

가변 조도계수 부정류 계산모형 Unsteady Flow Model with Variable Roughness Coefficient

김 한 준* / 전 경 수**

Kim, Han Joon / Jun, Kyung Soo

Abstract

An unsteady flow model is developed that allows variable roughness coefficient for each computational point according to its spatial position and the discharge. A step function or a power function can be used for functional relation between the discharge and the Manning's roughness coefficient. The model is applied to the reach of the South Han River between the Chungju Dam and Paldang Dam, and model parameters are estimated by optimization. Estimated parameters of both the step function model and the power function model show that Manning's roughness coefficient decreases as the discharge increases. This tendency is more noticeable for the upstream reach of Yeosu compared to the downstream reach. It turns out that the stages calculated by the variable roughness coefficient model agree better with the observed ones than those by the conventional fixed parameter model.

Keywords : unsteady flow model, variable roughness coefficient, optimal estimation, South Han River

요 지

공간적 위치 및 유량 값에 따라 각 계산점마다 조도계수의 값이 달리 주어질 수 있도록 하는 가변 조도계수 부정류 계산모형을 수립하였다. 유량과 조도계수의 관계식으로는 계단함수 또는 멱함수를 적용할 수 있도록 하였다. 수립된 모형을 충주댐부터 팔당댐까지의 남한강 구간에 적용하여 최적화에 의한 매개변수의 추정을 수행하였다. 가변 매개변수 모형의 보정 결과, 계단함수 모형 및 멱함수 모형 모두 유량이 커질수록 조도계수가 감소하는 경향이 일관되게 나타났다. 이러한 경향은 여주 지점 상류구간의 경우에 더욱 현저한 것으로 나타났다. 가변 조도계수 모형의 매개변수 추정에 따른 오차가 고정 조도계수 모형의 경우보다 작아짐을 알 수 있었다.

핵심용어 : 부정류 계산모형, 가변 조도계수, 최적 추정, 남한강

1. 서 론

하천 부정류에 대한 수리학적 계산을 위한 수치해법은 다양하나, 현재에는 Preissmann의 4점 음해법(Cunge 등, 1980; Liggett와 Cunge, 1975)을 사용하는 유한 차분법이 안정성, 정확성 및 적용성이 우수한 것

으로 평가되어 가장 널리 사용되고 있다(Fread와 Lewis, 1998; Schaffranek 등, 1981; Samuels와 Skeels, 1989). 수치해법의 정확성 외에 계산모형의 적절성을 좌우하는 중요한 요소는 모형의 매개변수로서, 수리학적 계산모형의 경우에는 조도계수가 지배적인 매개변수가 된다. 따라서 모형의 적용대상 하도에 대한 관측 자료를 이용한 조도계수의 추정이 요구된다.

* (주)유신 코퍼레이션 수자원부

Water Resources Engineer, Yooshin Engrg. Corporation, 832-40 Yoksam-Dong, Kangnam-Gu, Seoul 135-936, Korea

** 성균관대학교 토목환경공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

(E-mail: ksjun@yurim.skku.ac.kr)

수리학적 계산모형은 물리적 현상에 기초한 모형이고 매개변수의 수도 많지 않아서, 현상이 복잡하여 개념적 요소와 매개변수의 수가 많은 유역 수문모형 등 여타 수공모형에 비하여 매개변수 추정에 관해서 수행된 연구가 상대적으로 적은 편이다. Becker와 Yeh (1972; 1973)는 단면형이 일정한 하도에 대하여 에너지 경사 항을 하도의 단면특성과 조도특성을 대표하는 두 개의 매개변수를 사용하여 모형화하고, 관측치와 계산치간 오차 제곱합을 최소화하는 것을 목적함수로 하여 영향계수법에 의한 매개변수의 최적 추정 방법을 제시한 바 있다. Fread와 Smith(1978)는 수정 Newton-Raphson 반복계산법을 사용하여 오차의 합을 영에 가장 근사하게 하는 조도계수의 값을 최적치로서 추정하였다. 그들은 수위 관측 지점들을 기준으로 전체 하천 구간을 다수의 소구간으로 구분하고, 가장 상류구간에서 시작하여 하류 방향으로 각 소구간별 조도계수를 순차적으로 추정하였으며, 또한 조도계수가 유량에 따라 부분 선형적(piecewise linear)으로 변화한다고 두고, 각 유량규모별 조도계수를 추정하였다. Fread와 Smith (1978)의 매개변수 추정기법은 미국 기상청 FLDWAV 모형(Fread와 Lewis, 1998)의 보정기법으로 적용되고 있다. Wormleaton과 Karmegam(1984)은 하도의 단면 형상을 사다리꼴로 가정하고, 단면형 및 조도와 관련된 매개변수들을 오차 최대치의 최소화 및 오차제곱합의 최소화를 목적함수로 하는 각각의 경우에 대하여 추정하였다. Wasantha Lal(1995)은 특이치 분해(singular value decomposition) 방법을 적용하여 조도계수의 추정을 수행한 바 있다. 국내의 연구로는 김원 등(1995), 김상호와 김원(2002) 및 이정규와 이창현(2004)이 FLDWAV 모형을 사용하여 Fread와 Smith(1978)의 매개변수 추정기법을 한강 하류부에 적용하여 구간별, 유량규모별로 조도계수의 추정을 수행하였으며, 황의준과 전경수(1997)는 계단함수형의 가변 매개변수 모형을 이용하여 역시 한강본류 구간에 대하여 구간별, 유량규모별 조도계수를 추정한 바 있다.

