하천방재

중소 지류하천의 홍수위 산정에 관한 연구

Estimation of Flood Water Level for Small to Medium Streams

구강민* · 전경수**

Koo, Kang Min* and Jun, Kyung Soo**

Abstract

A method is proposed of estimating flood water level for small to medium streams. It is a combination of discharge prediction by Muskingum-Cunge flood routing and conversion of thus calculated discharge into stage using pre-determined discharge-stage relationship. Muskingum-Cunge parameters for the Dorim stream were estimated using either uniform or steady nonuniform flow model. Uniform flow model was used to estimate reach-by-reach parameters. For the locations under backwater effect, dependence of cross-sectional area on the downstream boundary water level as well as the discharge was considered to estimate Muskingum-Cunge parameters, and varied flow model to estimate pointwise parameters. Varied flow calculations were made for various combinations of discharge and downstream boundary condition to derive discharge-stage relations. Functional relations between the stage and the discharge and downstream water level were derived for locations under backwater effect of the Anyang stream junction.

Key words : Muskingum-Cunge model, discharge-stage relationship, parameter estimation, backwater effect, Dorim stream

요 지

중소 지류하천의 홍수시 수위산정 방법으로 Muskingum-Cunge 모형에 의하여 유량을 산정하고 유량-수위 관계식에 의하여 수위로 변환하는 방법을 제안하였다. 도립천을 대상으로 등류 또는 부등류 모형에 의한 계산결과를 활용하여 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 산정하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 등류모형을 적용하여 구간별 매개변수를 추정하였으며, 부등류 계산모형을 이용하여 지점별 매개변수를 추정하였다. 배수영향을 받는 하류 지점들에 대해서는 하류단 수위 또한 변수로 포함된 형태의 통수단면적-유량 관계식을 제안하여 매개변수들의 추정에 활용하였다. 계산된 유량을 수위로 변환하기 위한 유량-수위 관계를 도출하기 위하여 다양한 유량 및 하류단 경계조건에 대한 부등류 계산을 수행하여 얻어진 수위 계산치를 이용하였다. 안양천의 배수영향을 받는 하류 지점들의 경우에는 유량뿐만 아니라 하류단 수위의 함수로 수위 관계식을 도출하였다.

핵심용어 : Muskingum-Cunge 모형, 유량-수위 관계식, 매개변수 추정, 배수효과, 도립천

1. 서 론

외수위의 영향을 반영하는 도시 내배수 시스템 계산모형 또는 침수예측 모형을 적용하기 위해서는 도시 우수가 하천으로 배출되는 지점들에서의 하천수위가 경계조건으로 주어져야 한다. 이를 위하여 홍수시 하천 각 지점에서의 수위변화를 예측할 수 있는 수리학적 계산모형이 요구된다. 하천의 지형 및 흐름의 물리적 특성을 반영하는 가장 일반적인 수리학적 계산모형은 Saint-Venant 방정식을 지배방정식으로 하는 동역학적 부정류 계산모형(Cunge *et al.*, 1980; Holly *et al.*,

1990)이다. 그러나 동역학적 계산모형은 항상 안정적으로 해를 제공하지는 못한다. 하상경사가 작은 대하천 및 일부 1차 지류에 대해서는 동역학적 계산모형에 의하여 홍수위를 예측할 수 있으나, 하상경사가 비교적 큰 대하천의 상류구간이나 중소 지류하천에 대해서는 해의 안정성 문제를 수반하기 때문에 실시간 홍수예측의 목적으로 사용되기에 항상 적합한 방법은 아니다. 중소 지류하천에 대해서는 저류함수법(Park *et al.*, 2014), Muskingum 방법 등 수문학적 홍수추적 방법들이 널리 사용되고 있으나, 이러한 방법들은 유량만을 대상으로 하기 때문에 하도구간의 수위산정이 불가능하다. 중소 지류

*성균관대학교 수자원대학원 수자원학과 석사과정(E-mail: koo00v@skku.edu)

Graduate Research Assistant, Department of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University

**교신저자. 정회원. 성균관대학교 수자원대학원 수자원학과 교수(Tel: +82-31-290-7515, Fax: +82-31-290-7549, E-mail: ksjun@skku.edu)

Corresponding Author: Member, Professor, Department of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University

하천에 적용 가능한 수리학적 홍수추적 모형으로 Muskingum-Cunge 모형을 들 수 있다. Muskingum-Cunge 방법은 기존의 Muskingum 방법(Chow, 1959)을 개선한 것으로서, 수리학적 하도추적 모형의 일종인 확산파 모형의 수치해법에 해당하며, 하도의 물리적 특성을 어느 정도 고려한다는 면에서 수문학적 모형들보다 상대적으로 우수한 방법이라 할 수 있다. 또한 Bahrami 등(2010)은 Muskingum-Cunge 모형에 의한 계산결과와 실측유량과의 상대오차가 운동파 모형의 경우에 비하여 1/2-1/3 정도로 정확함을 보인 바 있다. 그러나 Muskingum-Cunge 모형 또한 유량만을 변수로 하기 때문에 하천수위를 산정할 수 없다는 한계가 있다.

