

사각형 개수로 마찰계수* Friction Factor of Rectangular Open Channel Flow

우 호 섭**
Woo, Hyo Seop

1. 서 론

상기 논문은 저자가 1993년부터 개수로 마찰계수에 관해 여러 학술지에 게재하여 온 것을 집약한 것으로, 논문의 주요 취지는 다음 두가지로 보인다. 첫째 Manning 공식이나 Chezy 공식 등 기존의 등류 평균유속공식들이 수리적으로 거친 바닥에서의 난류(저자는 이를 '전난류'라 칭하므로 여기서도 독자들의 편의상 그렇게 부를 것임)에 적용되는 것이 아니라 매끄러운 바닥에서의 난류(저자의 명명대로 '완난류'라 칭함)의 연장선상에서 이해되어야 한다는 것이다. 둘째, 따라서 저자의 완난류 경험식을 확대한 새로운 식이 기존식들보다 보다 논리적이고 조금이라도 더 정확하다는 것이다. 이러한 저자의 제안에 대해 이는 독자들의 오해를 가져올 수 있고, 또한 전 세계적으로 확립된 이론과 경험을 혼돈시키는 위험한 결론이라 생각하며, 이는 반드시 재검토되어야 한다는 점에서 이 토의를 제출한다.

저자는 Manning 공식 등 기존 평균유속공식들이 전난류의 공식이 아니라 완난류의 일환으로 해석되어야 한다는 것을 주장하기 위하여 1) Chow (1959) 11쪽에 있는 다음 그림 1에서 Manning 공식과 Chezy 공식의 개발에 이용된 Bazin의 실험자료가 모든 자료세트에 대해 완난류곡선(Bla-

sius, Prandtl-von Karman곡선)과 평행하다는 점을 제시하였다. 그러나 여기서 간과해서 안되는 것은 이 그림은 관수로 흐름의 Nikuradse 마찰계수 변화 그림에서와 같이 마찰계수를 레이놀즈수와 상대조도(조고와 관반경의 비)의 함수로 나타낸 것이 아니라 실험수로별로 조도가 일정한 자료에 대해 레이놀즈수에 대해 도시하였다는 점이다. Bazin의 자료가 저자도 지적하였듯이 대부분 거칠은 면에서의 흐름자료이므로 전난류 상태라 한다면 이 자료를 상대조도를 추가변수로 Nikuradse와 같은 형태로 도시하면 관수로 흐름에서의 전난류 상태와 같이 레이놀즈수에 크게 관계없이 거의 평행으로 나타날 것이다. 이러한 사실은 저자 논문의 그림 3에서와 같이 마찰계수에 직접 영향을 주는 값(저자 식 15)이 Bazin의 자료들은 상대조도에 따라 변하는 반면 완난류 자료인 Tracy-Laster 자료는 상대조도에 관계없이 일정하다는 것으로도 유추할 수 있다.

Manning 공식이 원칙적으로 전난류에만 적용되는 식이라는 것은 Henderson 책(1966, 97~101 쪽)에 분명히 나와 있다. 이 책의 그림 4-4는 관수로의 Nikuradse 실험결과중 전난류에서의 마찰계수와 상대조도와의 관계를 보여주고 있는데, 여기서 마찰계수는 일반적으로 상대조도의 1/3승으로 표시되며 이를 Chezy의 C로 표시하면 상대조도의 1/6승으로 표시된다. 이 결과를 Chezy C와

* 원저자: 유동훈, 제 28 권, 제 2 호, 1995년 4월

** 한국건설기술연구원 수자원연구실장

Manning n 과의 관계($C=H^{1/6}n$; H 는 동수반경)와 비교하면 결국 Manning의 n 값은 등가조도 k_s 의 1/6승에 비례하는 것으로 나타난다. 여기에 Nikuradse의 자료를 보다 잘 가다듬은 Williamson의 자료를 사용하면 결국 Manning의 n 값은 $0.031 k_s^{1/6}$ 으로 표시되며(영미단위임), 여기서 등가조도로서 하상재료의 대표입경 d 를 사용하면 1923년에 독립적으로 제시된 Strickler식($n=0.034 d^{1/6}$)과 비슷한 Manning계수식($n=0.031 d^{1/6}$)이 도출된다.

