

선형시스템가정에 근거한 Muskingum 하도추적방법의 매개변수 결정

Parameter Decision of Muskingum Channel Routing Method Based on the Linear System Assumption

유철상* / 신지예** / 전창현***

Yoo, Chulsang / Sin, Jiye / Jun, Chang Hyun

Abstract

This study proposes the method for determining the Muskingum channel routing model parameters based on the assumption of linear system. The proposed method was applied to the Chungju dam basin for the evaluation. Additionally, the rainfall-runoff was repeated for the Yeongchun-Chungju dam reach using seven rainfall events observed. Summarizing the results is as follows. First, the concentration time and storage coefficient of a channel reach formed by the subdivision can be expressed as the difference between the concentration times and storage coefficients of upstream and downstream basins. The storage coefficients of the channel reach estimated is equal to the storage coefficient of the Muskingum channel routing model and the weight factor can be simply estimated using the ratio between the concentration time and storage coefficient. Second, the weight factor of the Muskingum model is in inverse proportion to the Russel coefficient, which is in between 0.4166 and 0.625 when considering the Russel coefficients generally applied. Finally the application to the Yeongchun-Chungju dam reach showed that the proposed method is still valid regardless of the limitations such as the uncertainty of the observed data.

Keywords : muskingum channel routing, linear channel, linear reservoir

요 지

본 연구에서는 선형시스템 가정에 근거하여 하도구간에 대한 Muskingum 하도추적모형의 매개변수 결정방법을 제안하였다. 제안된 모형은 충주댐 유역에 적용되어 검토되었다. 추가적으로 영춘-충주댐 유역에 대해 총 7개의 호우사상을 대상으로 유출해석을 실시하고 그 결과를 검토하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저, 유역분할에 의해 발생하는 하도의 집중시간 및 저류상수는 상류 분할유역과 상류 분할유역을 포함한 하류 유역의 집중시간 및 저류상수의 차로써 표현 가능하다. 이와 같은 방법으로 산정된 하도구간에서의 저류상수는 Muskingum 하도추적모형의 저류상수와 동일하며, 가중인자 역시 집중시간과 저류상수와 비를 이용하여 간단히 산정할 수 있다. 둘째, Russel 계수와 Muskingum 모형의 가중인자는 서로 반비례 관계에 있으며 일반적으로 적용되고 있는 Russel 계수의 범위에 해당하는 가중인자의 범위는 0.4166-0.625이다. 마지막으로, 영춘-충주댐 구간을 대상으로 한 적용에서는 관측자료의 불확실성과 같은 한계에도 불구하고 제안된 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : Muskingum 하도추적, 선형하천, 선형저수지

* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 정교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

** 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 석사과정 (e-mail: soonie53@korea.ac.kr)

M.S. Candidate., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

*** 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정 (e-mail: luckys286@naver.com, Tel: 02-3290-3912)

Corresponding Author, Ph.D. Candidate., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

1. 서론

대유역에서의 강우-유출 해석은 유역 분할을 수반한다. 이는 물론 단위도의 한계 때문이다, 즉, 단위도 적용이 가능한 유역 규모의 한계 때문에 유역을 단위도의 적용이 가능한 소유역으로 구분하고, 각각의 소유역에 대해 단위도를 적용하여 유출해석한 후, 이를 하도추적하여 유역출구에서의 유출을 파악하는 것이다(Guang-Te and Chen, 1996; Agirre et al., 2005; MOCT, 2006; 2007). 물론 단위도의 적용이 가능한 최대 유역규모가 어느 정도인지에 대한 통일된 의견은 없다. 작게는 50 km²에서 크게는 1,000 km²까지 다양한 의견들이 존재한다(Heergegen and Reich, 1974; MOCT, 2006; 2007).

유역 분할 시에는 단일 유역으로 해석하는 경우와는 다른 문제가 발생한다. 그 중 하나가 유역의 출구로부터 떨어진 분할유역으로부터의 유출을 유역 출구까지 이동시켜야 한다는 것이다. 이러한 과정을 소위 하도추적(channel routing)이라고 한다. 일반적으로 자연하천의 하도추적에 가장 널리 사용되는 하도추적모형은 Muskingum 모형이다. Muskingum 모형은 선형시스템 이론에 근거한 방법으로, 지체효과만을 고려하는 선형하천모형 또는 저류효과만을 고려하는 선형저수지모형을 포함한다(Overton, 1966; Venetis, 1969). Yoo and Kim (2010)은 Muskingum 모형을 수문학적으로 재해석하여 선형하천모형과 선형저수지모형의 선형결합으로 나타낸 바 있다.

