

수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 하천유량 간접추정 Stream Discharge Estimation by Hydraulic Channel Routing and Stage Measurement

이 상 호* / 강 신 옥**
Lee, Sang Ho / Kang, Shin Uk

Abstract

This research estimated stream discharges indirectly by hydraulic channel routing. Only stage data from three stage stations and river cross section data were used to estimate Manning roughness coefficients and to compute stream discharges. When the discharges were estimated, a stage-stage set of conditions was used for upstream-downstream boundary conditions. The research used the data from the upper Mississippi River. The hydraulic channel routings were performed by DWOPER (operational dynamic wave model). The global optimization program of SCE-UA was used to improve the roughness coefficient estimation module of the modified Newton-Raphson method in DWOPER. The results from SCE-UA were better. For the case study of a flood, most estimated discharges except a few show errors within 10 %.

keywords : roughness coefficient, stream discharge estimation, DWOPER, global optimization, SCE-UA

요 지

수리학적 하도추적으로부터 하천유량을 간접추정하였다. 짧은 하천구간의 세 지점 연속수위자료와 하천 단면 자료만을 사용하여 조도계수 추정과 하천유량 계산이 가능하였다. 유량의 간접추정 과정에서, 상류-하류 경계조건을 수위-수위 조건으로 사용하였다. 미국 미시시피 강의 상류 구간 자료가 사용되었고 수리학적 하도추적에는 DWOPER (operational dynamic wave model)를 이용하였다. DWOPER 모형에서 수정 Newton-Raphson법에 의한 조도계수 추정과정을 개선하기 위하여 SCE-UA 전역최적화 기법을 적용하였으며, SCE-UA 기법의 결과가 적은 오차를 보였다. 특정 홍수에 대하여 유량을 추정한 결과, 몇 개를 제외한 대부분의 계산유량이 10% 이내의 오차를 보였다.

핵심용어 : 조도계수, 하천 유량 추정, DWOPER, 전역최적화, SCE-UA

* 부경대학교 공과대학 건설공학부 조교수
Assistant Prof., Division of Construction Eng., Pukyong National University, Pusan, 608-739, Korea
(E-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

** 부경대학교 공과대학 토목공학과 석사졸업
Former Graduate Student, Department of Civil Eng., Pukyong National University, Pusan, 608-739, Korea

1. 서 론

하천의 유량을 측정하는 전통적인 방식은, 회전 날개 또는 회전 킵을 사용하는 전 유속계로 하천을 가로질러 가면서 여러 소단면의 유속을 측정하고 수심 또는 수위 관측에 의한 흐름면적을 곱하여 유량을 구하는 방식이다. 홍수의 빠른 유속은 붕 부자를 이용하여 측정하는 다음 유량을 구하는 방식을 사용한다. 최근에는 전자 유도 현상을 이용한 전자기 유속계도 사용하고 있다. 현대적인 유량관측 기법으로는 음파 도플러 유속분포 측정기(acoustic doppler current profilers)가 있으며 이는 수심별 유속을 한꺼번에 측정하면서 하천을 가로질러 유량을 측정한다. 그 외에도 전지와 도플러 현상을 이용한 전지와 표면 유속계(한국수자원공사, 1994)가 있으며 이 기기는 홍수의 표면 유속만을 측정하여 유량을 구한다.

우리나라는 홍수유속이 매우 커서 유량측정에 애로가 많다. 붕 부자를 사용한 홍수 유량측정은 측정 정확도가 떨어지고 세 명 이상의 많은 인원이 필요하다. 뿐만 아니라 측정 기술자의 수준이 상이하여 회전 날개 유속계 등에 의한 평상시 유량측정과 붕 부자에 의한 홍수 유량측정 모두 양질의 유량자료 획득으로 귀결되지 못하고 있다. 그 결과 약 300여 수위관측 지점의 수위-유량 식들이 신뢰적이지 못한 경우가 많다. 특히 홍수위와 저수위 영역에서는 오차가 매우 큰 경우가 있다.

