

개수로에서의 대표 매개변수 방법에 의한 유량산정에 관한 연구

추 태 호* / 채 수 권**+

A Study on Discharge Estimation by Representative Parameter Method in Open Channels

Tai Ho Choo* / Soo Kwon Chae**+

요지 : 습지 생태계 및 하천에서 가장 중요한 요소인 유량의 산정은 항상 중요한 관심사였다. 이러한 유량의 산정은 그동안 수위유량 관계곡선에 의존하여 왔으나 수위와 유량만의 관계를 이용하는 수위-유량곡선의 한계점은 널리 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 개수로에서 널리 사용되는 Manning식과 Chezy식을 사용하여 구간 내 대표 매개변수 산정법을 통하여 유량 산정 방안을 제안하였다. 각각의 결과는 RMSE와 Discrepancy Ratio를 사용하여 나타내었고 실험실 수로와 자연하천에서 측정된 데이터에 대한 결과의 차이는 존재하였으나 산정된 유량과 측정된 유량 사이가 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 지속적인 연구를 통하여 여러 하천에 대한 검증이 이루어지고 개선이 이루어진다면 쉽고 빠르게 하천의 유량을 산정할 수 있으므로 수자원 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 수위-유량관계곡선, 유량 산정, Manning and Chezy 공식, 대표 매개변수 산정법

Abstract : The discharge estimation that means the most important element in a wetlands ecosystem and rivers is a prime concern. All the interim, this discharge estimation depends on stage-discharge curve, but the limitation of stage-discharge curve that uses only connection between the stage and discharge is widely well known. Thus, this paper proposed a method of discharge estimation in a section through "representative parameter estimation method" by using Manning and Chezy equations that have been extensively used in an open channel. Each result is presented by both RMSE and Discrepancy Ratio. The scale difference for the results between laboratory and natural open channel data existed, but the each result showed that the estimated discharge agree with the measured discharge. If the verification and improvement are conducted in various rivers through continuous study, the easy and rapid discharge estimation will be possible. So, the proposed method will be utilized in the water resources fields.

keywords : stage-discharge curve, discharge estimation, Manning and Chezy equation, representative parameter estimation method

1. 서 론

습지는 일반적으로 하천의 하나의 구성요소로서 존재하며 원시적인 습지 및 늪 형태를 간직할 곳에는 수많은 동식물들이 서식하고 있다. 이처럼

다양한 생태계를 가진 습지는 습지 식물과 수서 곤충, 어류 및 조류 등이 서식하는 생태계의 보고이다. 하지만 비가 연속적으로 내리는 집중호우 혹은 홍수기에는 본 하천의 수위상승에 영향을 받게 된다. 따라서 본 하천의 수위가 상승함에 따라

+ Corresponding author : cskwen@eulji.ac.kr

* 정희원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수 · E-mail : thchoo@pusan.ac.kr

** 정희원 · 을지대학교 보건환경안전학과 교수 · E-mail : cskwen@eulji.ac.kr

습지의 수위도 상승하게 되고 이렇게 증가한 수위(홍수위)는 3-4일에서 길게는 일주일 이상까지 유지되므로 홍수에 취약한 육상식물들의 폐사를 유발한다. 또한 물위를 떠다니던 개구리밥이나 생이가래 같은 부유성 식물은 제방 중간부로 떠밀려져 수위가 빠지면서 말라죽게 되거나 본류로 떠내려가 하류로 이동을 하기도 한다. 본류의 시각으로 보면 습지는 홍수발생시 물의 이동을 느리게 만들기 때문에 훌륭한 홍수터 역할을 수행하기도 한다. 이처럼 습지는 하천의 유량에 밀접한 관계를 가지고 있고 그 영향을 직접적으로 받는다. 이러한 하천의 유량산정은 그동안 습지보존, 수공 구조물의 설계, 시공 등 수자원 전역에 걸쳐 매우 중요한 관심사 중 하나였다. 하천을 흘러가는 유량의 정확한 산정은 오랜 기간 연구되어 왔으며 여전히 진행 중이다. 그중에서도 홍수기 유량의 정확한 계산은 여전히 해결해야 할 연구과제로 남아 있다.

