

자연하천에 대한 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수 산정

Estimation of Muskingum-Cunge Parameters for Natural Streams

김진수* / 전경수**

Kim, Jin Soo / Jun, Kyung Soo

Abstract

A method is proposed of estimating Muskingum-Cunge parameters for natural streams using cross-sectional and longitudinal channel geometry and roughness coefficient data. Firstly, for various water-surface levels at a cross section cross-sectional areas and hydraulic radii are calculated. Corresponding discharges are then calculated using Manning's equation. This procedure is repeated for all cross-sections in the reach. Finally, routing parameters are estimated from the calculated cross-sectional area and discharge value pairs by regression analysis. The procedures for estimating Muskingum-Cunge parameters are applied to the South Han River. Flows calculated by Muskingum-Cunge model with estimated parameters showed much better agreement with those by dynamic wave model in peak discharge, time to peak discharge, and normalized RMS errors than those calculated by the HEC-1 Muskingum-Cunge model.

Keywords : Muskingum-Cunge model, dynamic wave model, parameter estimation, South Han River

요 지

하도의 횡단 및 종단 지형자료와 조도계수를 이용하여 자연하천에 대한 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수들을 추정하는 방법을 제안하였다. 우선 각 단면에서의 다양한 수위에 대하여 통수단면 및 동수반경을 계산한 후, Manning 공식을 이용하여 유량을 산정한다. 이러한 과정은 하도에서의 모든 단면에 대하여 반복되며, 최종적으로 통수단면과 유량을 통한 회귀 분석에 의하여 매개변수들을 추정한다. 이와 같은 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수 추정과정을 남한강 구간에 적용하였다. 추정된 매개변수들을 사용한 Muskingum-Cunge 모형의 계산결과는 무차원 RMS 오차, 첨두유량의 크기 및 발생시각 등 모든 면에서 HEC-1의 Muskingum-Cunge 모형에 비하여 동역학적 모형의 계산결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : Muskingum-Cunge 모형, 동역학적 모형, 매개변수 추정, 남한강

1. 서 론

하천의 지형 및 흐름의 물리적 특성을 반영하는 가

장 일반적인 수리학적 계산모형은 Saint-Venant 방정식을 사용하는 동역학적 부정류 계산모형이다. 그러나 동역학적 계산모형은 항상 안정적으로 해를 제공하지

* 성균관대학교 공과대학 건설환경시스템공학과 대학원 박사수료

Graduate Res. Asst., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

** 교신저자, 성균관대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수

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

(e-mail: ksjun@skku.edu)

는 못하며, 따라서 실시간 홍수 예보의 목적으로 사용되기에 항상 적합한 방법은 아니다. 하상경사가 비교적 큰 하천의 상류구간이나 지류하천에 대해서는 Muskingum-Cunge 모형이 해의 안정성 문제를 수반하는 동역학적 모형의 대안이 될 수 있다. Muskingum-Cunge 방법은 기존의 Muskingum 방법(Chow, 1959)을 개선한 것으로서, 수리학적 하도추적 모형의 일종인 확산과 모형의 수치해법 중 하나로 볼 수 있으며, 안정적이고 효율적인 계산 결과를 제공하면서도 하도의 물리적 특성을 어느 정도 고려한다는 면에서 우수한 방법이라 할 수 있다.

Muskingum-Cunge 방법은 Cunge (1969)에 의하여 처음 제시된 이후로 Price (1985), Ponce and Yevjevich (1978), Koussis (1983), Ponce and Chaganti (1994), Ponce *et al.* (1996), Ponce and 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)와 Muskingum-Cunge 하도추적 모형의 안정성 연구(Huang *et al.*, 2001) 등이 있다. 국내에서는 남선우와 박상우(1985), 이상호와 이길성(1994), 김진수(1995; 1996), 전무갑과 지홍기(1996), 김진수와 김진홍(1999), 김대근과 서일원(2003) 등에 의하여 Muskingum-Cunge 방법에 관한 여러 연구가 수행되었으나, 아직까지 복잡한 자연하천의 지형을 고려한 매개변수 추정에 관한 연구는 이루어진 적이 없다.

HEC-1 모형(Hydrologic Engineering Center, 1990)을 비롯한 기존의 Muskingum-Cunge 홍수추적 모형은 대표 단면을 사용한다. 이러한 대표 단면은, 특히 하천지형의 불규칙성(irregularity)이 심할수록, 자연 하천의 지형학적 요소를 충실히 반영하지 못한다. 따라서 하천단면이 매우 불규칙한 자연 하천에서는 대표 단면을 사용하여 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수를 추정할 경우 상당히 부정확한 흐름 계산 결과가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수들이 대상 구간 내의 일반적인 수리학적 특성들을 대표할 수 있도록, 매개변수 추정과정에 자연하천의 지형학적 요소들을 반영할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 남한강 구간에 적용하여 Muskingum-Cunge 매개변수를 추정하였으며, 이를 사용한 Muskingum-Cunge 모형의 계산결과를 동역학적 하도추적 모형 및 대표 단면을 사용하는 HEC-1 모형의 결과와 비교, 검토하였다.