최근에 전지와 표면 유속계의 개발로 홍수 유량 측정기술이 진일보하고 있으나, 이 방법의 한계는 0.5 m/s 이하의 낮은 유속에서 바람에 의한 파랑의 영향을 많이 받을 수 있어서 평상시의 저수 유속측정이 곤란한 점이다. 또한 음파 도플러 유속분포 측정기는 가격이 매우 비싸고 배를 이용해야 하므로 우리나라와 같이 홍수유속이 빠른 산악지역에서는 홍수 유속을 측정하기 어렵다.

본 연구에서는 이러한 어려움을 해소하는 방안으로서 측방유입류를 무시할 수 있는 짧은 하천 구간에서 연속한 세 지점의 수위관측이 수행되는 곳에 대하여 수리학적 하도추적을 수행함으로써 연속적인 하천유량 자료를 얻는 방법을 제시하고자 한다.

2. 수위 자료를 이용한 간접 유량추정 방법

2.1 수리학적 하도추적 모형

개산유량을 얻기 위한 수리학적 하도추적 모형으로

서 DWOPER(Fread, 1984), FLDWAV(Fread와 Lewis, 1998), CE-QUAL-RIV1(USACE, 1990)을 수집하였다. CE-QUAL-RIV1은 부정류 수질모의 프로그램이지만 부정류 계산만 별도로 수행할 경우 RIV1 프로그램을 사용할 수 있다. 그렇지만 이 모형에는 초기값을 자료입력만으로 처리하고 별도의 보완 모듈을 갖추지 않았다. 또한 조도계수 추정 모듈을 가지고 있지 않다. 반면에 FLDWAV나 DWOPER는 정상부동류 계산으로 초기값을 수정하여 사용하는 기능이 있고, 조도계수 추정도 자체적으로 수행할 수 있는 장점이 있다. FLDWAV는 댐 파괴파 모의 프로그램인 DAM BRK와 DWOPER를 결합시킨 특징이 있으나 전체 프로그램 길이가 약 16,000 줄에 이르러 연구목적에 불필요한 부분이 많았다. DWOPER는 약 4,000 줄의 크기를 가지고 있어서 다루기 간편하다. 위와 같은 장단점으로부터 간편성과 기능면에서 유리한 DWOPER를 수리학적 하도추적에 사용하였다.

2.2 조도계수 추정 방법

신뢰적인 하천유량을 계산하려면 조도계수의 정밀한 추정이 필수적이다. DWOPER 모형은 조도계수의 추정을 위하여 수정 Newton Raphson 법을 사용한다. 조도계수의 추정은 유량구간(또는 수위구간) 별로 수행되며 다음의 목적함수로부터 변형된 식을 사용한다.

$$\text{Min } \phi_j \{h_j [n(\bar{Q}_j)]; j=1, 2, \dots, J\} \quad (1)$$

$$\phi_j = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} (h_i - h_i') \quad (2)$$

여기서 n 은 조도계수, \bar{Q}_j 는 j 유량구간의 상류단과 하류단 유량 평균, M_j 는 j 유량구간에 포함된 수위의 총수, h_i 는 계산수위, h_i' 은 관측수위이다. 관측 수위와 계산수위의 차이가 없는 경우 식 (1)은 이론적으로 다음의 등식이 된다.

$$\phi_j \{h_j [n(\bar{Q}_j)]\} = 0; j=1, 2, \dots, J \quad (3)$$

즉 식 (3)은 j 유량구간의 ϕ_j 가 0이 되도록 n_j 를 결정하는 문제이다. 여기에 비선형 식의 해를 구하는데 사용하는 수정 Newton Raphson 방법을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 n_j^{k+1} &= n_j^k - \frac{\phi_j^k}{d\phi/dn|_j^k} \cong n_j^k - \frac{\phi_j^k}{\Delta\phi_j^k/\Delta n_j^k} \\
 &= n_j^k - \frac{\phi_j^k(n_j^k - n_j^{k-1})}{\phi_j^k - \phi_j^{k-1}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서 k 는 반복계산 지표이다. 수식어 '수정'을 붙인 이유는 식 (4)에서 미분계수 대신 차분식을 사용하였기 때문이다.

