

# 우리나라 하천의 흐름특성 및 마찰계수 산정

## A Study of Frictional Flow Characteristics of Korean Streams

유 동 훈\*, 이 태 희\*\*  
Dong Hoon Yoo, Tae Hee Lee

### 요 지

본 연구에서는 개수로 마찰흐름 특성에 관한 연구로서 유량조사사업단(2006)의 우리나라 3대강 유역 하천자료와 미국의 Colorado지역 록키산맥 하천 관측자료를 통하여 개수로의 흐름특성을 집중적으로 검토하였다. 개수로 설계에 있어 수로의 흐름해석 및 마찰계수의 정확한 산정은 수로설계의 근간이 된다. 하지만 일반적으로 사용하고 있는 Manning(1889)식은 개수로 흐름특성을 판단하기에 너무 단순하여 상이한 결과를 보임에도 불구하고 단순성에 기인하여 사용되는 것으로 판단된다.

Bazin(1865)과 Varwick(1945)의 개수로 실험결과를 보면 Nikuradse(1933)의 원형관수로 실험결과와 마찬가지로 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류 등 다섯 가지의 흐름특성이 존재함을 알 수 있다. 또한, 개수로 마찰계수의 특성변화를 보면 조고 또는 조도가 증가함에 따라 마찰계수가 상향으로 평행 이동하는 것을 볼 수 있다. 실험결과로부터 확인되는 이러한 흐름 특성이 현장에서도 분명히 나타날 것으로 판단하며 이러한 가설에 근거하여 각 하천의 관측자료를 분석하였다.

유량조사사업단의 우리나라 3대강 유역 하천 관측자료(2006)를 레이놀즈수의 함수인 완난류 흐름으로 전제하고 물의 기본적인 성질과 하천의 경사, 수심, 조고 등의 영향을 고려한 무차원수를 도입하여 마찰계수의 2차적인 분포특성을 파악하고자 하였다. 하지만 관측된 자료로부터 무차원수를 도입하여 산정된 마찰계수분포를 보면 마찰계수가 급격히 증가하고 추정된 유속과 관측된 유속을 비교하면 추정된 유속이 산개되는 경향이 나타났다. 이러한 문제점은 유량관측시 관측지점의 수면경사 및 하상경사의 미관측으로 하천정비기본계획상에 제시된 지형으로부터 하상경사를 추정하여 마찰계수와 유속을 산정하였다. 또한 하천정비기본계획상에 제시된 Manning의 조도계수를 이용하여 Ganguillet&Kutter(1869) 산정식과 Manning(1889) 산정식으로 부터 유속을 산정한 결과 오차가 크게 발생한 것을 확인하였으며, 실제 관측자료에 적합하도록 조도계수를 재 산정하였다. 논문의 분량 제한상 분석과정은 추후 논문에 제시하기로 하고 분석결과와 수위관측에서의 문제점을 제시하였다.

**핵심용어:** 개수로, 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류, 무차원수  $Y_h$ , 수면경사, 하상경사

### 1. 서 론

개수로 흐름에 대한 연구는 마찰계수 또는 등류수로 평균유속을 산정하고자 하였으며 원형관수로에 대한 연구보다 먼저 시작되었다. 그러나 수로형상의 복잡성과 이차류 존재 등의 이유로 원형관수로보다 이론적인 접근이 늦어졌다. 1700년대 중엽 Chezy에 의해 이론적인 기초를 다졌으며 광범위하고 조직적인 연구는 Darcy(1803 ~ 1858)와 그의 제자인 Bazin(1865)에 의해 다양한 조건에서의 실험연구가 수행되었다. Bazin(1865)과 Varwick(1945)의 실험결과를 보면 Nikuradse(1933)의

\* 정회원 · 아주대학교 건설시스템공학과 정교수 · E-mail: [dhyoo@ajou.ac.kr](mailto:dhyoo@ajou.ac.kr)

\*\* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 박사과정 · E-mail: [rokmc828@ajou.ac.kr](mailto:rokmc828@ajou.ac.kr)

원형관수로 실험결과와 마찬가지로 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류 등 다섯 가지의 흐름특성이 존재함을 알 수 있다.

