

상용관 마찰흐름 실험연구

유 동 훈* 한 상 호** 윤 계 섭***
YOO, DONG HOON HAN, SANG HO YOON, KYE SUB

1. 서 론

Nikuradse(1933)는 다양한 크기의 모래입자를 관 내부에 접촉하여 모두 6종류의 조고비를 만든 균일조도 원형관에 대한 마찰실험으로 마찰계수의 분포가 직선형태를 이루는 세 영역의 존재를 확인하였고 그 영역에서의 마찰계수를 조고비와 레이놀즈수의 함수로 나타내었다. 조고의 형태 및 특성면에서 실제로 보기 드문 균일조도 원형관과는 상이한 점을 갖는 상용관에 대한 연구는 여러 연구자들의 실험자료를 수집하여 재분석한 Colebrook(1938)에 의해 큰 진전을 보게 되었다. Colebrook-White는 모든 난류구간에 적용할 수 있는 상용관 마찰계수 산정식을 개발하기 위하여 Nikuradse의 실험결과로 얻어진 완난류식과 전난류식을 수학적으로 단순히 조합하는 방법을 제안하였다. 이와같은 단순조합식은 몇가지 관경에는 잘 일치하지만 많은 경우에 상당한 오차를 발생시키는 문제점을 지니고 있다. 다른 경험식으로는 Hazen-Williams 지수함수식이 있는데 이 수식도 이론적 배경이 미약하고 경험계수 선택의 불확실성을 내포하는 등의 문제점이 있다. 한편 유동훈(1995)은 분포율 개념을 도입하여 상용관 마찰계수 산정식으로 마찰계수 평균법과 영점높이 평균법을 제안하였다.

본고는 Nikuradse의 실험장치와 유사한 실험장치를 이용하여 아연도금 강관의 접합조건과 접합회수를 변화시키며 실험한 자료에 유동훈(1995)이 제시한 마찰계수 평균법을 적용하여 관의 접합회수에 따른 매끈한 면의 분포율 변화를 살펴봄으로 그 수식의 타당성을 입증하고자 한다. 또한 정확한 유량 산정을 위한 이론적 연구와 실험결과를 제시하였으며 분석과정을 통하여 아연도금 강관의 등가조도는 계산상의 필요성이 요구되었다.

2. 유량검증 실험 및 예비실험

상용관 마찰실험장치는 개수로 실험장치와 일체식으로 설치되어 동시에 실험을 수행할 수 있는 이점이 있을 뿐만 아니라 유량계측을 여러가지 기기를 사용하여 동시에 수행할 수 있어 실험결과의 신뢰도를 높일 수 있다. 정확한 마찰계수 산정에 있어 오차의 원인이 되는 유량은 벤츄리미터, 사각위어, 유속계, 로타미터 등을 이용하여 관측하였고 서로 비교 검증한 결과는 표 1에

* 정희원, 아주대학교 공과대학 토목공학과 부교수
** 아주대학교 공과대학원, 現 아주대 토목기술 연구소 연구원
*** (주) 대우엔지니어링 환경사업 본부 전무

제시하였다. 또한 기존의 여러 연구자들이 제시한 사각위어 유량산정식을 이론 전개를 통해 얻어진 다음과 같은 형태로 모두 수정하였으며 각각의 유량계수는 무차원화하여 표 2에 제시하였다.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{3/2} \quad (1)$$

표 1 유량 검증 실험의 결과

종류	板谷(이타타니)와 手島(테시마)	벤튜리미터	Rehbock	4점법
유량 (m ³ /sec)	0.01776	0.01782	0.01852	0.01477