일반적으로 Newton-Raphson 방법으로 해를 구하는 경우에 초기값에 따라 해를 찾지 못하는 경우가 있다. 그리고 식 (1)과 (2)의 최적화 문제를 식 (3)과 같은 비선형 식의 해를 구하는 문제로 근사함으로써 추정된 n_j 값에 오차가 발생한다. 또한 식 (3)의 해가 여러 개인 경우 초기값에 따라서 서로 다른 해로 수렴할 수 있다. 수정 Newton Raphson 법의 또 다른 문제는 무제약(unconstrained) 헤엄이라는 점이다. 즉 해의 탐색과정에서 불합리한 영역으로 수렴되는 것을 통제할 수단이 없는 단점이 있다.

조도계수의 추정문제는 하도추적법의 상류-하류 경계 조건 사용과 연관되어 있다. DWOPER에서는 조도계수 추정을 위하여 상류-하류 경계조건으로 유량-수위 조합만을 사용한다. 국내에서도 DWOPER의 본래 기능 아래서 한강 하류와 낙동강 하류구간의 조도계수를 추정한 사례들이 있다(김원 등, 1995; 황의준과 전경수, 1997). 유량-수위 경계조건의 장점은 조도계수 n 의 변화에 대하여 계산된 유량 Q 가 순간하게 변한다는 점이다. Schaffranek과 Lai(1996)의 연구에 의하면 n 을 0.0360에서 $\pm 10\%$ 변화시켰을 때 계산된 유량의 유효숫자 세 자리 모두가 0.0360일 때의 계산값과 동일하였다. 그러나 수위-수위 경계조건에 의한 계산에서는 $\pm 10\%$ 의 조도계수 변화에 대하여 계산된 유량이 각각 약 -9% , $+11\%$ 변화하였다. 만일 수리학적 하도추적에 수위-수위 경계조건을 사용하고 조도계수 추정에 Newton-Raphson 법을 사용한다면 언급한 Newton-Raphson 법의 여러 가지 한계에 의하여 정확성이 떨어지는 조도계수가 추정되거나 조도계수 탐색과정의 민감한 유량변화로 인하여 수치해의 수렴이 불가능할 수 있다.

이러한 이유로 조도계수 추정에 제약 전역최적화 기법을 사용하게 되었다. 이에 합당한 여러 후보모형을 비교하지는 못하였으나 프로그램이 공개되어 있는 컴플렉스 혼합 진화 전역최적화 프로그램(Shuffled complex evolution-University Arizona; SCE-UA; Duan, 1991)을 사용하였다. 컴플렉스 혼합 진화 기법

은 최적화 과정에 전역 표본 형성(global sampling)과 컴플렉스 진화(complex evolution)를 도입한 CRS (Controlled Random Search) 방법을 개선한 것이다. CRS는 크게 두 가지 단계로 나눌 수 있다. 첫째는 주어진 해 공간(solution space)에서 무작위 표본을 형성한 후 지역 최소값 주변의 후진 점 군집(clusters)를 구성한다. 둘째는 각각의 군집에 대하여 지역 탐색기법으로 최소값을 찾아간다. 컴플렉스 혼합 진화 기법은 CRS 기법과 같이 무작위 표본 형성으로 시작하여, 목적함수 값의 오름차순으로 표본 점들을 배열한 뒤 이를 몇 개의 컴플렉스로 구분한다. 그 후 그림 1과 같은 반사, 확장, 축소, 수축의 진화(evolution) 과정을 통하여 최소값 주변으로 축소된 컴플렉스를 형성한다. 그 다음 서로 다른 컴플렉스의 점들을 섞어 새로운 컴플렉스를 형성한 뒤 다시 진화과정을 수행한다. 이로써 Duan이 사용한 다음의 Hosaki 함수에서 진화과정을 도시한 결과가 그림 2이다.

