



Optimal parameter derivation for Muskingum method in consideration of lateral inflow and travel time

Kim, Sang Ho^a · Kim, Ji-sung^b · Lee, Chang Hee^{c*}

^aDepartment of Civil Engineering, Sangji University

^bHydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

^cDepartment of Renewable Energy Resources, Jungwon University

Paper number: 17-076

Received: 17 September 2017; Revised: 17 October 2017; Accepted: 17 October 2017

Abstract

The most important parameters of the Muskingum method, widely used in hydrologic river routing, are the storage coefficient and the weighting factor. The Muskingum method does not consider the lateral inflow from the upstream to the downstream, but the lateral inflow actually occurs due to the rainfall on the watershed. As a result, it is very difficult to estimate the storage coefficient and the weighting factor by using the actual data of upstream and downstream. In this study, the flow without the lateral inflow was calculated from the river flow through the hydraulic flood routing by using the HEC-RAS one-dimensional unsteady flow model, and the method of the storage coefficient and the weighting factor calculation is presented. Considering that the storage coefficient relates to the travel time, the empirical travel time formulas used in the establishment of the domestic river basin plan were applied as the storage coefficient, and the simulation results were compared and analyzed. Finally, we have developed a formula for calculating the travel time considering the flow rate, and proposed a method to perform flood routing by updating the travel time according to the inflow change. The rise and fall process of the flow rate, the peak flow rate, and the peak time are well simulated when the travel time in consideration of the flow rate is applied as the storage coefficient.

Keywords: Channel flood routing, Muskingum, Travel time, Storage constant, Lateral inflow

측방유입유량 및 유하시간을 고려한 Muskingum 최적 매개변수 도출

김상호^a · 김지성^b · 이창희^{c*}

^a상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과, ^b한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, ^c중원대학교 이공대학 신재생에너지자원학과

요 지

하도홍수추적 방법에서 많이 사용되고 있는 Muskingum 방법의 가장 중요한 매개변수는 저류상수와 가중인자이다. Muskingum 방법은 상류 유입지점에서 하류 유출지점까지 측방유입량이 고려되지 않지만, 실제 유역에는 강우로 인하여 측방유입유량이 발생한다. 이로 인해 상하류 실측 자료를 이용하여 저류상수 및 가중인자를 산정하는 것이 매우 어려운 상황이다. 이에 본 연구는 HEC-RAS 1차원 부정류 해석모형을 이용한 수리학적 홍수추적을 통해 측방유입유량이 제외된 상태에서의 하도에서 전파되는 유량을 산정하였고, 이를 이용하여 저류상수 및 가중인자를 산정하는 방법을 제시하였다. 이와 함께 저류상수가 유하시간과 관계있음을 감안하여 국내 하천기본계획 수립 시 사용되는 유하시간 경험 공식들을 저류상수로 적용한 결과를 비교 분석하였다. 마지막으로 유량이 고려된 유하시간 산정 식을 개발하고, 유입량의 변화에 맞춰 유하시간을 업데이트하여 모의를 수행하는 방법을 제시하였다. 유량을 고려한 유하시간을 저류상수로 적용한 경우, 유량의 상승 및 하강 과정, 첨두 유량, 그리고 첨두 시간에 대해서 잘 모의하는 것으로 분석되었다.

핵심용어: 하도홍수추적, Muskingum, 유하시간, 저류상수, 측방유입유량

*Corresponding Author. Tel: +82-43-730-8685
E-mail: chlee@jwu.ac.kr (C. H. Lee)

1. 서론

홍수추적에서 많이 사용되는 Muskingum 방법은 유입량 및 유출량의 관계 조건을 이용하고, 대형저류(Prism Storage)와 썰기저류(Wedge Storage)를 조합하여 하천구간에서의 저류량의 변화를 모의한다(Chow et al., 1988). Muskingum 방법에서 가장 중요한 매개변수는 저류상수 K 와 가중인자 X 이다. X 의 값은 모의 되는 썰기저류의 형태와 관련되는데, Chow et al.(1988)에 의하면 0에서 0.5의 범위를 지니며, 자연 하천에서는 추적구간에 유출기록이 없을 경우에 0.2를 흔히 사용한다(Yun, 2007). 반면 K 의 경우 홍수파가 구간을 가로질러 유하하는 시간이며, 구간을 가로 지르는 상하류 침투유량의 발생 시간의 차로 추정될 수 있는데, 하천구간에서의 관측된 유입량 및 유출량 자료를 이용하여 가장 적합한 K 및 X 값을 도출할 수 있다(McCarthy, 1938; Chow et al., 1988; Linsley et al., 1975; Wilson, 1990)

한편 Muskingum 방법을 통해 하도구간을 따라 홍수추적을 수행할 때, 유역으로부터 하도 측면 방향으로 직접 유입되는 측방유입량은 없는 것으로 가정한다(O'Donnell, 1985). 그러나 실제 홍수가 발생하는 동안에는 유역 전역에 강우가 발생되며, 이로 인해 하도구간이 가로지르는 상하류 관측지점 사이에 유역 유출량에 해당하는 부분이 측방유입량으로 유입된다. 그러므로 구간 하류지역에서 관측한 유량은 구간 상류지역에서 유입된 유량과 측방유입량이 합쳐진 값으로 계측이 되며, 이로 인하여 상하류 구간 사이 유량의 침투값이 발생한 시간차이인 홍수파의 전달시간을 추정하기에는 많은 오류를 내포한다. 또한 홍수 기간 동안에 상류지역 관측 값과 하류지역 관측 값을 이용하여 하도홍수추적을 수행할 경우, 구간 하류에서 측정된 값에 구간 상류의 유입량과 측방유입량의 기여정도를 명확히 알 수 없기 때문에, 하도추적 매개변수에 따라 구간 상류의 유입량이 과소 산정되거나 과다 산정될 수 있고, 반대로 유역유출량이 과다 산정되거나, 과소 산정될 수 있다. 따라서 이러한 오류를 제거하기 위해서는 상류지점 유입량을 측방유입량과 명확히 구분하여 하류 지역으로 어떻게 전달되는 지는 분석할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 수리학적 하도 홍수추적 모형인 HEC-RAS 1차원 부정류 모형에 측방유입량의 영향이 없는 것으로 가정하여 상류지역 유입량을 대입하여 구간 하류로 유하하는 과정을 모의하였고, 이는 하류지점 관측지점에서의 유량 중 측방유입량이 제외된 상류 유입유량이 하도추적에 의해 구간 하류로 유하한 것으로 볼 수 있다.

