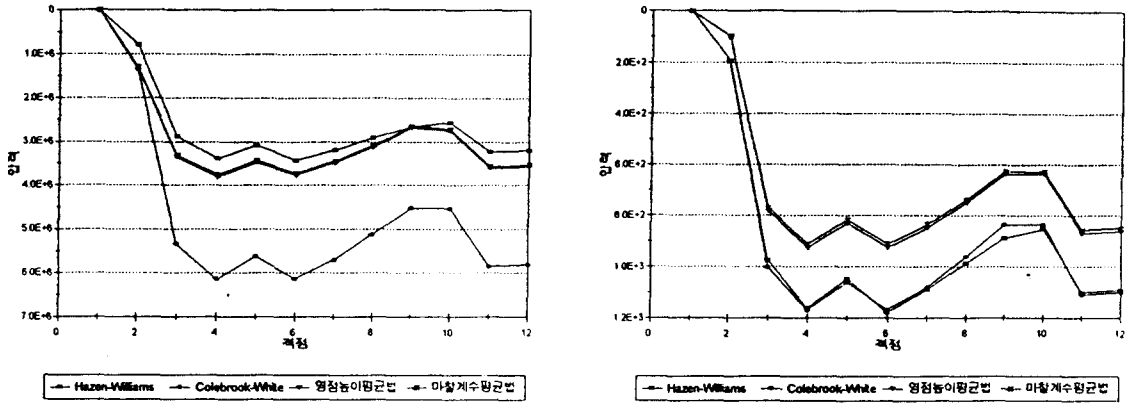


그림 3 적용예의 입력자료를 변화시켜 계산된 유량-압력과의 관계

(a) 소형관으로 변화시킨 Galvanized-Iron Pipe의 경우

(b) 대형관으로 변화시킨 Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우

그림 3(b)는 적용예의 관망에 대하여 관경을 7배, 유량을 1000배한 대형관에 대하여 Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우라고 가정하여 관망해석을 수행한 결과를 도시하였다. Hazen-Williams 경험계수, Colebrook-White식의 등가조고는 적용예의 경우와 같으며 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 등가조고 0.63 mm, 매끈한 면의 분포율은 표 1에 의해 산정되었다. 그림 2(b)와 그림 3(b)는 같은 Tar Coated Cast-Iron Pipe에 대해 중형관의 경우와 대형관으로 구성된 관망에 대한 관망해석 수행결과가 제시되어 있으며, 그림 2(b)의 Colebrook-White식으로 산정된 압력변화는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법으로 산정된 결과가 비슷한데 반해 그림 3(b)의 Colebrook-White식으로 산정된 결과는 Hazen-Williams식으로 산정된 압력과 비슷하였다. 이는 Hazen-Williams식과 Colebrook-White식은 대형관에 대해 적절히 수리조건을 변화시키는 계수항이 없으므로 인해 압력을 과소산정하는 것으로 판단된다. 즉, 관경에 따라 등가조고의 변화를 고려할 수 없어 대형관의 경우 두 식 모두 경험계수나 등가조고의 수정이 필요한 것으로 생각된다.

5. 결론 및 토의

본고는 Hazen-Williams식, Colebrook-White식 등의 기존 마찰계수 산정식과 유동훈(1995)의 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법에 의한 상용관 마찰계수 산정식을 간단한 예제에 적용시킨 압력변화를 제시하여 위의 네가지 식들이 가지는 특성을 논하였으며, 수행된 연구결과는 다음과 같다.

1. 새로운 상용관 마찰계수 산정식의 경우 등가조고 및 매끈한 면의 분포율은 Colebrook(1938) 자료분석을 통해 산정되었으며, 산정된 등가조고와 분포율은 마찰계수 평균법에 의한 결과였으나, 본고에서는 영점높이 평균법의 경우에도 이를 그대로 적용하였다.

2. 각각의 식들에 적용된 경험계수나 등가조고는 두 종류의 관에 맞게 제시된 자료에 의해 입력되었으며, 관망해석을 수행한 결과는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법에 비해 압력이 Galvanized-Iron Pipe의 경우는 Hazen-Williams식과 Colebrook-White식이 과소산정하고, Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우는 네 식이 거의 비슷하게 산정하는 것으로 분석되었으며, 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 모든 관에 대해 압력변화가 비슷하였다.
3. Galvanized-Iron Pipe 관망에 대해 관경을 줄여 소형관으로 변화시켜 산정된 결과는 원래 관경에 의해 수행된 결과에 비해 압력을 Hazen-Williams식은 과대산정하고, Colebrook-White식은 과소산정하는 것으로 분석되었다. 이는 소형관의 경우 Hazen-Williams 경험계수는 크게 Colebrook-White 등가조고는 작게 선정하여야 됨을 나타낸다고 할 수 있다.
4. Tar Coated Cast-Iron Pipe 관망에 대해 관경을 늘려 대형관으로 변화시켜 산정된 결과는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법에 의한 압력에 비해 원 자료에 의한 경우는 Hazen-Williams식은 과소, Colebrook-White식은 비슷하였으나, 관경이 증가한 관망은 유량을 증가시킨 경우와 비슷하게 Hazen-Williams식과 Colebrook-White식은 과소산정하는 것으로 나타났다. 이로부터 대형관에 기존 마찰계수 산정식을 적용할 때 Hazen-Williams 경험계수는 크게, Colebrook-White 등가조고는 작게하여야 할 것으로 판단된다.
5. 이러한 일련의 분석결과는 Hazen-Williams식이 대형관에서 경험계수를 크게 정해야 한다는 최근의 연구결과와 일치한다.

사 사

본 연구의 일부는 (주)대우엔지니어링의 1994년도 연구지원에 의하여 이루어진 것이며, 당 회사에 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. 유동훈, 천이류에서의 관마찰, 대한토목학회 논문집, 13-4, pp. 101-109, 1993a
2. 유동훈, 균일조도 원형관 마찰계수, 대한토목학회 논문집, 13-5, pp. 165-172, 1993b
3. 유동훈, 강기훈, 영점높이와 관마찰계수, 대한토목학회 논문집, 15-1, pp. 1-12, 1995
4. 유동훈, 복합면 마찰계수, 대한토목학회 논문집, 15-2, 1995 (출판예정)
5. 유동훈, 균일조도관의 양해법 설계, 한국수자원학회, 1995 (제출)
6. Colebrook, C.F., 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, 1938
7. Fowler, Alvin, A Computer Program in FORTRAN for the Hydraulic Simulation of Looped Water Distribution Networks, Department of Environmental Science and Engineering, University of North Carolina at Chapel Hill
8. Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory, Journal of the Hydraulics Div., ASCE, Jury, 1972