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= \left(1 - 8x + 7x^2 - \frac{7}{3}x^3 + \frac{1}{4}x^4\right)y^2 e^{-y} \\
 &; 0 \leq x \leq 5, 0 \leq y \leq 6 \quad (5)
 \end{aligned}$$

Hosaki 함수는 두 개의 극소값을 가진 함수이다. 그 중 최소값은 그림 2에서 'x'로 표시되어 있다. 그림 2(a)에는 표본으로부터 형성한 두 개의 컴플렉스가 각기 원(○)과 십자(+)로 표시되어 있고, 그림 2(b)는 진화결과이다. 컴플렉스 형성 점들을 서로 섞은 결과는 그림 2(c)이다. 그 후 진화, 혼합, 진화과정을 차례로 거치면 그림 2(d)의 결과를 얻는다. 즉 컴플렉스가 지역최적해 중에서 전역최적해 주변으로 수렴되어 있다. 컴플렉스 혼합 진화기법에서 사용할 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Min } \phi_T = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{M_j} (h_i - h_i')^2 \quad (6)$$

여기서, J 는 수위구간의 수, M_j 는 j 번째 수위구간에 포함된 수위의 총수, h_i 는 계산수위, 그리고 h_i' 은 관측수위이다.

2.3 수위-수위 경계조건에 의한 하천유량 계산

본 연구에서는 최종적으로 상류-하류 경계조건이 수위-수위 조건으로 주어지는 경우 수치해에 의하여 유량을 구하고자 한다. 입력자료는 짧은 하도구간의 세 지점 수위관측 자료와 하천 중형단측량 자료이다. 이 때 세 지점의 수위자료 중에서 중간지점의 수위자료는 하도 구

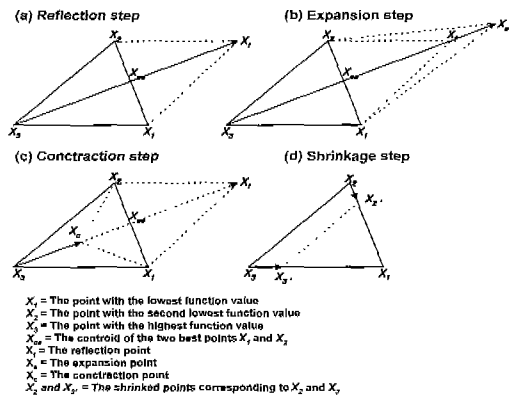


그림 1. 심플렉스를 이용한 진화과정 모식도(Duan, 1991)

간의 조도계수 추정에 사용된다. 여기에 중간지점 관측수위와 계산수위의 편차제곱합을 최소화하는 조도계수를 얻도록 콤플렉스 혼합진화 최적화 기법을 적용하고자 한다.

하도 구간의 조도계수는 보통 수위 또는 유량에 따라 서로 다른 값을 갖는다. Fread(1998)는 여덟 개의 수위 또는 유량별 조도계수로 하도 구간의 조도를 충분히 표시할 수 있다고 제시하므로 본 연구에서도 여덟 개를 추정하고자 한다.