한편 Muskingum 모형은 크게 저류상수 K_c , 가중인자 x 와 같은 두 개의 매개변수로 표현된다. 보다 신뢰할 만한 하도홍수예측을 모의하기 위한 많은 노력이 있었으며, 그 결과로 K_c 및 x 를 결정하기 위한 다양한 연구결과들이 제시되었다. 먼저 유입수문곡선과 유출수문곡선이 존재하는 경우에 대한 매개변수 결정방법으로 Wilson (1974)은 시행착오 도시법을 제안하였다. 시행착오법은 소모적인 작업을 요구하고, 주관적인 판단이 많이 개입하여 분석자마다 해석이 일치하지 않는 문제점이 있으므로, 그 대안으로 Gill (1978)은 선형 회귀분석을 이용하여 x 및 K_c 를 결정하였다. 또한 Ahn et al. (2004)의 연구에서는 매개변수 x 및 K_c 를 결정하지 않고, 선형방정식을 이용하여 Muskingum 계수(C_1, C_2, C_3)를 직접적으로 결정한 바 있다. 이러한 연구의 성과에도 불구하고, 유출량 자료가 존재하지 않는 경우에는 매개변수들에 대해 기존에 제시된 특정 값이나 일정범위 내의 값을 사용하거나 과거 경험을 통해 결정된 매개변수 값들을 사용하고 있는 것이 국내의 실정이다(Cho, 2008).

본 연구에서는 선형시스템의 기반 아래 Muskingum 하도추적모형을 수문학적으로 재해석한 Yoo and Kim (2010)의 연구를 검토하고, 유역분할에 따른 하도구간에 대한 Muskingum 하도추적모형의 매개변수 결정방법을 제안하였다. 분할된 충주댐 유역을 대상으로 추정된 집중시간 및 저류상수로부터 Muskingum 하도추적모형의 매개변수를 결정하고, Clark 단위도를 이용하여 하류 분할 유역에 대한 유출특성을 추가적으로 고려함으로써 본 연구에서 제시한 방법의 적용성을 평가하였다.

2. 선형시스템가정과 선형저수지 및 선형하천 모형의 응용

2.1 선형시스템

선형시스템이란 서로 다른 두 입력의 선형결합으로 나타낸 새로운 입력에 대해 두 출력에 대한 같은 형태의 선형결합으로 출력이 나타나는 시스템을 의미한다(Chen, 1999). 선형시스템 가정은 특히 시스템의 특성이 알려진 경우 예측을 가능하게 한다는 점에서 중요한 의미를 갖는다. 수문학 분야에서의 단위도 이론이 바로 이 선형시스템 이론에 근거하고 있다. 일정 기저시간 가정, 비례가정 및 중첩가정 등이 모두 선형시스템의 특성을 반영하는 단위도 적용의 특성이 된다(Yoon, 2008). 보다 근본적으로는 단위도의 모형화에 많이 사용되는 선형저수지나 선형하천의 개념도 역시 선형시스템에 근거하고 있다고 할 수 있다.

선형저수지 모형은 저류량과 유출량간에 선형의 관계가 만족된다는 가정에 근거한다. 즉, 선형저수지 모형은 다음과 같은 저류방정식을 기초로 한다.

$$S(t) = KQ(t) \quad (1)$$

위 식에서 $S(t)$ 는 시간 t 에서의 저류량, $Q(t)$ 는 유출량을 나타내고, K 는 비례상수로서 저류상수라 부른다. 위 식을 연속방정식에 대입하면 다음과 같이 유출량 $Q(t)$ 에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$I(t) - Q(t) = \frac{dS(t)}{dt} = K \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2)$$

위 식에서 $I(t)$ 는 유입량을 나타낸다. 만일 단위(unit) 크기의 유입량이 순간적으로 저수지에 들어온다면, 위 미분방정식을 Dirac Delta 함수를 이용하여 다음과 같이 변형시킬 수 있다. 즉,

$$Q(t) = \frac{1}{K} e^{-t/K} \quad (3)$$

위 Eq. (3)은 선형저수지에서 순간유입량에 대한 유출량을 나타내며, 선형시스템에서의 충격응답함수(impulse response function)와 동일하다. 만일 어떤 유역을 선형저수지로 모의한다면 그 유역의 순간단위도(instantaneous unit hydrograph: IUH)와도 같다. 위 충격응답함수 또는 순간단위도는 시간 $t=0$ 에서 최대값을 가지고, 이후 지수적으로 감소하는 형태를 나타내게 된다.

선형하천 모형의 개념은 더욱 단순하다. 유량의 크기에 관계없이 주어진 하천 구간을 통과하는데 걸리는 시간은 동일하다. 아울러 이 하천 구간 내에서는 어떠한 저류효과도 발생하지 않는다. 따라서 주어진 유입량 함수 $I=f(t)$ 에 대해서 다음과 같은 출력 함수를 갖는다.

$$Q(t) = f(t - T) \quad (4)$$

위 식에서 T 는 지체시간을 의미한다.

선형하천이론의 특성은 하도에서의 저류량이 상류단에서의 유입량에 의존한다는 점이다. 물론 상류단에서의 유입량 규모는 T 시간 후 하류단에서의 유출량과 같다. 그러나 저류량의 규모가 유출량을 지배하지 못하므로 둘 사이의 관계를 설정하는 것은 불가능하며, 반대로 유입량의 규모가 저류량을 지배하므로, 저류량은 유입량의 함수로 표현되는 것이다. 이러한 특성은 선형저수지의 개념과 정반대되는 개념이기도 하다.