Muskingum-Cunge 모형의 매개변수는 통수단면적과 유량의 관계를 정의하는 계수들로서 하천의 지형특성이 이들 계수에 반영되어야 한다. Muskingum-Cunge 방법에 의한 하도추적을 위하여 HEC-HMS 모형(HEC, 2020b)이 널리 사용되고 있으나, 임의의 대표 사다리꼴 단면을 설정하여 매개변수들을 산정하기 때문에 하도의 물리적 특성을 충실히 반영하기 어렵다. Muskingum-Cunge 방법은 Cunge(1969)에 의하여 처음 제시된 이후로 Ponce와 Yevjevich(1978), Koussis(1983), Ponce와 Chaganti(1994), Ponce 등(1996), Ponce와 Lugo(2001) 등의 많은 연구를 통하여 발달되어 왔다. 최근의 Muskingum-Cunge 방법에 관한 연구로는 가변 매개변수 Muskingum-Cunge 방법에 관한 연구(Tang et al., 1999; 2001; Cunge, 2001; Todini, 2007; Perumal and Sahoo, 2008) 등이 있다. 국내에서는 Nahm과 Park(1985), Lee와 Lee(1994), Kim과 Seo(2003), Kim과 Jun(2010) 등에 의하여 Muskingum-Cunge 방법에 관한 여러 연구가 수행되었으나, 아직까지 복잡한 자연하천의 지형을 고려한 매개변수 추정에 관한 연구는 국내외적으로 찾아보기 어렵다. Kim과 Jun(2010)은 하천 정비사업 이전의 여주지점 상류 남한강 구간에 대하여 횡단 측량 자료가 가용한 모든 지점에서의 단면특성을 반영하여 매개변수들을 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 이에 따라 산정된 매개변수들을 적용하여 산정된 여주지점의 유량수문곡선은 대표 사다리꼴 단면을 적용한 경우보다 월등하게 동역학적 모형의 계산결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 안양천의 지류이며 한강의 2차 지류인 도시하천 도림천을 대상으로 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 산정하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 우선 Kim과 Jun(2010)의 경우와 같이 등류모형을 사용하되 하상경사의 변화를 고려하여 하상경사에 따라 구간을 구분하여 구간별로 매개변수를 추정하였다. 또한 HEC-RAS(HEC, 2020a) 부등류 계산모형을 적용하여 그 결과로부터 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 산정하는 방안을 검토하였다.

Muskingum-Cunge 모형에 의한 홍수추적 결과로 원하는 지점들에서의 유량은 계산할 수 있으나, 이를 수위로 변환하기 위해서는 각 지점별로 유량에 따른 수위의 변화 관계가 주

어져야 한다. 계산모형을 수위-유량 관계, 즉 수위에 따른 유량의 변화관계의 도출 또는 검증에 활용한 연구는 다수 찾아볼 수 있다(Kim et al., 2013; Kim et al., 2009; Abril and Knight, 2004; Domeneghetti et al., 2012; Lindner and Miller, 2012). 그러나, 유량에 따른 수위의 변화를 다룬 연구는 찾아보기 어렵다. 중소 지류하천의 경우 도달시간이 짧음을 감안하여, 본 연구에서는 부등류 모형에 의한 계산결과를 이용하여 유량에 따른 수위의 변화 관계를 도출하는 방안에 관한 연구를 수행하였다. 즉, 다양한 유량 및 하류단 경계조건에 대한 흐름계산을 수행하여 얻어진 수위 계산치를 이용하여, 지점별로 유량-수위 관계식을 유도하였다. 안양천의 지류인 도림천을 대상으로 연구를 수행하였으며, 안양천 합류지점의 배수위 영향을 받는 도림천 하류 구간의 지점들에 대해서는 하천유량 및 하류단 수위의 함수로써 수위 관계식을 유도하였다.