3. 하천유량 간접추정 방법의 적용

3.1 유량-수위 경계조건에 의한 조도계수 추정 방법 비교

조도계수를 추정하거나 모형을 검증하기 위하여 신

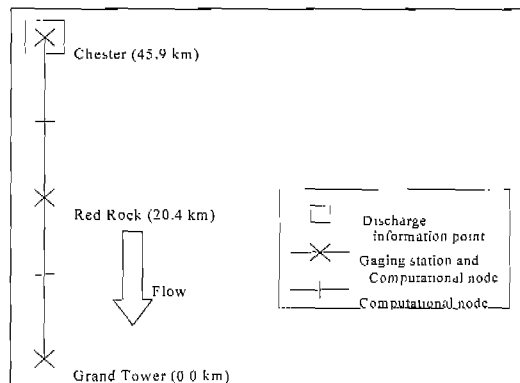


그림 3. 상류 미시시피 강의 하도 구간

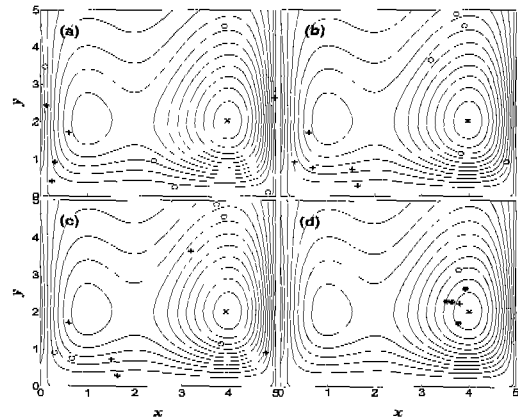


그림 2. Hosaki 함수에 대한 콤플렉스 혼합 및 진화과정 예

뢰적인 유량자료와 수위자료가 필요하다. 미국의 미시시피 강 상류 하도에 대한 DWOPER 수행자료 파일 (Fread, 1984)에는 경계조건이나, 조도계수 추정, 하도 추적 등에 사용된 유량, 수위자료가 수록되어 있으므로 이들을 본 연구에 사용하였다. Mississippi-Ohio-Cumberland-Tennessee 수계중 상류 미시시피 하도 구간에는 5 개의 수위관측소가 위치한다. 그 중 Chester, Red Rock, Grand Tower 관측소 구간을 선정하였다(그림 3). 하도 연장은 45.9 km, 하도경사는 평균 0.127 m/km이다. 적용된 홍수사상은 1970년에 발생한 지속기간이 83 일인 자료이다.

먼저 유량-수위 경계조건을 사용하여 Newton-Raphson 법에 의한 조도계수를 추정하였다. Chester 수위관측소의 관측유량을 상류 경계조건, Grand Tower 수위관측소 지점의 관측수위를 하류 경계조건으로

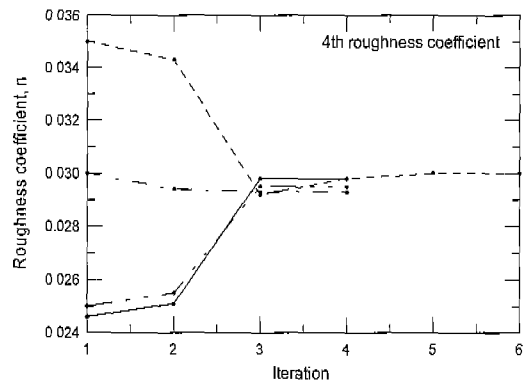


그림 4. 수정 Newton-Raphson 기법에 의한 조도계수 추정

하고, Chester 및 Red Rock 수위관측소 지점의 관측수위와 계산수위를 이용하여 식 (2)~(4)의 방법으로 두 구간 조도계수를 추정하였다. DWOPER에서 공간미분항을 차분할 때 사용되는 시간축 차분 가중계수(θ)는 0.60으로 하였으며, 조도계수는 유량규모별로 8 개로 나누었다. 수리학적 하도추적을 수행하여 조도계수를 추정된 결과 중 네 번째 유량구간의 조도계수에 대해 최적화 반복횟수별로 조도계수가 수렴해 가는 것을 그림 4에 나타내었다. 다른 유량구간 조도계수는 유사한 형태를 보이므로 생략하였다. 초기 조도계수로 0.025 ~ 0.035 사이의 값을 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기 조도계수에 따라 서로 다른 값으로 수렴하였다. 추정결과 목적함수의 값은 3.65 m^3 이었다.

수렴값들은 0.0293~0.0300 사이에 있으며 약 0.0007의 최대 차이를 보인다. 0.030을 기준으로 하면 2.3 %의 차이이다. 이러한 조도계수 차이가, 다른 흐름조건이 동일한 경우 유량차이에 미치는 영향을 개략적으로 살펴보고자 등류의 경우 Manning 식을 사용한 민감도를 분석하였다. 하천폭이 넓은 수로의 단위폭당 유량(q)을 Manning 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$q = \frac{1}{n} h^{5/3} S_0^{1/2} \quad (7)$$

여기서 n 은 조도계수, h 는 수심, S_0 는 하상경사이다.

h 는 일정하다고 가정하고, 위 식을 n 에 대해 편미분하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial q}{\partial n} = -\frac{1}{n^2} h^{5/3} S_0^{1/2} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 조도계수 차이에 의한 유량차이를 q 에 대한 비로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta q}{q} \approx \left(\frac{\partial q}{\partial n} \Delta n \right) / q = -\frac{\Delta n}{n} \quad (9)$$

위 식은 조도계수 추정오차 비율의 절대값만큼 유량오차의 절대값이 발생하며 변화부호는 반대임을 말한다. 즉 Manning 식만으로 간략히 살펴보면 다른 흐름조건이 동일한 경우에 +2.3 %의 조도계수 추정오차가 -2.3 %의 유량 오차를 발생시키는 계산 예이다.