자연하천에 관한 부정류 계산모형의 조도계수는 하상재료의 특성에 따라 좌우되는 표피마찰뿐만 아니라 하상의 굴곡 등 단면형의 변화에 따른 형상손실 및 하천의 사행에 따른 손실 효과 등을 포괄적으로 내포하고 있기 때문에 모든 하천구간별로 상이한 값을 갖는 것이 일반적이다. 또한 조도계수는 흐름조건, 즉 유량 또는 수위의 변화에 따른 가변성을 갖고 있기 때문에, 흐름이 시간적으로 변화하는 부정류의 경우에는 시간적으로도 값이 변화하도록 하는 것이 일반적이라 할 수 있다. 유량이 증가할수록 추정된 조도계수의 값이 감소하는

것은 한강을 대상으로 한 최근의 연구결과들에서도 일관되게 나타나고 있다(김원 등, 1995; 황의준과 전경수, 1997; 김상호와 김원, 2002; 이정규와 이창현, 2004). 이와 같은 조도계수의 공간적 변화 및 유량 규모에 따른 변화를 고려한 조도계수의 추정이 가능한 공용 소프트웨어로서 FLDWAV 모형(Fread와 Lewis, 1998)이 있다. FLDWAV 모형은 소구간별로 다른 값을 갖도록 조도계수를 추정할 수 있으나, 소구간 구분이 관측소의 위치에 따라 좌우되기 때문에 실제 하도의 물리적 특성의 변화에 따른 구분과는 거리가 있다.

이러한 조도계수의 시간적, 공간적 가변성을 반영하기 위해서는 각 계산점에서의 조도계수가 그 계산점이 위치한 하천구간 및 유량에 따라 매 상이한 값의 조도계수가 부여될 수 있도록 할 필요가 있다. 황의준과 전경수(1997)는 이러한 가변 매개변수 모형을 한강본류 구간에 적용한 바 있다. 유량과 조도계수의 관계식으로서 계단함수를 사용하였으며, 이러한 가변 매개변수 모형을 사용할 경우 종래의 고정 매개변수 모형에 비하여 정확한 모의가 가능함을 입증하였다. 본 연구에서는 남한강 수계에 대하여 가변 매개변수 모형을 수립하여 매개변수의 추정을 수행한다. 유량과 조도계수의 관계식으로는 계단함수 및 멱함수를 적용하여, 각각의 경우에 대한 조도계수의 추정결과를 기존의 고정 매개변수 모형의 경우와 비교함으로써 그 개선 효과를 살펴보고자 한다.

2. 계산모형

계산모형으로는 폐합형 수계에 관한 모형을 사용하였다. 폐합형 수계 모형은 가장 일반적인 부정류 계산 모형으로서, 이를 수지형 수계 또는 단일하도에 적용할 경우의 계산과정은 수지형 시스템 또는 단일하도에 대한 모의모형을 적용하는 각각의 경우와 실질적으로 같게 된다.

2.1 지배방정식 및 수치해법

폐합형 수계에 관한 계산모형의 지배 방정식은 수로 지배방정식과 절점 지배 방정식들로 구성된다. 하도 흐름에 관한 수로 지배방정식은 다음식 (1) 및 (2)와 같은 연속방정식 및 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{Q |Q|}{K^2} = 0 \quad (2)$$

여기서 $Q = Q(x,t)$ 및 $y = y(x,t)$ 는 각각 유량과 수위를 나타내며, A 와 K 는 흐름단면적과 통수능으로서 각각 y 의 함수이다. a 는 운동량 보정계수, g 는 중력가속도이며, x 와 t 는 각각 공간 및 시간좌표를 나타낸다. 통수능 K 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (3)$$

여기서 R 은 등수반경이며, n 은 Manning의 조도계수이다.

점점 지배방정식은 연속방정식 (4)와 등수위 조건식 (5)로 구성된다.

$$\sum_{k=1}^{L_j} Q_{j,k} + Q_{\text{ext}}(j,t) = 0, \quad j = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$y_{j,k} = y_j, \quad k = 1, \dots, L_j; \quad j = 1, \dots, J \quad (5)$$

여기서 J 는 절점의 총수, L_j 는 절점 j 에 연결된 수로의 총수이다. $Q_{j,k}$ 은 수로 k 로부터의 유입량 또는 수로 k 로의 유출량이며 $Q_{\text{ext}}(j,t)$ 는 시각 t 에서의 기지의 외부 유출입량으로서 지천 유입량, 상류단 경계에서의 유입량, 하류단 경계에서의 유출량 등이 여기에 포함된다. $Q_{j,k}$ 와 $Q_{\text{ext}}(j,t)$ 는 양의 값일 경우 절점으로의 유입량을, 음의 값일 경우 유출량을 각각 의미한다.