2. Muskingum-Cunge 모형의 매개변수 추정

2.1 Muskingum-Cunge 모형

종방향 위치 x 부터 $(x+\Delta x)$ 까지의 하도구간에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dS}{dt} = Q(x, t) - Q(x + \Delta x, t) \quad (1)$$

여기서 $s(t)$ 는 구간저류량, $Q(x, t)$ 는 구간의 유입량, $Q(x + \Delta x, t)$ 는 유출량, Δx 는 구간거리이며 t 는 시간을 나타낸다.

하도저류량은 홍수파의 유하시간 K 와 유입량에 대한 가중치 X 를 사용하여 다음과 같이 표현한다.

$$S(t) = KXQ(x, t) + K(1-X)Q(x + \Delta x, t) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 $S(t)$ 를 소거하면 다음과 같이 된다.

$$KX\frac{\partial}{\partial t}Q(x, t) + K(1-X)\frac{\partial}{\partial t}Q(x + \Delta x, t) = Q(x) - Q(x + \Delta x) \quad (3)$$

$Q(x + \Delta x)$ 를 $Q(x)$ 에 대하여 Taylor 급수로 전개하고 3차 이상의 고차항을 무시하면 다음과 같이 된다.

$$K\frac{\partial Q}{\partial t} + K(1-X)\Delta\frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} = -\Delta x\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{(\Delta x)^2}{2}\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (4)$$

통수단면적을 A 라 하면 연쇄법칙으로부터 다음의 식이 성립되고

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial t} \quad (5)$$

부정류에 대한 연속방정식으로부터 다음과 같이 나타낼 수

있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -c \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (6)$$

여기서 c 는 운동파의 전파속도로서 다음과 같이 정의된다.

$$c = \frac{dQ}{dA} \quad (7)$$

식 (6)을 이용하여 식 (4)를 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$c = \frac{dQ}{dA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\Delta x}{K} \frac{\partial Q}{\partial x} = \left[c(1-X)\Delta x - \frac{(\Delta x)^2}{2K} \right] \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (8)$$

이 식은 결국 확산파 모형의 지배방정식인 다음식 (9)와 같은 형태의 식으로 귀결됨을 알 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (9)$$

여기서 ν 는 확산계수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\nu = \frac{Q_0}{2TS_0} \quad (10)$$

여기서 Q_0 는 기준(평균)유량, T 는 수면폭이며, S_0 는 하상경사이다.

따라서 식 (8)에서 이송항 및 확산항의 계수에 해당하는 부분이 각각 실제 파속(c) 및 확산계수(ν)와 같아지도록 K 와 X 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (11)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q_0}{c\Delta x TS_0} \right) \quad (12)$$

즉, Muskingum 모형의 저류방정식인 식 (2)에서 매개변수 K 와 X 를 각각 식 (11) 및 (12)와 같이 취하게 되면, 확산파 모형의 해를 구하는 것과 같게 되는데, 이를 Muskingum-Cunge 모형이라 한다.

Muskingum-Cunge 방법의 홍수추적식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{i+1}^{n+1} = C_0 Q_i^{n+1} + C_1 Q_i^n + C_2 Q_{i+1}^n \quad (13)$$

여기서 아래첨자 i 와 위첨자 n 은 각각 공간 및 시간 준위를 나타내며, C_0 , C_1 및 C_2 는 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_0 = \frac{-1+C+D}{1+C+D} \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{1+C-D}{1+C+D} \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{1-C+D}{1+C+D} \quad (16)$$

여기서 C 와 D 는 각각 Courant 수와 격자(cell) Reynolds 수로서 다음과 같다. 다음과 같이 표현된다.

$$C = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (17)$$

$$D = \frac{Q_0}{TS_0 c \Delta x} \quad (18)$$

기준유량(Q_0) 값으로는 일반적으로 최대유량과 기저유량의 가중평균치를 사용한다. 통수단면적과 유량의 관계를 다음과 같이 표현하면,

$$Q = \alpha A^m \quad (19)$$

파속 c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 (7) 참조).

$$c = \alpha m A^{m-1} \quad (20)$$

하상 경사와 단면형이 일정한 수로에 대해서는 S_0 와 α 및 m 이 일정한 값으로 잘 정의되므로, 이들 값을 적용하여 홍수추적을 수행할 수 있다. 그러나 단면형과 경사가 불규칙한 자연하천의 경우에는 평균적인 하상경사와 구간을 대표하는 α 및 m 의 값에 대한 추정이 필요하다.