DWOPER의 조도계수 추정과정을 콤플렉스 혼합 진화 기법으로 변경한 뒤에, 수정 Newton-Raphson 방법의 자료를 동일하게 사용하여 조도계수를 추정하였다. 그림 5는 수리학적 하도추적과 함께 조도계수를 추

정해 가는 과정을 보이고 있다. 초기 조도계수가 어떤 값이든 하나의 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있으며, 목적함수의 값은 1.53 m^3 이었다.

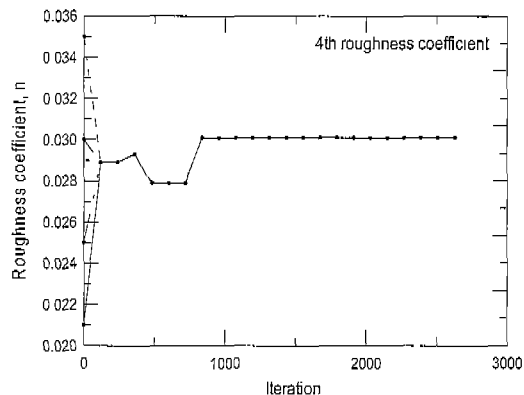


그림 5. 콤플렉스 혼합 진화 기법에 의한 조도계수 추정

위의 두 가지 방법으로 구한 조도계수들을 사용하여 유량-수위 관계조건으로 수리학적 하도추적을 수행하였다. 그림 6은 상류단 Chester 수위관측소 지점의 계산수위와 관측수위의 비교결과이다. 고수위 부분에서는 두 가지 방법 모두 유사한 결과를 보였지만, 저수위 부분에서는 수정 Newton-Raphson 기법으로 구한 조도계수를 사용한 경우는 0.3 m 정도의 조금 큰 편차를 보인 반면 콤플렉스 혼합 진화 기법은 이보다 적은 편차를 보였다. 콤플렉스 혼합 진화 기법에 의해 구한 조도계수를 사용한 경우는 평균제곱오차 평방근(root mean square error)이 0.133 m, 평균편차(mean bias)는 0.0216 m이었고, 수정 Newton-Raphson 방법에 의해 구한 조도계수를 사용한 경우는 평균제곱오차 평방근은 0.210 m, 평균편차는 0.145 m이었다. 이로써 콤플렉스 혼합 진화 기법이 수정 Newton-Raphson 방법보다 적합한 조도계수를 추정하고 작은 오차로 수리학적 하도추적을 수행한다는 점을 확인하게 되었다.

두 방법으로 추정된 조도계수 차이가 수위-수위 관계조건에서 유량모의에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 관계조건을 모두 수위로 변경하고서 모의하여 상류단 Chester 지점의 계산유량을 관측유량과 비교하였다(그림 7). 수정 Newton-Raphson 방법에 의해 조도계수를 구한 경우는 저유량 부분에서 최대 10 % 정도의 절대오차를 보였고 평균절대오차는 5.23 %이었다. 그리고 콤플렉스 혼합 진화 기법에 의한 경우는 저유량