표 2 무차원 위어 유량계수

연구자 이름	유량계수, C _d	비고
Francis	$0.62 \left(1 - \frac{nH}{10L}\right) \left\{ \left(\frac{1+H_a}{H}\right)^{3/2} - \left(\frac{H_a}{H}\right)^{3/2} \right\}$	n= 측면수축수 H _a = 접근유속수두
Bazin	$\left(0.608 + \frac{H_0}{H}\right) \left\{ 1 + 0.55 \left(\frac{H}{H+P}\right)^2 \right\}$	기준수두, H ₀ =0.0045m
Rehbock	$0.605 + \frac{H_0}{H} + 0.08 \frac{H}{P}$	H ₀ =0.001m
石原과 井田	$\left\{ 0.605 + \left(\frac{H_0}{H} + 0.08 \frac{H}{P}\right) (1+e) \right\}$	H ₀ =0.001m, 수정항 e= 0~0.55(P-1)
오키	$0.6224 \left(1 + \frac{H_0}{H}\right) \left\{ 1 - \frac{\sqrt{m}}{10} \left(1 - \frac{m}{10P}\right) \right\} \left\{ 1 + 0.5 \left(\frac{L}{B} \frac{H}{H+P}\right)^2 \right\}$	H ₀ =0.0012m m= H/L
板谷과 手島	$\left\{ 0.605 + \left(\frac{H_0}{H} + 0.08 \frac{H}{P} - 0.145 \sqrt{\frac{(B-L)P}{PB}} + 0.0115 \sqrt{\frac{B}{P}} \right) \right\}$	H ₀ =0.001m

이번 실험의 모든 유량은 적용범위가 본 실험장치 규격에 적합하고 최근에 개발된 이타타니-테시마 식으로 산출하였다. 또다른 유량측정 장치인 벤튜리미터 유량 산정식에 포함된 유량계수는 보통 단면 지름비와 관련지어 상수로 사용하지만 그 값은 레이놀즈수에 따라 변한다는 사실이 실험으로 이미 알려졌다. 하지만 변이특징을 나타내는 산정식은 아직도 제시되지 못한 상태이다. 따라서 유량계수를 단면지름비 및 레이놀즈수의 함수로 다음과 같이 개발하였고 이 수식으로 산정된 유량은 다른 장치로 측정한 값과 잘 일치함을 확인하였다. 그림 1에는 단면지름비 0.4에 대한 실험결과와 여러 단면비에 대하여 새로 개발된 식 (2)로 도시한 유량계수 분포를 나타내었다.

$$C_v = (0.9858 - 0.196\beta^{4.5}) \tanh(0.09R^{0.3}) \quad (2)$$

예비 실험이라 함은 같은 종류의 관이지만 피에조미터 상호간의 가공정도 및 접합 상태 등

의 물리적 차이로 발생하는 오차를 고려하지 않고 한 개의 관에 한 종류의 접합조건만을 실험하고 다른 관에는 접합조건은 같지만 그 회수를 다르게 하는 방법으로 아연도금 강관의 나사 접합조건과 단순 용접 접합조건을 접합회수의 증가에 따라 마찰계수의 비례적 증가를 예상하고 수행한 실험을 의미한다. 이 실험에서는 밸브를 수동으로 회전하여 유량을 조절하였기 때문에 각각의 관에 대하여 서너개 정도의 자료밖에 얻을 수 없었으며 레이놀즈수의 측정 범위도 제한되어 최대 300,000 정도이었다. 예비 실험에 사용된 아연도금 강관의 직경은 0.08 m, 피에조미터 사이의 거리는 3.44 m이었다. 그림 2에 제시된 아연도금 강관에 대한 2가지 접합조건의 예비 실험자료 분석결과를 살펴보면 1회 나사 접합조건 및 1회 단순 용접 접합조건의 마찰계수는 오히려 각각의 접합조건 2회 보다 크게 나타나는 모순을 알 수 있다. 이는 피에조미터 가공이 정교하지 못하고 관마다 가공의 차이점이 있기 때문인 것으로 추론된다.