2.2 매개변수 추정

본 연구에서는 안양천의 지류이며 한강의 2차 지류인 도림천(Fig. 1 참조)을 대상으로 하여 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수 추정에 관한 연구를 수행하였다. 도림천 하구부터 상류 11 km 지점까지를 구간에 대하여 등류 모형을 이용한 구간별 추정방법과 부등류 계산모형을 이용한 지점별 추정방법을 각각 적용하였다.

2.2.1 등류 모형을 이용한 구간별 매개변수 추정

통수단면적과 유량의 관계를 정의하는 매개변수 α 및 m 은 하천의 단면특성이 반영되어야 한다. 유역유출모형으로 널

Fig. 1. Schematic Representation of Modeled Stream Reach.

리 사용되고 있는 HEC-HMS 모형(HEC, 2010)의 Muskingum-Cunge 홍수추적 모형은 사다리꼴 대표단면을 사용한다. 이러한 대표단면은, 특히 하천단면형의 불균일성이 심할수록, 자연하천의 지형학적 요소를 충실히 반영하지 못한다. 따라서 하천단면의 변화가 심한 하천에서는 대표 단면을 사용하여 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 추정할 경우 상당히 부정확한 계산결과가 발생할 수 있다. 여기서는 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수들이 대상구간 내의 평균적인 수리학적 특성들을 대표할 수 있도록, 등류모형에 근거한 다음의 방법에 의하여 매개변수 추정을 수행하였다.

우선 횡단면 자료가 가용한 하천구간 내 모든 지점에서의 단면들에 대하여, 다음 1)~5)의 과정을 반복한다.

- 1) 수면의 표고 값을 가정한다.
- 2) 수면 표고에 대한 통수단면적 A , 윤변 P 를 구한다.
- 3) 통수반경 $R(=A/P)$ 을 계산한다.
- 4) Manning의 공식을 이용하여 유량(Q)을 계산한다.
- 5) 새로운 수면 표고 값들을 가정하고 2)~4)의 과정을 반복한다.

이와 같은 방법으로 계산된 단면적 및 유량자료들 중 유량 값이 원하는 속하는 자료들을 모두 선택한 후, 통수단면적과 유량 간의 회귀분석에 의하여 α 및 m 을 추정한다.

Fig. 2는 특정 지점에 대하여 이와 같은 방법으로 구한 통수단면적 및 유량자료를 도시한 전형적인 그림을 나타내고 있다. 통수단면적이 증가함에 따라 유량이 증가하다가, 통수단면적이 어느 정도까지 증가한 후에는 유량이 계속 증가하지 않고 다소 감소하거나 거의 변화하지 않는 구간이 있음을 알 수 있다. 이는 복단면(Fig. 3 참조) 수로에서 수위가 고수부지 위로 상승함에 따라 윤변이 증가하여 발생하는 현상이다(Smart, 1992). 본 연구에서는 고수부지 표고보다 높은 수위에 대한 통수단면적 및 유량자료들만을 매개변수의 추정에 사용하였다.

Fig. 4는 도림천 전체구간에 대하여 이와 같은 방법으로 구

Fig. 2. Cross-sectional Area and Discharge Relationship Developed Using the Uniform Flow Model (1 km Upstream from the Anyang Stream Junction).

한 통수단면적 및 유량자료를 도시한 것이다. 도림천 전체 구간 내 각 지점에서의 최심하상고 자료를 사용한 회귀분석으로부터 평균 하상경사를 구하였으며(Table 1 참조), 조도계수로는 MOLIT(2012)를 참조하여 0.030의 값을 적용하였다. Fig. 4를 살펴보면 동일한 통수단면적에 대하여 유량의 범위가 상당히 넓게 나타나고 있는데, 이는 구간 내 단면들의 특성이 그만큼 상이하기 때문이다. 또한 전체구간에 대한 평균 하상경사를 적용할 경우 상류로 갈수록 유량이 과소평가되고, 하류에 위치한 단면들에 대해서는 과대평가될 수 있다.

도림천 구간의 하상경사와 단면특성을 고려하여 도림천 구간을 3개의 소구간으로 구분하였다. 각 소구간의 범위와 평균

Fig. 3. Cross Section at 1 km Upstream from the Anyang Stream Junction.

Fig. 4. Parameters Estimated for the Whole Reach Using the Uniform Flow Model.

