

하천기본계획의 홍수기 조도계수의 적용 및 분석(한강유역 하천 사례)

Application and Analysis for Flood Season Roughness Height of River Master Plan(the case of streams of Han river basin)

이 태 희* · 박 현 근** · 김 승 현***
Tae Hee Lee* · Hyun Keun Park** · Seung Hyun Kim**

요 지

국내 하천은 하천의 관리, 이용, 개발, 치수경제 및 수질 보전을 위해 각 하천에 대해 하천기본계획이 작성되고 있다. 치수와 관련하여 조도계수는 각 하천의 계획홍수량 산정 및 하천제방 등 구조물 설계에 필수적인 인자로서 조도계수의 정확도에 따라 결과에 큰 오차범위를 가지게 된다. 국내 하천기본계획은 하천의 하상재료 및 하도조건에 따라 산정되어지는 조도계수를 각 하천의 일정빈도 홍수량에 맞추어 일정한 값으로 조도계수를 추정하고 있다.

본 연구에서는 국토해양부에서 2009년 한강유역 19개 지점에 대해 관측한 자료와 하천기본계획상에 제시된 조도계수를 적용하여 산정된 값을 비교·분석하였다. 국토해양부의 관측자료 분석에 있어서 유량 관측시 관측지점의 수면경사 및 하상경사의 관측 결합으로 하천기본계획상에 제시된 지형으로부터 하상경사를 추정하였으며 1차적으로 에너지경사는 하상경사와 동일하다고 가정하였다. 또한, 하천기본계획에 제시된 조도계수의 값은 어느 일정 홍수빈도에 대하여 산정된 값으로 국토해양부 관측자료 중 갈수기 및 평수기의 자료는 제외하고 홍수기의 관측값에 대하여 분석을 실시하였다. 이러한 가정하에 하천기본계획상에 제시된 조도계수를 인용하여 Manning-Strickler 식으로 부터 산정된 유속과 국토해양부의 관측유속을 비교·분석하였다.

핵심용어 : 조도계수, 하천기본계획, 에너지경사, 하상경사, Manning-Strickler 식

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. 그림 1에서와 같이 Bazin(1865)과 Varwick(1945)의 실험결과를 보면 Nikuradse(1933)의 원형관수로 실험결과와 마찬가지로 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류 등 다섯 가지의 흐름특성이 존재함을 알 수 있다.

본 연구에서는 국토해양부(2009)의 한강유역 15개 하천 19지점 관측자료를 이용하여 개수로 흐름의 마찰특성 및 하천기본계획에 제시된 조도계수를 적용하여 산정된 유속과 관측된 유속을 비

* 정회원 · 유량조사사업단 유량조사실 한강그룹 연구원 · E-mail : thlee@hsc.re.kr

** 정회원 · 유량조사사업단 유량조사실 한강그룹 연구원 · E-mail : gusroot@hsc.re.kr

*** 유량조사사업단 유량조사실 한강그룹 연구조사원 · E-mail : lionking45@hsc.re.kr

교·분석하였다. 국토해양부의 관측자료 분석에 있어서 유량 관측시 관측지점의 수면경사 및 하상경사의 관측 결함으로 하천기본계획상에 제시된 지형으로부터 하상경사를 추정하였으며 1차적으로 에너지경사는 하상경사와 동일하다고 가정하였다. 또한, 하천기본계획에 제시된 조도계수의 값은 어느 일정 홍수빈도에 대하여 산정된 값으로 국토해양부 관측자료 중 갈수기 및 평수기의 자료는 제외하고 홍수기의 관측값에 대하여 분석을 실시하였다. 이러한 가정하에 하천기본계획상에 제시된 조도계수를 인용하여 Manning-Strickler 식으로 부터 산정된 유속과 국토해양부의 관측유속을 비교·분석하였다.

2. 개수로 평균유속 산정식

등류이고 정상류인 조건에서 이론적으로 유도된 Chezy의 평균유속공식은 다음과 같다

$$V = \sqrt{\frac{gHi}{C}} = C_h \sqrt{Hi} \quad (1)$$

여기서 H는 동수반경, i는 에너지경사, g는 중력가속도이다. 식 (1)에는 중력가속도를 포함한 Chezy의 경험계수 C_h 가 도입되었는데, 당시 C_h 또는 마찰계수 C는 변이가 크지 않은 상수로 인식되었다. 이후 마찰계수는 상수가 아니라 조도나 수로의 형상과 크기에 따라 크게 변이하는 특성이 발견되어 이를 산정하는 것이 개수로 흐름해석의 주요 관건이 되었다. 여기서 특히 주목할 점은 마찰계수 C는 무차원수이나 Chezy 계수 C_h 는 무차원수가 아니기 때문에 C_h 로 표기하면 차원 일치를 기하기 어렵다는 점이다. 한편 많은 연구자들이 Chezy 계수 C_h 를 산정하는 공식을 개발하는데 상당한 노력을 기울였다. 그 중 Bazin, Ganguillet-Kutter, Manning, Manning-Strickler 등의 경험식이 현재까지도 널리 이용되고 있다. 여러 산정식들은 표 1에 정리되어 있는데 각각의 특징은 다음과 같다.