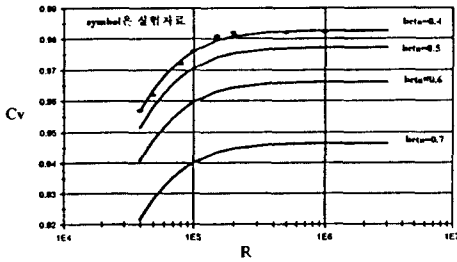


그림 1 유량계수 분포 비교

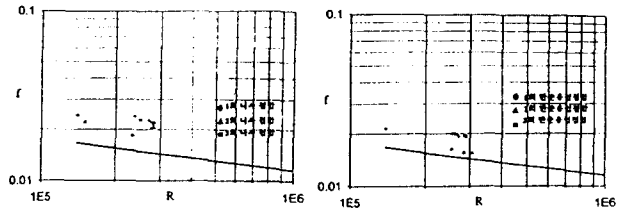


그림 2 예비 실험 자료의 마찰계수 분포

3. 본 실험자료의 1차 분석

본 실험에 사용된 아연도금 강관의 직경은 0.0817 m이고 피에조미터 사이의 거리는 3.06 m이다. 실험방법에 있어 예비 실험과의 큰 차이는 물리적으로 발생할 수 있는 오차를 제거하기 위하여 동일한 관에 접합회수를 바꾸어 가며 실험한 점과 유량 조절을 수동에서 인버터로 교체하여 레이놀즈수를 약 500,000까지 측정할 것과 관을 임의 용접접합한 점이다. 위에서 언급한 접합조건들에 대한 각 단면은 그림 3에 도시하였으며 이 중에 임의 용접 접합조건이라 함은 접합부에 폭 1.5 cm, 두께 1 mm의 강판을 관 내벽에 용접하여 임의로 조고를 만든 것을 의미한다. 본 실험자료는 그림 4에 도시하였고 분석한 결과는 그림 5에 도시하였다.

그림 4에 제시된 한번도 용접하지 않은 매끈한 관에 대한 실험자료를 살펴보면 점차로 감소하던 마찰계수는 레이놀즈수가 약 290,000에서 국부적으로 상승하고 있음을 알 수 있다. 이 사실로부터 천이난류의 시작점을 알 수 있으며 400,000이 넘는 레이놀즈수의 범위에서 마찰계수는 일정해지고 오직 조고비에 영향을 받는 전난류 구간의 특성이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 관 내부에 형성된 조고가 매끄러운 관에 적용되는 조고 보다 크다는 점을 암시하며 용접회수를 증가시키면 다음 자료에도 이 영향은 누적되어 발생할 것임을 예상할 수 있다. 또한 용접회수를 증가할수록 천이난류의 시작점은 빨라지고 매끈한 면의 분포율은 일정한 상관관계를 가지고 점차로 감소하리라 예상할 수 있다.

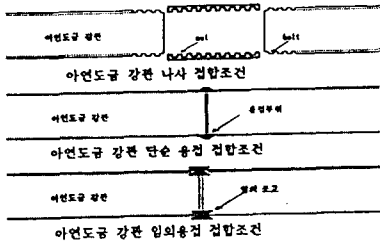


그림 3 여러가지 접합조건의 단면도

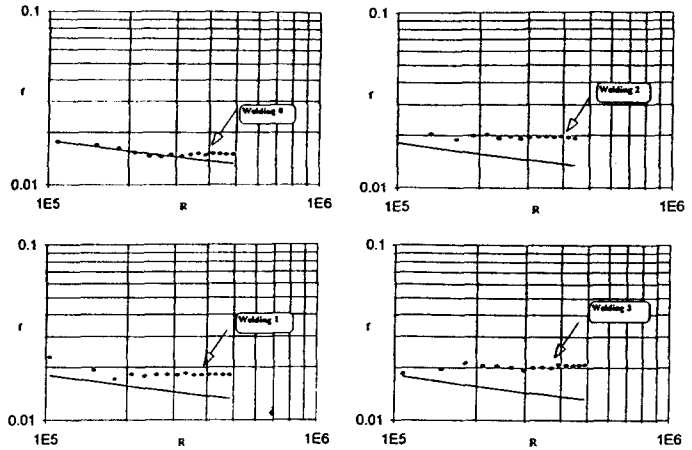


그림 4 본 실험자료의 마찰계수 분포

한번도 용접하지 않은 아연도금 강관을 완전하게 매끈한 관으로 간주하여 매끈한 면의 등가조도를 0.01 mm로 가정하였고 용접하지 않은 실험자료와 가장 잘 일치하는 매끈한 면의 분포율 P_s 를 계산해 본 결과 예상했던 100%에 가까운 값이 아니라 89%이었다. 이 실험자료를 마찰계수 평균법으로 분석하기 위하여 조고비를 임의로 91에서 117까지 7단계로 변화시키면서 자료와 가장 잘 일치하는 매끈한 면의 분포율을 구한 결과는 표 3에 제시하였다. 7가지 조고비를 각각 대입하여 마찰계수 평균법으로 분석한 결과는 서로 비슷하며 실험자료에 모두 잘 일치하는 것을 확인하였다. 그 중에 조고비가 91일 때의 경우를 다음의 그림 5에 2차 분석과 비교하여 도시하였으며 각 조고비에 대한 P_s 의 변화를 비교해 본 결과 일정한 규칙이 있음을 알 수 있었다. 지금까지의 분석 결과를 살펴보면 용접을 한번도 하지 않은 관의 거칠은 면의 조고가 0.898 mm 정도이고 거칠은 면의 분포율은 10.8%임을 알 수 있다. 또한 한번 용접한 경우 거칠은 면의 분포율이 15.6%, 두번 용접한 경우는 19.5%, 세번 용접한 경우는 23.3%가 됨을 조도비가 91인 자료를 통하여 알 수 있는데 이 수치에서 용접하지 않은 관의 거칠은 면의 분포율을 빼면 각각 4.8%, 8.7%, 12.5%로 그 분포율이 어느 정도 비례적인 경향을 알 수 있다.