Table 1. Location and Average Channel Slope for Subreaches

Reach	Location (Distance from Stream Mouth, km)	Reach Length (km)	Average Slope (10^{-3})
The Whole Reach	0.0 - 11.0	11.0	5.72
Subreach 1	0.0 - 5.3	5.3	1.65
Subreach 2	5.3 - 7.9	2.6	5.28
Subreach 3	7.9 ~ 11.0	3.1	12.8

Fig. 5. Parameters Estimated for Subreach 3 Using the Uniform Flow Model.

Fig. 6. Cross-sectional Area and Discharge Relation for Sub-reaches

하상경사는 Table 1에 제시된 바와 같다. 소구간별 매개변수 추정결과는 Fig. 5에 나타내었다. 모든 구간에 대하여 추정된 매개변수 c 의 값이 1 이상인 것은 통수단면적이 증가할수록 파속(c)이 증가함을 의미한다. Fig. 6은 소구간별로 추정된 통수단면적과 유량 관계를 전체구간에 대한 것과 함께 나타낸 것이다. 동일한 통수단면적에 대한 유량이 상류 구간으로 갈수록 크게 나타나고 있는데, 이는 하류측 구간에 비하여 하상경사가 크기 때문이다.

2.2.2 부등류 계산모형을 이용한 지점별 매개변수 추정

다양한 유량에 대한 부등류 계산을 수행하여, 그 결과로 산정되는 각 지점에서의 통수단면적 자료로부터 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 추정하였다. 부등류 계산모형으로는 HEC-RAS(HEC, 2010a) 계산모형을 이용하였다. Fig. 7은 하류단 경계조건을 하구수위 El. 14.0 m 또는 El. 13.0 m로 하여 계산된 결과를 제시하고 있다. 유량이 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 인 경우 도립천 하구로부터 약 5 km 상류까지 안양천의 배수영향이 미침을 나타내고 있다.

도립천 하구의 계획홍수위가 El. 14.07 m(MOLIT, 2012)임을 감안하여 하류단 경계조건을 El. 13.0 m부터 El. 14.0 m까지 0.1 m씩 증가시켜가며 다양한 유량에 대하여 HEC-RAS

Fig. 7. Water Surface Profile Calculated by HEC-RAS Model ($Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$)

Table 2. Range of Discharge Values for Developing Q-A Relationship

(Unit: m^3/s)

Distance from the Downstream End (km)	Range of Discharge	Increment	Design Flood Discharge
1	15 ~ 795	15	747
2	15 ~ 600	15	549
3	15 ~ 600	15	549
4	15 ~ 495	15	484
5	15 ~ 390	15	359
6	15 ~ 300	15	247
7	15 ~ 300	15	247
8	15 ~ 300	15	247
9	15 ~ 210	15	165
10	15 ~ 210	15	165
11	15 ~ 210	15	181

모형에 의한 부등류 계산을 수행하였다. 이러한 계산결과를 이용하여 도립천 상류 1 km 지점부터 11 km 지점까지 매 1 km 지점에 대하여 통수단면적과 유량의 관계를 구하였다. 이 때 사용된 유량 값의 범위는 각 지점에 대한 계획홍수량을 고려하여 Table 2와 같이 취하였다.

Fig. 8은 유량과 하구수위의 다양한 조합에 대하여 수행된 HEC-RAS 모형에 의한 모의계산 결과를 이용하여 4개 지점에서의 통수단면적 계산치들을 해당 유량과 함께 도시한 것이다. 도립천 상류 7 km 지점의 경우 일정한 유량에 대해서는 하류단 수위 경계조건에 관계없이 통수단면적이 동일한 값을 나타내고 있다. 하구의 배수영향을 전혀 받지 않는 이러한 지점에서의 통수단면적과 유량의 변화관계를 식 (19)와 같은 형태로 나타낼 수 있다. 그러나 하류측으로 갈수록 동일한 유량에 대해서도 하류단 수위에 따라 통수단면적의 변화폭이 커지는 것을 볼 수 있다(Fig. 8 참조). 따라서 하구의 배수영향을 크게 받는 지점들에 대해서는 다음과 같은 형태의 통수단

Fig. 8. Cross-sectional Area and Discharge Relationship Developed Using the Varied Flow Model.