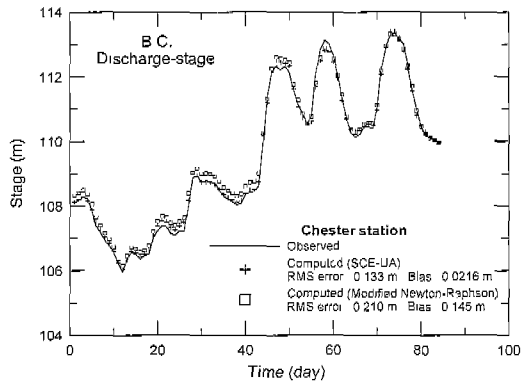


그림 6. 수정 Newton-Raphson 법과 콤플렉스 혼합진화 기법의 적용결과 비교

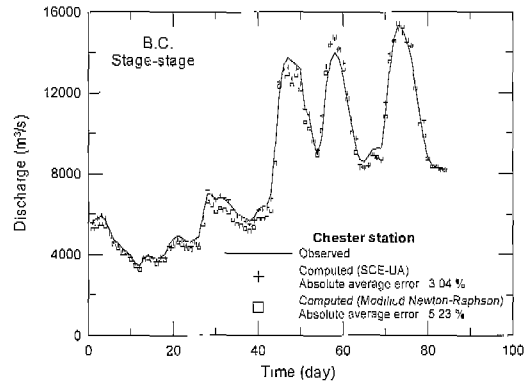


그림 7. 유량-수위 경계조건에서 추정된 조도계수를 사용하여 수위-수위 조건으로 모의한 결과

부분에서 관측유량과 보다 차이가 적었으며 평균절대오차는 3.04 %이었다. 앞에서 수정 Newton-Raphson 방법에 의한 조도계수가 초기값에 따라 2.3 % 차이가 날 수 있음을 보였고, 조도계수 차이는 동일한 비율로 유량차이로 귀결됨을 간략한 Manning 식으로부터 살펴 보았다. 수리학적 하도추적에서도 수정 Newton-Raphson 방법의 평균절대오차가 2.2 % 더 크게 발생한 점은 일관성 있는 결과이다.

3.2 수위-수위 경계조건에 의한 조도계수 추정 및 유량 모의

컴플렉스 혼합 진화 기법이 기존의 수정 Newton-Raphson 방법보다 개선된 조도계수 추정결과를 보임에 따라, 인접한 세 수위관측소의 수위자료만으로 조도계수를 추정하고, 수위-수위 경계조건으로 수리학적 하

도추적에 의하여 유량을 간접 추정하였다. 이를 위하여 Chester와 Grand Tower의 수위를 각각 상류-하류 경계조건으로 설정하였고, Red Rock의 관측수위와 계산수위의 편차계급을 적게 하도록 식 (6)과 같은 목적함수를 사용하였다. 먼저 수정 Newton-Raphson 방법으로 조도계수를 추정하려고 하였으나 수치해가 수렴되지 않았다. 이에 대한 명확한 이유를 분석하지는 못하였으나, 수정 Newton-Raphson 방법의 반복계산 과정에서 조도계수 변화를 제약할 수 없다는 점과 수위-수위 경계조건에서는 조도계수 변화에 따라 계산유량이 민감하게 변한다는 점이 수치해의 발산을 초래한 것으로 생각된다. 컴플렉스 혼합 진화 기법에 의하여 조도계수를 추정한 내용은 다음과 같다.