2. 지배 방정식 및 수치해법

2.1 Muskingum-Cunge 모형

Muskingum-Cunge 모형의 홍수추적식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_0 Q_j^{n+1} + C_1 Q_j^n + C_2 Q_{j+1}^n \quad (1)$$

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

$$C_0 = \frac{-1 + C + D}{1 + C + D} \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{1 + C - D}{1 + C + D} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{1 - C + D}{1 + C + D} \quad (4)$$

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

$$C = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

$$D = \frac{Q_0}{BS_0 c \Delta x} \quad (6)$$

여기서 Δx 와 Δt 는 각각 공간 및 시간 증분, B 는 하폭, S_0 는 하상경사, Q_0 는 기준유량, c 는 파속이다. 기준유량 Q_0 는 하천구간으로의 유입수문곡선으로부터 다음과 같이 구한다.

$$Q_0 = Q_b + \theta(Q_p - Q_b) \quad (7)$$

여기서 Q_b 와 Q_p 는 각각 기저유량(base flow)과 첨두유량(peak flow)이며, θ 는 가중치이다. 홍수추적 시작시점에서의 하도유입량을 기저유량으로 취하였으며, 가중치 θ 의 값은 0.5로 부여하였다. 따라서 기준유량은 기저유량과 첨두유량의 평균값에 해당하게 된다.

파속 c 는 다음과 같이 정의된다.

$$c = \frac{dQ}{dA} \quad (8)$$

유량과 통수단면적의 관계를 다음과 같이 표현하면,

$$Q = \alpha A^m \quad (9)$$

파속 c 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$c = \alpha m A^{m-1} \quad (10)$$

자연하천 구간의 평균적 하상경사(S_0)는 최심하상고 자료를 이용한 선형회귀분석으로부터 산정할 수 있다. 계수 α 및 m 은 하천 횡단면 측량자료를 이용하여 다음과 같이 추정할 수 있다:

하천 구간 내의 특정 단면에 대하여,

- ① 수면의 표고 값을 가정한다.
- ② 수면 표고에 대한 통수단면적 A , 윤변 P 를 구한다.
- ③ 동수반경 $R(= A/P)$ 을 계산한다.
- ④ 구간 내의 평균적 하상경사 S_0 와 Manning의 공식식을 이용하여 유량(Q)을 계산한다.
- ⑤ 새로운 수면 표고 값들을 가정하고 ②~④의 과정을 반복한다.
- ⑥ 하천 구간 내 모든 단면에 대하여 ①~⑤의 과정을 반복한다.
- ⑦ 이와 같은 방법으로 계산된 단면적 및 유량 자료들 중 유량 값이 허용 최대치 이내에 해당하는 자료들을 모두 선택한다.
- ⑧ 통수단면적과 유량 간의 회귀분석에 의하여 α 및 m 을 추정한다.

위의 절차에 따라 구간 내의 α 및 m 의 값이 결정되면, Eq. (9)에 의하여 통수단면적 A 를 구할 수 있다. 이때 Eq. (9)의 Q 의 값으로는 이전 시간 준위에서의 하도 유입량(Q_j^n) 및 유출량(Q_{j+1}^n)과 현 시간준위에서의 하도유입량(Q_j^{n+1})의 평균값이 사용된다. 이와 같이 구한 통수단면적 A 와 α 및 m 을 Eq. (10)에 대입하면 파속 c 의 값을 결정할 수 있다. 따라서 Eqs. (5) and (6)으로부터 C 와 D 의 값이, 또한 그에 따라 C_0 , C_1 및 C_2 의 값이 결정되며, Eq. (1)에 의하여 하도유출량이 산정된다.

2.2 동역학적 하도추적 모형

Muskingum-Cunge 모형과의 비교 및 Manning 공식에 적용할 조도계수 추정을 위하여 본 연구에서 사용된 동역학적 하도 추적 모형은 Preissmann의 기법을 적용하는 폐합형 수계 모형이다. 폐합형 수계에 관한 계산모형의 지배 방정식은 수로 지배 방정식과 절점 지배 방정식으로 구성된다.

하도 흐름에 관한 수로 지배 방정식은 다음의 Eqs. (11) and (12)와 같은 연속방정식 및 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{Q |Q|}{K^2} = 0 \quad (12)$$

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. α 는 운동량 보정계수, g 는 중력가속도이며, x 와 t 는 각각 공간 및 시간좌표를 나타낸다. K 는 통수능으로서 Manning 조도계수(n)를 사용하면 다음과 같이 나타내진다.

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (13)$$

여기서 R 은 동수반경(hydraulic radius)이다.

절점 지배방정식은 연속방정식 Eq. (14)와 등수위 조건식 Eq. (15)로 구성된다.

$$\sum_{l=1}^{L_j} Q_{j,l} + Q_{\text{ext}}(j, t) = 0, \quad j = 1, \dots, J \quad (14)$$

$$y_{j,l} = y_j, \quad l = 1, \dots, L_j; \quad j = 1, \dots, J \quad (15)$$

여기서 J 는 절점의 총수, L_j 는 절점 j 에 연결된 수로의 총수이다. $Q_{j,l}$ 은 수로 l 로부터의 유입량 또는 수로 l 로의 유출량이며 $Q_{\text{ext}}(j, t)$ 는 시각 t 에서의 기지의 외부 유출입량이다. $y_{j,l}$ 은 절점 j 와 l 을 연결하는 수로의 절점 j 측 끝단 계산점에서의 수위를 나타낸다.

