

단면조도계수를 이용한 자연하천 유량 산정

이상진¹⁾·황만하²⁾·고익환³⁾·이배성⁴⁾

Lee, Sang Jin·Hwang, Man Ha·Ko, Ick Whan·Lee, BaeSung

요 지

자연하천에서의 유량측정은 직·간접유속측정을 통하여 이루어진다. 홍수기는 주로 봉부자에 의한 방법을 이용하고 평·갈수기에는 과살플룸이나 유속계에 의한 방법을 이용한다. 이 방법은 측정지점의 상태 또는 기술자의 숙련도에 따라 많은 오차를 발생시키고 연속적인 관측의 어려움을 가진다.

본 연구는 자연하천의 기본적인 수리학적 정보와 하천의 수리특성을 나타내는 조도계수를 유량규모별로 추정하여 유량을 산정하는 기법을 활용하여 자연하천 유량자료의 연속적인 획득이 가능한 프로그램을 개발하였다. 대상지점으로 금강 대청댐 하류 공주지점을 선정하여 2003년~2004년의 유량실측 자료를 바탕으로 유량 측정하고, 단면의 적절한 조도계수를 추정하여 유량을 산정하였다. 이를 통하여 기존 수위-유량관계곡선식의 신뢰성을 평가하고, 실측값에 근사한 유량을 연속적으로 산정할 수 있도록 하였으며, 이를 적용하여 향후 수문해석, 유출분석등에 활용하고자 한다.

1. 서론

수자원의 효율적인 관리 및 배분과 강우-유출관계를 규명하기 위해서는 하천의 정확한 유량측정이 선행되어야 하며, 장기간에 걸쳐 신뢰성 있는 유량자료의 획득은 대단히 중요한 기초작업이다.

일반적인 자연하천에서의 유량측정은 현장의 접근성 및 측정자의 작업숙련도 등의 문제로 인하여 측정자료의 신뢰도 저하는 물론 연속적인 유량자료의 확보가 어려운 실정이다. 또한 이상홍수가 발생할 경우 수위 관측소의 파손 및 오작동 등 여러 사유로 인해 계측을 하지 못하는 경우도 발생한다. 이러한 돌발홍수 등에 대한 관측의 실패는 수자원의 계획이나 관리에 필요한 수문분석의 불확실성을 증폭할 우려가 있다. 한편, 수공구조물이나 하천의 치수계획, 수자원의 이용·관리를 위해서는 홍수량의 크기 또는 첨두홍수량의 규모를 결정하는 것이 매우 중요하다. 대규모 홍수로 인한 첨두홍수량은 일반적으로 홍수빈도분석에 이용되며, 이는 종종 이상치로 나타나기도 하여 분석에 많은 어려움을 야기 시키기도 한다. 또한 하천의 홍수터 설계 등에 있어서 첨두홍수량이 실제 유량보다 크다면 홍수빈도분석 결과는 홍수량을 과대 추정하게 될 것이고 이에 따라 구조물은 과대설계가 될 것이다. 이렇듯 유량자료의 획득은 수자원분야에서 매우 중요한 일임에도 불구하고, 기존의 “실측에 의한 유량산정”으로는 신뢰도가 높은 유량자료를 얻는데 많은 어려움이 있다. 따라서, 이러한 문제점의 해결방안의 하나로 적절한 단면조도계수를 추정하고, 측정된 하천단면과 수위를 이용하여 유량을 산정할 필요가 있다. 이러한 방법은 특히 원격탐사분야에 의한 수문분석이나 광범위한 홍수범람 분석 시 유속이나 수위가 급격하게 변하는 지역에서 유량산정을 위해서는 많은 비용과 시간이 소요되는 것을 비추어 볼 때 유용한 방법이 될 것이다.