본 연구에서는 유량조사사업단(2006)의 우리나라 3대강 유역 하천 관측자료와 Jarrett(1984)의 미국의 Colorado지역 록키산맥 하천의 관측자료를 이용하여 개수로 흐름의 마찰특성을 분석하였다. 분석에 있어서 우리나라 하천의 흐름은 완난류 흐름, Colorado지역 하천은 록키산맥 산지하천의 영향을 고려하여 전난류 흐름으로 전제하고 물의 기본적인 성질과 자연하천의 경사, 수심, 조고 등의 영향을 고려하기 위해 새로운 무차원수  $Y_h$ 를 도입하였다.

## 2. 지수형 마찰계수 산정식

유동훈(2003)은 Hicks and Mason(1991)의 흐름자료를 이용하여 지수형 마찰계수 산정식을 개발하였다. 지수형 개수로 마찰계수 산정식은 등류수심의 산정 등 개수로 설계에 유용한 마찰계수 산정식이다. 조고에 따라 변이하는 계수  $\alpha$ 와 동수반경레이놀즈수  $R_H$ 의 지수승  $\beta$ 와 조고비  $H_r$ 의 지수승  $\zeta$  함수로 다음과 같이 표현된다(유동훈, 이민호, 2000).

$$C = \alpha R_H^\beta H_r^\zeta \quad (1)$$

$$\alpha = a + b k_w \quad (2)$$

$$\alpha = a + b Y_h \quad (3)$$

여기서 식 (2)의 기존의  $\alpha$ 는 조고에 따라 변이하는 계수였으나 식 (3)에서와 같이 새로운 무차원수  $Y_h$ 의 함수로 물의 기본적인 성질과 하천의 자연적인 조건을 내포하고 있다. 흐름특성 또는 각 변수의 크기에 따라 변이하는 계수  $\beta$ 와  $\zeta$ , 무차원수  $Y_h$ 에 대해서는 2.1절에 설명하고 있다.

등류이고 정상류 조건에서 이론적으로 유도된 Chezy의 평균유속공식은 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{gHi}{C}} \quad (4)$$

여기서  $H$ 는 동수반경,  $I$ 는 수로경사,  $g$ 는 중력사속도,  $C$ 는 마찰계수이다.

### 2.1 새로운 무차원수 $Y$ 의 정의

무차원수  $Y$ 는 W-F수와 R-W수의 조합무차원수로 개수로 흐름에 있어서 중요시되는 표면장력, 점성력, 경사, 조고의 영향을 모두 고려한 무차원수로 기존의 무차원수에 비해 개수로의 수리특성을 해석하는데 있어서 보다 합리적일 것으로 판단된다.

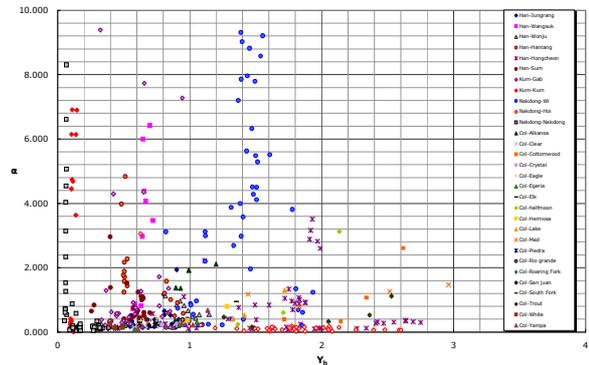
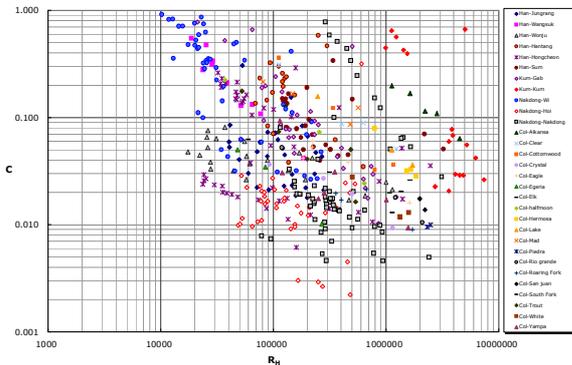
$$Y_h = \frac{W_{F_i}}{R_{W_h}} = \frac{\rho v k_w}{\sigma} \sqrt{\frac{gi}{h}} \quad (5)$$