수로 지배방정식을 Preissmann의 4점 음해법 (Liggett and Cunge, 1975; Cunge *et al.*, 1980)에 의하여 차별화하면 수로상의 각 계산점에서의 수위 및 유량과 절점 수위에 관한 비선형 연립방정식이 구성되며, 그 해는 Newton-Raphson 방법을 적용하여 구한다. Newton-Raphson 방법을 적용하여 구성되는 수위 및 유량 보정치에 관한 선형 연립방정식의 해법으로는 수로에 대한 forward sweep과 절점 수위 보정치의 계산 및 수로에 대한 return sweep으로 구성되는 폐합형 double-sweep 알고리즘을 사용한다. 수치해법에 관한 상세한 내용은 Holly *et al.* (1990)에 상세히 기술되어 있다.

3. 모형의 적용

우선 동역학적 하도추적 모형을 자연하천에 대하여 적용하였다. 대상 구간은 한강수계의 남한강 구간으로서 팔당댐부터 충주 조정지댐까지의 구간이며, 모형의 지배적인 매개변수로서 조도계수를 추정하였다. 그 후 하천의 지형 자료(건설교통부, 2004)와 산정된 조도계수를 사용하여 본 연구에서 제안한 방법으로 Muskingum-Cunge 매개변수를 추정하였다(2.1절 참조). Muskingum-Cunge 모형의 적용 대상구간은 충주 조정지댐부터 여주까지의 하천구간이다. 추정된 매개변수를 사용한 Muskingum-Cunge 모형의 계산결과를 동역학적 하도추적 모형 및 대표단면을 사용한 HEC-1 Muskingum-Cunge 모형의 계산결과와 비교하였다.

3.1 동역학적 하도추적 모형의 적용

Fig. 1은 대상하천 구간에 대한 동역학적 하도추적 모형의 모식도이다. 구간에 적용된 모형은 2.2 절에서 설명한 폐합형 수계모형이다. 모형은 전체적으로 수지형 수계 모형을 이루며, 이에 따른 상류단 경계조건은 충주 조정지댐과 청평댐의 방류량이다. 하류단 경계조건으로는 팔당댐 관측 수위를 사용하였다. 각 지천에서의 유입유량은 지천 수위표 자료를 수위-유량 곡선식을 사용하여 유량자료로 환산한 후 분류로 유입되도록 모형에 적용하였다. 모형의 상류단인 충주 조정지댐 및 청평댐, 하류단인 팔당댐, 6개의 지천의 유입지점과 남한강과 북한강의 합류점에 각각 절점이 위치하도록 구성하였으며, 절점들은 인접 절점들과 각각 한 개의 수로로 연결하였다. 따라서 모형은 총 10개의 절점과 9개의 수로로 구성되었다.



Fig. 1. Schematic Representation of Modeled River Reach

수리학적 모형의 지배적인 매개변수로서 조도계수의 추정을 수행하였다. 이를 위하여 1987년부터 2004년 까지 발생한 12개의 홍수사상을 선정하여 모형에 적용하였으며, 조도계수는 대상 하천의 전 구간에 걸쳐 일정한 값을 가지도록 하였다. 매개변수 추정을 위한 목적함수로는 다음과 같이 여주 지점에서의 매 시각 수위 관측치와 계산치간의 오차 제곱합이 최소화되도록 하는 최적화 기법을 사용하였다.

$$\text{Minimize } S(n) = \sum_{t=1}^T (H_t - h_t(n))^2 \quad (16)$$

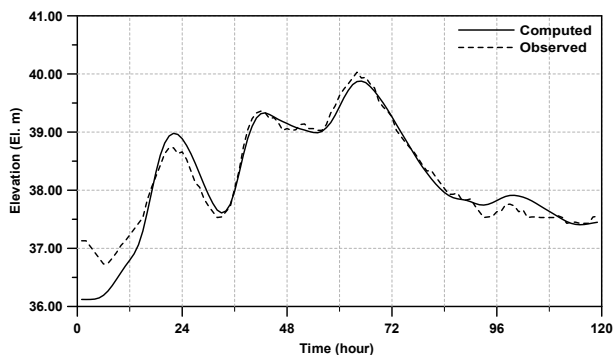
여기서 H_t 와 h_t 는 시각 t 에서의 관측수위와 계산수위를 각각 나타낸다. 최적 추정 방법으로는 Gauss-Newton 방법에 Marquardt (1963)의 기법을 적용한 수정 Gauss-Newton 방법을 적용하였으며, 이를 위하여 상용 소프트웨어인 PEST (Doherty, 2000)가 사용되었다. 최적화 기법에 관한 상세한 내용은 Hill (1992, 1998) 등에 잘 기술되어 있다. Table 1에 추정된 매개변수와 그에 따라 계산된 여주 지점에서의 계산수위와 관측수위와의 RMS 오차를 홍수사상별로 정리하였다. Fig. 2에 매개변수 추정결과의 예시로서 홍수사상 3과 11에 대한 여주에서 계산된 수위와 관측수위를 함께 도시하였다.