조도계수를 추정한 국내연구로 김원 등(1995)은 한강 하류부(팔당댐-인도교)구간의 하도에 대한 Manning 조도계수를 1차원 부정류 모형인 NETWORK모형을 이용하여 산정하였다. 이정규와 이창현(2004)은 FLDWAV 모형내의 수정 Newton-Raphson 방법을 이용하여 높은 정확도를 가진 조도계수를 구하고 한강하류부(팔당댐-전류)에 적용하여 유량에 대한 지수함수식으로 표현되는 조도계수 산정식을 제안하였다. 또한 이상호 등(2001)은 DWOPER 모형을 기반으로 한 부정류모형을 개발하여 낙동강 하도 3개 지점(현풍, 고령

1) 정회원 한국수자원공사 수자원시스템연구소 선임연구원·공학박사

2) 정회원 한국수자원공사 수자원시스템연구소 수석연구원·공학박사

3) 정회원 한국수자원공사 수자원시스템연구소 소장·공학박사

4) 정회원 한국수자원공사 수자원시스템연구소 위촉연구원·공학석사

교, 화원)의 수위를 관측하고, 제약전역최적화 기법을 통하여 적절한 조도계수를 추정하고 유량을 산정한 바 있다. 이러한 연구들은 주로 홍수유출수문곡선의 추정이나 하도의 홍수량을 분석하기 위해 적용되어 왔다.

따라서, 본 연구에서는 신뢰가 높고 객관성이 확보된 유량자료를 확보하기 위해 공주지점을 대상으로 수위 자료와 조도계수를 추정하는 기법을 활용하여 실측값에 근사한 유량을 연속적으로 획득할 수 있는 방안을 마련하고자 한다.

2. 단면조도계수를 이용한 유량산정 기법

단면조도계수를 이용한 자연하천의 유량 산정기법은 유량측정이 불가능 지역이나 유량측정 시설물이 설치되어 있지 않아 고수위 및 홍수위 측정이 곤란한 지역의 수위를 유량으로 환산하고자 할 때, 하천특성과 홍수조사에 의해서 유량을 산정하는 방법이다. 또한 대규모의 홍수가 발생했을 때 점유속 측정법에 의한 유량의 측정은 불가능할 경우 유용한 방법이다.

이러한 유량산정기법은 통상 경사면적법과 유사하여 주로 하천횡단면과 수면경사등을 이용하여 유량을 산정한다. 실제 자연하천에서의 흐름은 비정상류이며, 특히 홍수과인 경우의 흐름은 시간과 공간상에서 많은 변화가 다양하게 일어난다. 그러나 이러한 변화는 일반적으로 실무적으로는 작게 취급할 수 있기 때문에 흐름의 상태를 정상류로 가정해도 대개의 경우 충분한 정확도를 얻을 수 있다. 이때 유량은 대상하천의 하도 특성, 수면경사, 그리고 매닝식에 기초한 조도계수 등을 바탕으로 한 등류방정식을 기본으로 하여 추정된 조도계수를 사용하여 산정된다. 이에 따라 이 방법에 의한 유량산정은 적용구간의 선택이 매우 중요하다 (Darynple and Benson, 1967; Barnes and Davidian, 1978). 일반적으로 적용하기에 양호한 구간은 고수의 흔적이 명확하여 수면경사를 정의하기가 좋거나, 하도구간이 일정한 직선형이면서 3~5개의 횡단면을 구성할 수 있어야 하며, 쇄굴이나 퇴적이 되도록 최소한으로 발생하거나 이들의 변화를 고려할 수 있어야 한다.

에너지 보존법칙(Bernoulli equation)과 질량보존방정식(Manning's equation)으로 구성된 기본방정식을 그림 1과 같은 임의 하천구간의 두 단면에 적용여 유량을 산정한다.

$$h_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{f_{1-2}} + h_{e_{1-2}} \quad (1)$$

여기서, h_1 과 h_2 는 단면 1과 2지점에서의 수위이며, V_1 과 V_2 는 각 단면의 평균유속이다. g 는 중력가속도이며, $h_{f_{1-2}}$ 는 마찰손실, $h_{e_{1-2}}$ 는 흐름의 수축이나 확대에 의한 에너지 손실수두이다.