한편 McCuen (2004)과 Kim and Lee (2016)에 따르면

Muskingum 모형의 매개변수인 저류상수 K 는 하도구간에 대한 홍수파의 전파시간과 관계가 있으며, 하천구간을 통한 유하시간과 매우 유사한 값을 가지는 것으로 제시한 바 있다. 이에 본 연구에서는 하천기본계획에서 사용되는 다양한 유하시간 공식들을 적용하여 이중 실제 하천에 적합한 방법을 도출하였다. 적용과정에서 단일구간으로 모의할 경우와 구간을 여러 개 구간으로 세분화 하였을 때 영향을 분석하였다. 마지막으로 HEC-RAS 1차원 모형을 통해 분석된 자료를 이용하여 하도구간에서 모의된 하도거리, 하도경사, 유량, 유하시간 자료를 토대로 유량을 고려한 유하시간 산정공식을 개발하고, 이를 Muskingum에 적용하여 기존 방법과 비교 검토를 수행하였다.

2. 하도 홍수추적

2.1 Muskingum 기본 이론

Muskingum 모형은 Fig. 1과 같이 하도 구간 내(A 단면에서 B 단면까지)에 측방유입이 없는 것으로 가정하고 연속방정식과 하도의 선형 저류관계를 이용하여 Eqs. (1) and (2)와 같이 구성된다(McCarthy, 1938; O'Sullivan et al., 2012; Kim and Lee, 2016).

$$\text{연속방정식: } \frac{dS_t}{dt} = I_t - O_t \tag{1}$$

$$\text{저류방정식: } S_t = K[XI_t + (1 - X)O_t] \tag{2}$$

여기서, S_t , I_t , O_t 는 시간 t 에서의 저류량, 상류 유입량, 하류 유출량이며, K , X 는 저류상수 및 가중인자이다.

저류상수 K 는 하도의 유하시간과 매우 유사한 값을 가지며 (McCuen, 1998; O'sullivan et al., 2012), K 와 X 값이 주어지면 다음 Eq. (3)을 통해 하도 홍수추적이 수행된다.

$$Q_t = C_1 I_t + C_2 I_{t-\Delta t} + C_3 O_{t-\Delta t} \tag{3}$$

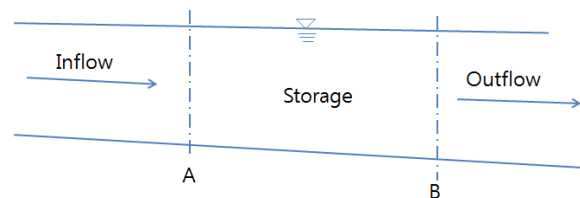


Fig. 1. Inflow, storage and outflow for a reach of river

여기서, C_1 , C_2 , 그리고 C_3 는 Eqs. (4)~(6)과 같다.

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - KX}{(1-X)K + 0.5\Delta t} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{KX + 0.5\Delta t}{(1-X)K + 0.5\Delta t} \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{-0.5\Delta t + (1-X)K}{(1-X)K + 0.5\Delta t} \quad (6)$$

여기서, Δt 는 시간 간격이며, $I_{t-\Delta t}$ 와 $O_{t-\Delta t}$ 는 $t-\Delta t$ 에서의 유입량과 유출량을 나타낸다.

2.2 측방유입유량의 영향

실제 홍수가 발생하는 동안에는 유역 전역에 강우가 발생되며, Fig. 2와 같이 A-B 하도구간을 가로지르는 구간으로 유역 유출량(측방유입유량)이 유입된다. Fig. 2와 같이 측방유입유량의 영향으로 유출량이 유입량보다 큰 값을 가지게 되므로, Eq. (1)의 매 시간별 저류량은 양의 값을 발생하지 않고, 음의 값만 산정되게 된다. 그러나 강우로 인한 유출로 인하여 실제 하천에서는 유량이 있으므로 저류량이 항상 음의 값을 가지는 것은 물리적으로 있을 수 없다.

Fig. 3은 청미천 유역의 유역도 및 국가수문 측정지점을 나타내며, Fig. 4는 청미천 유역의 삼합교(파란 점선)와 장호원(붉은 점선) 두 측정 지점에서 측정한 유량이다. 두 구간 중 상류지역에 위치한 장호원(유역면적 431.23 m²)에서 하류지역

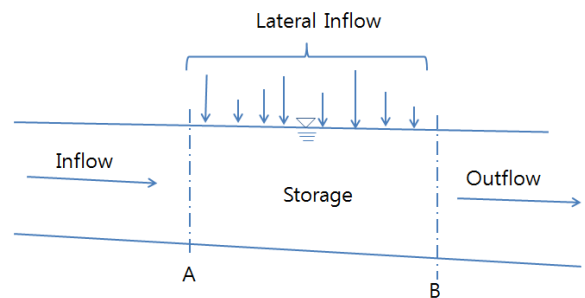
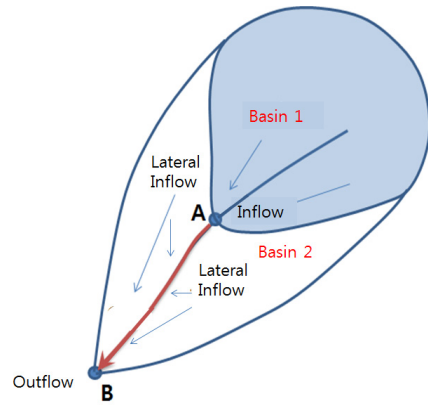


Fig. 2. Inflow, storage and outflow and lateral inflow for a reach of river

에 위치한 삼합교 측정지점(유역면적 584.07 km²)까지의 거리는 15.6 km인데, 상류지역에 위치한 장호원 지점의 유입량과 하류지역에 위치한 삼합교 지점의 유출량을 비교하였다. Fig. 4와 같이 2010년 9월 21일(Event 1), 2011년 7월 3일(Event 2), 2012년 7월 6일(Event 3), 2012년 8월 31일(Event