3.2 Muskingum-Cunge 모형의 적용

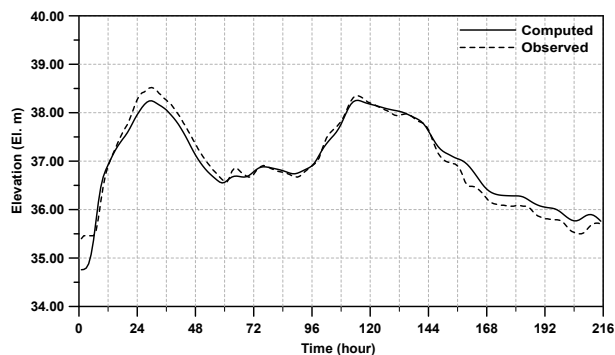
충주 조정지댐에서 여주 지점까지의 구간에 대하여 Muskingum-Cunge 모형을 적용하였다. 구간 내의 지천 유입은 고려하지 않았으며, 모형의 매개변수는 2.1 절에서 설명한 절차에 따라 추정하였다. Manning 공식에 사용된 조도계수는 동역학적 하도추적 모형의 매개변수 추정 결과의 평균값인 0.0362를 사용하였으며 (Table 1 참조), 수면표고는 최심하상고로부터 0.1 m씩 증가하도록 하였다. 이와 같은 과정을 통하여 산정된 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수 a 와 m 의 값은 각각 0.3193과 1.2356이며, Fig. 3에 통수단면적과 유량과의 회귀분석 결과를 도시하였다. HEC-1 Muskingum-Cunge 모형 역시 동일한 구간에 대하여 적용하였다. HEC-1 모형의 매개변수 파속 c 의 추정에는 동일한 구간에 대하여 한국수자원공사의 KOWACO 홍수추적 모형에서 산정한 하폭이 540 m이고, 옆면경사가 1:1인 사다리꼴 단면을 대표단면으로 사용하였다(한국수자원공사, 2003). 매개변수 a 와 m 의 값은 대표단면에서 수심 0.5 m 및 5.0 m인 경우에 대한 Manning의 유량 관계식을 연립하여 구하여 모형에 적용하였다.

Table 1. Results of Calibration

Flood Event		Peak Discharge of the 2nd Chungju Dam (m ³ /s)	Manning's n	RMS error (m)
Number	Duration			
1	88/07/19 - 07/24	5,340	0.0364	0.2947
2	02/08/31 - 09/02	4,788	0.0303	0.2146
3	87/08/29 - 09/02	4,573	0.0346	0.1825
4	89/07/27 - 07/31	3,505	0.0374	0.2241
5	99/09/20 - 09/28	3,066	0.0303	0.1354
6	99/08/02 - 08/05	2,736	0.0326	0.0616
7	00/09/14 - 09/20	2,592	0.0310	0.2142
8	90/06/21 - 06/23	2,443	0.0387	0.0900
9	88/07/13 - 07/17	2,178	0.0486	0.1686
10	03/08/27 - 08/30	1,900	0.0277	0.1810
11	00/07/22 - 07/25	1,266	0.0234	0.3700
12	93/07/13 - 07/15	992	0.0636	0.4223
Average			0.0362	0.2133



(a) Flood event 3



(b) Flood event 11

Fig. 2. Comparison of Observed and Calculated Stages

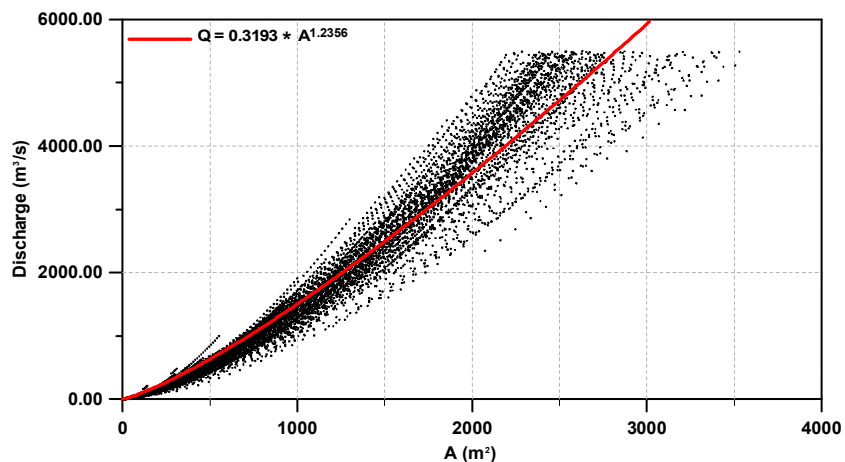


Fig. 3. Estimation of Muskingum-Cunge Parameters

모형의 비교를 위하여 여주 지점에서의 유량을 모의하였다. Muskingum-Cunge 모형과의 비교를 위하여 지천유입을 고려하지 않은 폐합형 수계모형을 각 홍수사상에 적용하여, 여주지점에서의 유량을 산정하였다. 하폭은 540 m로 일정한 값을 부여하였다(Eq. (6) 참조). 충주조성지댐부터 여주까지의 하천구간은 배수위 영향이 미치지 않는 구간으로서 Muskingum-Cunge 모형에 의한 계산결과가 동역학적 모형의 계산결과를 비교적 잘 재현하였다. 각 모형의 모의결과를 사용하여 무차원화된 RMS 오차(Normalized RMS error)를 구하였다. 무차원 RMS 오차(E)는 Eq. (17)과 같이 구할 수 있다.