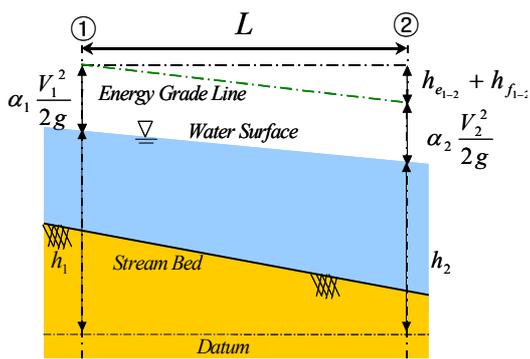


그림 1 하천구간 L에서의 수두

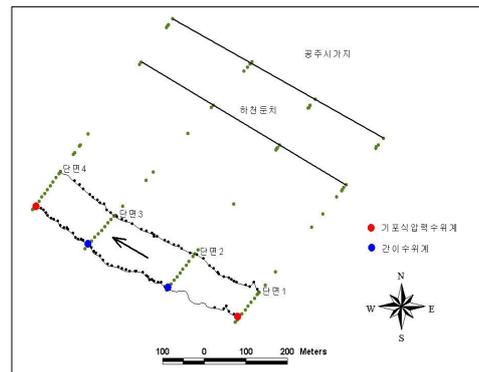


그림 2 공주지점 평면도

3. 자연하천 유량 산정 방안

3.1 대상 지점 특성

공주 TM수위표 지점을 기준으로 유량측정하기에 적합한 지점을 선정하기 위하여 현지답사를 실시하였으

며, 선정된 유량측정 단면에 대한 중·횡단 측량을 실시하였다. 공주수위표의 상하류 하천을 따라 유수의 흐름이 안정적이며 수로의 형상이 직선에 가깝고 접근성이 용이한 곳을 우선적으로 선정하였으며, 하도의 폭이 비교적 짧아 유속측정이 수월한 곳을 선정하였다. 또한, 선정된 구간에서 150m 간격으로 4개의 유량측정 단면을 선정하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 선정된 구간의 최상류 단면과 최하류 단면에는 기포식 수위계를 설치하여 연속적 수위관측을 실시하며, 중간 두 단면에서는 수위표를 이용한 간이수위계를 설치하여 유량측정시 보조수위표로 사용할 수 있게 하였다.

선정된 단면에 대한 측량은 약 500m에 달하는 하천 횡단면에 대해 각 단면별로 유량측정과 동시에 실시하였으며, 측량 결과는 그림 3과 같다. 또한 선정구간에서 하도의 형상 및 하천의 경사를 살펴보기 위해 하천의 종단 측량을 좌우안에서 각각 실시하였다. 이상의 상태는 전 구간에 걸쳐 잔차 및 모래가 주를 이루며 좌안은 일부 하천정비가 이루어 졌으며 우안은 모래언덕으로 유하폭은 하류부로 갈수록 완만하게 넓어진다.

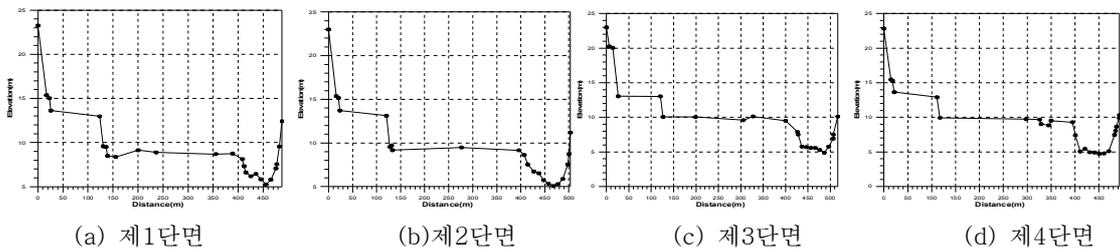


그림 3 공주지점의 횡단면 측량성과(2003년도)

3.2 수위 및 유량측정

연속적 수위관측을 위하여 각 단면의 좌안 암반에 수위계를 설치하였다. 그림 2에서와 같이 단면 1과 단면 4에는 독일 OTT의 기포식 압력수위계(Orphimedes)를 설치하여 매시간 간격으로 수위를 측정하였으며, 단면 2와 단면 3에는 간이 수위표를 설치하여 보조수위표로 이용할 수 있게 하였다. 또한 기포식 압력수위계의 영점 및 간이수위표의 영점에 대한 표고값을 수준측량을 통하여 정하여 수위의 독치를 표고값으로 환산하여 그 수면경사를 계산할 수 있도록 하였다. 각 단면에 설치된 수위계의 영점표고는 1단면 EL. 7.061m, 2단면 EL. 7.024m, 3단면 EL. 7.066m, 4단면 EL. 6.967m이다.