현재는 이러한 홍수기의 유량을 예측하기 위해 평수기에 간헐적으로 측정된 유량데이터와 10분 단위로 측정된 수위 데이터와의 관계를 공식화 하여 생산되는 수위-유량관계곡선에 의존하고 있다. 이러한 수위-유량 관계 곡선은 비교적 편리하고 빠르게 유량을 생산할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 평수기에는 측정치와 곡선식에 의한 결과가 잘 일치하기도 한다. 하지만 그 측정 지점의 단면형상이나 에너지 혹은 수면경사, 조도 같은 수리학적 파라미터들을 반영하지 못하고 단지 수위와 유량의 관계만을 이용하므로 고수위(홍수기)로 갈수록 그 예측치에는 많은 불확실성을 내포하고 있다.

본래 기본적으로 수위-유량 관계는 1:1을 유지한다는 가정 하에 수위-유량 관계곡선이 이루어 지는데 이는 정상류 상태에서만 존재할 수 있다. 즉 자연상태 에서는 발생하기 힘든 현상이며 특히 주요한 관심을 가지고 있는 홍수기는 부정류 상태 로써 수위-유량곡선에 의한 홍수기 예측 유량 값의 오차 발생 가능성은 매우 높다고 할 수 있다. 그리고 여러 가지 요인으로 인해 발생하는 루프형(Loop)수위-유량관계 곡선의 존재는 이러한 주장

을 더욱 뒷받침 하고 있다. 미국 기상청(Fread, 1976)에서는 고리형 수위-유량관계와 그 영향 인자들 간의 관계를 분석하고 실측유량을 비교한바 있으며, Cunge 등 (1980)에서는 수위-유량 관계 곡선이 고리형 특성을 나타내는 원인은 유량과 하상경사, 조도계수 등이라고 하였다. Asgeir and Trond 등(2009)은 홍수가 빈번한 지점에 부정확한 수위-유량 산정에 대한 방안으로 최우도법(maximum likelihood method)을 기반으로 하는 방법을 이용하였다.

Sahoo and Ray(2006)은 Artificial Neural Network (ANN)을 적용해 하와이 유역에 대한 수위 유량 상관관계를 분석하여 자연하천 유량을 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 또한 김정훈 등(2008)이 수위-유량곡선식 개발 시 사용되는 전통적인 비선형최소제곱모형(NLSM)의 제한성을 제시하고자 이분산성을 고려한 최우도모형(HMLM)을 제안하였고, 권현한 등(2008)은 Hierarchical Bayesian 방법을 도입하여 불확실성(uncertainty)과 함께 저수위-고수위를 정량적으로 구분할 수 있는 수위-유량 관계곡선식을 유도하여 기존 방법의 개선안을 제시하였다. 하지만 상기의 여러 연구들을 살펴보면 하천의 유량을 정확히 산정하는 방법론을 제시하기 보다는 기존의 수위-유량 관계곡선의 개선에 대한 것이 주를 이루고 있다.

따라서 본 논문에서는 수위와 유량만의 관계가 아닌 수리적인 특성을 비교적 잘 반영하는 경험적 공식으로서 널리 알려진 개수로 공식인 Manning 식 및 Chezy식의 경험적 파라미터를 산정하는 방법과 동시에 이를 이용한 유량 산정 방법을 제시하였다.