2.2 선형저수지 및 선형하천 모형의 응용

선형하천과 선형저수지 모형은 유역의 수문해석모형에 많이 적용된다. 특히 많은 단위도 모형들이 이들 두 개념을 근거로 하고 있다. 예를 들어, Nash 모형(Nash, 1957)은 n 개의 동일한 선형저수지를 직렬로 연결하여 유도한 수문곡선을 단위도로 정의하고 있다. 실무에서 많이 사용되고 있는 Clark 단위도의 경우에는 선형하천과 선형저수지의 결합으로 단위도를 유도하게 된다. 즉, 주어진 집중시간을 고려하여 선형하천의 개념으로 유역출구에 모인 유효강우는 선형저수지를 거쳐 유역 밖으로 빠져 나가는 것이다. 유역의 형상을 고려하는 시간-면적 관계곡선(width function의 개념)이 선형하천을 적용한 결과가 되고, 이를 선형저수지에 넣어 유출량을 계산하면 그 결과가 바로 Clark 단위도가 되는 것이다.

이와 유사하게 Muskingum 하도추적모형도 선형저수지와 선형하천에 근거한 모형이다(Yoo and Kim, 2010).

다음 장에서는 Muskingum 모형이 어떻게 선형저수지와 선형하천 모형으로 분리되는지를 설명하고 있다.

2.3 Muskingum 하도추적모형의 수문학적 재해석

Yoo and Kim (2010)의 연구에서는 Muskingum 하도추적모형을 수문학적으로 재해석하여 지체효과만을 고려하는 선형하천 모형과 저류효과만을 고려하는 선형저수지 모형의 선형결합으로 나타냈다. 먼저, Yoo and Kim (2010)의 연구를 요약하면 다음과 같다.

Muskingum 모형에서는 하도에서의 저류량을 유입량 I 및 유출량 O 의 선형조합으로 표현한다. 즉,

$$S = K_c \{O + x(I - O)\} = K_c \{xI + (1-x)O\} \quad (5)$$

위 식에서 K_c 는 저류상수, x 는 일종의 비례상수로서 유입량의 비율을 나타낸다. x 가 0인 경우 위 식은 선형저수지 모형이 되고, x 가 1인 경우에는 선형하천 모형이 된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 즉, 유입량 중 x 만큼은 선형하천으로 빠져나가고(즉, 저류효과 없이 지체시간만을 고려하여), 나머지 $(1-x)$ 만큼은 선형하천에서와 동일한 시간으로 지체된 후 저류상수 K_c 를 갖는 선형저수지를 통해 빠져나가게 되는 것이다. 따라서 순간단위도의 경우에서와 같이 유입량을 순간유입인 Dirac Delta 함수로 가정하면, 그 응답함수는 다음과 같이 표현된다.

$$O(t) = x\delta(t - T_c) + (1-x)\frac{1}{K_c} e^{-(t-T_c)/K_c} \quad (6)$$

위 Eq. (6)에서 알 수 있듯이 순간단위도에서 첫 번째 항은 선형하천 모형을 나타내는 부분이고, 두 번째 항은 선형저수지 모형을 나타낸 부분이다. Muskingum 방법을 적용하여 하도추적을 수행하는 경우 주의해야 하는 점은 추적 시간간격 Δt 의 결정이다. 일반적으로 도달시간의 $1/3-1/2$ 정도가 고려된다고 하지만 보다 엄밀하게는 $\Delta t > 2K_c x$ 가 되도록 Δt 가 결정되어야 한다(Yoon, 2008). 그런데 이렇게 Δt 가 결정된다는 것은 수문학적 해석 측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 이는 기본적으로 Δt 만큼의 시간이 경과하기 전에는 유입량의 영향이 유출량에 전혀 반영되지 않기 때문이다. 즉, 이 추적 시간간격 Δt 가 집중시간의 역할을 하게 되는 것이다. 따라서 전체 순간단위도는 시간 T_c 에 $x + (1-x)/K_c$ 만큼의 첨두가 발생하고, 이후 $(1-x)/K_c$ 가 지수적으로 감소하는 형태의 유출응답으로 나타난다. 유도된 모형은 일종의 순간단위도의 형태가 되며, 그 매개변수는 Muskingum 모형의 매개변수와 동일하다.

3. 전체 유역의 저류상수와 집중시간 및 유역분할

3.1 유역의 T_c 와 K 결정

Clark (Clark, 1945)은 선형하천 및 선형저수지 이론에 근거하여 순간단위도를 유도하는 방법을 제안하였다. 먼저, 유역 전반에 순간적으로 내린 단위유효강우는 선형하천을 거쳐 유역출구에 도달하게 되는데, 이는 시간-면적 관계곡선(width function의 개념)으로 나타나게 된다. 이와 같은 선형하천으로의 유출을 유역출구에서 선형저수지에 유입시켜 유출량을 계산한 결과가 Clark 순간단위도(IUH)가 된다.