표 1. 여러 종류의 평균유속 산정식

Author	V	Factors of Friction Coefficient
Bazin	$V = C_h \sqrt{Hi}; C_h = \frac{87\sqrt{H}}{\gamma + \sqrt{H}}$	γ, H
Manning-Strickler	$V = k_S H^{2/3} i^{1/2}; k_S = \frac{1}{n}$	n, H
Hazen-Williams	$V = 0.85 C_{HW} H^{0.63} i^{0.54}$	C_{HW}, H, i
Ganguillet - Kutter	$C_h = \left \frac{\frac{1}{n} + X}{1 + \frac{n}{\sqrt{H}} X} \right ; X = 23 + \frac{0.0015}{i}$	n, H, i
Manning	$V = C_M \left[1 + 0.22 \left(\sqrt{\frac{H}{H_0}} - 0.15 \sqrt{\frac{H_0}{H}} \right) \right] \sqrt{gHi}$	C_M, H, k_w, R
Keulegan	$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{1}{k} \left(\ln \frac{H}{k_w} + 2.5 \right)$	H_r
비 고	H: 동수반경, V: 평균유속, i: 경사, R: 레이놀즈 수, k_w : 조고, H_r : 조고비	

2.1 Manning-Strickler 식

에이레의 Manning(1889)은 여러 유량 측정자료와 각종 공식들을 조사하여 Chezy의 평균유속과 유사한 경험식을 제안하였고, 동수반경의 지수승이 0.6351에서 0.8395까지 증가하는 것으로 추정하

였으며, 이미 Hagen(1876)이 수로형태에 따라 지수승을 3/4 또는 2/3로 선택하였음을 밝혔고 Strickler(1923)가 총괄적으로 2/3를 채택하여 유속산정식을 단순화해도 정밀도를 유지할 수 있다고 주장하였다. 따라서 동수반경의 지수승이 2/3인 Manning 공식은 Manning-Strickler 식이라 칭하며, 실제 Manning이 제시한 식과 구별하는데 유리하다.

$$V = k_S H^{2/3} i^{1/2}$$

$$k_S = \frac{1}{n} \tag{2}$$

여기서 H는 동수반경이고 i는 에너지 경사이다. k_S 는 Strickler 계수이며 n은 Kutter의 조도계수로써 수로의 형태나 종류에 따라 변이하며 조도가 크지 않은 인공수로에서는 그 수치를 결정하기 어렵지 않으나 자연수로의 경우에는 적절한 값을 결정하기가 매우 어렵다. 또한 Strickler 계수 k_S 도 무차원수는 아니다.

상기 식 (2)를 식 (1)의 Chezy 공식에 대하여 정리하면 $\sqrt{g/C} = H^{1/6}/n$ 로부터 무차원수인 마찰계수 C로 전환된다.

$$C = (0.016 \sim 0.025) H_r^{-0.33} \tag{3}$$

여기서 H_r 은 동수반경대 조고비($H_r = H/k_w$)이다.

3. 한강유역 하천자료의 분석

2009년도 국토해양부 한강유역 15개 하천의 19개 지점 관측자료를 이용하여 각 하천의 흐름특성을 분석하고자 하였다. 홍수기 관측자료로 유량의 범위는 최소 43.8 m³/s에서 최대 8922 m³/s, 유속은 최소 0.7 m/s에서 최대 4.4 m/s의 범위이고 수심은 최소 0.7 m에서 최대 8.2 m의 범위이다. 그림 2에서 레이놀즈수에 대한 마찰계수의 분포는 완난류에서 천이난류 흐름으로 레이놀즈수의 범위는 신천의 청산지점에서 유량 44 m³/s, 평균수심 1.16 m, 평균유속 0.71 m/s의 조건에서 최소 866,816로 나타났고 한탄강 전곡지점에서 유량 6,318 m³/s, 평균수심 7.84 m, 평균유속 4.18 m/s의 조건에서 최대 32,780,019의 범위로 산정되었다. 표 2의 하천기본계획에 제시된 조도계수를 살펴보면 조도계수의 범위가 0.025에서 0.035의 범위로 같은 하천이지만 다른 지형특성을 갖는 지점임에도 불구하고 조도계수는 고정된 값으로 정의되어 있다.