본 연구에서는 기 연구에서 수로의 폭보다 수로의 수심의 영향이 크게 나타나서 무차원수  $Y_h$  를 자료의 분석에 도입하였다.

### 3. 하천의 관측자료 분석

본 연구에서는 2006년도 유량조사사업단의 우리나라 3대강 유역 11개 하천의 23개 지점 관측 자료와 Jarrett(1984)의 미국 Colorado지역 21개 하천의 75개 지점 관측자료를 이용하여 각 하천의 흐름특성을 분석하고자 하였다. 그림 1에서 (a)를 보면 각 하천마다 일정한 기울기로 레이놀즈수가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 경향이 나타난다. 마찰계수 0.1 이상의 수치들은 경사의 불확실도와 유량이 큰 조건에서 유속이 매우 적은 자료들로 인하여 마찰계수가 크게 나타났다. (b)를 보면 무차원수  $Y_h$ 가 증가함에 따라 비례상수  $\alpha$ 도 증가하는 경향이 나타나고 (a)에서와 같 음 문제점으로 인한  $\alpha$ 의 증가현상이 나타났다.

각 하천의 관측지점 수위와 하천정비기본계획으로부터 산정된 경사, 조고를 사용하여 식 (5)의 무차원수  $Y_h$ 를 산정하였다. 무차원수  $Y_h$ 와 지수형 마찰계수 산정식의 비례상수  $\alpha$ 의 상관관계로부터 식 (3)의 형태인 비례상수  $\alpha$ 산정식을 도출하였다. 무차원수  $Y_h$ 로부터 산정된  $\alpha$ 값과 완난류 I 구간일 경우  $\beta=-0.25$ , II구간일 경우  $\beta=-0.17$ , III구간일 경우  $\beta=-0.11$ 을 대입하여 지수형 마찰계수 산정식으로 마찰계수  $C$ 를 산정하여 등류조건에서 평균유속공식인 Chezy 산정식 (4)로부터 유속을 산정하였다.