Table 3. Estimated Regression Constants for Eq. (21) at 1 km Upstream from the Downstream End

H_0 (El. m)	α	m	A_0 (m ²)	$A(H_0)$ (m ²)	Standard Error (m)
13.00	185.8	0.504	437.9	399.1	0.0185
13.10	187.9	0.503	446.0	405.6	0.0208
13.20	189.6	0.502	454.1	412.2	0.0517
13.30	191.5	0.497	462.3	418.7	0.0141
13.40	189.4	0.495	470.5	425.2	0.0145
13.50	185.2	0.500	478.9	449.4	0.0205
13.60	184.6	0.501	487.5	456.9	0.0178
13.70	185.5	0.499	496.1	464.3	0.0211
13.80	187.1	0.495	504.8	471.8	0.0148

면적-유량 관계식을 도입하였다.

$$Q = \alpha(A - A_0)^m \quad (21)$$

식 (21)을 채용하는 경우의 파속은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$c = \alpha m (A - A_0)^{m-1} \quad (22)$$

수위가 하류단 수위보다 작으면 하류 방향으로 흐름이 발생

할 수 없기 때문에 식 (21)의 A_0 는 지점 수위가 하류단 수위 (H_0)와 같을 때의 통수단면적($A(H_0)$)보다는 커야 한다. 이는 A_0 가 H_0 에 따라 달리 주어져야 함을, 즉 H_0 에 따른 가변 상수임을 시사한다. 본 연구에서는 동일한 하류단 수위에 대하여 다양한 유량에 대한 부등류 계산으로부터 생성된 통수단면적 자료들을 이용한 회귀분석에 의하여 식 (22)의 α , m 및 A_0 의 값을 추정하였다. Table 3은 도림천 상류 1 km 지점에 대하여 추정된 하류단 수위별 회귀상수의 값들을 표준오차와 함께

나타낸 것이다. 하류단 수위별 표준오차의 평균치는 0.0215이며, 또한 지점 수위가 하류단 수위와 동일할 경우의 통수단면적($A(H_0)$)을 제시하였으며, 추정된 A_0 의 값들은 모두 $A(H_0)$ 의 값보다 큰 것으로 나타났다.

3. 유량-수위 관계의 도출

Fig. 9는 앞 절에서 유량과 하구수위의 다양한 조합에 대하여 수행된 HEC-RAS 모형에 의한 모의계산 결과를 이용하여 4개 지점에서의 수위계산치들을 해당 유량과 함께 도시한 것이다. 도림천 상류 7 km 지점의 경우 일정한 유량에 대해서는 하류단 수위 경계조건에 관계없이 동일한 수위 값을 나타내고 있다. 하구의 배수영향을 전혀 받지 않는 이러한 지점에서의 유량에 따른 수위(h)의 변화관계는 다음식과 같은 형태로 근사할 수 있다.

$$h = aQ^b + d \quad (23)$$

여기서 a , b 및 d 는 상수이다.

한편 도림천 하구에 가까이 위치한 상류 1 km 및 3 km 지점의 경우에는 역시 유량에 따라 수위가 증가하되, 하류단 수

위의 영향을 크게 받고 있음을 볼 수 있다. 상류 5 km 지점의 경우에는 배수영향 구간 내에 있으나, 유량이 증가함에 따라 그 영향이 줄어들고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 10은 도림천 상류 3 km 및 5 km 지점에 대하여 각 지점의 수위와 하류단 수위와의 차가 유량에 따라서 변화하는 경향을 나타낸 것이다. 도림천 상류 3 km 지점의 경우를 살펴보면, 배수영향을 크게 받는 지점에 대해서는 수위를 유량뿐만 아니라 하류단 수위(H_0)의 함수로서 다음과 같은 형태로 나타내는 것이 적합함을 시사하고 있다.

$$h = H_0 + aQ^b \quad (24)$$

식 (24)를 채용할 경우 a 와 b 는 H_0 에 따라 변하는 가변상수로 함으로써 더욱 정확한 관계를 도출할 수 있는데, 이는 도림천 상류 5 km 지점의 경우를 보면 더욱 확연히 알 수 있다. 또한 Fig. 10(b)로부터 유량이 커질수록 수위차($h-H_0$)의 변동 범위가 커짐을 알 수 있는데, 이는 배수영향이 감소함에 따라 식 (23), 즉 하류단 수위를 변수로 포함하지 않는 경우가 식 (24)보다 적합할 수도 있음을 시사하는 것으로 볼 수 있다.

부동류 계산결과를 이용하여 도림천 상류 1 km 지점부터 11 km 지점까지 매 1 km 지점에 대하여 식 (23) 및 (24)와 같

Fig. 9. Discharge and Stage Relationship Developed Using the Varied Flow Model.