2. 경험적 파라미터 중요성 및 대표매개변수 산정 방법

실제로 하천에서의 물의 흐름은 여러 가지 변수들의 영향을 받는다. 하천의 흐름을 결정짓는 지배적인 요소들은 관성력과 마찰력, 중력 등으로 나타낼 수 있는데 이들은 단면의 형상과 하상의

거칠기, 즉 조도계수에 영향을 받는다. 이런 조도계수를 사용하는 경험적 공식으로 유량을 산정하는 공식 중 가장 널리 알려진 공식은 Manning식과 Chezy식이 있다. 이들 식은 기본적으로 정류 조건에서 잘 맞는 것으로 알려져 있으나 실제 하천의 유량산정에 널리 이용되어 오고 있다. 이 두 식의 가장 중요한 매개변수는 경험적으로 산정되어지는 Manning식의 조도계수 n 과 Chezy식의 Chezy계수 C 가 있다. 동수반경이나 에너지 경사, 수면경사 등은 계산적으로 혹은 실측에 의해 구해질 수 있으나 조도계수와 Chezy계수는 수위, 유량, 만곡부나 하상의 구성성분이나 형상, 경사, 식생의 분포 현황 등에 따라 달라지며 매우 다양하고 복합적인 인자들에 의해 영향을 받는다. 또한 증적하천과 달리 고경상의 하천에서는 단면의 형상이 고정되어 있지만 조도계수는 그렇지 않다. 일반적으로 조도계수는 수위가 올라가면 낮아지고 수위가 내려가면 높아지는 것으로 알려져 있다. 즉 같은 단면에서도 수위와 유량에 따라 조도계수가 변하며 공간적, 시간적으로 변화하는 값이므로 이러한 경험적 매개변수의 정확한 산정은 매우 어려운 영역이며 일반화를 위해서 많은 연구가 그동안 수행되어 왔고 앞으로 수행되어야 할 것이다.

그 동안 수행되어온 연구를 간략히 살펴보면 Yu, G.와 Lim, S.-Y.(2012)에서는 수정Manning 공식을 사용하여 새로운 유량예측 공식을 개발하였다. 이 공식을 통하여 4824세트의 실측자료를 바탕으로 검증해본 결과 약 86% 정도가 실측값과 잘 일치하였으나 에너지 경사가 매우 작은 상층류나 수심이 매우 깊은 경우에는 오차가 많이 발생하므로 이에 대한 추가연구가 필요하다고 하였다. 이성현 등(2011)에서는 사진해석 방법을 활용하여 국가하천이나 지방하천같이 기본계획 수립시 하천 단면 측량을 시행하고 수위 및 유량 실측자료가 많아 상대적으로 조도계수 산정이 용이한 지역이 아닌 실측자료가 전무한 우리나라의 소하천에 대하여 조도계수 값을 추정하는 연구를 수행하였다. 김주영 등(2011)에서는 국내의 주요 3대 하천인 한강, 낙동강, 금강에 대하여 하상개

료의 입도분포를 이용하는 방법과 수치모형을 이용하는 방법으로 조도계수를 산정하였고 이 결과를 기존의 하천정비기본계획상에서 제시하는 조도계수와 비교하였으며 두 값 사이에는 상당한 값의 차이가 있음을 제시하였다. Buffington과 Montgomery (1999)에서는 워싱턴 주와 알래스카의 자갈하천에 대하여 하상 입경이 하천 조도계수에 영향을 미치는 주된 요소임을 확인하였고 D_{50} 을 이용하여 산정한 조도계수와 이론적 하상 전단력에 의한 조도계수와의 경향성을 분석하였다. Ree와 Palmer(1949)에서는 사다리꼴 자연하도를 조사하여 유속, 동수반경과 Manning의 조도계수 n 과의 관계를 분석하였다.

상기의 내용과 같이 이러한 경험적 파라미터의 산정은 각 방법이 매우 다양하며 정확한 산정은 매우 어려움을 잘 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 대표 매개변수 기법을 사용하여 비교적 쉽게 하천의 경험적 파라미터를 산정할 수 있는 하나의 방법론을 제시하였다. 본 방법은 다음과 같다. 일정 구간 내에서 측정된 유속, 동수경사, 에너지경사 혹은 수면경사의 자료를 이용하여 $y=ax$ 형태로 변환하여 조도계수 회귀식을 통하여 산정한다. 여기서 y 는 유속을 의미하여 x 는 Manning식에서는 $R^{2/3}I^{1/2}$ 을 뜻하고, Chezy식에서는 \sqrt{RI} 를 뜻한다. 본 방법은 매우 간단하면서도 비교적 잘 유량을 산정할 수 있음을 보여주며 Choo 등 (2011)에서 다양한 하천에서 그 정확성을 검증한 바 있다. 본 방법이 가지는 중요성은 다음과 같다.