표 2. 한강유역 15개 하천의 조도계수 (하천기본계획)

하천	지점	조도계수 n	하천	지점	조도계수 n
한강	여주	0.027	북하천	홍천	0.03
	이포	0.027	양화천	율곡	0.032
섬강	문막	0.03	영평천	고소성	0.025
	장현	0.03	포천천	은현	0.032
	횡성	0.03	목감천	천왕	0.03
안성천	팽성	0.033	신천	청산	0.025
	평택	0.033	범천천	범천	0.035
원주천	원주	0.03	청미천	삼합	0.03
주천강	안흥	0.035	곤지암천	도평	0.035
한탄강	전곡	0.033			

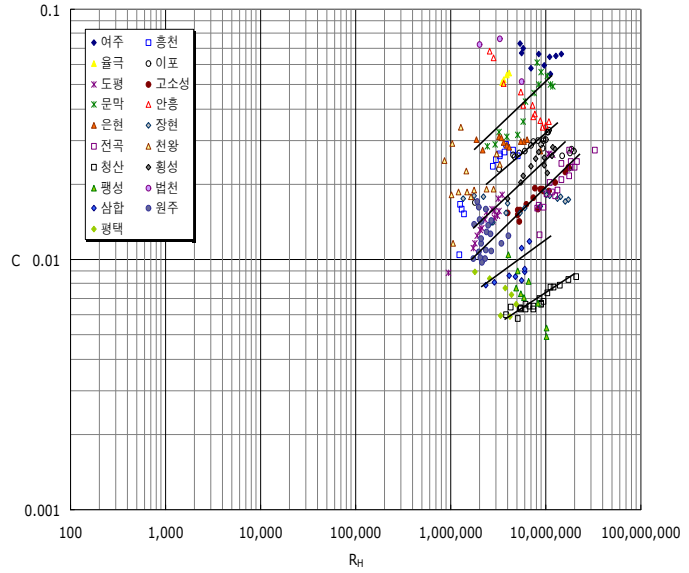
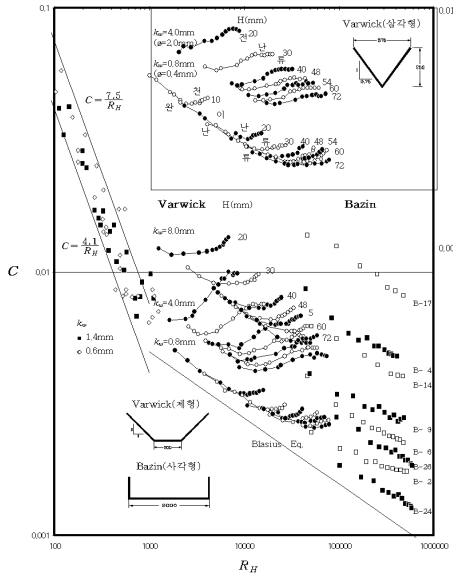


그림 1. 개수로 흐름의 마찰계수 분포 그림 2. 한강유역 15개 하천 19개 지점의 마찰계수 분포

그림 3에는 한강유역 15개 하천의 19개 지점 관측자료와 하천기본계획에 제시되어있는 조도계수를 적용하여 Manning-Strickler 식으로부터 산정된 값을 비교하여 나타내었다. 홍수기 관측자료에 적용했음에도 불구하고 전반적으로 관측값보다 과대 산정되는 경향이 나타났다. 관측값과 산정값의 불일치의 결과는 수면경사를 지형경사로 대체한 오류도 내포하지만 국내 하천 조도계수의 고정된 값으로 인한 불확실도의 영향으로 판단된다. (그림 3에는 학술발표회 논문페이지 제출 규제 조건상 12개 지점의 결과에 대해서 우선 제시하며 추후 논문집 및 발표에 나머지 7개 지점에 대해서 추가 첨부한다.)