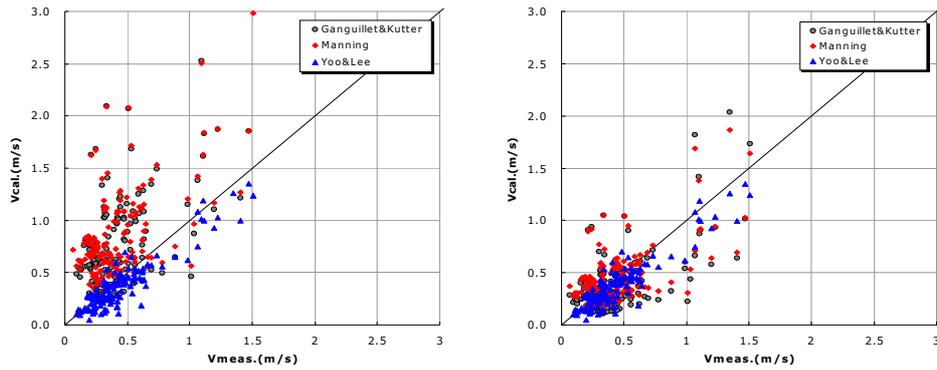
(a)마찰계수대 레이놀즈수 분포

(b)비례상수  $\alpha$ 대 무차원수  $Y_h$  분포

그림 1. 각 하천에서의 흐름분석

### 3.1 한강유역 하천자료의 분석

한강유역 자료는 한강의 지류인 중랑천, 왕숙천, 원주천, 한탄강, 섬강, 홍천강 총 6개 하천의 관측자료를 분석하였다. 유량의 범위는 최소 0.0084  $m^3/s$ 에서 최대 588  $m^3/s$ , 유속은 최소 0.058 m/s에서 1.5 m/s의 범위이고 수심은 최소 0.07 m에서 최대 2.43 m의 범위이다. 흐름은 완난류 흐름으로 레이놀즈수의 범위가 15,000에서 2,000,000의 범위로 완난류 I구간과 완난류 II 구간으로 분석되었다. 조고는 하천정비기본계획에 제시된 중랑천 0.17 m, 왕숙천 0.14 m, 원주천 0.14 m, 한탄강 0.25 m, 홍천강 0.25 m, 섬강 0.14 m를 사용하였다.

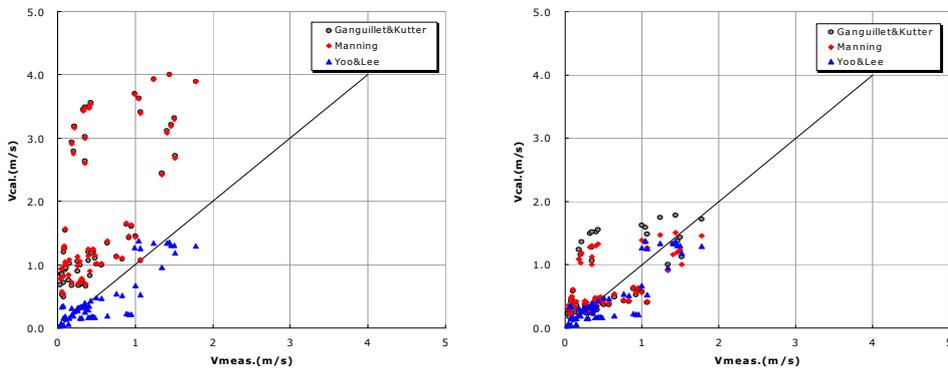


(a) Manning 조도계수 보정전 (b) Manning 조도계수 보정후(n=0.06)

그림 2. 한강유역 하천의 관측유속과 계산유속의 비교

### 3.2 금강유역 하천자료의 분석

금강유역 자료는 금강, 갑천 총 2개 하천 4개 지점의 관측자료를 분석하였다. 유량의 범위는 최소 0.355 m<sup>3</sup>/s에서 최대 3037 m<sup>3</sup>/s, 유속은 최소 0.002 m/s에서 최대 1.78 m/s의 범위이고 수심은 최소 0.24 m에서 최대 11 m의 범위이다. 흐름은 완난류 흐름으로 레이놀즈수의 범위가 7,230에서 7,551,057의 범위로 완난류 I구간, II구간 및 III구간으로 분석되었다. 조고는 하천정비 기본계획에 제시된 0.1 m를 금강과 갑천에 사용하였다.

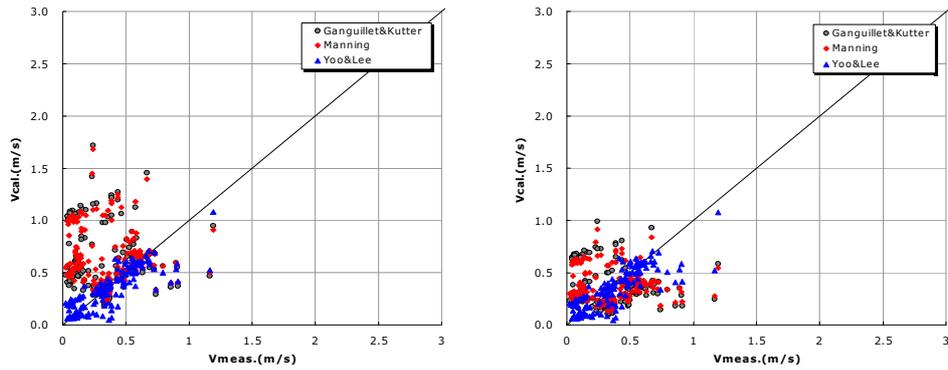


(a) Manning 조도계수 보정전 (b) Manning 조도계수 보정후(n=0.08)