하나의 단면을 대상으로 하는 것이 아니라 어떤 일정한 구간(상하류) 내에서 측정된 자료를 바탕으로 하나의 대표조도계수를 산정하는 방법의 제시를 목적으로 실제로 한 지점에서 수위에 따라 조도계수가 변하는 상황에서 어떤 일정한 구간 내에서 대표조도계수의 산정이 필요할 경우 어떤 기준으로 할 것인가?에 대하여 접근 하였다. x 축과 y 축의 값들은 모두 그 하천의 수리적인 특성치를 반영하여 나온 값이므로 일정한 기준이 없는 이러한 조도계수의 산정에 기준이 될 수 있는

대표조도계수를 제안하는 방법론으로 유용할 것으로 판단하였다.

3. 실험실 수로 및 자연하천 측정 데이터

본 논문에서 제안하는 대표매개변수 산정법의 정확성을 검증하기 위해서 실험실 개수로 측정 데이터 2세트와 자연하천 측정 데이터 1세트가 사용되었다.

실험실 수로 측정 데이터는 스위스 로잔 공과대학의 Song(1994)의 박사논문에서 측정된 정류 데이터를 활용하여 수위와 유량에 따른 조도계수를 산정하여 대표조도계수를 산정하였다. 실험실 수로의 폭은 60cm이고 길이는 16.8m, 측벽은 유리, 바닥은 steel로 구성되어 있고 경사조절이 가

능하나 본 논문에서는 0.0075와 0.0090의 경사에서 측정된 데이터만을 사용하였다. 유속의 측정은 바닥에 부착한 ADV를 이용하였고 유량을 다르게 흘러 보내어 L1지점에서 측정하였으며 유량 측정 장치의 형상은 아래의 그림 1과 같다.

자연 하천의 데이터는 캐나다 Ottawa의 알버타 대학의 보고서에서 수집된 신뢰도 높은 유량관측 자료를 사용하였다(Peterson and Howells, 1973). 수집된 많은 자료들 중에서 Nordin and Beverage(1965)가 뉴 멕시코의 Rio Grande 강에서 측정된 자료를 사용하였다. 총 6개의 관측지점에서 측정되었으며 유사의 평균 크기는 0.062보다 크며 본 논문에서 사용한 데이터는 Otowi 다리와 Cochiti의 2지점에서 측정된 자료를 주로 사용하였으며 총 측정지점은 49이다.

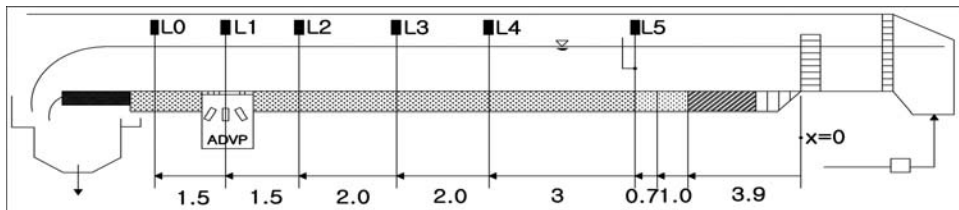
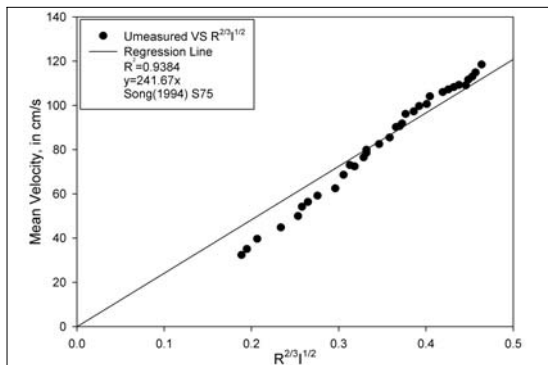