$y_{j,k}$ 는 절점 j 와 k 를 연결하는 수로의 절점 j 측 끝단 계산점에서의 수위를 나타낸다.

수로 지배방정식을 Preissmann의 4점 음해법 (Liggett과 Cunge, 1975; Cunge 등, 1980)에 의하여 차분화하면 수로상의 각 계산점에서의 수위 및 유량과 절점 수위에 관한 비선형 연립방정식이 구성되며, 그 해

는 Newton-Raphson 방법을 적용하여 구한다. Newton-Raphson 방법을 적용하여 구성되는 수위 및 유량 보정치에 관한 선형 연립방정식의 해법으로는 수로에 대한 forward sweep, 절점 수위 보정치의 계산 및 수로에 대한 return sweep으로 구성되는 폐합형 double-sweep 알고리즘을 사용한다. 전반적인 계산모형에 관한 상세한 내용은 Holly 등(1990) 및 황의준(1997)에 상세히 기술되어 있다.

2.2 가변 매개변수 모형

식 (3)의 조도계수 n 은 가변 매개변수로 다음과 같이 표시할 수 있다.

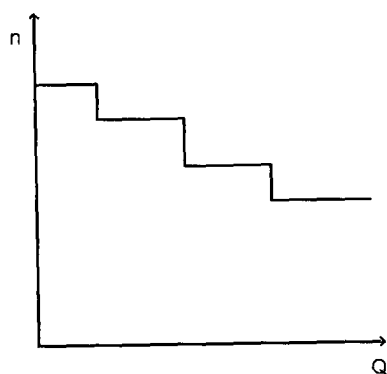
$$n = n(x, Q(x,t)) \quad (6)$$

즉, 각 계산점에서의 조도계수는 그 계산점의 위치 및 유량에 따라 결정되며, 유량은 시간에 따라 변하므로 조도계수는 일반적으로 시간 및 공간적으로 변화하게 된다. 유량과 조도계수의 관계식으로서 계단함수 또는 멱함수를 적용할 수 있도록 하였다(그림 1 참조). 조도계수의 공간적 변화에 대해서는 소구간 별로 다른 값을 갖는 것으로, 즉 계단함수 형태로 변하는 것으로 하였다. Newton-Raphson 보정량 방정식의 계수값 산정 시, 조도계수는 이전 반복계산 단계에서 구한 유량에 따라 그에 해당하는 값을 유량-조도계수의 관계식으로부터 구하여 부여하도록 하였다.

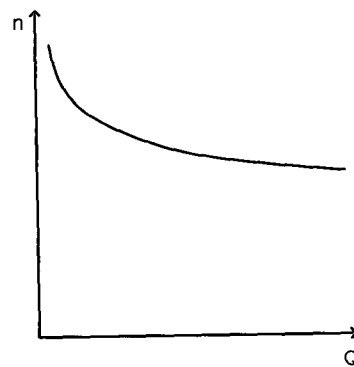
3. 모형의 적용

3.1 대상하천 구간 및 모형의 구성

가변 매개변수의 추정 및 홍수위 검증을 위한 모형의 적용 대상구간은 한강수계의 남한강 구간으로서 팔



(a) 계단함수 모형



(b) 멱함수 모형

그림 1. 가변 조도계수 모형에서의 유량에 따른 조도계수의 변화 관계곡선

당담부터 충주 조정지댐까지의 구간에 대하여, 모형을 구성하였다. 부류류 계산모형의 구성을 나타내는 모식도는 그림 2와 같다. 청평댐부터 남북한강 합류점까지는 상당한 거리가 있기 때문에 수리학적 계산을 수행하였다. 따라서 모형 전체적으로는 수지형 수계 모형이 된다. 모형의 상류단인 충주 조정지댐 및 청평댐, 하류단인 팔당댐, 유입지천인 경안천, 흑천, 복화천, 양화천, 청미천, 섬강 등 6개의 지천과 남한강과 북한강의 합류점, 각 댐의 직상류 및 직하류에 각각 절점이 위치하도록 구성하였으며 절점들은 인접 절점들과 각각 한 개의 수로로 연결하였다. 따라서 모형의 구성은 총 10개의 절점과 9개의 수로로 구성하였으며 계산점과 다른 계산점 사이의 평균간격은 약 200 m이다.