Clark 순간단위도는 크게 유역의 집중시간(concentration time)과 저류상수(storage coefficient) 두 개의 매개변수로 표현된다. 집중시간은 유역의 최원점에서 유역출구까지의 도달시간이며, 저류상수는 유효우량이 유역출구로 빠져나가기 전에 유역에 일시적으로 저류시키는 능력을 시간의 단위로 표현한 것이다(Sabol, 1988). 즉, 집중시간은 시간-면적 관계곡선에서 시간의 최대값이며, 저류상수는 Clark 순간단위도의 선형저수지에 대한 저류상수라 할 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 Clark 순간단위도는 선형시스템 이론에 근거하므로, 매개변수가 비록 두 개인 단순한 형태로 표현되지만 이 매개변수를 결정하는데 큰 어려움이 있다. 사실, 모든 강우-유출 사상에 대해 적용 가능한 유일한 매개변수를 찾아내는 것은 현실적으로 불가능하다. 이는 Clark (Clark, 1945)이 유역에서의 강우-유출 과정을 선형으로 가정하였기 때문이다. 즉, 근본적으로 비선형인 강우-유출 과정을 선형으로 가정함에 따라 발생하는 문제이다. 또 다른 문제는 이들 두 매개변수가 서로 관계되어 있다는 점이다. 따라서 정밀하게 관측된 강우-유출 기록이 가용하다 하더라도 이들 두 매개변수를 유일하게 결정하기 어려운 것이 현실이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Yoo and Shin (2010)은 Nash (1957)의 순간단위도 형태를 이용하여 유출특성을 유도하는 방안을 제시한 바 있다. 이 방법론의 적용을 통해 비상식적인 매개변수의 추정문제는 어느 정도 해결할 수 있다.

한편, 미계측 유역의 경우에는 경험식을 이용하여 매개변수를 추정한다. 국내에서 사용되고 있는 경험식은 주로 국외에서 개발된 식이며, 경험식별로 추정된 값들이 큰 차이를 보이므로, 적용시 주의가 필요하다(Jeong et al., 2006; Jeong and Yoon, 2007; Yoon, 2008; Yoo, 2009). 또한, 국외에서 개발된 경험식은 우리나라의 지역성을 반영

하지 못할 가능성이 크다는 문제점도 있다. 이에 Jung (2005)은 국내 유역의 관측자료를 이용하여 결정한 매개변수와 유역특성인자의 상관성을 검토하여 경험식을 유도하였으며, Lee (2012)는 집중시간 및 저류상수의 이론적 배경에 근거한 경험식의 형태를 제안하고, 국내 6개 유역에 대한 경험식을 제시한 바 있다.

3.2 저류상수와 하도 길이의 관계

먼저, Dooge et al. (1982)은 선형시스템의 기반 아래, Muskingum 하도추적모형과 Saint-Venant 방정식을 연계하여 Muskingum 하도추적모형의 가중인자 및 저류상수의 물리적 기반을 제시하였다. 즉, 정상상태의 상태에서 홍수파의 전파속도 c_k 는 $c_k = dQ/dA$ (A 는 하도단면적, Q 는 유량)로 표현되므로 Muskingum 하도추적모형의 저류상수 K 는 다음 Eq. (7)과 같이 나타난다.

$$K = \left(-\frac{\partial A}{\partial Q} \right) L = \frac{L}{c_k} \quad (7)$$

여기서, L 은 하도길이 혹은 유로연장, c_k 는 홍수파 전파속도, K 는 저류상수를 의미한다. 따라서 Muskingum 하도추적모형에서의 저류상수는 하도구간에서 홍수파의 도달시간으로 볼 수 있으며, 유역 내 홍수파 전파속도가 일정하다면 저류상수는 하도길이에 비례한다고 할 수 있다.

이와 관련하여 홍수파 전파속도가 유역 내에서 일정하다는 가정을 근거로 수행된 연구들이 있다(Beven, 1979; Bengtsson, 1991; Krein, 2001; Shome and Steffler, 2006). 특히, Beven (1979)은 유역 내 홍수파의 전파속도가 하도에서 일정하게 유지된다는 가정 아래, 수위가 높은 경우 유속과 유량이 비교적 선형관계를 나타낸다고 하였다. 또한 Hayami (1951)는 홍수파 전파속도와 확산계수가 일정하다는 가정아래 확산과 방정식에 대한 해석해를 구하였으며, 그 후 수행된 많은 연구에서도 Saint-Venant 방정식의 홍수파 전파속도(celerity)와 확산계수(diffusivity)가 일정하다고 가정하고 해를 유도하였다(Moussa, 1996; Fan and Li, 2006). Gonwa and Kavvas (1986)는 Hayami (1951)의 방정식과 새롭게 제안한 확산과 방정식을 이용하여 이 가정의 타당성을 검토하였고, 그 결과로서 일정한 홍수파 전파속도를 이론적으로 산정하였다.