표 3 완벽하게 매끈하다는 가정으로 구한 P_s 의 분포 ($d=81.7\text{mm}$, $k_{ss}=0.01\text{mm}$)

d/k_{sr}	91	94	96	98	102	109	117
$k_{sr}(\text{mm})$	0.898	0.869	0.851	0.834	0.801	0.750	0.698
용접회수	P_s	P_s	P_s	P_s	P_s	P_s	P_s
0	0.8922	0.8922	0.8922	0.8922	0.8922	0.8922	0.8922
1	0.844	0.841	0.839	0.836	0.833	0.827	0.82
2	0.805	0.801	0.799	0.796	0.792	0.784	0.775
3	0.767	0.763	0.76	0.756	0.751	0.742	0.732

4. 본 실험자료의 2차 분석

다음의 그림 5로부터 매끈한 면의 조고를 실제적으로 0으로 가정하고 분석한 결과 천이난

류 영역과 전난류 영역에서는 작지 않은 오차를 포함하고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인 중의 하나는 용접하지 않은 관이 완벽하게 매끄럽지 않고 어느 정도 관 자체에 조고를 포함하고 있기 때문으로 판단되며 용접하지 않은 관으로 실험한 자료의 매끈한 면의 분포율을 100 %로 간주하고 자료에 가장 근접하는 조고를 구하여 새롭게 분석할 필요가 있다. 이러한 가정하에 새로이 구한 매끈한 신설 아연도금 강관의 등가조고는 0.0322 mm 정도 되었다. 매끈한 면의 조고를 0.0322 mm로 가정하고 거칠은 면의 조고비를 7가지로 가정하여 매끈한 면의 분포율 P_s 의 변화를 살펴보는 앞 절과 동일한 분석과정을 통하여 얻어진 결과를 표 4에 제시하였다. 또한 매끈한 면의 분포율은 용접회수의 증가에 따라 일정하게 감소하는 경향은 살펴볼 수 있었으나 그 비율에 있어 상당한 차이를 발견할 수 있다. 거칠은 면의 조고가 0.898 mm일 때의 자료를 기준으로 살펴보면 한번 용접한 경우에 거칠은 면의 분포율은 약 14 %로 한번도 용접하지 않은 관에 비해 상당히 증가하지만 두번 용접한 경우는 한번 용접한 경우 보다 4.5 %만 증가하고 세번 용접한 경우는 두번 용접한 경우에 비해 4.6 %로 그 증가 경향이 일정해지는 것을 알 수 있다

표 4 매끄러운 관의 조고가 0.0322mm임을 고려하여 구한 P_s 의 분포($d=81.7\text{mm}$, $K_s=0.0322\text{mm}$)

d/k_{sr}	91	94	96	98	102	109	117
$k_{sr}(\text{mm})$	0.898	0.869	0.851	0.834	0.801	0.750	0.698
용접회수	P_s	P_s	P_s	P_s	P_s	P_s	P_s
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1	0.861	0.858	0.857	0.855	0.852	0.846	0.840
2	0.816	0.813	0.810	0.808	0.804	0.797	0.788
3	0.770	0.766	0.763	0.760	0.755	0.745	0.735

위와같은 새로운 결과를 마찰계수 평균법으로 분석하기 위하여 7개의 조고비 중에 가장 오차가 작은 117을 택하여 분석한 결과를 그림 6에 도시하였는데 전 절에 비해 천이난류 및 전난류 구간에서 더욱 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 한번도 용접하지 않은 매끈한 관의 내부에 0.01 mm보다 3배 정도 큰 등가조고가 존재한다는 점을 발견한 것이며 전 구간에서 실험자료와 잘 일치하는 결과는 상용관 마찰계수 산정식으로 마찰계수 평균법의 적용 타당성을 입증한 것이라 할 수 있다.