3.2 사용자료

1987년부터 1993년 사이에 발생한 홍수사상 중 충주 조정지댐 및 청평댐 방류량과 팔당댐 수위 및 여주의

수위표 자료가 가용한 10개의 홍수사상 자료를 이용하여 가변 매개변수의 추정을 수행하였다. 이 기간 동안의 자료를 사용한 것은 1987년부터 1991년까지의 기간에 다양한 규모의 홍수사상이 많이 발생하였으며 1989년에 측정된 하천 단면 자료가 가용하기 때문이다. 따라서 본 연구에서 추정된 조도계수들이 현재의 하도 상태를 대표하는 것은 아님이 물론이다. 표 1은 이들 홍수사상 중 충주 조정지댐의 최대 방류량을 크기 순으로 정리한 것이다. 충주 조정지댐 및 청평댐 방류량을 상류단 경계조건으로 하였으며 팔당댐 수위를 하류단의 경계조건으로 각각 사용하였다. 유입지천 중 경안천, 섬강 및 청미천의 지천 유입량은 경안, 문막 및 청미 수위표 자료와 수위-유량 관계식으로부터 산정하였다(표 2 참조). 흑천, 복화천 및 양화천에 대해서는 청미천과의 유역면적 비에 청미천의 유량을 곱하여 각각 지천 유입 유량으로 하였다. 또한 매개변수의 추정을 위한 수위자료는 여주 수위표 자료를 사용하였다.

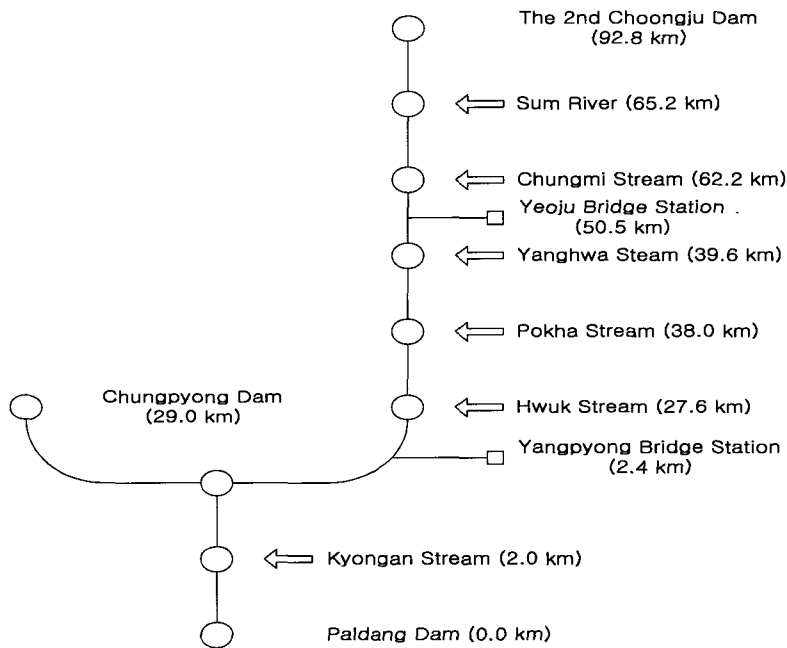


그림 2. 대상 하천구간에 대한 모형의 모식도

표 1. 매개변수의 추정을 위한 홍수사상 자료

번호	기간	충주조정지댐 최대방류량(CMS)	청평댐 최대방류량(CMS)
1	90/9/9 23:00 ~ 90/9/13 23:00	16646	16103
2	87/7/21 01:00 ~ 87/7/24 23:00	5457	3798
3	88/7/19 01:00 ~ 88/7/25 16:00	5340	2496
4	87/8/3 01:00 ~ 87/8/6 23:00	3330	4141
5	87/7/26 01:00 ~ 87/7/30 23:00	2678	3214
6	90/6/20 01:00 ~ 90/6/27 23:00	2443	3304
7	91/7/24 12:00 ~ 91/7/26 12:00	2330	10339
8	88/7/13 01:00 ~ 88/7/16 23:00	2178	3055
9	93/7/13 01:00 ~ 93/7/16 23:00	1941	1763
10	87/8/7 01:00 ~ 87/8/9 23:00	1671	1590

표 2. 지천 유입량의 산정에 사용된 수위-유량 관계식 (한국건설기술연구원, 1994)

지천	수위표	수위-유량 관계식
경안천	경안	$Q = 12.9145 \times (h + 0.35)^{3.5937} \quad (0.30 \leq h \leq 2.20)$
섬강	문막	$Q = 48.8663 \times (h + 0.91)^{2.3790} \quad (-0.08 \leq h \leq 5.33)$
청미천	청미	$Q = 108.03 \times (h - 0.2)^{1.743} \quad (0.29 \leq h \leq 4.00)$

3.3 매개변수의 추정

매개변수의 추정을 위한 목적함수로는 다음과 같이 여주 지점에서의 매 시각 수위 관측치와 계산치간의 오차 제곱합이 최소화되도록 하였다.

$$\text{Minimize } S(\mathbf{n}) = \sum_{t=1}^T (H_t - h_t)^2 \quad (7)$$

여기서 H_t 와 h_t 는 시각 t 에서의 관측수위와 계산수위를 각각 나타낸다. 또한 \mathbf{n} 은 하도내의 위치 및 유량의 크기에 따라 달리 주어지는 가변 조도계수의 함수 형태를 정의하는 상수들을 그 성분으로 하는 매개변수 벡터이다. 최적 추정 방법으로는 Gauss-Newton 방법에 Marquardt (1963)의 기법을 적용한 수정 Gauss-Newton 방법이 적용되었으며, 이를 위하여 상용 소프트웨어인 PEST (Doherty, 2000)가 사용되었다. 최적화 기법에 관한 상세한 내용은 Hill(1992, 1998) 등에 잘 기술되어 있다.