(a) 3 km Upstream from the Stream Mouth

(b) 5 km Upstream from the Stream Mouth

Fig. 10. Relationship between the Discharge and Stage Difference.

Fig. 11. RMS Errors for the Developed Discharge-Stage Relationship

은 형태의 유량-수위 관계식을 도출하였다. Fig. 11은 회귀분석에 따른 RMS 오차를 나타낸 것이다. 하류단 수위의 배수 영향을 받지 않는 6 km 상류의 지점들에 대해서는 식 (23)과 같은 형태의 유량-수위 관계식이, 5 km 하류의 지점들에 대해서는 식 (24)와 같은 지점 수위와 하류단 수위에 따른 유량관계식이 각각 현저하게 작은 오차를 나타냄을 볼 수 있다. Fig. 12는 식 (24)를 적용할 경우에 대하여 회귀식에 의한 계산수위와 모형에 의한 계산수위의 비교결과를, Fig. 13은 식 (23)을 적용할 경우의 비교결과를 각각 예시한 것이다,

Fig. 12. Comparison of Stages Calculated by Eq. (24) and Those Simulated by the Varied Flow Model (3 km Upstream from the Stream Mouth).

Fig. 13. Comparison of Stages Calculated by Eq. (23) and Those Simulated by the Varied Flow Model.

결론

안양천의 지류인 도시하천 도림천을 대상으로 등류 또는 부등류 모형에 의한 계산결과를 활용하여 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 산정하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 우선 등류모형을 적용하여 하천 구간별로 매개변수를 추정하였다. 수위가 고수부지 위로 상승함에 따라 유량의 증가가 둔화되는 복단면 흐름의 특성을 확인할 수 있었다. 또한 하상경사가 급격히 변화하는 중소 지류하천의 경우 적절한 매개변수의 산정을 위해서는 하상경사 및 단면특성을 고려하여 소구간별로 매개변수를 추정할 필요가 있는 것으로 나타났다.

다양한 하류단 수위 및 유량에 대한 부등류 계산을 수행하여, 그 결과로 산정되는 각 지점에서의 통수단면적 자료로부터 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 추정하였다. 하구의 배수영향이 미치지 않는 상류 지점들의 경우 하류단 수위 경계조건에 관계없이 고유한 통수단면적과 유량의 관계를 도출할 수 있었다. 배수영향을 받는 하류 지점들에 대해서는 하류단 수위 또한 변수로 포함된 형태의 통수단면적-유량 관계식을 제안하였다. 이러한 관계식을 채용하여, 평균적으로 표준오차 2% 정도로 매개변수들을 추정하였으며, 수리학적으

로 타당한 매개변수의 값들이 추정되었다.

Muskingum-Cunge 모형 등에 의한 홍수추적 결과로 계산된 유량을 수위로 변환하기 위한 유량-수위 관계를 도출하기 위하여 부등류 모형에 의한 계산결과를 이용하였다. 다양한 유량 및 하류단 경계조건에 대한 흐름계산을 수행하여 얻어진 수위 계산치를 이용하여, 지점별로 유량-수위 관계식을 유도하였다. 모든 지점에 대하여 수위를 유량의 함수로만 유량-수위 나타내는 관계식과 유량 및 하류단 수위의 함수로 나타내는 식을 각각 적용하였다. 배수영향을 받는 하류 지점들의 경우에는 후자의 관계식이, 상류지점의 경우에는 전자의 식의 적용성이 현저히 나은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 하천 구간에 전체에 대하여 또는 소구간별로 동일하게 부여하는 대신, 지점별로 다르게 부여할 수 있는 방법론을 제시함으로써, 분포형 매개변수 Muskingum-Cunge 모형의 적용을 가능하게 하였다. 또한 계산모형을 활용하여 배수영향 하도구간 내의 지점에 대한 수위를 유량 및 하류단 수위로부터 도출할 수 있는 방법론을 제시하였다. 이와 같이 HEC-RAS 등의 흐름계산 모형을 활용하여 Muskingum-Cunge 모형의 지점별 매개변수와 지점별 수위 관계식을 도출할 경우, 도출된 계수들과 관계식의 정확성을 확보하기 위해서는 실측자료를 이용한 흐름계산모형의 보정, 즉 매개변수(조도계수)의 추정이 선행될 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구에는 실측자료를 통한 모형의 보정이 포함되어 있지 않다. 이는 모형의 보정을 위한 자료의 부재 때문이기도 하지만, 본 연구의 목적이 도림천에 대한 최적의 매개변수와 회귀상수들의 값을 구하는 것이라기보다는 중소 지류하천의 수위 산정을 위한 방법론을 제시하는 것에 국한하고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서 구한 매개변수와 회귀상수 값들 자체에는 큰 의미를 부여하기 어려우며, 이를 위해서는 향후 홍수사상에 대한 관측과, 관측자료를 이용한 흐름계산 모형의 보정이 요구된다..