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T \{(Q_t - q_t)/Q_t\}^2}{T}} \quad (17)$$

여기서 Q_t 는 시각 t 에서의 지천유입을 고려하지 않은 폐합형 수계모형의 유량 계산 결과이며, q_t 는 동일 시각 t 에서의 Muskingum-Cunge 모형의 모의 결과이다.

Table 2는 각 홍수사상에 대한 무차원화된 RMS 오차를 정리한 것이다. 본 연구에서 제안한 방법으로 추정된 매개변수를 사용한 Muskingum-Cunge 모형의 무차원 RMS 오차가 대표단면을 사용한 HEC-1 모형에 비하여 훨씬 작은 것으로 나타났다. HEC-1 모형과 폐

합형 수계모형과의 무차원 RMS 오차는 홍수사상 6에서 최대 0.87이며, 전체 홍수사상에 대한 평균값은 0.26으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 방법으로 추정된 매개변수를 사용한 Muskingum-Cunge 모형의 경우에는 최대값이 홍수사상 12에서의 0.36이었으며, 전체 홍수사상의 평균은 0.10으로 HEC-1 모형에 비하여 폐합형 수계 모형의 결과와 잘 일치하였다.

Table 3은 각 모형들의 첨두 유량을 비교하여 정리한 것이다. 첨두 유량의 비교는 동역학적 하도 추적모형의 첨두 유량에 대한 Muskingum-Cunge 모형의 첨두 유량의 상대오차율을 구하여 검토하였다. 대표 단면을 사용한 HEC-1 모형의 경우 동역학적 하도 추적모형과의 상대오차율이 15.22 %로서, 본 연구에서 제안한 방법으로 추정한 매개변수를 사용한 Muskingum-Cunge 모형의 상대오차율인 6.17 %에 비하여 그 차이가 크게 나타났다.

Table 4에는 각 모형의 첨두 유량의 발생시각을 정리하여 나타내었다. 첨두 유량 발생시각은 동역학적 하도 추적모형과 Muskingum-Cunge 모형의 첨두 유량 발생시각 차이의 절대 값이 적용된 홍수기간의 전체 모의 시간에서 차지하는 비율을 구하여 비교하였다. 첨두 유량 발생 시각 역시 본 연구에서의 방법으로 매개변수를 추정한 Muskingum-Cunge 모형의 모의 결과가 대

Table 2. Comparison of Normalized RMS Errors

Flood Event		Peak Discharge of the 2nd Chungju Dam (m ³ /s)	Normalized RMS error	
Number	Duration		HEC-1	This Study
1	88/07/19 - 07/24	5,340	0.09	0.04
2	02/08/31 - 09/02	4,788	0.18	0.05
3	87/08/29 - 09/02	4,573	0.10	0.05
4	89/07/27 - 07/31	3,505	0.16	0.06
5	99/09/20 - 09/28	3,066	0.11	0.05
6	99/08/02 - 08/05	2,736	0.87	0.13
7	00/09/14 - 09/20	2,592	0.16	0.04
8	90/06/21 - 06/23	2,443	0.11	0.04
9	88/07/13 - 07/17	2,178	0.24	0.08
10	03/08/27 - 08/30	1,900	0.11	0.04
11	00/07/22 - 07/25	1,266	0.31	0.20
12	93/07/13 - 07/15	992	0.65	0.36
Average			0.26	0.10

Table 3. Comparison of the Peak Discharge Calculated by the Models

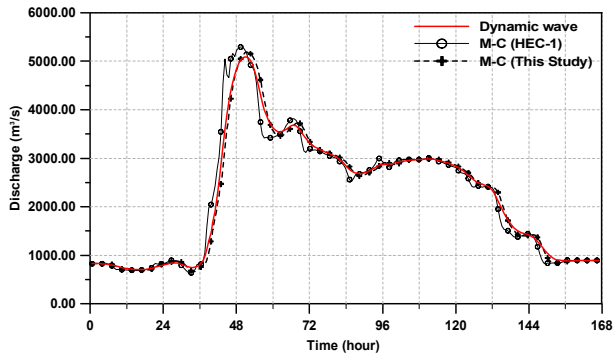
Flood Event	Peak discharge (m ³ /s)			Relative errors (%)	
	Dynamic wave	HEC-1	This Study	HEC-1	This Study
1	5,087	5,299	5,188	4.17	1.99
2	4,326	4,807	4,464	11.12	3.19
3	4,215	4,622	4,315	9.66	2.37
4	3,394	3,573	3,467	5.27	2.15
5	2,894	3,112	2,998	7.53	3.59
6	2,330	2,732	2,438	17.25	4.64
7	2,427	2,626	2,476	8.20	2.02
8	2,324	2,454	2,408	5.59	3.61
9	1,988	2,153	2,048	8.30	3.02
10	1,814	1,926	1,893	6.17	4.36
11	1,127	1,568	1,264	39.13	12.16
12	654	1,048	856	60.24	30.89
Average	2,715	2,993	2,818	15.22	6.17