그림 1. 실험실 수로의 제원(Song 1994)

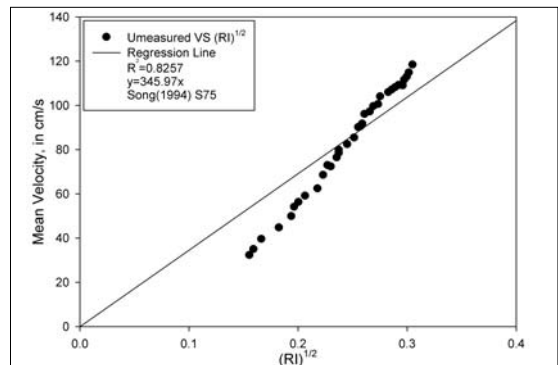
4. 경험적 파라미터 산정을 통한 유량산정

2장에서 서술한바와 같이 우선 경험적 파라메

터인 Manning식의 대표 n값과 Chezy식의 대표 C값을 산정하였다. 실험실 수로 2세트와 자연하천 1세트에 대하여 산정하였으며 결과는 아래의 그림 2-5와 같으며 표 1과 같이 정리하였다.

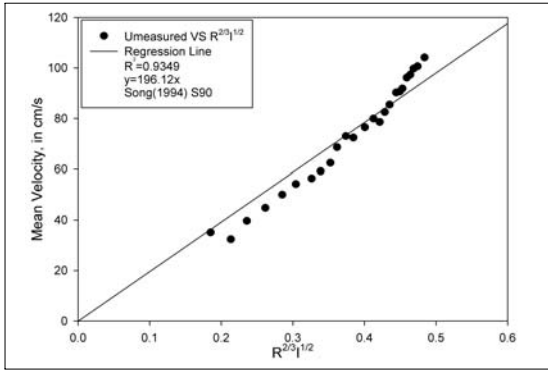


(a) Manning n

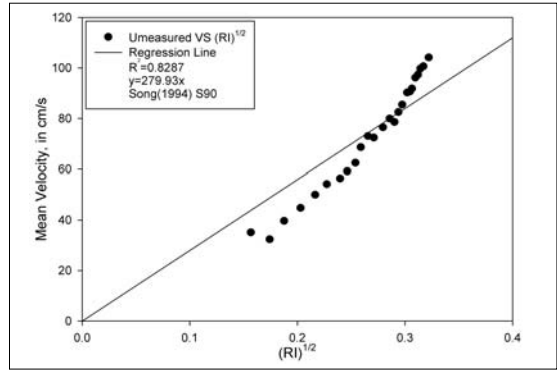


(b) Chezy C

그림 2. Song(1994) S75의 대표조도계수 n 및 대표 Chezy계수 C산정

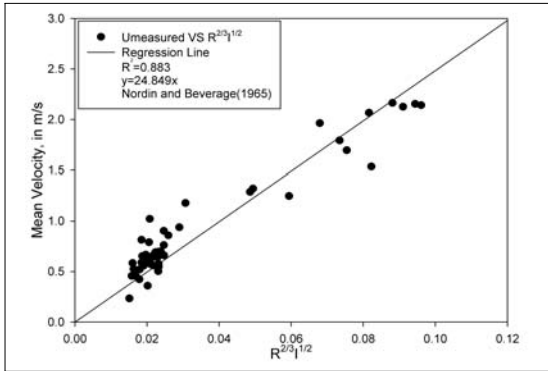


(a) Manning n

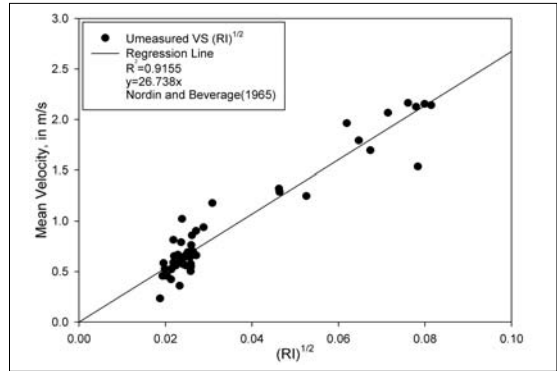


(b) Chezy C

그림 3. Song(1994) S90의 대표조도계수 n 및 대표 Chezy계수 C산정



(a) Manning n



(b) Chezy C

그림 4. Nordin and Beverage(1965)의 대표조도계수 n 및 대표 Chezy계수 C산정

표 1. 실험실 수로 및 자연하천의 대표 파라미터 및 결정계수

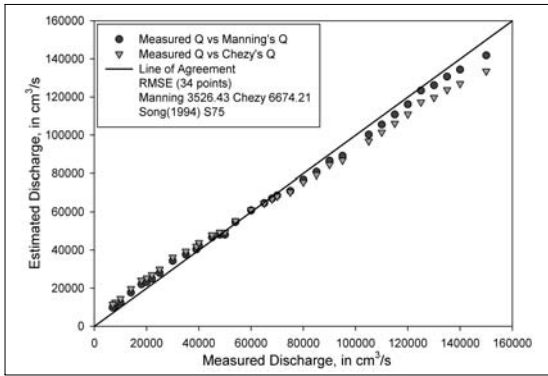