표 1의 10개의 홍수사상 자료를 이용하여 다음과 같은 세 가지 경우에 대하여 조도계수의 추정을 수행하였다. 우선 전체 구간에 대하여 조도계수를 항상 일정하게 두고(고정 조도계수 모형) 그에 대한 추정을 수행하였다. 다음으로는 유량의 증가에 따라 조도계수가 변화하는 경향을 반영하기 위한 모형으로서 유량규모별로 조도계수를 부여하도록 하는 가변 조도계수 모형을 구성하였다. 이 때 유량과 조도계수의 함수관계로서 계단함수 및 멱함수를 적용하는 두 가지 경우에 대하여 각각 모형을 구성하여 매개변수의 추정을 수행하였다. 계단함수의 경우에는 유량이 1000 m^3/s 이하인 경우, 1000 - 3000 m^3/s 인 경우, 3000 - 5000 m^3/s 인 경우 및 5000 m^3/s 이상인 경우 등 4단계로 구분하여, 각 단계별 조도계수의 값들에 대한 추정을 수행하였다. 즉, 이 경우의 추정 대상 매개변수는 4개가 된다. 멱함수를 적용할 경우 조도계수는 다음 식 (8)과 같이 주어지며, α 및 β 가 추정 대상 매개변수가 된다.

$$n = \alpha Q^\beta \quad (8)$$

다음으로는 유량에 따른 변화와 함께 조도계수의 공간적

변동성을 함께 고려하기 위하여 및 유량에 따른 가변성을 함께 반영하기 위하여 대상 하천구간을 여주 지점 상류구간과 하류구간으로 구분하고, 각 구간별로 상기한 계단함수 모형 및 멱함수 모형을 적용하였다. 따라서 계단함수 모형을 적용할 경우에는 8개, 멱함수 모형을 적용할 경우에는 4개의 매개변수를 추정하게 된다.

고정 조도계수 모형과 계단함수 모형에 대하여 홍수 사상별로 추정된 매개변수의 값들은 표 3에 정리된 바와 같다. 홍수사상 1, 2, 3 외의 경우에는 최대유량이 5000 m^3/s 이하이므로 실질적으로는 3 계단 모형이 되어 3개의 매개변수가 추정되었다. 표 4는 홍수사상별로 구한 고정 조도계수 및 계단함수 모형의 유량범위별 조도계수의 산술평균값들을 각각 계산하여 제시한 것으로서, 이들이 모형의 향후 모형의 적용에 있어서 사용될 매개변수의 값들이 된다. 멱함수 모형의 매개변수 추정 결과는 표 5와 같다. 멱함수 모형의 경우 각 홍수사상에 대하여 구한 식 (8)의 기하평균식이 향후 모형에 적용될 수 있으며, 따라서 α 에 대해서는 기하평균값을, β 에 대해서는 산술평균값을 각각 구하여 표 5에 제시하였다. 표 5에서 추정된 β 의 값이 모든 홍수사상에 대하여 음의 값을 갖는 것에서 알 수 있듯이 유량이 커질수록 조도계수가 감소하는 경향이 일관되게 나타나고 있다. 계단함수 모형의 경우에도 전반적으로 이러한 경향이 잘 나타나고 있다(표 3 및 4 참조). 그림 3은 홍수사상 3에 대하여 각각의 가변 조도계수 모형에 의하여 추정된 결과를 그림으로 표시한 것으로서 조도계수의 공간적 변동성을 고려한 경우(그림 3(a) 및 3(b)) 및 그렇지 않은 경우(그림 3(c))에 대하여 유량에 따른 조도계수 변화의 전형적인 형태를 나타내고 있다. 그림 4는 공간적 변동성을 고려한 경우에 대하여 추정된 매개변수를 사용하여 계산된 여주 지점에서의 수위 수문곡선을 비교한 것으로서, 계단함수 및 멱함수 모형은 유사한 결과를 보이고 있다. 표 4를 보면 계단함수의 최대치와 최소치의 차이가 상류구간의 경우에 더 크게 나타나고 있다. 또한 표 5에서 상류구간에 대하여 추정된 β 의 값이 하류구간에 대한 값보다 작게 나타나고 있는데, 이는 조도계수에 따라 유량이 감소하는 정도가 상류구간의 경우에 더욱 현저함을 의미한다.