Table 4. Comparison the Time to Peak Discharge Calculated by the Models

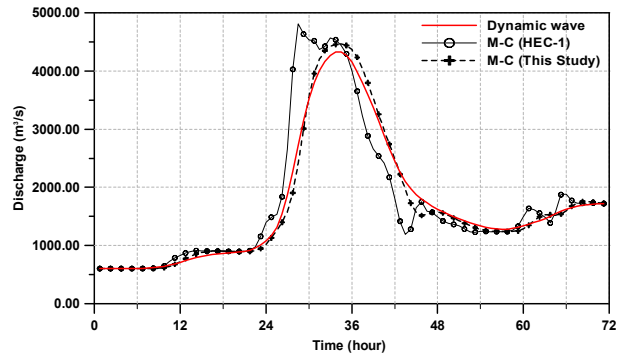
Flood Event	Time to peak discharge (hour)			Differences (hour)	
	Dynamic wave	HEC-1	This Study	HEC-1	This Study
1	50.7	50.1	51.4	0.6	0.7
2	34.5	28.5	34.5	6.0	0.0
3	64.0	62.0	65.0	2.0	1.0
4	56.1	51.9	56.1	4.2	0.0
5	115.6	112.2	114.8	3.4	0.8
6	32.3	30.0	32.3	2.3	0.0
7	47.5	35.5	48.5	12.0	1.0
8	24.4	20.4	24.8	4.0	0.4
9	40.1	24.3	40.1	15.8	0.0
10	32.8	29.6	32.8	3.2	0.0
11	82.8	77.4	82.2	5.4	0.6
12	24.4	21.6	24.0	2.8	0.4
Average	50.4	45.3	50.5	5.1	0.4

표 단면을 사용한 HEC-1 모형에 비하여 동역학적 하도 추적 모형의 모의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 전체 홍수사상에서의 침투 유량 발생 시각 차이에 대한 오차율의 평균은 HEC-1 모형이 5.01 %이며,

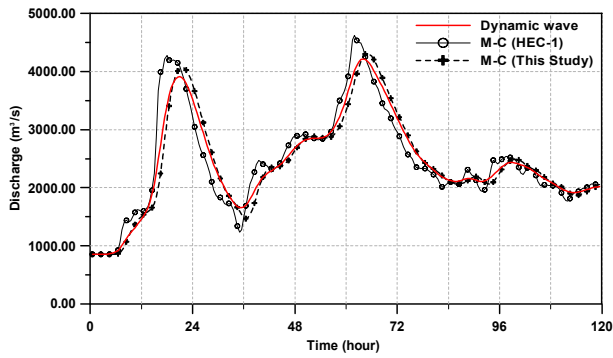
본 연구에서의 방법으로 추정된 매개변수를 사용한 Muskingum-Cunge 모형의 경우는 0.44 %이다. Fig. 4에 각 모형들의 모의 결과인 여주지점에서의 유량수문 곡선을 홍수사상별로 비교하여 도시하였다.