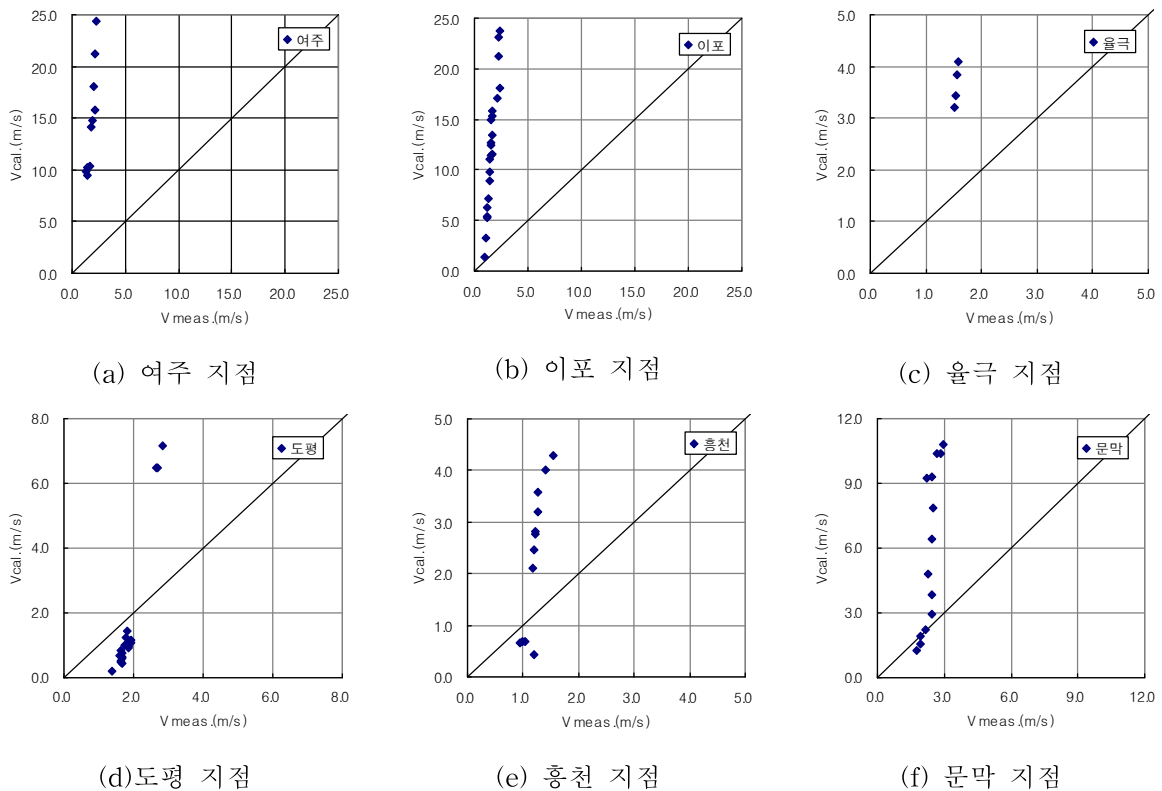


그림 3. 한강유역 하천의 관측유속과 계산유속의 비교(계속)