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리 연구사업의 연구비지원(13AW MP-B066744-01)에 의해 수행되었으며, 이에 사의를 표한다.

References

- Abrial, J.B. and Knight, D.W. (2004) Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 6, pp. 616-629.
- Bahrami, M., Nasab, S.B., Naseri, A.A., and Albaji, M. (2010) Comparison of Muskingum-Cunge model and irrigation hydraulic models in estimation of furrow irrigation advance phase. *Research on Crops*, Vol. 11, No. 2, pp. 541-544.

- Chow, V.T. (1959) *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York.
- Cunge, J.A. (1969) On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 7, No. 2, pp. 205-230.
- Cunge, J.A. (2001) iVolume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method: Discussion. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 3, pp. 239.
- Cunge, J.A., Holly, F.M., and Verwey, A. (1980) *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pittman.
- Domeneghetti, A., Castellarin, A., and Brath, A. (2012) Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 4, pp. 1191-1202.
- 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.
- Hydrologic Engineering Center (2010a) *HEC-RAS river analysis system: users manual*: U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- Hydrologic Engineering Center (2010b) *Hydrologic modeling system HEC-HMS, users manual*: U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- Kim, D.G. and Seo, I.W. (2003) Error analysis of Muskingum-Cunge flood routing method. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No.5, pp. 751-760.
- Kim, J.S. and Jun, K.S. (2010) Estimation of Muskingum-Cunge parameters for natural streams, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp.233-243.
- Kim, J.S., Kim, W., Kim, D.G., and Kim, C.Y. (2009) Analysis on looped stage-discharge relation and its simulation using the numerical model, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 1B, pp. 1-9.
- Kim, J.S., Yoon, S.K., and Moon, Y.I. (2013) Development of rating curve for high water level in an urban stream using Monte Carlo simulation. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp. 1433-1446.
- Koussis, A.D. (1983) Unified theory for flood and pollution routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 12, pp. 1652-1664.
- Lee, S.H. and Lee, K.S. (1994) A flood routing for the South Han River by Muskingum-Cunge method, *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 27, No. 4, pp. 105-114.
- Lindner, G.A. and Miller, A.J. (2012) Numerical modeling of stage-discharge relationships in urban streams. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 590-596.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (2012) *Anyang stream master plan*. Seoul Regional Construction Management Administration.
- Nahm, S.W. and Park, S.W. (1985) A study on the flood routing using a convective-diffusion Model, *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 18, No. 3, pp. 265-270.
- Park, M., Kim, D., Kwak, J., and Kim, H. (2014) Evaluation of parameter characteristics of a storage function model. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 308-318.
- Perumal, M. and Sahoo, B. (2008) Volume conservation controversy of the variable parameter Muskingum-Cunge method. *Water Resources research*, Vol. 43, No. 5, art. No. W05409.
- Ponce, V.M. and Changanti, P.V. (1994) Variable-parameter Muskingum-Cunge method revisited. *Journal of Hydrology*, Vol. 162, No. 3-4, pp. 433-439.
- Ponce, V.M. and Lugo, A. (2001) Modelling looped ratings in muskingum-cunge routing. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 119-124.
- Ponce, V.M. and Yevjevich, V. (1978) Muskingum-Cunge method with variable parameters. *Journal of Hydraulic Div.*, Vol. 104, No. 12, pp. 1663-1667.
- Ponce, V.M., Lohani, A.K., and Scheyhing, C. (1996) Analytical verification of Muskingum-Cunge routing. *Journal of Hydrology*, Vol. 174, No. 3-4, pp. 235-241.
- Smart, G.M. (1992) Stage-discharge discontinuity in composite flood channels. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 817-833.
- Tang, X.N., Knight, D.W., and Samules, P.G. (1999) Variable parameter Muskingum-Cunge method for flood routing in a compound channel. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 591-613.
- Tang, X.N., Knight, D.W., and Samules, P.G. (2001) Volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method: Closure. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 3, pp. 239-240.
- Todini, E. (2007) A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 5, pp. 1645-1659.

Received ■ April 10, 2014

Revised ■ April 18, 2014

Accepted ■ May 12, 2014