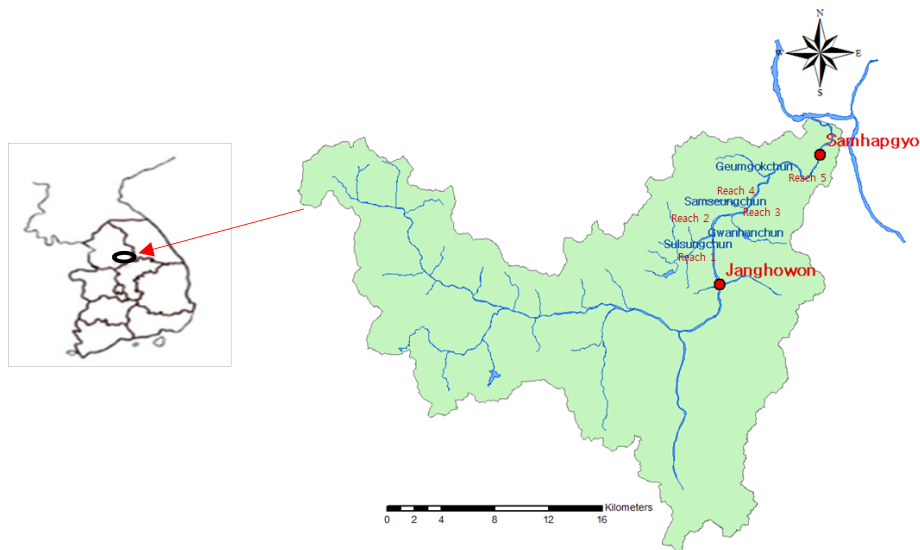


Fig. 3. Map of the study area

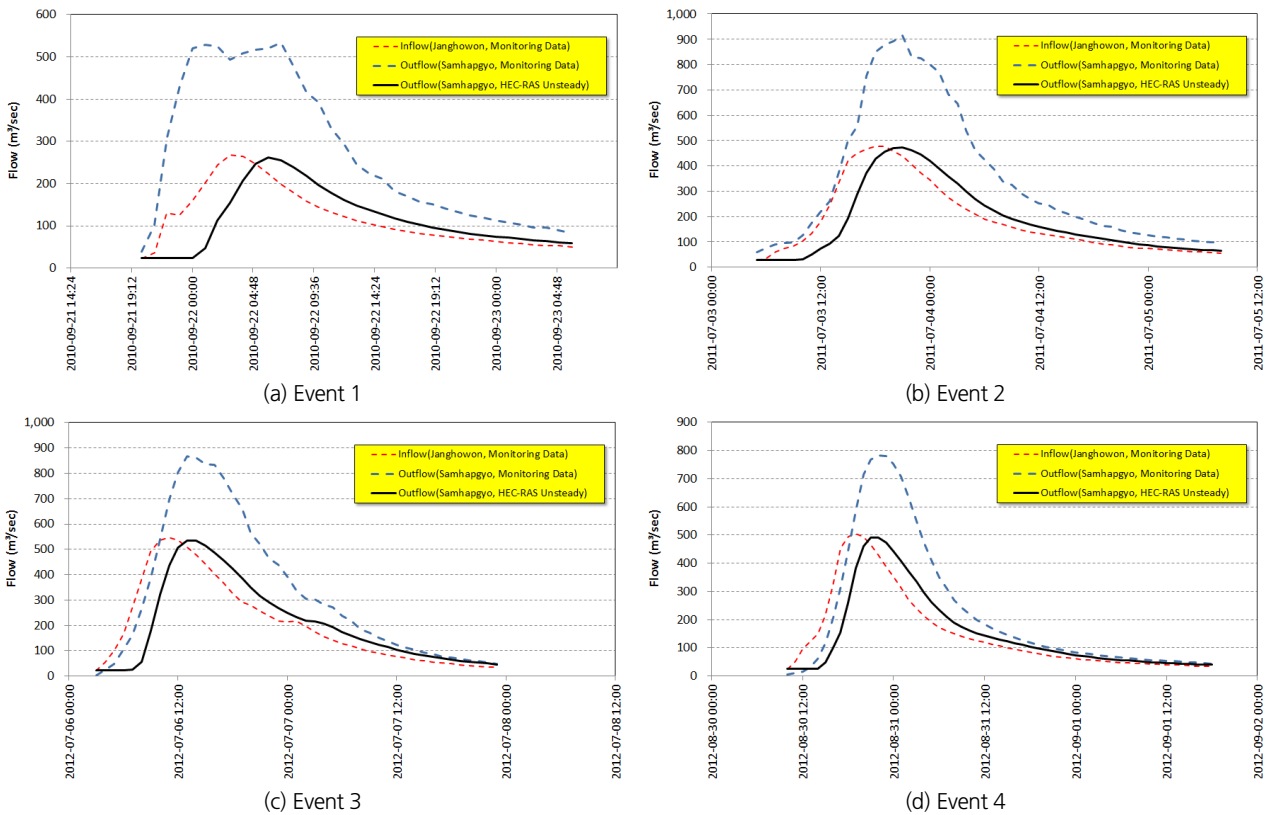


Fig. 4. Inflow, storage and outflow for a reach of river

4) 사상에 대한 측정 유량을 비교한 결과, 측방유입유량의 영향으로 하류지역에 위치한 삼합교 측정지점의 첨두값은 장호원 측정지점의 첨두값보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다(1.5~2.0배). 이와 함께 Fig. 4(a)와 같이 장호원 지점의 유입량에서는 첨두치가 한번 발생하더라도 유역 배수특성에 따라 유역 출구지점에서는 첨두치가 여러 번 발생되기도 한다. 한편, 삼합교에서 측정된 유량은 상류지역 장호원의 유입유량이 하도 홍수추적을 통해 전달되는 유량과 측방유입유량으로 각각 구분할 수가 없다. 이로 인해 하도추적 혹은 유역추적 매개변수에 따라 구간 상류의 유입량이 과소 산정되거나 과다 산정될 수 있고, 반대로 유역유출량이 과다 산정되거나, 과소 산정될 수 있다. 이에 본 연구에서는 하천기본계획(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012)에서 이용된 HEC-RAS자료를 바탕으로 1차원 부정류 모의를 통해 Fig. 4와 같이 삼합교에서 측정된 유량 중에서 장호원 지점으로부터 유하한 유량을 분리하였다(검은실선).