연구 대상구간인 공주지점의 유하폭은 약 80m전후이고 단면의 최저 수심이 약 2m이상으로 직접 도하에 의한 유량측정이 불가능하여 각 단면을 횡단하는 케이블을 설치하고 케이블을 따라 보트를 이용해 도하를 하며 유속을 측정하였다. 유속측정기기는 영국 Valport의 프로펠러식 하천유속계인 BFM-002를 사용하였으며 횡단구간을 약 8~12개의 구간으로 나누어 유속측정과 함께 수심을 측정하였다. 유속측정은 3점법을 실시하는 것을 원칙으로 하였으며, 유속측정시 최소 3회 이상 측정하여 점 유속측정에 의한 오차를 최대한 줄이고자 하였다. 유속측정자료를 바탕으로 유량환산은 중간단면법에 의한 방법을 사용하였다. 또한, 유속측정계의 정확도 검증을 위해 건설기술연구원의 유속계 검정을 실시하여 기계오차를 보정하였다.

연구 대상지점인 공주지점에서의 유량측정은 수위의 변동을 고려하여 2003년부터 2004년까지 2년간 실시하였으며, 측정결과는 표 1과 같다. TM수위는 유량측정과 동일한 시각의 공주수위표의 TM수위에 의한 유량환산 값이다. 수위-유량관계식은 “금강유량측정보고서”의 2002년 식 $Q=39.365(H+0.379)^{2.260}$, ($H=h+0.5$)을 사용하였다. 본 연구대상 전 단면(1~4 단면)에서의 유량측정(37.38~167.5 CMS)이 비교적 잘 이루어졌으나, 연구대상 지점 인근에 있는 공주 T/M수위 관측소의 수위-유량관계식에 의해 산정된 유량(58.21~188.3 CMS)과는 매우 상당한 차이를 보였다. 이와 같이 연구 대상구간이 짧음에도 불구하고 연구대상지점과 공주 T/M수위 관측소의 수위-유량관계식에 의해 산정된 유량과 차이를 보이는 이유는 공주 T/M 수위 관측소 상류 100m 지점에 수리구조물이 있어 수위관측소의 유량측정이 이루어지는 공주대교 일부지점에 사수지역이 발생하여 이 지점에서 평·갈수기시 유량측정이 제대로 이루어지지 못한 것으로 추정되어 공주 T/M수위 관측소의 평·갈수위에 대한 수위-유량관계식의 신뢰성은 결여된 것으로 판단된다.

표 1 유량측정결과

단면	2003-03-04		2003-03-20		2003-03-31		2003-04-16		2003-05-13		2004-04-22		2004-06-03		2003-06-18	
	수위 (EL.m)	유량 (CMS)														
1	7.921	110.0	7.596	65.1	7.496	61.0	7.416	53.0	8.381	167.1	7.380	42.60	7.490	58.00	8.202	143.05
2	7.879	109.0	7.554	67.4	7.452	60.1	7.370	52.5	8.337	167.5	7.337	41.10	7.444	57.90	8.154	143.02
3	7.843	109.8	7.520	62.0	7.427	59.1	7.345	52.2	8.301	166.8	7.303	41.46	7.416	58.450	8.127	142.87
4	7.827	107.7	7.507	61.0	7.417	56.3	7.337	55.0	8.282	167.2	7.290	37.38	7.402	52.847	8.101	140.77
TM 수위	0.79	125.3	0.51	82.7	0.45	74.9	0.40	68.6	1.12	188.3	0.31	58.21	0.44	73.60	1.06	175.81

4. 유량산정 프로그램의 적용

4.1 단면조도계수의 추정

본 연구에서 개발된 프로그램의 중요한 수리학적 특성인자는 수위정보와 단면의 조도계수이다. 수위정보는 각 단면에 설치된 수위계를 통하여 얻을 수 있으나, 단면조도계수는 하상의 피복상태와 유량의 규모 등을 고려하여 적당한 값을 추정하여야 한다.