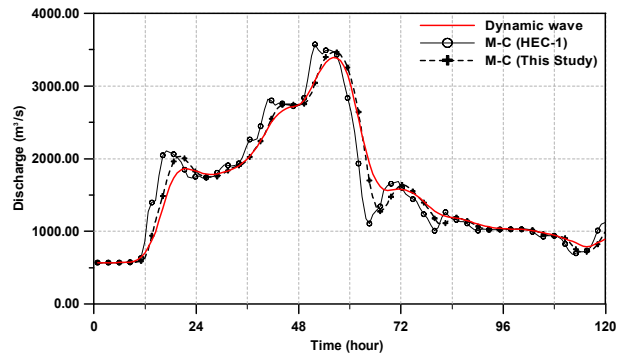
(a) Flood event 1



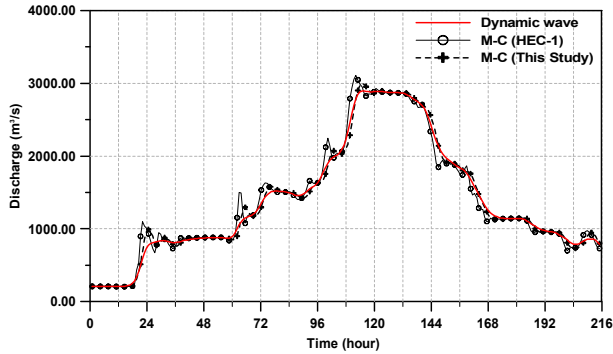
(b) Flood event 2



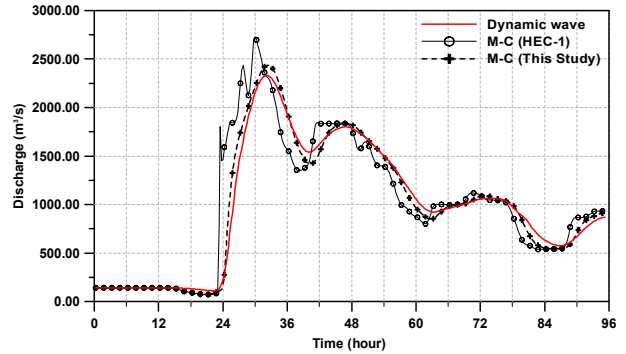
(c) Flood event 3



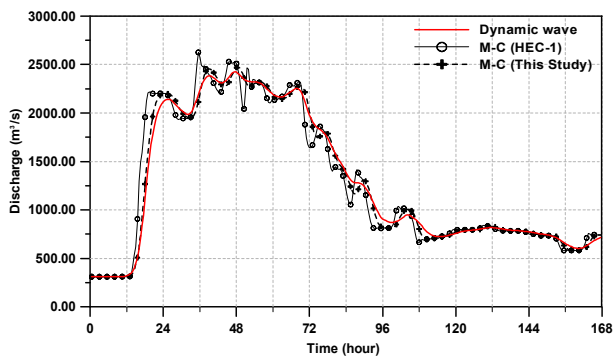
(d) Flood event 4



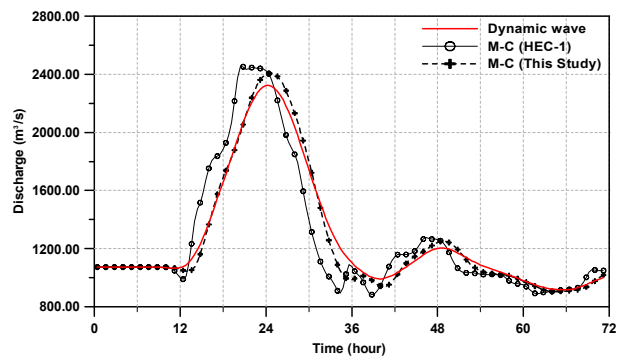
(f) Flood event 5



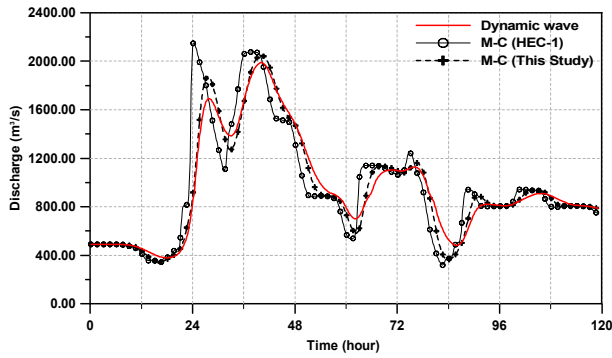
(g) Flood event 6



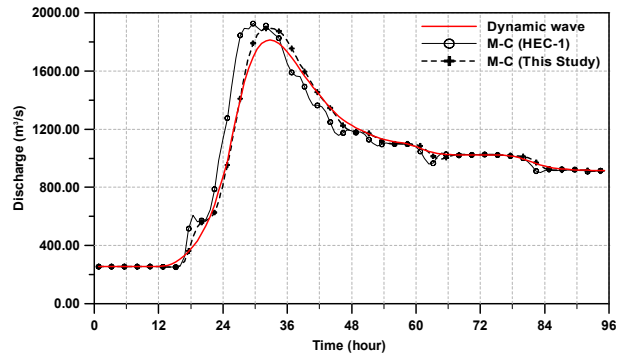
(h) Flood event 7



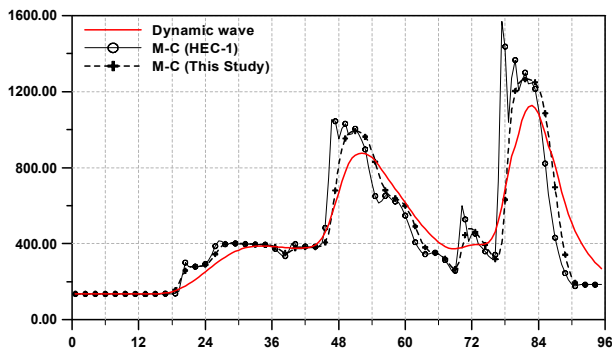
(i) Flood event 8



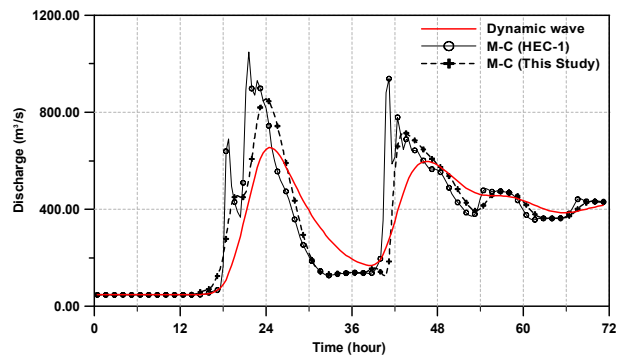
(j) Flood event 9



(k) Flood event 10



(l) Flood event 11



(m) Flood event 12

Fig. 4. Comparison of Discharges Calculated by Each Model

4. 결 론

하도의 횡단 및 종단 지형자료와 조도계수를 이용하여 자연하천에 대한 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수들을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 불규칙한 하천단면을 갖는 자연하천 구간에 대하여 구간의 물리적 특성을 적절히 대표할 수 있도록 매개변수들을 산정하는 것으로서 우선 각 단면에서의 다양한 수위에 대하여 통수단면 및 동수반경을 계산한 후, Manning 공식을 이용하여 유량을 산정한다. 이러한 과정은 하도에서의 모든 단면에 대하여 반복되며, 최종적으로 통수단면과 유량을 통한 회귀 분석에 의하여 매개변수들을 추정한다.