이와 더불어 유역 내 유속이 일정하다는 가정을 근거로 수행된 연구들이 있다(Molnár and Ramírez, 1998; Furey and Gupta, 2003; Manfreda et al., 2005; Kim et al., 2005). 이러한 가정은 실제 관측자료에 대한 분석 결과를 통해 확인되었다. Leopold (1953)는 Yellowstone, Bighorn,

Missouri, Mississippi 강의 28개 지점에서 관측된 유속에 대해 상류에서 하류방향으로 평균유속이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. Leopold and Maddock (1953)의 연구에서는 상류에서 하류로 갈수록 유량이 증가함에 따라 평균유속이 약간 증가한다는 특성을 보여주었다. 그러나 Leopold (1953)의 연구 중 Yellowstone 강에 대한 결과에서는 유량에 관계없이 유역 내 평균유속이 일정하게 유지됨을 확인하였다. 또한 Carlston (1969)은 10개의 강에서 상류에서 하류 방향으로 적게는 4개, 많게는 46개의 관측소에서 유속을 관측하였는데, 이 중 절반가량의 자료에서 유속과 유량 사이에 아무런 관계가 없는 것으로, 즉, 상류에서 하류까지 평균유속이 일정하게 나타남을 확인하였다. Brush (1961)의 연구에서도 Pennsylvania 16개의 강 중 절반에서 이와 유사한 결과가 나타났다.

Wong (2002)은 홍수와 전파속도가 유속과 선형의 관계가 있음을 제시하고 있다. 즉,

$$c_k = \alpha V \quad (8)$$

여기서, α 는 상수, V 는 유속(m/s)을 나타낸다. Eq. (8)에서 상수 α 가 1이라면 유역 내 홍수와 전파속도와 유속은 동일하게 된다. Wong (2002)은 하도단면을 다양한 직사각형 형태로 가정하여 하도에서의 집중시간을 살펴보았으며, 수심이 깊은 직사각형 단면 하도에서 홍수와 전파속도와 유속이 동일함을 이론적으로 밝힌 바 있다. 그 밖에 Viessman et al. (1989)는 Manning 공식과 Chezy 공식을 이용하여 하도 단면적의 형태에 따른 홍수와 전파속도와 하도 내 평균유속과의 관계를 살펴보았으며 그 결과를 정리하면 다음 Table 1과 같다.

Eqs. (7) and (8)로부터 저류상수와 홍수와 전파속도 또는 평균유속 간의 관계는 다음 Eq. (9)와 같이 나타난다.

$$K = \frac{L}{c_k} = \frac{L}{\alpha V_{av}} \quad (9)$$

전 하도에 걸쳐 단면적의 형태가 일정하고, 홍수와 전파속도 혹은 평균유속이 일정하다면, 저류상수는 하도길

이에 비례한다고 할 수 있다. 즉,

$$K \propto L \quad (10)$$

이상과 같은 결과는 저류상수를 산정하기 위한 경험공식에도 그대로 적용된다. 즉, Clark 공식, Linsley 공식, Russel 공식 등 대부분의 경험공식에서 저류상수와 유로연장은 비례관계에 있다. Clark 공식과 Linsley 공식에서는 저류상수가 유로연장 혹은 하도길이와 직접적인 비례관계로 나타나며, Russel 공식에서는 저류상수가 집중시간에 대한 함수로 나타나고 있다. 여기서 Russel 공식의 경우, Rizha 공식, Kraven (I) 공식, Kraven (II) 공식과 같은 집중시간을 산정하기 위한 경험공식 역시 집중시간과 유로연장이 비례관계에 있기 때문에 결과적으로 저류상수 또한 유로연장과 비례관계에 있다고 할 수 있다.

3.3 유역분할에 의해 발생하는 하도의 T_c 와 K 및 Muskingum의 K_c 와 x

대상 유역이 다음 Fig. 1과 같이 2개의 분할유역으로 나누어진다고 가정하자. 전체 유역과 분리된 상류 분할유역 및 전체유역의 T_c 와 K 는 어떤 방법에 의해서든지 구할 수 있으며, 그 값은 상류 분할유역의 경우 T_{c1} , K_1 , 전체유역의 경우 T_{c2} , K_2 라 하자.