본래의 DWOPER 수행에서는 하도 구간을 Red Rock을 중심으로 두 기로 분할하여 조도계수를 추정하

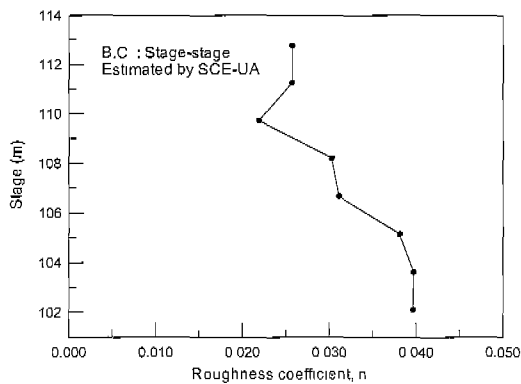


그림 8. 수위-수위 경계조건에 의한 Chester~Grand Tower 구간의 조도계수 추정결과

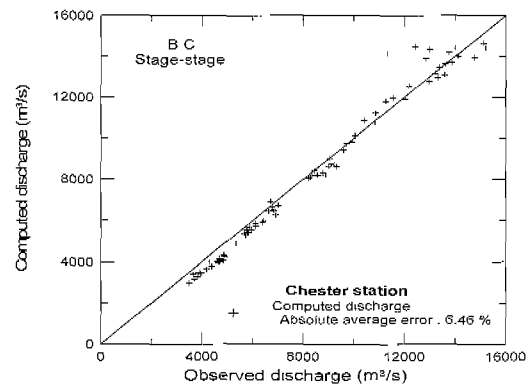


그림 9. 수위-수위 경계조건의 조도계수 추정에 의한 계산 유량

였지만 진제 하도 구간이 동일한 조도계수를 가진 것으로 하였고, 수위구간은 8 개의 층으로 나누었다. 추정된 조도계수는 그림 8과 같다. 조도계수는 0.0219 ~ 0.0397 사이에 추정되었으며 수위 109.7 m일 때를 제외하면 대체로 수위가 높아질수록 작은 값을 가진다. 이를 사용하여 수리학적 하도추적에 의하여 상부단 Chester 지점의 유량을 계산한 결과는 그림 9에 나타내었다. 계산유량이 대각선에 위치하면 관측유량과 동일한 것을 의미한다. 관측유량과 계산유량의 평균절대 오차는 6.46 %이었다. 최대절대오차는 24.8 %이었으나 다섯 개를 제외하고는 모두 절대오차가 10 % 이내였다.

4. 결 론

자연하천의 짧은 구간에서 세 지점의 연속수위자료와 여러 하천 단면자료를 이용하여 조도계수를 추정하고 수리학적 하도추적에 의하여 유량을 간접 추정하였다. 수리학적 하도추적에는 DWOPER를 사용하였으며, 미시시피 강의 Chester-Red Rock-Ground Tower 하도구간에 대한 자료가 이용되었다. DWOPER 모형의 수정 Newton-Raphson 조도계수 추정방법은 초기값에 따라서 조도계수 수렴결과가 달라지는 문제가 있고, 조도계수 추정에서 상류-하류 경계조건을 유량-수위로 하여야 하는 한계가 있다. 이를 개선하고자 전역 최적화 기법의 일종인 콤플렉스 혼합진화 기법을 도입하였으며 수정 Newton-Raphson 방법의 조도계수 추정 결과와 비교한 결과는 다음과 같다.

유량-수위 경계조건을 사용하여 수정 Newton-Raphson 방법으로 구한 조도계수는 초기값에 따라 조금씩 다른 값으로 수렴된 반면, 콤플렉스 혼합진화 기법은 동일한 값으로 수렴되었다. 유량-수위 경계조건으로 두 방법에 의하여 추정된 조도계수 차이가 계산유량에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 경계조건을 수위-수위로 변경하고서 Chester 지점의 모의된 유량과 관측된 유량을 비교하였다. 그 결과 수정 Newton-Raphson 방법의 평균오차는 5.23 %였고, 콤플렉스 혼합진화 기법의 평균오차는 3.04 %였다. 수위-수위 경계조건을 사용하여 수정 Newton-Raphson 방법으로 조도계수를 추정하는 경우는 수치가 수렴되지 않은 반면에, 콤플렉스 혼합진화 기법을 사용한 경우는 적절한 조도계수를 추정할 수 있었다. 이를 이용하여 하천유량을 간접 추정할 수 있었다.

감사의 글

본 연구를 위하여 자료 취득에 도움을 주신 한국수자원공사 이한구 과장님과 소양강댐 임경희, 김한석 대리님께 심심한 감사의 뜻을 전합니다. 이 연구는 부경대학교 발전기금 연구비에 의하여 수행되었으며 연구비 지원에 깊이 감사드립니다. 특허출원(출원번호 10-2001-0000623)에 도움주신 이우석 님께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 권신부 (1990). 북한강, 소양강 하천정비기본계획.
 김원, 김양수, 우호섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정." 한국수 자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
 한국수자원공사 (1994). 대하천 유량 지동 측정설비 개발(2차년도), WRII-WR-94-1.
 황의준, 전경수 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정." 한국수자원학회지, 한국수 자원학회, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
 Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*, Ph.D. dissertation, Dept. of Hydrol. and Water Resour., Univ. of Arizona, Tucson.
 Fread, D.L. (1984). *National Weather Service operational dynamic wave model*, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, Md.
 Fread, D.L., and Lewis, J.M. (1998). *The NWS FLDWAV model: Theoretical description/user documentation*, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Spring, Maryland.
 Schaffranck, R.W., and Lai, C. (1996). "Friction-term response to boundary-condition type in flow models." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 2, pp. 72-81.
 US Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station (1990). *CE-QUAL-R1V1: A dynamic one-dimensional (longitudinal) water quality model for stream: user's manual*, Instruction Report E-90-1, Environmental Laboratory, Vicksburg, Mississippi.

(논문번호:01-004/집수:2001.01.26/심사완료:2001.08.23)