이와 같은 Muskingum-Cunge 모형의 매개변수 추정 방법을 충주댐부터 여주까지의 남한강 구간에 적용하여 Muskingum-Cunge 매개변수를 추정하였다. 추정된 Muskingum-Cunge 모형의 계산결과를 동역학적 계산 모형 및 대표 단면을 사용하는 HEC-1 모형의 결과와 비교하였다. 무차원화된 RMS 오차를 통하여 비교한 결과, 본 연구에서 제시한 방법으로 추정한 매개변수를 사용한 Muskingum-Cunge 모형의 계산 결과가 HEC-1 모형에 비하여 동역학적 모형의 결과를 잘 재

현하는 것으로 나타났다. 또한 침투유량의 크기 및 발생시각에 있어서도 HEC-1의 Muskingum-Cunge 모형에 비하여 동역학적 모형의 계산결과와 월등하게 잘 일치하였다. 이와 같은 결과는 모의된 12개 홍수사상 모두에 대하여 일관적으로 나타났다.

본 연구에서는 계산의 복잡성과 안정성 측면에서 동역학적 하도추적 모형보다 유리하면서도, 기존의 Muskingum-Cunge 모형보다 동역학적 하도추적 모형과 더욱 유사한 계산결과를 제공할 수 있는 매개변수 추정방법을 제시함으로써, Muskingum-Cunge 모형의 적용성을 향상시켰다. 이러한 Muskingum-Cunge 계산 모형은 하상경사의 증가에 따른 해의 안정성 문제 때문에 동역학적 모형의 적용이 어려운 국내 대하천의 지류 등에 대한 부정류 계산에 유용하게 적용될 수 있다. 다만, 동역학적 모형과는 달리 수위를 제공할 수 없는 모형의 근본적인 한계가 남아 있으며, 따라서 적용대상 구간의 수위를 구하고자 하는 경우에는 계산된 유량으로부터 수위를 결정하는 별개의 방법이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술

혁신F01)에 의한 차세대 홍수방어 기술개발 연구단의 연구비 지원에 의해 일부 수행되었으며, 이에 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2004). 남한강 하천정비기본계획 및 하천대장, 서울지방국토관리청
- 김대근, 서일원 (2003). “Muskingum-Cunge 홍수추적 방법의 오차해석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 751-760.
- 김진수 (1995). “수리학적 유출모형에 의한 홍수추적 : 선형 Muskingum-Cunge법을 이용한 단위유역의 추적.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제37권, 제6호, pp. 59-69.
- 김진수 (1996). “선형 Muskingum-Cunge법에서의 수치적 인자의 변화가 유출추적에 미치는 영향.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제29권, 제5호, pp. 139-150.
- 김진수, 김진홍 (1999). “선형과 비선형 Muskingum-Cunge법에 의한 유출곡선의 특성 비교.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp. 417-426.
- 남선우, 박상우 (1985). “대류-확산 모델을 이용한 홍수 추적에 관한 연구.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제19권, 제3호, pp. 265-270.
- 이상호, 이길성 (1994). “Muskingum-Cunge 방법에 의한 남한강 홍수추적.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제27권, 제4호, pp. 105-114.
- 전무갑, 지흥기 (1996). “외부전단력 적용에 의한 균일대칭 복단면에서의 하도추적.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제29권, 제3호, pp. 217-228.
- 한국수자원공사 (2003). KOWACO 홍수분석모형 개발 보고서, 한국수자원공사 물관리센터
- 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). “Volume 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.
- Doherty, J. (2000). *Visual PEST: Model-independent Parameter Estimation*. Watermark Computing & Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, Ontario, Canada.
- Hill, M.C. (1992). *A computer program (MODFLOWP) 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.
- Huang, G.-R., Hu, H.-P., and Yin, D.-K. (2001). “Stability condition analysis of Muskingum-Cunge flood routing model.” *Shuikexue Jinzhan/Advances in Water Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 206-209.
- Hydrologic Engineering Center, (1990). *HEC-1 flood hydrograph package, program users manual: U.S. Army Corps of Engineers*, Davis, California.
- Koussis, A.D. (1983). “Unified theory for flood and pollution routing.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 12, pp. 1652-1664.
- 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, pp. 89-182.
- Marquardt, D.W. (1963). “An Algorithm for Least Square Estimation of Nonlinear Parameters.” *J. Soc. of Ind. and Appl. Math.*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441.
- 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 Chaganti, P.V. (1994). “Variable-

- parameter Muskingum-Cunge method revisited.” *Journal of Hydrology*, Vol. 162, No. 3-4, pp. 433-439.
- 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.
- Ponce, V.M., and Lugo, A. (2001). “Modeling looped ratings in Muskingum-Cunge routing.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 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.
- Price, R.K. (1985). “Flood routing.” *Developments in hydraulic engineering*, P. Novak, ed. Vol. 3, Elsevier, New York, pp. 129-173.
- 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 Science Discussions*, Vol. 4, No. 3, pp. 1549-1592.

논문번호: 09-145	접수: 2009.12.31
수정일자: 2010.02.08	심사완료: 2010.02.08