단면조도계수를 이용한 유량산정을 위해서 각 단면에 설치된 수위계를 통하여 얻은 수위자료를 이용하여 수면경사를 산정하였다. 유량산정시 분석대상지역을 6개구간으로 구분한 결과 유량의 변화에 따라 조도계수를 추정하였다.

그림 4는 2004년도의 공주 T/M 관측소의 홍수기시 유량실측성과 자료를 추가하여 유량추정된 단면조도계수를 수위별로 도시한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 본 연구에서 추정된 단면조도계수는 고수위일수록 감소하는 일반적인 자연하천의 변화양상을 나타내었다. 그림 5은 유량의 증가에 따라 조도계수가 변화하는 경향을 반영한 그래프이다. 유량 실측시 신뢰도가 결여된다고 판단되는 두 번의 관측결과를 제외하고 플로팅한 결과 그림에서는 보는바와 2500cms를 기준으로 조도계수 $n_1=0.0654Q^{-0.1316}$ 와 조도계수 $n_2=0.4019Q^{-0.3260}$ 인 2단계로 유량규모로 구분하여 $R^2=0.9$ 이상의 높은 상관도를 가지는 단면조도계수 회귀식을 도출하였다.

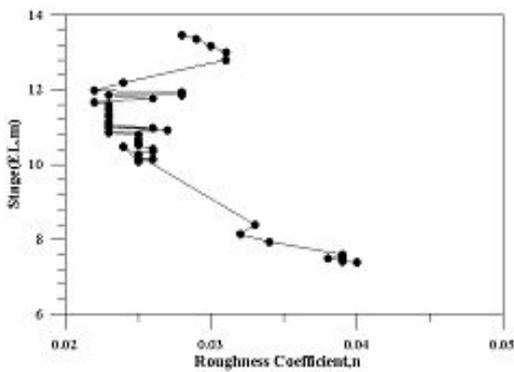


그림 4 수위변화에 따른 조도계수

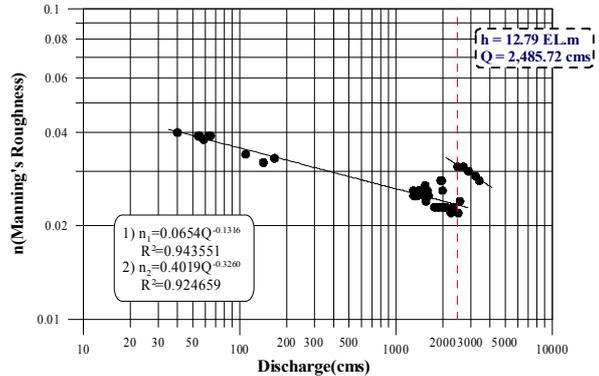


그림 5 유량과 조도계수(n)와의 상관관계 (공주 T/M수위 기준)

4.2 결과 비교 및 분석

그림 6은 앞서 추정된 조도계수를 이용하여 산정된 유량과 기존의 금강수계 유량측정조사 보고서(건설교통부, 2002)에서 산정한 수위-유량곡선을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 산정한 유량이 실측치에 근사한 값을 모의하는 것으로 나타났다. 또한, 측정을 실시한 0.4m~1.12m의 전 구간에 걸쳐 수위-유량곡선식 환산 유량값이 실측값에 비하여 과다하게 산정되었으나 홍수량이 커질수록 실측값에 근접하는 양상을 나타내었다.