이 경우, 하도구간 내의 T_c 와 K 는 간단히 다음과 같이

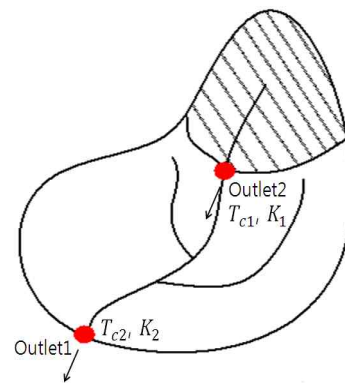


Fig. 1. Example of Subbasins

Table 1. Estimation of Celerity for Various Channel Shapes (Viessman et al., 1989)

Channel shape	Manning equation	Chezy equation
Wide rectangular	$\frac{5}{3} V_{ave}$	$\frac{3}{2} V_{ave}$
Triangular	$\frac{4}{3} V_{ave}$	$\frac{5}{4} V_{ave}$
Parabolic	$\frac{11}{9} V_{ave}$	$\frac{7}{6} V_{ave}$

나타낼 수 있다. 즉,

$$T_c = T_{c2} - T_{c1} \quad (11)$$

$$K = K_2 - K_1 \quad (12)$$

물론 이 값이 하류 분할유역을 대표하는 T_c 와 K 는 아니다. 단지 상류 분할유역 아래 하도구간을 대표하는 값일 뿐이다. 그러나 이 값이 Muskingum 하도추적모형의 저류상수 K_c 와 가중인자 x 를 결정하는데 사용된다.

Muskingum 하도추적모형에서의 저류상수 K_c 는 Eq. (12)로부터 결정된 K 와 같다. 또한 가중인자 x 를 결정하기 위해서는 추적 시간간격 Δt 에 주목해야 한다. 사실, $\Delta t > 2K_c x$ 의 조건을 만족하는 최소 Δt 가 바로 하도구간 내에서의 T_c 에 해당하는 값이다. 따라서 가중인자 x 는 다음 Eq. (13)으로부터 결정된다.

$$x = T_c / 2K_c \quad (13)$$

추가로, T_c 와 K 사이에 일정한 비례관계가 성립한다면, 즉 Russel 계수 $\alpha (K = \alpha T_c)$ 가 일정하다면 x 는 다음과 같이 결정된다.

$$x = \frac{T_c}{2K_c} = \frac{1}{2(K_c/T_c)} = \frac{1}{2\alpha} \quad (14)$$

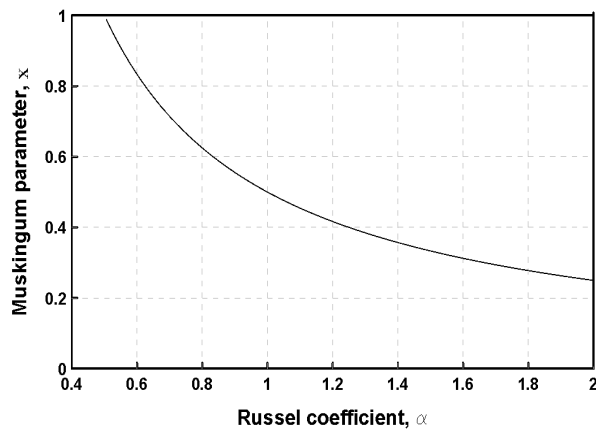


Fig. 2. Relation between Russel Coefficient, α and Muskingum Parameter, x

여기서, α 는 집중시간 및 저류상수의 비례상수인 Russel 계수를 의미한다. 추가로 Eq. (14)에 제시된 Muskingum 하도추적모형의 가중인자 x 와 Russel 계수 α 간의 반비례 관계를 도식해 보면 다음 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 결과로부터 Russel 계수 α 는 0.5보다 큰 값을 가지게 됨을 확인할 수 있는데 이는 Muskingum 하도추적모형의 가중인자 x 가 0~1의 범위를 갖기 때문이다. 참고로, Russel (1979)은 유역의 특성에 따른 Russel 계수의 범위를 제시하였으며 Eq. (14)을 이용하여 Russel 계수의 범위에 해당하는 가중인자 x 의 범위를 정리하면 다음 Table 2와 같다.

Russel 공식은 우리나라 실무에서 많이 사용되는 방법으로써, Russel 계수 α 는 0.8~1.2 범위로 나타나며 일반적으로 1.0이 적용되는 것으로 알려져 있다(Jeong and Yoon, 2007). 이는 Russel이 제시한 일반적인 유역에 대한 Russel 계수의 범위와 일치한다. 결국 Table 2의 결과에 따르면, 일반적인 유역에서 가중인자 x 는 0.4166~0.625 범위 내에서 결정된다고 판단할 수 있다.

4. 대상유역

4.1 충주댐 유역 및 수위관측소

본 연구의 적용대상 지역으로 충주댐 유역을 선정하였다. 충주댐 유역은 남한강 상류 유역, 평창강 유역, 충주댐유역으로 구성되어 있으며, 한강 유역 중 유역면적이 가장 큰 유역이다. 남한강 유역의 주하천은 남한강이며, 남한강 상류 유역에 위치한 남한강은 강원도 삼척시 대덕산(EL. 1,307 m)에서 발원하여 골지천, 동강을 따라 남서쪽으로 흐른 뒤 영월읍에서 평창강으로 합류된다. 충주댐 유역의 소유역 중 하나인 평창강 유역은 평창강이 주하천이며, 평창강은 유역의 최고봉인 계방산(EL. 1,557 m)에서 발원하여 남한강으로 유입되는 한강의 제 1지류이다. 북으로는 홍천강, 동으로는 오대천, 서로는 남한강 수계의 섬강과 인접하는 산지성 고지대라 할 수 있다(Yoo and Shin, 2010). 대상 유역의 지형도 및 하천망도를 나타낸 결과는 다음 Fig. 3과 같다. 여기서, 대상 유역의 수치 지