구분	대표 조도계수n	결정계수	대표 Chezy계수C	결정계수
Song(1994) s 75	0.004	0.9384	345.97	0.8257
Song(1994) s 90	0.006	0.9349	279.83	0.8287
Nordin and Beverage(1965)	0.04	0.883	26.738	0.9155

표 1과 같이 산정된 대표 조도계수 및 대표 Chezy를 이용하여 유량을 산정한 결과는 아래의 그림 5(a),(b),(c)와 같다. 그림에서와 같이 실험실 수로에서는 비교적 직선 형태를 보이며 일정한 패턴을 보이는 반면 자연하천에서는 비교적 분산되어 있음을 알 수 있다. 또한 각각의 RMSE(Root Mean Square Error)는 Manning과

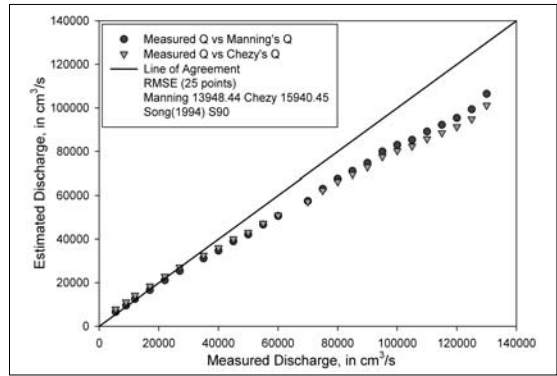
Chezy의 순서로 S75에서는 3526.43과 6674.21 이고 S90에서는 13948.44과 15940.45이었으며 자연하천에서는 10과 7.58이었다. 수치의 차이는 cm와 m의 단위차이에서 기인하는 것으로 판단되며 비슷한 환경의 실험실 수로에서는 비교적 완경사인 S75에서 조금 더 정확함을 알 수 있었다. 상기의 결과를 종합해보면 Manning식과 Chezy

식이 등류 일때 성립하는 태생적인 한계에서 비롯되는 것으로 판단되며 이에 대한 오차의 전과

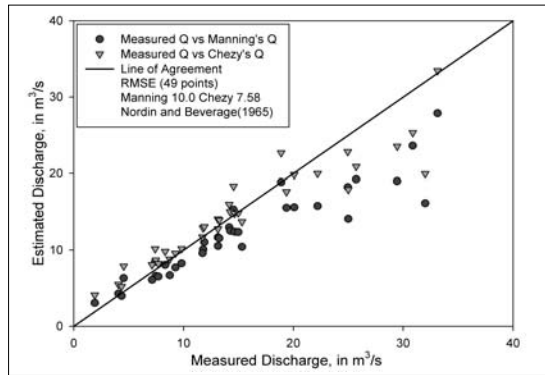
특성은 추후 연구를 통해 계속 수행되어야 할 것으로 판단된다.