참고로 흐름이 비교적 약하고 하상과 제방이 부드러운 풀로 덮힌 경우 흐름은 전난류가 아닌 '천이난류' 상태가 될 수 있다. 이러한 경우 엄격한 의미에서는 Manning 공식은 사용할 수 없으나 이 경우에도 우리에게 익숙한 Manning 공식의 꼴을 그대로 쓰되 유속과 동수반경의 곱의 함수로 n 값을 변화시키는 SCS의 경험적 방법도 Henderson 책(1966)에 소개되고 있다. 이는 기본적으로 Manning 공식은 경험식이기 때문에 n 값을 적절히 선정하면 여러 흐름조건에도 쓸 수 있다는 것이지, 그렇다고 이 공식이 완난류에 쓰이는 식은 아니라는 점을 강조한다.

여기서, Bazin 자료를 보다 정밀하게 검토하기 위하여 저자의 논문에 나와있는 Bazin 자료 (#2, 4, 5, 6, 7 계 5개 자료세트; 자료세트 번호는 Manning의 번호임)를 다음과 같이 분석하였다.

먼저 등가조도 k_s 값은 다음과 같은 Nikuradse-Williamson의 경험식을 이용하여 추정하였다.

$$R_s = \left(\frac{f}{0.113}\right)^3 H$$

이렇게 추정된 k_s 값을 자료세트별로 Reynolds 수에 대하여 도시한 결과는 그림 2~6과 같다. 이 그림들에서 보는 바와 같이 조고 k_s 는 레이놀즈수에 대해 크게 변하지 않고 대략 일정한 값을 보여 주고 있다. 물론 이 자료들이 전난류 조건이었다면 한 자료세트에 대해 조고 k_s 는 레이놀즈수에 관계 없이 완전히 일정하여야 하나, 이 그림들에서 보는 바와 같이 k_s 값은 레이놀즈수에 대하여 어느 정도의 변화가 있다. 이러한 사실은 자료점 하나 하나

에서 오는 오차에 의한 자료점의 산포 뿐만 아니라, 흐름 자체가 전난류부터 천이난류까지의 영역에 있기 때문에 레이놀즈수의 변화에 따라 어느 정도 변화가 있다는 것을 암시하고 있다.

이러한 결과들은 Bazin 자료는 저자도 지적하였듯이 거치른 바닥에서의 흐름자료이므로 전난류이거나 어느 정도 천이난류 조건이라는 것을 의미한다. 따라서, 저자의 의도대로 이러한 자료들이 완난류 성격을 가졌으므로 완난류 조건식을 수정하여 fitting한 경험식을 만드는 것은 그 식의 결과를 떠나서 올바른 접근 방법이 아니라고 사료된다.

둘째 저자가 제안한 식 15(혹은 23)의 유도상의 제반 문제점과 실제 실무에의 적용상의 문제점들을 지적하지 않을 수 없다. 이러한 문제점들을 요약하면 다음과 같다.

- ① 저자는 관수로 마찰과 개수로 마찰과의 차이를 설명하기 위하여 개수로의 자유수면도 벽마찰에 일부 기여한다는 가정하에서 '마찰반경'이라는 개념을 제시하였는데(유동훈, 1993), 유체 역학에서의 마찰이라 함은 주로 유동상태의 유체가 상대속도가 있는 고체면에서 받는 전단응력을 의미한다. 그런데 물위에 접촉해 있는 공기입자는 물입자와 같이 움직임에 있어 큰 저항이 없으므로 따라서 흐르는 물과 그 위에 있는 공기와의 전단응력은 통상 매우 작다는 것은 주지의 사실이다(Henderson, 1966, 88쪽). 관수로 마찰과 개수로 마찰과의 차이는 역시 개수로 단면의 비대칭성 및 자유수면의 존재에 의한 유속분포의 비대칭성과 2차류의 존재에서 찾아야 할 것이다.
- ② 저자 논문 162쪽의 식 16에 나타난 기준조고 ($k_s=0.03mm$)의 물리적 의미를 찾기 어렵다. 이는 단지 저자의 경험식을 자료에 맞추어 얻어진 양일 뿐이다.
- ③ 저자 논문 164쪽에서 경험식 18의 k_s 를 위하여 Weber수와 Froude수의 비를 이용하였고 그 이유를 개수로 마찰계수의 변화는 조고와 중력뿐만 아니라 표면장력의 영향도 중요하기 때문이라고 하였는데, 표면장력의 난류에의 기여도는 별로 없다. 수심을 길이차원으로 보고 물에서 중력과 표면장력의 비를 계산하면 통상 300

배 이상으로 표면장력의 기여도는 사실상 찾기 어렵다. 더구나 표면장력의 경우 길이 차원은 수표면에서 힘이 작용하는 길이 방향인 반면 중력의 경우 수심 방향으로, 이 두 양의 비를 구하는 것은 물리적으로 의미를 찾기 어렵다.