Table 2. Range of Russel Coefficient according to Characteristics of Basin (Russel, 1979)

Characteristics of basin	Russel coefficient, α	Muskingum parameter, x
Generally	0.8 ~ 1.2	0.4166 ~ 0.625
Urban	1.1 ~ 2.1	0.238 ~ 0.455
Natural	1.5 ~ 2.8	0.179 ~ 0.333
Mountain	8 ~ 12	0.0417 ~ 0.0625

도는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)으로부터 제공된 자료를 이용하였으며, 공간해상도는 30 × 30 m를 갖는다.

먼저, 충주댐 유역의 각 수위관측소를 출구로 하는 유역들에 대한 T_c 및 K 를 결정하기 위해 충주댐 유역 내에 위치한 31개의 수위관측소 중에서 분석이 가능한 18개 지

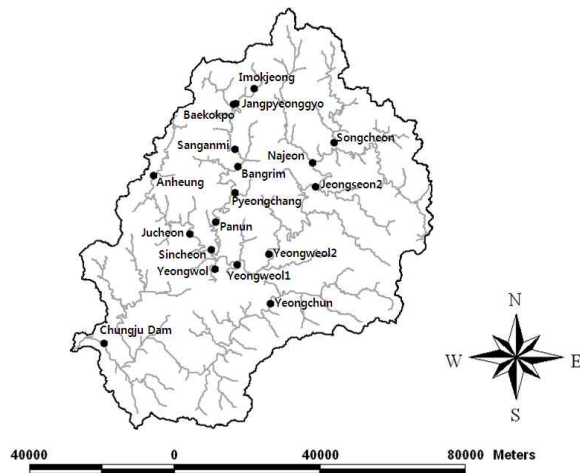


Fig. 3. Gauge Stations of the Chungju Dam Basin Considered in This Study

점을 선별하였다(Fig. 3). 강우 및 유출자료는 국토해양부의 한강홍수통제소에서 제공받았으며, 산술평균법을 이용하여 유역 평균강우량을 산정하였다. AMC-III 조건에서 강우사상들은 상대적으로 강우강도의 공간분포가 균일하여 유역의 유출특성을 결정하는데 보다 적절하다고 판단되므로(Lee and Yoo, 2011) AMC-III 조건인 독립호 우사상만을 추출하여 본 연구에 적용하였다.

이와 관련하여 선별된 18개 수위관측소 지점에 따라 분할된 유역에 대한 유역특성, 적용된 우량관측소 개수, 적용 자료의 기간 및 호우사상의 개수를 정리하면 다음 Table 3과 같다. 여기서, Length는 유로연장으로 하천의 주요로를 따라 유역출구지점으로부터 지형도상에 나타난 유로의 종점까지의 거리로 산정하였다. 또한 Slope는 유로경사로서 유역출구점에서 하천시작점까지의 표고차이를 두 지점사이의 유로연장으로 나누어 산정하였다.

4.2 대상 하도구간 및 호우사상

본 연구에서는 전체유역의 유출수문곡선을 구하기 위해 전체유역을 Fig. 1과 같이 상류 분할유역과 하류 분할유역으로 구분하였다. 여기서 상류 분할유역의 출구(Outlet 2) 및 하류 분할유역의 출구(Outlet 1)를 연결하는 구간이 하

Table 3. Characteristics of Subbasins and Storm Events Considered in This Study

Basin / Gauge station		Characteristics of basin				# of rainfall gauging station	Duration of data	# of storm event applied
		Area (km^2)	Length (km)	Slope	Shape factor			
Upper south Han river basin	Jeongseon2	1688.1	103.5	0.00505	0.158	14	2009-2009	6
	Yeongwol	2440.4	186.5	0.00337	0.070	18	2003-2009	4
	Yeongweol2	2283.4	181.5	0.00352	0.069	18	1994-2009	3
	Songcheon	349.5	62.8	0.00890	0.089	4	2007-2009	3
	Najeon	452.6	59.1	0.00814	0.130	3	2007-2009	5
Pyeongchang river basin	Bangrim	527.2	51.9	0.00774	0.196	10	1983-2009	25
	Sanganmi	393.3	44.2	0.00857	0.201	6	1983-2009	12
	Baekokpo	143.9	23.0	0.01428	0.272	2	1983-2009	14
	Jangpyeonggyo	105.1	26.0	0.01521	0.155	2	1983-2009	10
	Imokjeong	55.8	16.6	0.01604	0.202	2	1983-2009	7
	Pyeongchang	695.7	74.8	0.00613	0.124	15	2006-2009	4
	Panun	879.1	90.3	0.00491	0.108	16	1994-2009	7
	Jucheon	533.2	71.0	0.00425	0.106	4	2002-2009	5
	Yeongweol1	1524.1	125.7	0.00380	0.096	19	1994-2009	14
	Anheung	187.0	31.8	0.00495	0.185	2	2006-2009	3
Sincheon	598.3	84.1	0.00409	0.085	4	2007-2009	3	
Dam basin	Yeongchun	4775.0	189.1	0.00311	0.134	39	1994-2009	22
	Chungju dam	6448.0	282.2	0.00176	0.083	49	1996-2009	3