(a) Song(1994) S75



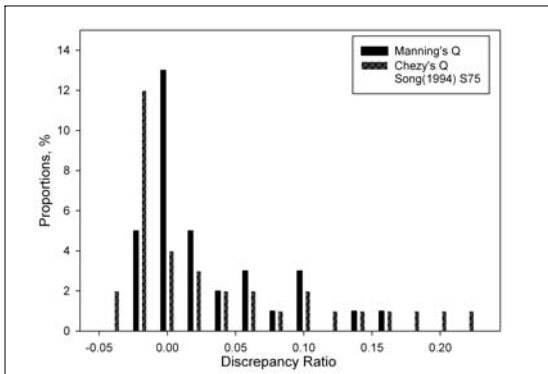
(b) Song(1994) S90



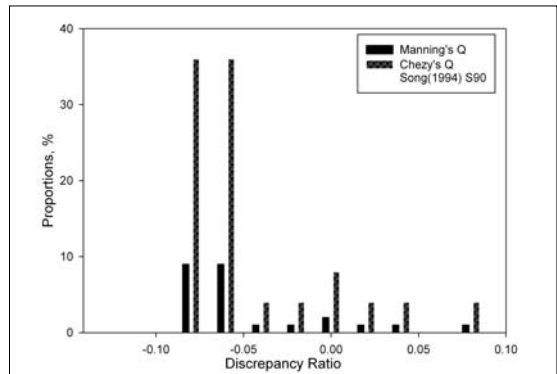
(c) Nordin and Beverage(1965)

그림 5. 실측된 유량와 계산된 유량 사이의 정확성 비교

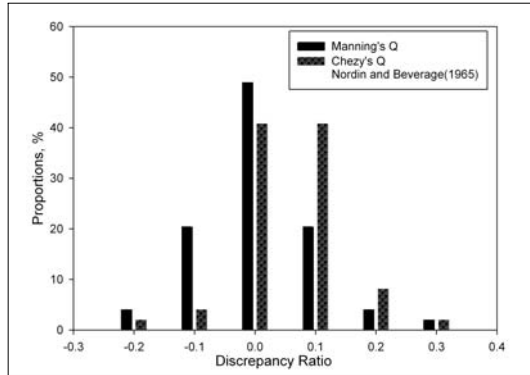
5. 산정된 유량의 정확성 분석



(a) Song(1994) S75



(b) Song(1994) S90



(c) Nordin and Beverage(1965)

그림 6. 실측된 유량과 계산된 유량 사이의 Discrepancy Ratio 분석

4장과 같이 산정된 유량과 실측된 유량의 정확성은 통계분석 기법인 Discrepancy Ratio 방법을 사용하여 그림 6 (a), (b), (c)와 같이 나타내었다. 계산된 값과 측정된 값의 비율에 상용로그를 취하여 그 결과를 오름차순으로 정리한 다음 백분율을 주어 그 양상을 바 형태로 쉽게 표현할 수 있다. 그래프가 0에 가까울수록 값이 잘 일치함을 의미하여 양의 값은 과대산정, 음의 값은 과소산정을 뜻한다. 결과를 살펴보면 전체적으로 0 부근에 많이 몰려 있음을 알 수 있었으며 매우 간단한 방법을 통하여 어떤 특정한 구간 내의 수리적 특성을 반영하는 대표 조도계수를 산정하여 구한 유량의 결과는 비교적 만족스러움을 알 수 있다.