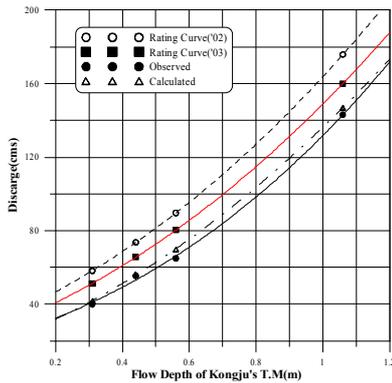


그림 6 공주 TM수위에 따른 유량변화 비교 ('04)

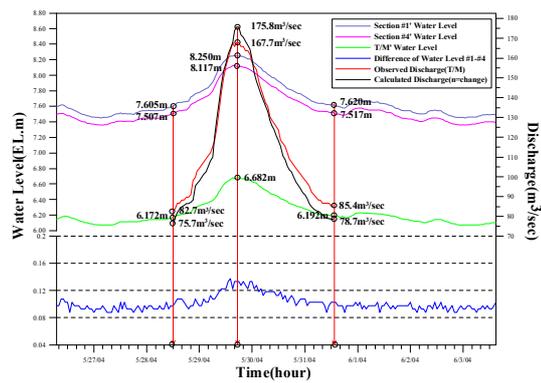


그림 7 연속수위에 따른 유량계산 예

그림 7은 수위자료를 이용하여 연속적인 유량자료가 얻어지는 예를 나타낸 것으로 본 연구에서 개발된 프로그램을 활용하면 연속수위에 따른 유량자료를 확보할 수 있다. 또한 공주 T/M 수위관측소의 수위-유량관계식에 의한 환산 유량과 모의유량 결과와 비교하였다. 그림에서 보는바와 같이 수문곡선의 상승부와 하강부의 증가 또는 감소하는 비율이 실제 자연하천이 Loop 형태의 유량임을 감안한다면 타당한 결과라고 판단된다.

5. 결론 및 향후 계획

자연하천의 기본적인 수리학적 정보를 활용하여 적절한 단면조도계수의 추정을 통하여 보다 신뢰성있는 유량값의 연속적인 획득이 가능하게 한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 수위자료 등 기본적인 수리학적 정보를 활용하여 유량을 산정하는 시스템을 구축하기 위한 프로그램을 개발하여 자연하천 유량자료의 연속적인 획득이 가능토록 하였다.
2. 관측된 유량과 추정된 조도계수를 이용하여 유량과 조도계수(n)와의 상관관계를 분석한 결과 2500cms를 중심으로 $n_1=0.0654Q^{-0.1316}$ 와 $n_2=0.4019Q^{-0.3260}$ 로 유량규모에 따른 단면조도계수의 회귀식을 도출하였다.
3. 공주 T/M 수위관측소의 수위-유량관계식에 의한 환산 유량과 개발된 프로그램을 적용할 경우와 비교한 결과 수문곡선의 상승부와 하강부의 증가 또는 감소하는 비율이 실제 자연하천이 Loop 형태의 유량임을 감안한다면 타당한 결과라고 판단된다.
4. 향후계획으로 자연하천에 있어서 실시간 유량 산정을 위한 사용자 위주의 편의시스템을 구축하여 공주 T/M수위 관측소와 같이 기존 수위-유량곡선식의 신뢰성을 판별함은 물론, 수문해석 및 유출분석에 활용하고자 한다.

6. 참고문헌

3. 건설교통부, 금강홍수통제소, “금강수계 유량측정조사 보고서”, 2002
5. 김원, 김양수, 우효섭, “부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정”, 한국수자원학회지, 제28권, 제6호, pp. 133-146, 1995.
6. 김원, 우효섭, 김양수, “1차원 St. Venant 방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍수류 특성 분석”, 한국수자원학회지, 제29권, 제1호, pp. 163-179, 1996.
10. 이상호, 강신욱, “수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 하천유량 간접추정”, 한국수자원학회논문집, 제34권 제5호, pp. 543~549, 2001.
11. 이정규, 이창현, “수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정”, 대한토목학회논문집, 제24권, 제1-B호, pp. 25-32, 2004.
12. American National Standards Institute, “American National Standard Programming Language FORTRAN: American National Standards Institute”, New York, N.Y, 1978.
13. Barnes, H. H., 1967, Roughness Characteristics of Natural Channels, Geological Survey Water-Supply Paper 1849, US Government Printing Office, Washington, D. C.