2.3 저류량 관계식을 이용한 x 및 k 의 산정

연속방정식과 운동량 방정식을 이용하여 계산하는 HEC-RAS 1차원 부정류 해석모형은 홍수추적과정을 적절히 잘 묘

사하지만, 수로 및 홍수터의 지형 및 저항 특성, 그리고 초기 및 경계조건과 같은 많은 양의 세밀한 입력 자료를 필요로 하며(Singh, 1988), 실행시키는데 매우 복잡하여 종종 어려움을 동반하기도 한다(France, 1985; Kim and Lee, 2016). 한편 Haktanir and Ozmen (1997)은 수문학적 홍수추적방법은 실용적인 면에서 수행하기에는 비교적 간단하면서도 합리적인 정확성을 지니는 것으로 밝힌 바 있다. Muskingum 모형을 이용한 수문학적 홍수추적은 입력자료 및 계산과정이 비교적 간단하며, 수리학적 모의를 수행하기 위한 입력 자료가 충분하지 않을 때 유용하게 사용될 수 있다(Tung, 1985; Kundzewics and Strupczewski, 1982).

Muskingum 모형을 수행하기 위해서 필요한 가중인자 x 및 저류상수 K 는 유입 및 유출수문곡선을 이용하여 누가 저류량과 $XI + (1 - X)O$ 의 관계를 도출함으로써 산정할 수 있다(Gray, 1973; Wilson, 1983). 여기서, I 는 유입량이고 O 는 유출량이다.

누가 저류량은 Eq. (1)로부터 다음과 같이 전개된다.

$$S_t = S_{t-\Delta t} + \Delta t \left(\frac{I_{t-\Delta t} + I_t}{2} \right) - \Delta t \left(\frac{Q_{t-\Delta t} + Q_t}{2} \right) \quad (7)$$

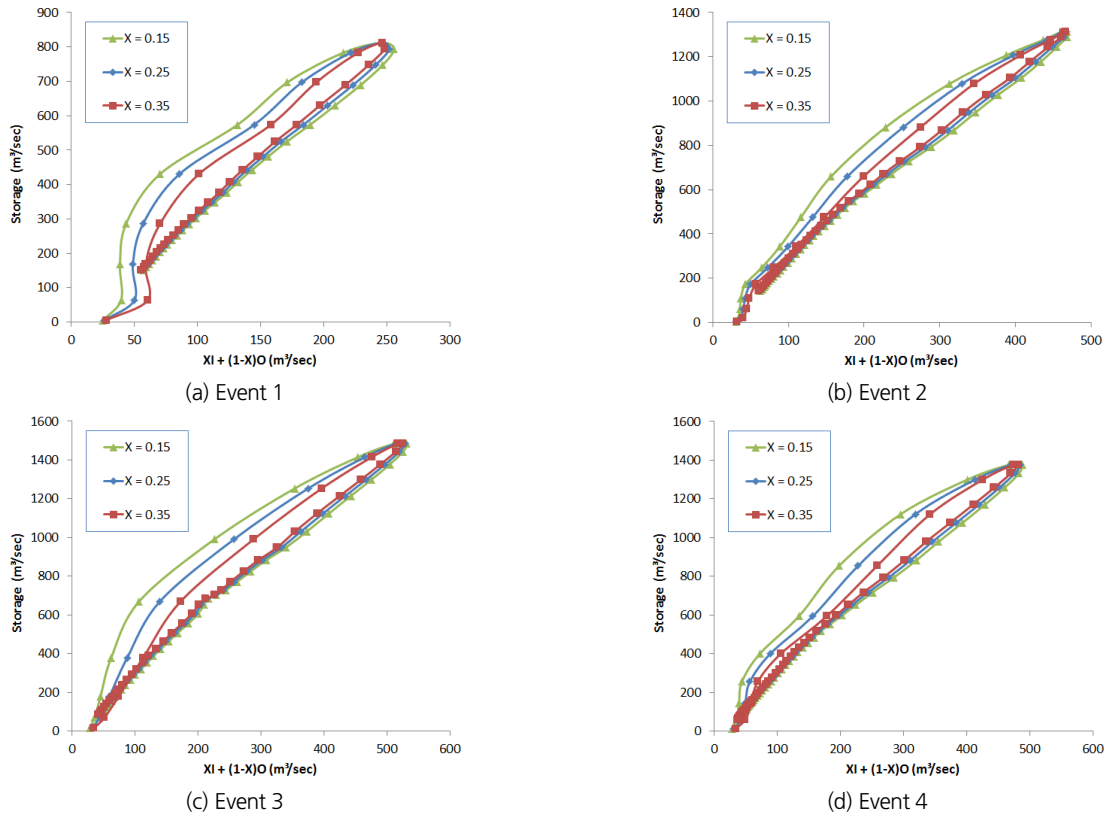


Fig. 5. Storage loops from HEC-RAS unsteady simulation result and inflow for the Fig. 4

그러나 앞서서도 언급하였듯이 장호원(유입량)과 삼합교(유출량) 관측 자료를 이용하여 Eq. (7)의 저류량을 산정할 경우, Figs. 4(a) and 4(b)와 같이 유입량보다 유출량이 훨씬 크기 때문에 저류량은 모든 시간대별 음의 값을 가지게 되는데, 이는 물리적으로 맞지 않은 결과를 계산하게 된다.

Muskingum 하도추적 방법에 사용되는 가중인자 및 저류상수를 도출하기 위해서는 측방유입량을 제외한 하도구간내 유입량과 유출량 흐름에 대해서만 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 상류지점(장호원)으로부터 HEC-RAS 1차원 부정류 모의를 통해 하류지점(삼합)까지 모의한 결과를 상류 유입량에 조건에서 하도추적의 최종 유출량에 대한 참값인 것으로 설정하였다.

Table 1. Derivation of storage coefficients by storage of Fig. 5

Event no.	Storage coefficient
1	2.88
2	2.99
3	2.97
4	2.92
Average	2.94

Fig. 5는 가중인자 X 와 저류상수 K 를 도출하는 과정으로 본 연구에서는 HEC-RAS 모의 결과를 바탕으로 누가 저류량과 $XI + (1 - X)O$ 의 관계를 이용하여 청미천 유역에 대한 가중인자 X 는 0.35이고, 그때의 기울기에 해당하는 저류상수 K 는 Table 1과 같이 평균 2.94를 나타내었다.