그림 3. 금강유역 하천의 관측유속과 계산유속의 비교

### 3.3 낙동강유역 하천자료의 분석

낙동강유역 자료는 낙동강 및 지류인 위천, 회천 총 3개 하천 7개 지점의 관측자료를 분석하였다. 유량의 범위는 최소 0.044 m<sup>3</sup>/s에서 최대 894 m<sup>3</sup>/s, 유속은 최소 0.023 m/s에서 1.2 m/s의 범위이고 수심은 최소 0.124 m에서 최대 4.63 m의 범위이다. 흐름은 완난류 흐름으로 레이놀즈수의 범위가 4,727에서 2,000,000의 범위로 완난류 I구간과 완난류 II구간으로 분석되었다. 조고는 하천정비기본계획에 제시된 위천 0.25 m, 회천 0.80 m, 낙동강 0.15 m를 사용하였다.

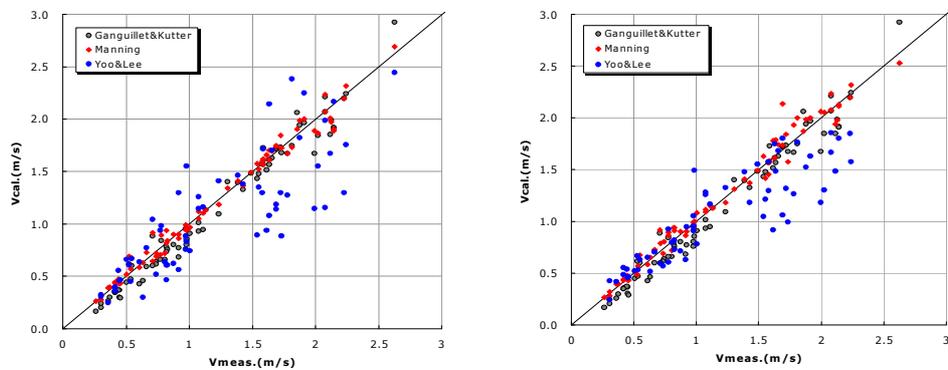


(a) Manning 조도계수 보정전 (b) Manning 조도계수 보정후(n=0.055)

그림 4. 낙동강유역 하천의 관측유속과 계산유속의 비교

### 3.3 Colorado지역 하천자료의 분석

Colorado지역 록키산맥의 21개 산지하천으로 Price AA meter를 사용하여 75개 지점에서 유속을 관측하였다. 유량의 범위는 최소 3.65 m<sup>3</sup>/s에서 최대 1325 m<sup>3</sup>/s, 유속 범위는 최소 0.26 m/s에서 최대 2.63 m/s이고 수심의 범위는 최소 0.15 m에서 최대 1.5 m의 범위이다. 흐름은 전난류 흐름으로 레이놀즈수의 범위가 37,223에서 4,520,304의 범위로 레이놀즈수의 범위가 4,727에서 2,000,000의 범위이고  $H_r < 23$ 인 경우로 전난류 I구간  $\zeta = -0.6$ 을 사용하였다. 하천의 조고의 입경은 최소 0.30 m에서 최대 0.85 m로 대부분이 바위로 형성되어 있다. 그림 5에서 (a)는 완난류 조건으로 분석한 경우이고 (b)는 전난류 조건으로 분석하여 나타내었다.



(a)완난류 분석

(b)전난류 분석

그림 5. Colorado지역 하천의 관측유속과 계산유속의 비교

## 4. 결론

본 연구에서는 일반적으로 사용하고 있는 Manning(1889)식의 불확실도를 개선하고자 유량조사 사업단의 2006년 우리나라 3대강 유역 11개 하천과 미국 Colorado지역 21개 하천의 관측자료를 분석하였다. 각 하천의 흐름특성을 분석하기위해 물의 기본적인 성질과 자연 하천의 경사, 수심, 조고 등의 현장조건의 영향을 고려한 무차원수  $Y_h$ 를 도입하였다.