- ④ 저자의 논문 162쪽에서 Bazin 자료중 수로 바닥상태 및 벽면의 재질 및 거칠은 정도를 기술한 상태만 보고 Nikuradse 자료와 비교하여 단순히 조고를 추정하여 저자의 경험식을 만들고 이를 기존의 식들과 비교한 것은 마치 경험식의 개발에 이용된 자료를 가지고 그 경험식 자체와 다른 식을 비교하는 꼴로 기본적으로 비교의 공정성에 문제가 있다. 더구나 우리가 가장 흔히 쓰는 Manning 공식을 명명이 잘못되었다고 식 (4)와 같은 낯선 식으로 대체했다는 것은 독자들에게 혼란만 가중시킬 것이다. 따라서, 표 2의 제식들의 비교는 사실상 큰 의미를 찾기 어렵다.
- ⑤ 저자는 많은 지면을 할애하여 Manning 공식 명명의 문제점과 Manning 공식, Chezy 공식 등 기존식들 계수의 차원의 불일치 문제를 지적하고 있는데, 이점에 대해서는 이미 Chow 책(1959, 98~99쪽)과 기타 다른 참고문헌에 구체적으로 나와 있다. 학술논문에서 구태여 이를 다시 강조할 필요는 없다고 본다. 100년동안 써온 식의 이름을 지금 국제학술지도 아닌 국내학술지에 바꾸어 제시하는 것은 설득력도 약할 뿐만 아니라 독자들의 혼란만 가중시킬 것이다.
- ⑥ 설령 저자가 제안한 식이 조금이라도 기존식들보다 낮다 하더라도 적용성에 문제가 있으면 그 의미가 반감될 것이다. 저자의 경험식의 등가조도를 실제 하천에서 과연 어떻게 추정할 것인가 라는 문제는 이 토의에서 사실상 가장 본질적인 문제중 하나이다. 단순히 Strickler 식 모양으로 하상재료의 대표입경으로 할 것인지 아니면 다른 대안이 있는지 이 논문에서는 아무런 제안이 없다. 단지 100년전 Bazin의

실험실 자료를 fitting해서 새로운 경험식을 제안했을 뿐이다. 반면에 Manning 공식이나 Chezy 공식 등도 물론 Bazin의 실험실 자료를 이용하였지만 마찰계수 n 이나 C 값에 대해서는 100년 이상에 걸쳐 많은 사람들이 야외 실측 자료를 이용하여 경험적으로 혹은 반이론적으로 제안해 왔기 때문에 쉽게 쓸 수 있는 것이다.

- ⑦ 저자의 복잡한 제안식(23)을 잘 살펴보면 물의 동점성계수만 온도에 따라 조금 변하지만 이 양도 실제적으로는 일정한 값이므로 마찰계수는 결국 동수반경, 등가조고, 하상경사의 함수로 표시된다. 이는 Chezy식에서 Gangulliet-Kutter가 제안한 계수 C 값의 관련 변수와 사실상 일치한다. 결국 Bazin자료 등 같은 자료를 어떻게 fitting했는가가 결과를 다르게 했을 뿐이다.

결론적으로 저자의 개수로 마찰계수에 관한 일련의 논문들은 불확실한 해석과 결과가 담겨져 있으며, 이러한 사실은 독자들에게 알려져 오해와 혼란의 소지를 줄여야 할 필요가 있다. 다시 강조하면 Manning 공식은 전난류식이 아닌 완난류식이 아니라 저자의 제안식은 특별한 의미를 찾기 어렵다는 것이다. 이 논문에서는 제한된 범위의 자료 분석결과에 대하여 너무나 확대해석하거나 단정짓는 것을 자주 접할 수 있다. 설령 토론자의 토론에 문제가 있다 하더라도, 이러한 쟁점들은 유체역학/수리학 분야에서 기본적인 중요한 것들로서 객관적으로 검증되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. McMillan Publishing Co., New York, N.Y.
- Chow, V.T. (1959). *Open channel hydraulics*. McMillan Publishing Co., New York, N.Y.
- 유동훈 (1993). “완난류 개수로 마찰계수”. 제35회 수공학 연구발표회논문집, pp. 49-56.