2.4 유하시간을 이용한 K 의 적용

Muskingum 모형의 매개변수인 저류상수 K 는 하도구간에 대한 홍수파의 전파시간과 관계가 있으며, 하천구간을 통한 유하시간과 매우 유사한 값을 가진다(McCuen, 2004; Kim and Lee, 2016). 이에 본 연구에서는 국내 하천기본계획 수립 시 사용되는 설계홍수량 산정요령(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012)에 수록된 유하시간 경험 공식들을 이용하여 유하시간이 Muskingum 모형의 저류상수 K 로 적용하였을 때의 모의결과를 검토하였다.

설계홍수량 산정요령에서는 Kirpich, Rziha, Kraven 1, Kraven II, 연속형 Kraven 공식을 제시하고 있으며, 이 중 Rziha 공식은 경사가 급한 상류부($S \geq 1/200$)에서 적용되는 방법이므로 본 연구의 분석 대상에서 제외하였다. 각 방법에 대한 기본적인 방법은 Table 2와 같으며, 여기서 L 은 유로연

Table 2. Empirical travel time equations in domestic river basin plan

Method	Equation	
Kirpich	$3.976L^{0.77}/S^{0.385}$	
Kraven I	$0.444L/S^{0.515}$	
Kraven II	$16.667L/V$	Where, for $S < 1/200$: $V = 2.1$ m/sec for $1/200 \leq S \leq 1/100$: $V = 3.0$ m/sec for $S > 1/100$: $V = 3.5$ m/sec
Continuous Kraven	$16.667L/V$	Where, for $S > 3/400$ $V = 4.592 - 0.01194/S$, $V_{max} = 4.5$ m/sec for $S \leq 3/400$ $V = 35,151.515S^2 - 79.393939S + 1.6181818$, $V_{min} = 1.6$ m/sec

Table 3. Travel time (as storage coef.) for each reach

Reach no.	Starting point	Ending point	Length (km)	Slope	Travel time (hr) = Storage coef. (K)			
					Kirpich	Kraven I	Kraven II	Continuous Kraven
R1	Janghowon	Sulsungchun	3.50	0.00115	2.351	0.844	0.463	0.607
R2	Sulsungchun	Gwanhanchun	2.41	0.00111	1.794	0.594	0.319	0.419
R3	Gwanhanchun	Samseungchun	1.20	0.00008	2.954	1.182	0.159	0.416
R4	Samseungchun	Geumgokchun	2.80	0.00098	2.110	0.735	0.370	0.486
R5	Geumgokchun	Samhapgyo	5.69	0.00086	3.836	1.601	0.753	0.988
Total			15.60		13.044	4.956	2.064	2.917

장(km)이며, S 는 평균경사(dimensionless), V 는 평균유속 (m/sec)이다.

모의 과정에서 상하류 사이의 구간을 세분화 하지 않고 전 구간을 하나의 하도 구간으로만 설정한 경우와 구간을 세분화 한 경우에 대해서 비교하였다. 구간구분은 상류측정지점인 장호원과 하류측정구간인 삼합교 사이의 지류하천 유입지점을 기준으로 5개 구간으로 세분화 하였고, Table 2의 경험공식에 의해서 각 구간별 산정한 유하시간은 Table 3과 같다. 각

방법을 통해 산정된 유하시간을 저류상수 K 로 대입하고, 가중인자 X 는 0.35로 설정 한 후 Muskingum 모형을 적용하여 산정된 유출량을 HEC-RAS 부정류 모의결과를 참값으로 설정하고 그 결과를 비교하였다. Fig. 6과 Table 4는 구간을 세분화하지 않고 전체를 하나의 구간으로 설정하여 모의(Case A)한 결과이고, Fig. 7과 Table 5는 5개 구간으로 세분화 하여 모의한 결과(Case B)이다. 모의 결과 Kraven II와 연속형 Kraven 공식이 첨두 유량 및 첨두 시간이 잘 일치하여 다른 경험 공식

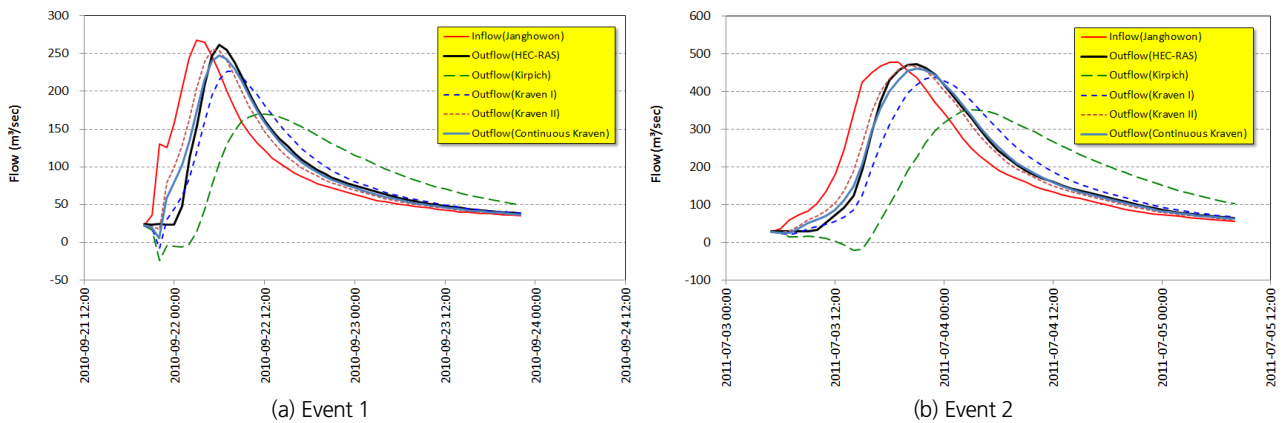


Fig. 6. The results using empirical travel time methods as storage coef. - for Case A