국내자료 분석시 에너지경사를 관측된 수면경사 자료가 없어서 단순히 하천정비기본계획으로부터 산정한 하상경사를 사용하였고 관측자료의 일부 중 유량이 매우 크나 유속이 정체가되어있을

정도의 매우 작은 유속에서 마찰계수가 급격히 증가하는 것을 그림 1에서 볼 수 있었다. 이러한 이유로 관측된 유속과 추정된 유속과의 비교시 Ganguillet&Kutter(1869) 산정식과 Manning(1889) 산정식의 경우 관측된 유속보다 크게 산정되는 경향을 나타냈고 유와 이(2000)의 산정식의 경우 관측유속과 가장 근접하게 산정되었으나 산개되는 경향을 나타내었다. Ganguillet&Kutter(1869) 산정식과 Manning(1889) 산정식은 조도계수의 보정에 의해 관측 유속에 근접하게 추정되었으나 물의 성질과 하천의 영향을 고려한 유와 이(2000)의 지수형 산정식보다 크게 산개되는 경향을 나타냈다. Colorado 지역의 하천은 산지하천 특성으로 전란류 흐름 분석이 관측유속에 근접하게 산정되나 1.5 m/s 이상의 유속에서는 작게 산정되는 경향이 나타났다. Ganguillet&Kutter(1869) 및 Manning(1889) 산정식의 경우 관측된 자료로부터 추정된 조도계수를 이용하여 유속을 산정하였기에 관측유속과 매우 근접하게 나타났다.

국토해양부 수문조사연보(2006)에 제시되어있는 중랑천 신곡수위표의 수위-유량관계곡선과 김이현(2006)이 제시한 중랑천 신곡수위표의 수위-유량관계곡선과는 차이가 있다. 이와 같이 동일한 지점에서 계수들이 연구자에 따라서 다르고 강우조건, 년도에 따라서 다르기 때문에 일관성 및 예측성에 있어서 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 정확한 마찰계수 산정이나 조도계수 산정이 중요하나 유량 관측시 관측지점 상-하류 지점의 수위를 관측하여 관측지점의 수면경사 산정이 필요하지만 현재는 이루어지지 않고 있다. 외국의 예로 Hicks & Mason(1998)의 경우 유량관측시 뉴질랜드의 전국 하천에 대해서 수면경사와 하상경사를 관측하고 조도계수를 산정한 바 있다. 우리나라도 앞으로 각 하천의 보다 정확한 마찰계수 산정을 위해 관측지점의 수면경사와 하상경사를 관측함으로써 정확한 흐름특성 파악이 필요할 것으로 사료된다.

## 감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03-산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

## 참 고 문 헌

- 유동훈, 이민호(2000). "지수형 개수로 마찰계수 산정식." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제20권, 제 1-B호, pp.1-10.
- 이태희(2007). "하수 흐름의 마찰계수" 아주대학교 석사학위 논문.
- Bazin, H.E.(1865). "Recherches experimentales sur lecoulement de leau dans les canaux decouverts." Memories presents par divers savants al Academie des Sciences, Paris, Vol. 19.
- Colosimo, Carld, Copertino, Vito A. and Veltri, Massino(1988). "Friction Factor Evaluation in Gravel-Bed Rivers", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 861-875.
- Hicks, D. M., and Mason, P. D.(1998). Roughness Characteristics of New Zealand rivers, Water Resources Survey, Dsir Marine and Freshwater, Wellington.
- Jarrett, Robert D.(1984). "Hydraulics of High-Gradient Streams", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11.
- Manning, R. (1889). "On the flow of water in open channels and pipes." Trans. Inst. Civil Eng. Ireland, 20, pp. 161-195.
- Nikuradse,(1933). "Stroemungsgesetze in rauhen Rohren." Ver. Dtsch Ing. Forsch, No. 361.
- Varwick, F.(1945). "Zur Fliess formel fur offene Kunstliche Gerinne." These inedite, Dresden University.