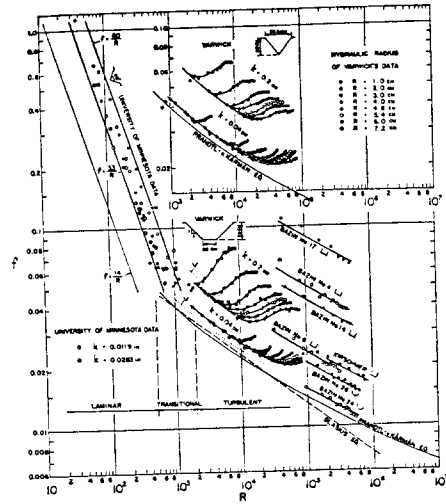


그림 1. 개수로 마찰계수의 변화
(Chow, 1959, 11쪽 그림 1-4)

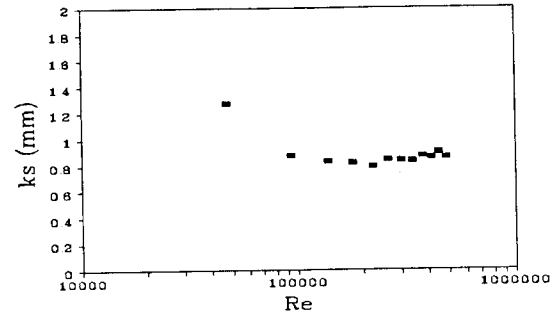


그림 4. Bazin 자료 #5에 대한 ks 값(평균 조고 0.88mm)

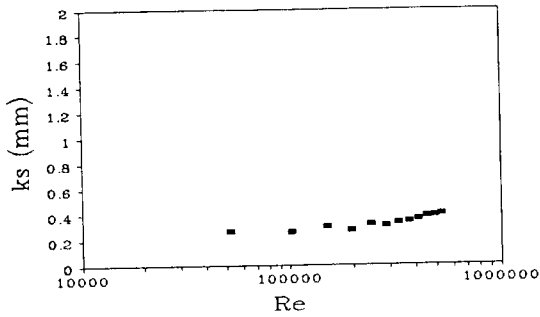


그림 2. Bazin 자료 #2에 대한 ks 값
(평균 조고 0.33mm)

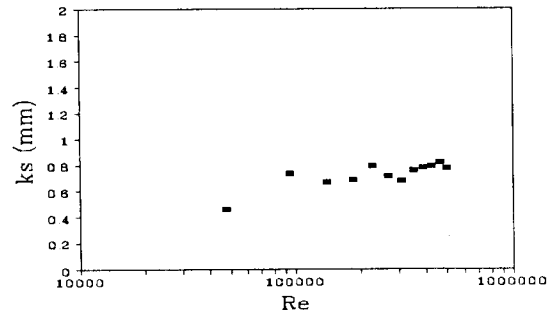


그림 5. Bazin 자료 #6에 대한 ks 값(평균 조고 0.72mm)

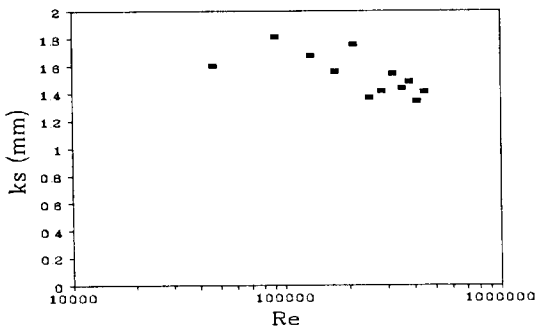


그림 3. Bazin 자료 #4에 대한 ks 값(평균 조고 1.53mm)

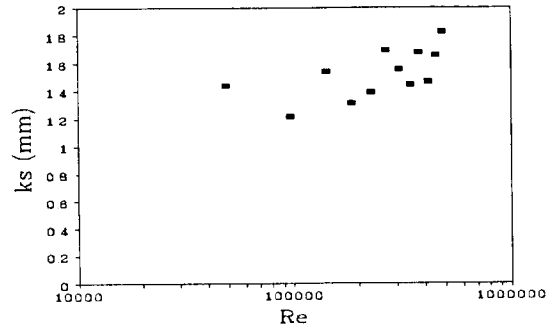


그림 6. Bazin 자료 #7에 대한 ks 값(평균 조고 1.52mm)