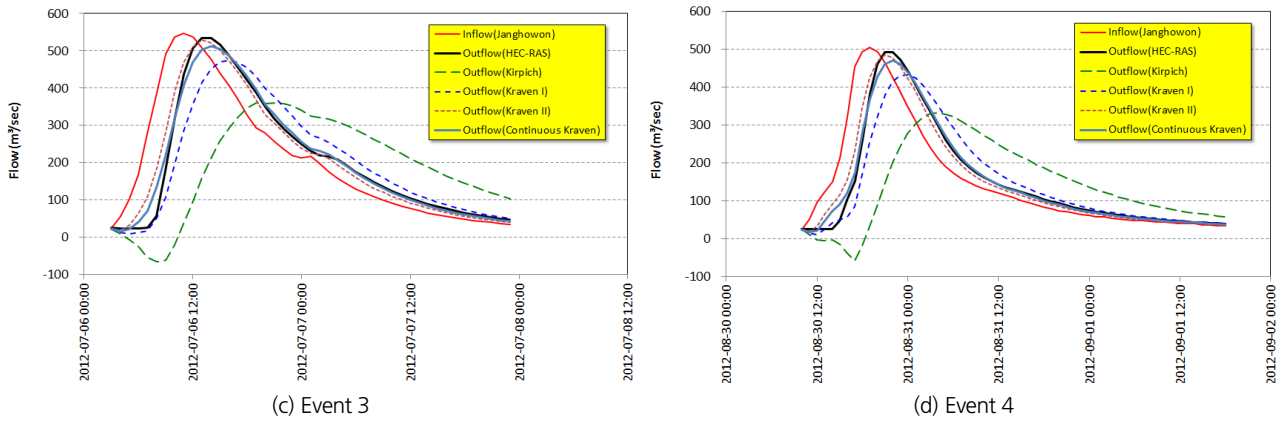


Fig. 6. The results using empirical travel time methods as storage coef. - for Case A (Continue)

Table 4. Error of each method - for Case A

Event no.	Peak Q (m ³ /sec)					Error of peak Q for HEC-RAS (%)				Difference of peak time for HEC-RAS (hr)			
	HEC-RAS	Kirpich	Kraven I	Kraven II	Continuos Kraven	Kirpich	Kraven I	Kraven II	Continuos Kraven	Kirpich	Kraven I	Kraven II	Continuos Kraven
1	261.21	169.5	226.4	255.6	247.3	35.11	13.33	2.15	5.33	-5	-1	+1	0
2	473.27	351.6	437.8	470.9	460.4	46.58	13.58	0.91	4.93	-6	-3	+1	0
3	534.85	360.8	473.3	528.4	511.5	66.63	23.56	2.47	8.94	-8	-3	0	-1
4	492.18	332.4	432.9	486.6	470.5	61.17	22.69	2.14	8.30	-5	-3	0	-1
Ave.						52.37	18.29	1.92	6.87	(-) : occur later than HEC-RAS peak (+) : occur earlier than HEC-RAS peak (0) : same			

에 비해 적용성이 높은 것으로 나타났다. 특히 Kraven II는 첨두 시간이 가장 잘 맞는 것으로 분석되었고, 연속형 Kraven II는 첨두 유량이 잘 맞는 것으로 분석되었다. 한편 구간을 세분화하지 않은 Case A보다 구간을 지류유입지점을 기준으로 세분화한 Case B의 경우가 잘 일치하여 적용성이 높은 것으로 분석되었다. 또한 Case A의 경우 강우로 인한 유출이 발생하

는 시점에 작은 유량에 대해서는 큰 폭의 요동과 유량값의 하락이 나타나 유량 계산에 왜곡을 줄 수 있는 것으로 판단되며, Case B의 경우에서도 Kirpich 방법은 큰 오차를 보이고 있고, 강우유출이 발생하는 시점에서 많은 요동이 발생되므로 이를 이용해서 Muskingum 모형의 저류상수로 사용하기에는 적용성이 좋지 않은 것으로 분석되었다.

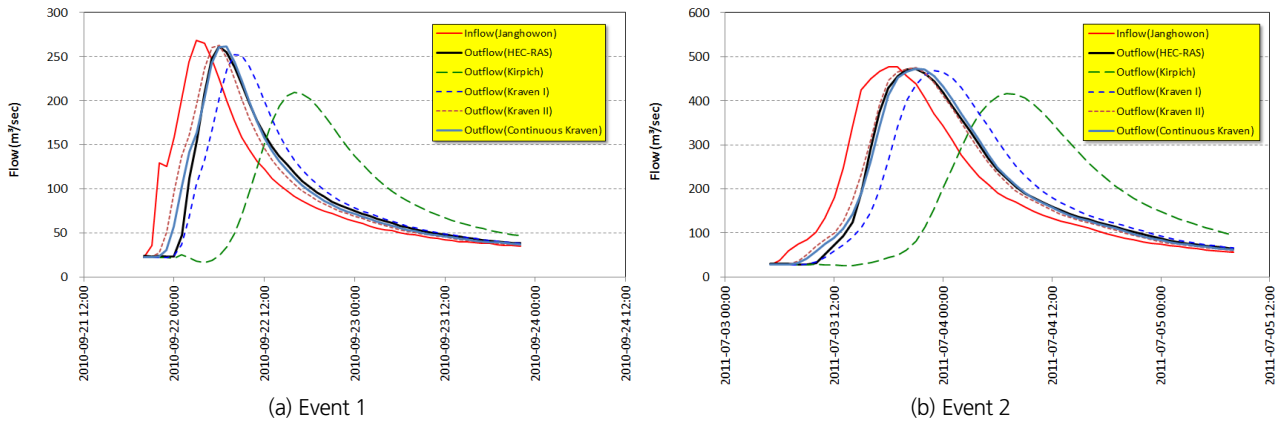


Fig. 7. The results using empirical travel time methods as storage coef. - for Case B

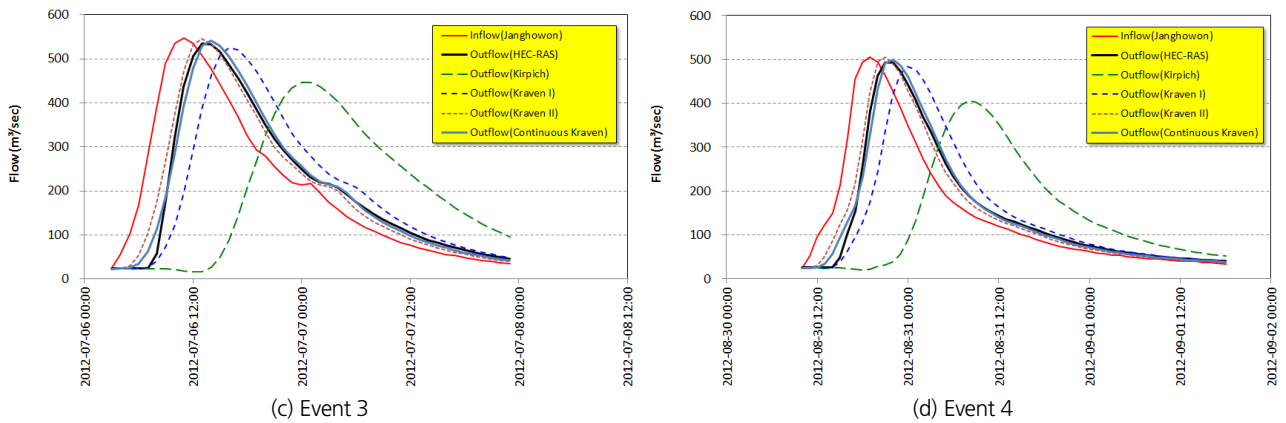


Fig. 7. The results using empirical travel time methods as storage coef. - for Case B (Continue)