표 3. 고정 조도계수 모형과 계단함수 모형의 매개변수 추정결과

홍수 사상	유량범위 (CMS)	일정 조도 계수	공간적 변동성을 고려하지 않은 경우	공간적 변동성을 고려한 경우		홍수 사상	유량범위 (CMS)	일정 조도 계수	공간적 변동성을 고려하지 않은 경우	공간적 변동성을 고려한 경우	
				하류부	상류부					하류부	상류부
1	1000 이하	0.0335	0.0452	0.0439	0.0631	6	1000이하	0.0458	0.0501	0.0457	0.0299
	1000~3000		0.0384	0.0388	0.0386		1000~3000		0.0456	0.0465	0.0222
	3000~5000		0.0389	0.0314	0.0289		3000~5000		0.0196	0.0243	0.0437
	5000 이상		0.0312	0.0631	0.0299		5000이상		—	—	—
2	1000 이하	0.0404	0.0909	0.0909	0.0909	7	1000이하	0.0464	0.0568	0.0498	0.0528
	1000~3000		0.0419	0.0416	0.0380		1000~3000		0.0457	0.0458	0.0351
	3000~5000		0.0398	0.0417	0.0286		3000~5000		0.0196	0.0204	0.0196
	5000 이상		0.0378	0.0392	0.0294		5000이상		—	—	—
3	1000 이하	0.0375	0.0464	0.0443	0.0728	8	1000이하	0.0447	0.0478	0.0457	0.0495
	1000~3000		0.0397	0.0398	0.0404		1000~3000		0.0447	0.0447	0.0399
	3000~5000		0.0368	0.0373	0.0283		3000~5000		0.0435	0.0456	0.0308
	5000 이상		0.0336	0.0346	0.0244		5000이상		—	—	—
4	1000 이하	0.0385	0.0454	0.0404	0.0884	9	1000이하	0.0278	0.0500	0.050	0.0588
	1000~3000		0.0388	0.0382	0.0266		1000~3000		0.0435	0.0439	0.0444
	3000~5000		0.0375	0.0387	0.0224		3000~5000		0.0435	0.050	0.0435
	5000이상		—	—	—		5000이상		—	—	—
5	1000 이하	0.0440	0.0752	0.0909	0.0672	10	1000이하	0.0364	0.0333	0.0333	0.0333
	1000~3000		0.0439	0.0437	0.0433		1000~3000		0.0364	0.0365	0.0282
	3000~5000		0.0425	0.0445	0.0384		3000~5000		—	—	—
	5000 이상		—	—	—		5000이상		—	—	—

표 4. 고정 조도계수 모형과 계단함수 모형에 대하여 추정된 매개변수의 산술평균

유량범위(CMS)	일정 조도계수 모형	계단함수 모형		
		공간적 변동성을 고려하지 않은 경우	공간적 변동성을 고려한 경우	
			하류부	상류부
1000 이하	0.0395	0.0541	0.0539	0.0607
1000 ~ 3000		0.0419	0.0420	0.0357
3000 ~ 5000		0.0359	0.0371	0.0327
5000 이상		0.0342	0.0456	0.0279

표 5. 멱함수 모형의 매개변수 추정 결과

홍수사상	충주 조정지점 최대방류량 (CMS)	a	β
1	16646	0.1696	-0.1823
2	5457	0.1678	-0.1742
3	5340	0.1647	-0.1830
4	3330	0.0386	-0.00086
5	2678	0.1036	-0.1103
6	2443	0.1665	-0.1751
7	2330	0.1766	-0.1753
8	2178	0.0755	-0.0691
9	1941	0.0657	-0.0629
10	1671	0.0367	-0.00113
평균		0.1219	-0.1152