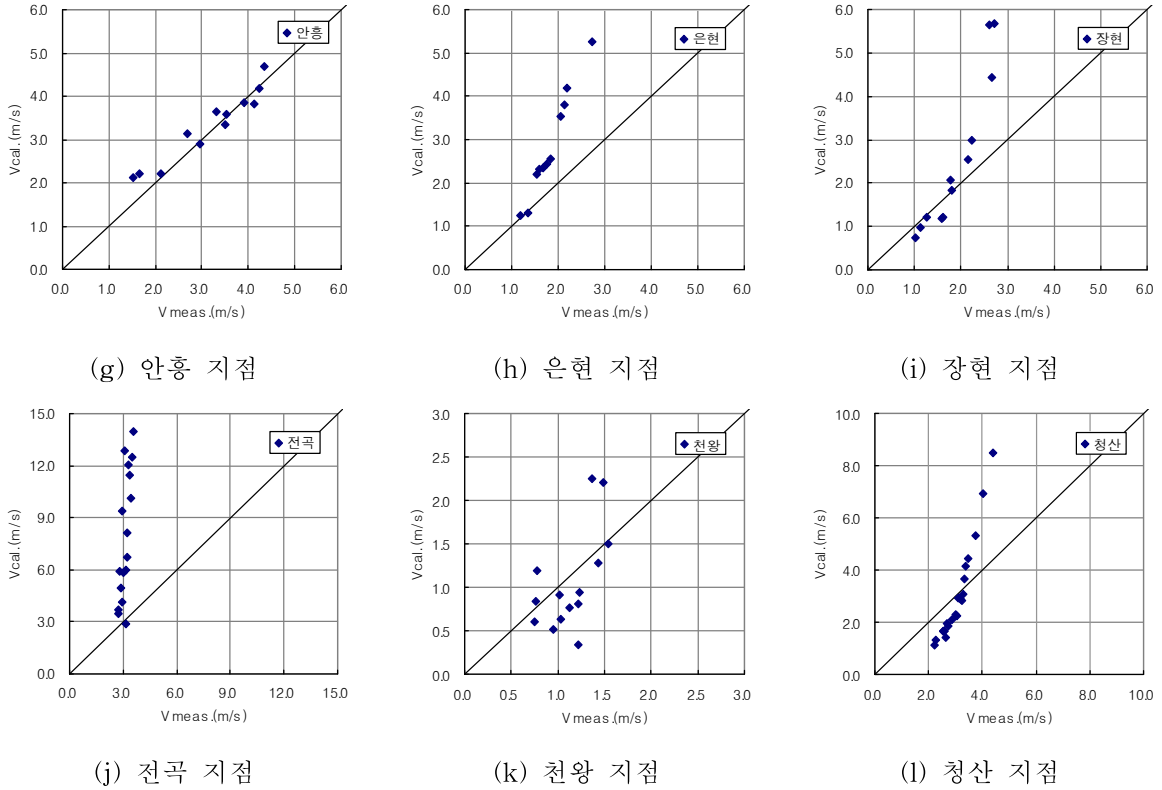


그림 3. 한강유역 하천의 관측유속과 계산유속의 비교

4. 결론

본 연구에서는 일반적으로 사용하고 있는 Manning-Strickler식에 적용되는 조도계수의 불확실도를 개선하고자 국토해양부(2009)에서 관측·수집한 한강유역 15개 하천의 관측자료를 분석하였다. 한강유역 15개 하천자료 분석시 에너지경사 및 하상경사의 미관측으로 하천기본계획상에 제시된 지형자료를 바탕으로 하상경사를 추정하고 에너지경사와 같다고 가정하였으며 조도계수 n 은 각 하천에 제시된 조도계수를 사용하였다.

한강유역 하천자료의 분석결과 Manning-Strickler 산정식에 의해 산정된 값이 전반적으로 관측값보다 과대 산정되는 경향이 나타났다. 홍수기 관측자료에 적용했음에도 불구하고 산정값과 관측값의 불일치의 결과는 하천기본계획에 제시된 국내 하천 조도계수의 어느 일정 범위의 값으로 인한 불확실도의 영향으로 판단된다.

국내 각 하천의 경우 조도계수의 범위가 어느 일정홍수빈도에 국한되어 각 하천의 상시 흐름을 해석하기 위해서는 부족한 면이 많은 것으로 판단되며, 따라서 갈수기, 평수기, 홍수기 등 상시 흐름해석 조건에 적합한 조도계수를 산정해야 할 것으로 사료된다. 또한 유량 관측시 관측지점 상·하류 지점의 수위를 관측하여 관측지점의 수면경사 및 마찰경사를 산정함으로써 정확한 흐름특성 파악이 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

유동훈, 이태희 (2008). “우리나라 하천의 흐름특성 및 마찰계수 산정.”, 한국수자원학회 학술발표회논문

- 집, 한국수자원학회, CD
- 유동훈, 이태희 (2009). “국내 하천 조도계수 산정을 위한 기초연구.”, **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, CD
- 국토해양부 (2009). 2009년 유량측정 성과모음.
- 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.
- Chow, V. T. (1959). "Open-channel hydraulics, *McGraw-Hill*. New York, NY.
- Ganguillet, E. and Kutter W.R (1869). "An investigation to establish a new eneral formular for uniform flow of water in canels and river." *Zeitschrift des esterreichischen Ingenieur und Architekten Vereines*, Vol. 21, No. 2, pp. 129-147.
- Hagen, G. H. L. (1876). "Untersuchngen über die gleichförmige Bewegung des Wassers (Researches on Uniform Flow of Water)", Berlin, 1876.
- Manning, R. (1889). "On the flow of water in open channels and pipes." *Trans. Inst. Civil Eng.*, Ireland, 20, pp. 161-195.
- Nikuradse, J. (1933). "Stroemungsgesetze in rauhen Rohren." *Ver. Dtsch Ing.* Forsch, No. 361.
- Strickler, A. (1923). "Beiträge Zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlem für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen." *Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft, Bern*, Switzerland, no. 16.
- Varwick, F. (1945). "Zur Fliess formel fur offene Kunstliche Gerinne." *These inedite*, Dresden University.