Table 5. Error of each method - for Case B

Event no.	Peak Q (m³/sec)					Error of peak Q for HEC-RAS (%)				Difference of peak time for HEC-RAS (hr)			
	HEC-RAS	Kirpich	Kraven I	Kraven II	Continuos Kraven	Kirpich	Kraven I	Kraven II	Continuos Kraven	Kirpich	Kraven I	Kraven II	Continuos Kraven
1	261.21	209.4	251.8	262.7	261.6	19.83	3.60	0.57	0.15	-10	-2	0	-1
2	473.27	416.5	467.8	474.9	473.2	21.73	2.09	0.62	0.03	-10	-2	0	0
3	534.85	446.5	525.6	546.0	541.8	33.82	3.54	4.27	2.66	-11	-3	0	-1
4	492.18	404.9	483.1	504.5	499.7	33.41	3.48	4.72	2.88	-11	-3	0	-1
Ave.						27.20	3.18	2.54	1.43	(-) : occur later than HEC-RAS peak (+) : occur earlier than HEC-RAS peak (0) : same			

2.5 유량이 고려된 유하시간을 이용한 K의 적용

Fig. 7과 Table 5를 통해 설계홍수량 산정요령에서 제시한 방법 중 Kraven II와 연속형 Kraven 공식을 이용하여 산정한 유하시간을 저류상수 K로 이용하였을 때 적용성이 큰 것으로 분석되었다. 그러나 유하시간은 유속 혹은 유량 크기와 관련이 높는데(유하시간 = 거리/유속, 유속 = 유량/단면적), Table 2의 경험공식들은 속도(유하시간)를 고정 값으로 설정하도록 되어 있다. 이로 인해 유량이 적은 경우에는 유속이 감소하여 유하시간이 길어지고, 유량이 많은 경우에는 유속이 빨라져 유하시간이 짧아져야 하는데, 경험공식들을 사용할 경우 이러한 변화를 고려하지 못하는 한계가 있다. 예컨대 Figs. 6 and 7에서 첨두 유량과 첨두 시간의 분석에 있어서 적용성이 컸던 Kraven II와 연속형 Kraven 공식을 적용한 결과에서 나타난 바와 같이, 유량곡선이 상승하는 시점이 HEC-RAS 모의 보다 빨리 시작되는 것을 확인할 수 있다. 이는 유량 상승 시점에 유량이 많지 않음에도 불구하고 유량이 많을 때와 같은 짧은 유하시간이 대입되었기 때문이다. 이에 본 연구에서는 유하시간을 산정할 때 유량을 고려하도록 한 회귀식을 개발하고, 시시각각 변동되는 유입량의 변화에 맞춰 유하시간을 업

데이트하는 방식으로 모의를 수행하였다. 이때 X는 0.35 그리고 5개 구간을 분리한 Case B 조건으로 설정하였다.

Eq. (8)은 본 대상하천에 대해 개발된 유하시간 곡선식이다. 유하시간 곡선식은 Kim and Lee (2016)에 의해 제시된 다양한 유량조건에 대한 HEC-RAS 모의 결과를 바탕으로 SPSS를 이용하여 도출하였다.

$$K = 0.000372 * L^{0.904} * S^{-0.312} * Q^{-0.326} \tag{8}$$

Fig. 8과 Table 6은 모의 수행 결과를 나타낸다.

Fig. 8에서 나타난 바와 같이 유량이 고려된 유하시간을 이용한 경우 유량 상승이 시작하는 부분에 있어서 Figs. 6 and 7과 달리 HEC-RAS 모의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 유량이 감소하는 구간 역시 마찬가지로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이와 함께 Tables 5 and 6에서 나타난 바와 같이 유량이 고려된 유하곡선식을 적용한 경우 첨두 유량과 첨두 시간이 가장 잘 일치하는 것으로 분석되었다.