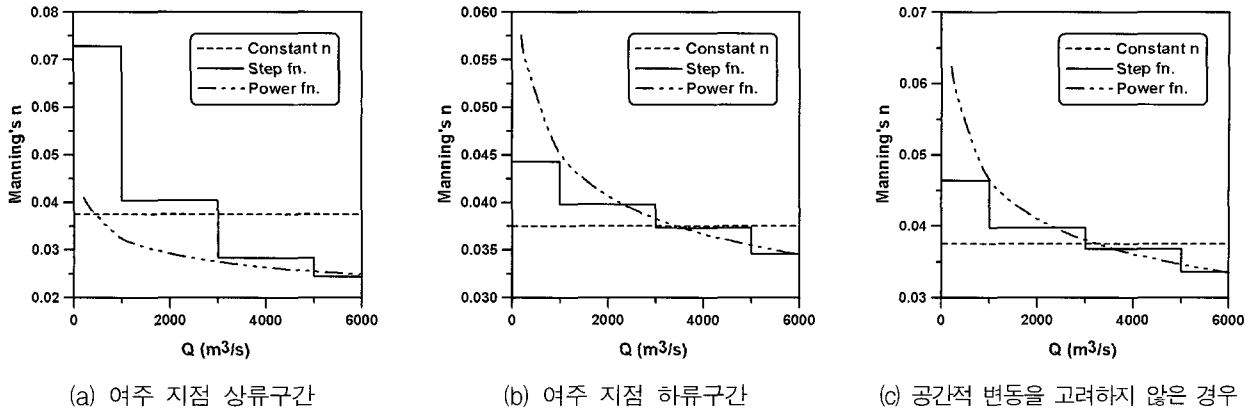


그림 3. 홍수사상 3에 대한 가변 조도계수 추정 결과

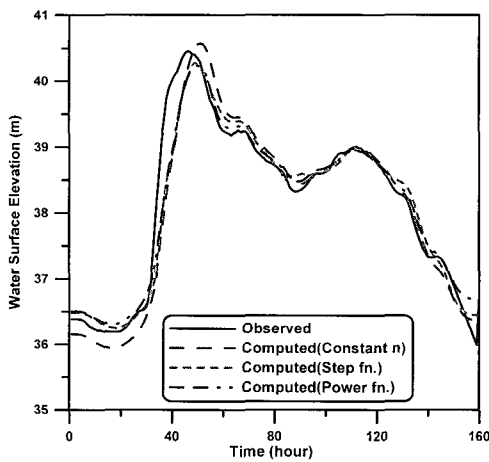


그림 4. 추정된 매개변수를 사용하여 계산된 수위 수문곡선의 비교(홍수사상 3)

표 6은 고정 조도계수 모형 및 각 가변 조도계수 모형에 대해서 추정된 매개변수를 사용하여 산정된 여주 지점 수위 계산치와 관측치와의 제곱평균 제곱근(RMS) 오차를 나타낸 것이다. 표 6에 나타낸 값들은 각 홍수 사상별로 추정된 매개변수 값들을 사용할 경우의 RMS 오차 값들이며, 표 4 및 5에 나타낸 평균값들을 사용할

경우에는 일반적으로 오차가 더 크게 뒀은 물론이다. 고정 조도계수 모형의 경우보다 계단함수 또는 멱함수 형태의 가변 매개변수 모형에 따른 계산결과의 오차가 작은 것을 알 수 있으나, 이는 추정대상 매개변수의 수가 상대적으로 많음에 기인한 것으로서 큰 의미를 부여하기는 어렵다. 공간적 변동을 고려할 경우의 RMS 오차가 그렇지 않은 경우에 비하여 작은 것도 같은 맥락에서 이해될 수 있다. 가변 조도계수 모형 중 멱함수 모형과 계단함수 모형의 RMS 오차는 거의 차이가 없다. 모든 홍수사상에 대한 RMS 오차의 평균값으로 보면 멱함수 모형이 관측치와 다소 잘 일치하고 있으나, 홍수사상 4, 5, 6 및 8의 경우에는 멱함수 모형의 RMS 오차가 더 큼을 알 수 있다. 매개변수가 2개인 멱함수 모형이 4개의 매개변수를 갖는 계단함수 모형보다도 전체적으로 RMS 오차가 크지 않은 것은 계단함수 모형을 사용할 경우에는 조도계수가 가질 수 있는 값이 4개로 제한되는데 반해, 연속함수인 멱함수 모형을 사용할 경우에는 그러한 제한이 없기 때문에 실질적으로 유량에 따라 더 다양한 조도계수 값들을 가질 수 있다는 점에서 이해될 수 있다.

표 6. 추정된 매개변수에 의한 수위 계산치의 제곱평균 제곱근 오차

(단위 : m)

홍수사상	모형	일정 조도계수	계단함수		멱함수	
			공간적 변동성을 고려하지 않은 경우	공간적 변동성을 고려한 경우	공간적 변동성을 고려하지 않은 경우	공간적 변동성을 고려한 경우
1		0.4608	0.4004	0.3957	0.3221	0.3142
2		0.3847	0.3488	0.1737	0.3688	0.1820
3		0.2601	0.2227	0.1940	0.2118	0.1906
4		0.2642	0.2483	0.3081	0.2633	0.3263
5		0.1740	0.1428	0.1768	0.1633	0.2192
6		0.2073	0.2042	0.2583	0.2067	0.1535
7		0.1279	0.0826	0.1111	0.0767	0.1192
8		0.1345	0.1290	0.1415	0.1276	0.1535
9		0.4835	0.2617	0.0598	0.2125	0.0725
10		0.0772	0.0772	0.0719	0.0772	0.0740
평균		0.2574	0.2118	0.1891	0.2030	0.1805

4. 결 론

하도의 물리적 특성에 따라 하천구간을 구분하여, 각 계산점별로 계산점이 위치한 하천구간 및 유량에 따라 서로 다른 조도계수의 값을 부여할 수 있는 가변 조도계수 모형을 구성하고, 이를 충주댐 하류의 남한강 구간에 적용하여 최적화에 의한 매개변수의 추정을 수행하였다.

유량과 조도계수의 함수관계로서 계단함수 또는 멱함수를 사용하는 가변 조도계수 모형을 적용함으로써 고정된 조도계수를 사용하는 종래의 모형에 비하여 매개변수 추정에 따른 오차가 상당히 감소하였다. 여기에 하천구간 별로 조도계수를 달리할 경우 추가적으로 오차가 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 그 감소량은 미미한 것으로 나타났다. 즉, 남한강 구간의 경우에는, 유량에 따른 조도계수의 가변성이 하천구간별 변동성보다도 중요한 요소인 것으로 나타났다. 가변 조도계수 모형 중에는 멱함수 모형을 사용할 경우와 4단계 계단함수 모형을 사용할 경우의 RMS 오차의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 계단함수 모형 및 멱함수 모형 모두 유량이 커질수록 조도계수가 감소하는 경향이 일관되게 나타났으며, 이러한 경향은 여주 지점 상류구간의 경우에 더욱 뚜렷하게 나타났다.