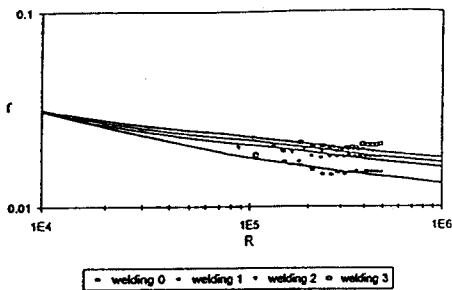


그림 5 완벽하게 매끈하다는 가정하에 마찰계수 평균법으로 분석한 결과

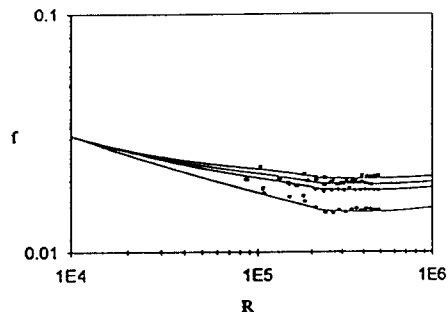


그림 6 매끄러운 관의 조고가 0.0322mm임을 고려하여 마찰계수 평균법으로 분석한 결과

5. 결론 및 토의

본 연구는 상용관에 사용되는 기존 마찰계수 산정식들의 문제점을 파악하고 마찰계수 평균법을 임의조건 접합조건 실험자료에 적용하여 그 타당성을 입증하는데 그 목적이 있다.

1. 용접이나 소켓 이음을 하지 않은 신설 아연도금 강관의 등가조고는 약 0.032 mm임을 발견하였고 주철관 등의 등가조고는 이 보다 큰 것으로 판단되나 정확한 수치는 Colebrook-White가 수집한 자료를 재분석하고 보다 정밀한 실험을 통하여 구할 수 있을 것이다.
2. 접합회수의 증가와 함께 거칠은 면의 분포율은 점차적으로 증가하는 것을 실험으로 확인하였으며 이 사실은 상용관 마찰계수 산정식으로 마찰계수 평균법의 적용이 타당함을 간접적으로 확인해주는 것이라 할 수 있다. 한편 거칠은 면의 분포율이 접합회수에 선형 비례하지는 않는 것으로 나타났는데 이는 관측 구간이 짧아서 전난류 구간을 충분히 확보하지 못한다 그 근본 원인이 있을 것으로 판단된다. 또한 접합하지 않은 관에 비해 한번 접합한 관의 거칠은 면 분포는 상당히 증가하였으나 그 다음부터는 접합회수에 따라 일정하게 약 4.5 %씩 거칠은 면의 분포가 증가하는 것을 알 수 있었다.
3. 각 관에 설치된 피에조미터의 가공 정도 및 관의 접합 상태는 서로 균일해야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 한개의 관에 피에조미터를 매끈하게 설치하고 접합회수를 바꾸어 가며 실험하였다. 이는 이번 실험이 모두 같은 조건 아래에서 이루어졌음을 의미하며 그 만큼 자료의 신뢰도를 높혀 주었다고 할 수 있다.
4. 실험자료의 정밀도를 높이고자 여러가지 위어의 유량 산정식을 면밀히 검토하여 무차원 유량계수 형태로 도출하였고 벤튜리미터 유량계수는 단면지름비와 레이놀즈수의 함수로 나타내는 수식을 개발하였으며 이 두 식으로 산정된 유량의 차이가 1 % 미만임을 실험으로 확인하였다.

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, 균일조건 원형관 마찰계수, 대한토목학회 논문집, 13-5, pp. 165-172, 1993b
3. 유동훈, 강기훈, 영접높이와 관마찰계수, 대한토목학회 논문집, 15-1, pp. 1-12, 1995
4. 유동훈, 복합면 마찰계수, 대한토목학회 논문집, 15-2, 1995(출판예정)
5. 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.
6. Nikuradse, J., Stromungsgesetze in rauhen Rohren, Ver. Dtsch. Ing. Forsch., Vol.361, 1933.