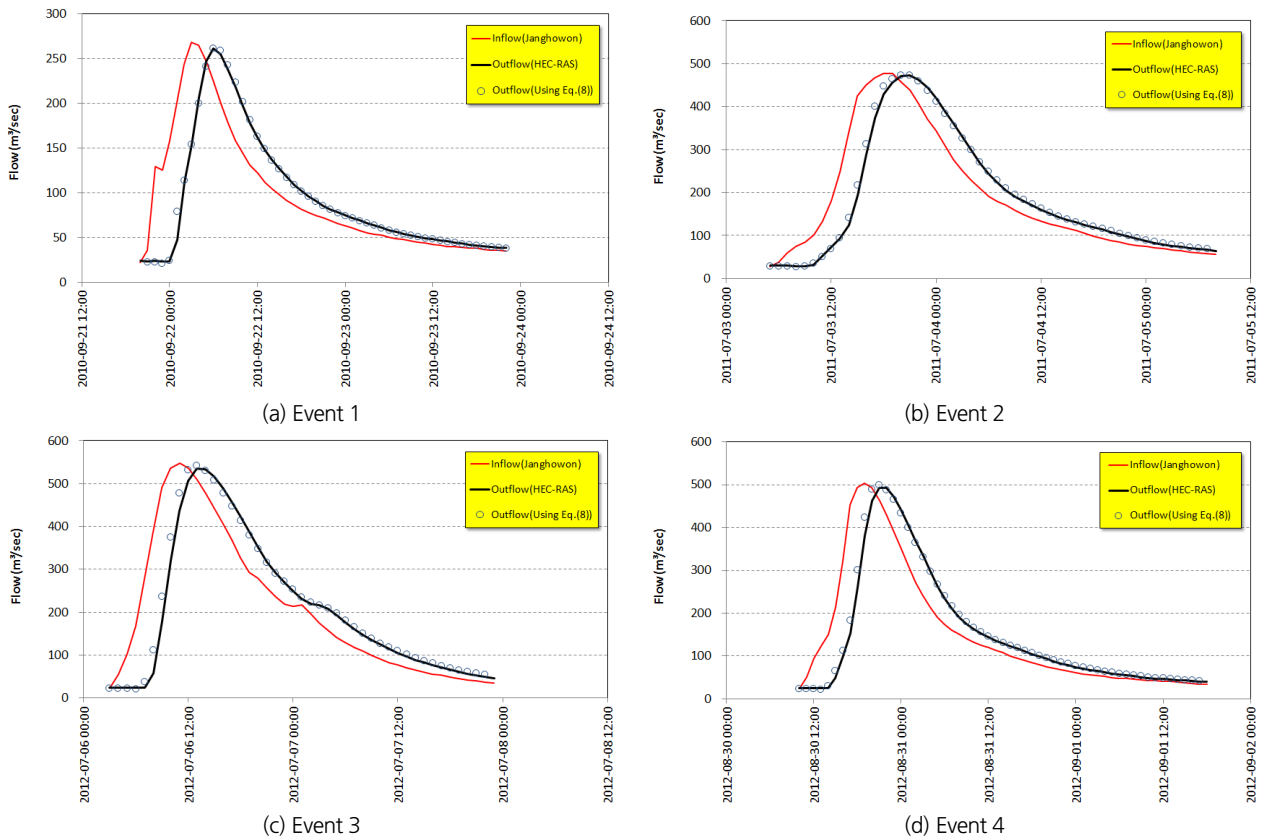


Fig. 8. The results using travel time considering Q as storage coef.

Table 6. Error of using travel time in consideration of Q

Event no.	Peak Q with Eq.(8) (m ³ /sec)	Error of peak Q for HEC-RAS (%)	Difference of peak time for HEC-RAS (hr)
1	261.8	0.23	0
2	472.7	0.22	0
3	541.5	2.55	0
4	499.0	2.61	0
Ave.		1.40	

3. 결론

본 연구에서는 측방유입유량과 유하시간을 고려한 Muskingum 홍수추적 최적 매개상수를 도출한 연구로써 본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 실제 홍수가 발생하는 동안에 유역 전역에 강우로 인하여 상류 유입지점에서 하류 유출지점까지 유하하는 동안 유입되는 측방유입유량이 발생한다. 이에 HEC-RAS 1차원 부정류 해석모형을 이용한 수리학적 홍수추적을 통해 하류 지점의 유량 관측지에서 측방유입유량과 하도홍수 추

적에 의한 유량을 분리할 수 있는 방법을 제시하였다.

- 2) 상류 유입량과 HEC-RAS 1차원 부정류 해석모형을 이용한 수리학적 홍수추적 결과를 바탕으로 누가 저류량과 $XI + (1 - X)O$ 의 관계를 이용하여 저류상수 K 와 가중인자 X 를 도출하는 방법을 제시하였다.
- 3) 저류상수 K 가 유하시간과 관계있음을 감안하여 국내 하천 기본계획 수립 시 사용되는 유하시간 경험 공식들을 적용하였는데, 구간을 세분화하지 않고 전체를 하나의 구간으로 설정하여 모의(Case A)한 것과 저류 유입지점을 기준으로 구간을 5개 구간으로 세분화하여 모의(Case B)한 결과를 비교 분석하였다. 모의 결과 구간을 세분화한 Case B

조건의 Kraven II와 연속형 Kraven 공식이 침투 유량과 침투 시간을 잘 반영하여 적용성이 높은 것으로 분석되었다.

- 4) 하천기본계획 수립 시 사용되는 유하시간 경험공식을 적용할 경우 유하시간이 유량에 관계없이 고정된 특정 값으로만 산정된다. 이로 인해 유량이 많지 않은 경우에도 짧은 유하시간이 저류상수로 적용된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 유량과 하도경사, 유하거리가 고려된 곡선식을 개발하고, 유입량의 변화에 따라 적정 유하시간을 산정하여 모의를 수행하는 방법을 적용하였다. 유량이 고려된 유하시간 곡선식을 적용한 결과 Kraven II와 연속형 Kraven의 유량 상승 및 하강 과정에서 나타난 오류를 해결할 수 있었고, 침투 유량과 침투 시간 역시 잘 반영할 수 있는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구[MOIS-재난-2015-05]와 한국건설기술연구원 2017년 주요사업(20170100-1-1)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, pp. 572.
- France, P. W. (1985). "Hydrologic routing with a microcomputer." *Advanced in Engineering Software*, Vol. 7, No. 1, pp. 8-12.
- Gray, D. M. (1973). *Handbook on the principles of hydrology*. Port Washington, N.Y., Water Information Center.
- Haktanir, T., and Ozmen, H. (1997). "Comparison of hydraulic and hydrologic routing on three long reservoirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 2, pp. 153-156.
- Kim, S. H., and Lee, C. H. (2016). "A study on channel flood routing using nonlinear regression equation for the travel time." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 148-153.
- Kundzewicz, Z. W., and Strupczewski, W. G. (1982). "Approximate translation in the Muskingum model." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 19-26.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., and Paulhus, J. L. H. (1975). *Hydrology for engineers*, Second ed. McGraw-Hill, New York, NY, pp. 340.
- McCarthy, G. T. (1938). *The unit hydrograph and flood routing*. US Army Corps Eng., New London, CT. US Engineering Office, Providence RI.
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic analysis and design*, Second ed. Section 10.5.1, Estimation of the Muskingum Routing Coefficients. Prentice Hall.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). *Cheongmi River basic plan*, Korea.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012). *Design flood calculation manual*, Korea.
- O'Donnell, T. (1985). "A direct three-parameter Muskingum procedure incorporating lateral inflow." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 30, No. 4, pp. 479-496.
- O'Sullivan, J. J., Ahilan, S., and Bruen, M. (2012). "A modified Muskingum routing approach for floodplain flows: theory and practice." *Journal of Hydrology*, Vol. 470-471, pp. 239-254.
- Singh, V. P. (1988). *Hydrologic systems: rainfall-runoff modelling*. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Tung, Y. K. (1985). "River flood routing by nonlinear Muskingum method." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, No. 12, pp. 1447-1460.
- Wilson, E. M. (1990). *Engineering hydrology*. MacMillan, Hong Kong.
- Yun, Y. N. (2007). *Hydrology-Fundamentals and Applications*. Korea.