본 연구에서 제안된 유량에 따른 가변 조도계수 모형 중 계단함수 모형의 경우에는 계단의 수 및 동일한 조도계수를 갖는 유량의 범위를 정하는 것이 임의적이며, 계단함수가 불연속 함수라는 단점이 있다. 반면 멱함수의 경우에는 단조 증가 또는 단조 감소 함수로서 이론적으로는 값의 상한이 없어 유량이 작아짐에 따라 조도계수가 비현실적으로 커질 수도 있다는 문제점이 있다. 그러나, 유량이 증가함에 따라 조도계수가 감소하는 것이, 즉 조도계수가 유량에 대한 단조 감소 함수임이 일반적이고, 또한 실질적으로는 어느 정도 이상의 유량이 유지되므로 유량의 감소에 따른 조도계수 값의 증가는 제한적이다. 따라서 오차의 측면에서 멱함수 모형의 경우가 계단함수 모형의 경우와 거의 대등하게 나타난 결과로부터 판단해 볼 때, 연속함수인 멱함수를 사용하는 가변 매개변수 모형이 그 적용성 면에서 보다 적합한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김상호, 김원 (2002). "한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학적 모형의 구축." **한국수자원학회논문집**, 제35권, 제5호, pp. 485-500.
김원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한

강 하류부 하도의 조도계수산정." **한국수자원학회지**, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
이정규, 이창현 (2004). "수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정." **대한토목학회논문집**, 제24권, 제1B호, pp. 25-32.
한국건설기술연구원 (1994). **1994년도 수자원관리기법 개발연구조사: 수위유량관계곡선 자료집(4판)**.
황의준 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산모형," 석사학위논문, 성균관대학교.
황의준, 전경수 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산 모형: 모형의 보정." **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
Becker, L., and Yeh, W.W.-G. (1972). "Identification of parameters in unsteady open channel flow." *Water Resour. Res.*, Vol. 8, No. 4, pp. 956-965.
Becker, L., and Yeh, W.W.-G. (1973). "Identification of multiple reach channel parameters." *Water Resour. Res.*, Vol. 9, No. 2, pp. 326-335.
Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr., and Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pittman.
Doherty, J. (2000). *Visual PEST: Model-independent parameter estimation*. Watermark Computing & Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, Ontario, Canada.
Fread, D.L. and Lewis, J.M. (1998). "NWS FLDWAV Model." *NWS Report*, Hydrologic Research Laboratory, NWS Office of Hydrology, NWA, Silver Spring, MD, USA.
Fread, D.L., and Smith, G.F. (1978). "Calibration technique for 1-D unsteady flow models." *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 104, No. HY7, pp. 1027-1044.
Hill, M.C. (1992). "A computer program (MODF-LOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional, ground-water flow model using nonlinear regression." *Open-File Report 91-484*, U.S. Geological Survey, Denver, CO, USA.
Hill, M.C. (1998). "Methods and guidelines for effective model calibration." *Open-File Report 98-4005*, U.S. Geological Survey, Denver, CO, USA.
Holly, F.M., Yang, J.C., Schwarz, P., Schaefer, J., Hsu, S.H., and Einhellig, R. (1990). "Numerical simulation of unsteady water and sediment

- movement in multiply connected networks of mobile-bed channels." *IIHR Report No. 343*, Iowa Inst. of Hydr. Res., Iowa City, Iowa.
- Liggett, J.A., and Cunge, J.A. (1975). "Numerical methods of solution of the unsteady flow equations." *Unsteady flow in open channels*, K. Mohmmmod and V. Yevjevich, eds., Water Resour. Publications, Fort Collins, CO, USA, pp. 89-182.
- Marquardt, D.W. (1963). "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters." *J. Soc. of Ind. and Appl. Math.*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441.
- Samuels, P.G., and Skeels, C.P. (1989). "Stability and accuracy analysis of numerical scheme modelling open channel flow." *paper presented at Hydrocomp 89*, Dubrovnik, Yugoslavia, pp. 13-16.
- Schaffranek, R.W., Baltzer, R.A., and Goldberg, D.E. (1981). "A model for simulation of flow in singular and interconnected channels." *Technique of WRI*, U.S. Geological Survey, Denver, CO, USA.
- Wasantha Lal, A.M. (1995). "Calibration of riverbed roughness." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 121, No. 9, pp. 664-671.
- Wormleaton, R., and Karmegam, M. (1984). "Parameter optimization in flood routing." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 110, No. 12, pp. 1799-1814.
- (논문번호:04-96/접수:2004.10.07/심사완료:2004.11.29)