6. 결 론

본래 Manning, Chezy 공식은 등류상태일때 성립하는 식으로 실제하천에서는 100% 일치할 수 없음은 이미 알려진 사실이다. 하지만 현재 수위와 유량의 관계만을 사용하는 수위-유량관계 곡선법에 비하여 비교적 하천의 수리적인 특성을 잘 반영할 수 있는 장점을 가지고 있고 본 논문에서 제안하는 방법인 경험적 매개변수를 추정하여 산정된 유량의 결과는 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 물론 경사에 따른 값의 과소산정 경향 혹은 실험실 수로에 비교하여 자연하천에서의 분상성에

대한 부분에 대하여 추후 지속적인 연구를 바탕으로 오차를 줄일 수 있는 방안을 강구함과 동시에 여러 하천 및 실험실 수로에 대하여 많은 시행착오가 있어야 할 것으로 판단된다. 또한 실제 사용 부분에서 본 방법이 수위-유량 관계곡선법 보다 적용이 어려울 수도 있지만 수위-유량 곡선법과 마찬가지로 데이터들이 축적이 되어 진다면 활용 가능성은 충분하다고 생각된다. 물론 본 방법 내에서 존재하는 오차의 전과특성은 향후 지속적인 연구를 바탕으로 더욱 많은 실험실 개수로 및 자연하천 데이터를 사용하여 많은 표본 결과를 바탕으로 신빙성 있는 방안을 강구해 나가야 할 것이며 개선되어 진다면 간편한 방법으로 수자원 분야에 쉽게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

7. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

8. 참고 문헌

권현한, 문영일, 최병규, 김민석. 2008. Hierarchical bayesian 방법을 이용한 수위-유량 관계 곡선 유도 및 불확실성 분석. 한국수자원학회 학

술대회 논문집 pp 1211-1214.

김경훈, 박준일, 신찬기. 2008. 최우도 모형을 이용한 수위-유량곡선식 개발. 대한환경위생공학회지, 대한환경위생공학회 70 : 83-93

김주영, 김한섭, 이정규. 2011. 실측 자료를 이용한 국내하천의 조도계수 특성검토. 한국수자원학회논문집 44(9) : 695-710.

이성현, 김대곤, 정태성, 정상만. 2011. 사진해석 방법을 활용한 국내 소하천의 조도계수 추정. 대한토목학회 정기학술대회 pp. 2045-2048.

Asgeir PØ, Trond R. 2009 Accounting for rating curve imprecision in flood frequency analysis using likelihood-based method. J Hydro 366(1-4) : 89-100

Buffington JM, Montgomery DR. 1999. Effects of sediment supply on surface textures of gravel-bed rivers. Water Resources Research 35(11) : 3523-3530.

Choo TH, Park SK, Lee SJ, Oh RS. 2011. Estimation of river discharge using mean velocity equation, KSCE Journal of Civil Engineering 15(5) : 927-938.

Cunge, JA, Holly FM, Jr and Verwey A. 1980. Practical aspects of computational river hydraulics. Pitman, Boston, Mass.

Fread DL. 1976. A dynamic model of stage-discharge relations affected by changing discharge. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-16, Office of Hydrology, National Weather Service, Washington, D.C.

Nordin CF and Beverage J P. 1965. Sediment transport in the Rio Grande, New Mexico. Professional paper 462-F, U.S. Geological Survey, Washington, D.C., pp.35.

Peterson AW and Howells RF. 1973. A Compendium of Solids Transport Data for Mobile Boundary Channels. HY-1973-ST3

Ree WO, Palmer VJ. 1949. Flow of water in channels protected by vegetativelinings. Tech. Bull. No. 967, Soil Conservative Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Sahoo GB, Ray C. 2006. Flow forecasting for a Hawaii stream using rating curves and neural networks. J Hydro 317(1-2) : 63-80

Song T. 1994. Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow. Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL.

Yu G and Lim SY. 2010. Modified Manning formula for flow in alluvial channels with sand-beds. Journal of Hudraulic Research 41(6) : 597-608.

- 논문접수일 : 2012년 09월 09일
- 심사의뢰일 : 2012년 09월 10일
- 심사완료일 : 2012년 10월 23일