도추적의 대상 구간이다. 앞서 4.1에서 언급한 바와 같이 18개의 수위관측소를 선별하였으며, 하도구간으로 이목정-평창 구간 등 총 10개 구간을 선정하였다. 특히 영춘-충주댐 구간에 대해서는 실제 하도 홍수추적을 실시하여 Muskingum 모형의 매개변수 추정방법의 적용성을 평가해 보았다.

Fig. 4는 충주댐 유역과 영춘-충주댐의 하도구간을 나타낸 것이다. 영춘 수위관측소는 충주댐 상류 약 88 km 지점에 위치하고 있으며 부자식 관측기종을 이용하여 1995년부터 수위 관측이 수행되어 오고 있다. 영춘-충주댐 구간을 포함하고 있는 하류 분할유역의 유역면적은 1873 km²이며 유역 내에 단양, 어상천, 영춘, 덕산, 청풍, 제천, 봉양, 백운 등 8개의 강우관측소가 포함되어 있다. 이 구간의 홍수추적을 위해 총 7개의 호우사상을 고려하였으며 이를 정리하면 다음 Table 4와 같다.

5. 적용결과

5.1 충주댐 내 유역의 T_c 와 K 결정

충주댐 유역 내 수위관측소 지점에 따라 구분된 유역들

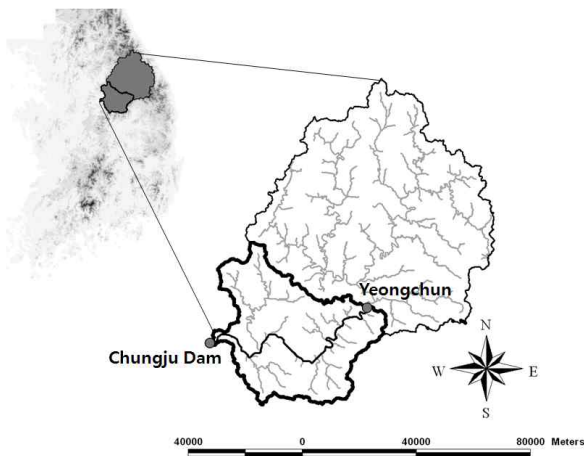


Fig. 4. Study Basin

의 T_c 와 K 를 결정하기 위해 관측자료를 이용하는 경우와 경험식을 이용하는 경우에 대한 결과를 비교·검토하였다. 먼저, 관측자료를 이용하여 T_c 와 K 를 결정하는 경우에는 Lee et al. (2012)의 결과를 이용하였다. Lee et al. (2012)은 Yoo and Shin (2010)에 제시된 방법을 이용하여 충주댐 유역의 T_c 와 K 를 결정하였다. 아울러 Lee et al. (2012)이 제시한 T_c 와 K 의 경험식은 다음과 같다.

$$T_c = 0.306 \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0.256} \quad (15)$$

$$K = 0.786 \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0.195} \quad (16)$$

여기서, L 은 유로연장, S 는 유로경사를 의미하며 본 연구에서는 Table 3에서 구한 Length와 Slope를 각각 이용하였다. 추가로 Russel 공식의 α 는 유역별로 결정된 T_c 와 K 를 회귀분석하여 결정하였다(Fig. 5). 즉,

$$K = \alpha T_c = 0.986 T_c, \quad (R^2 = 0.964) \quad (17)$$

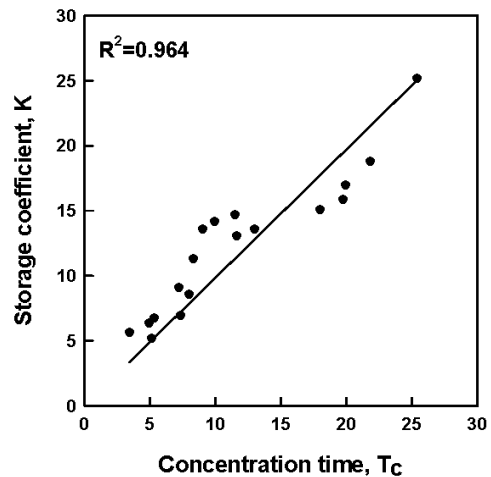


Fig. 5. Russel Coefficient of the Chungju Dam Basin, α

Table 4. Storm Events Considered in This Study

# of Storm events	Storm event duration	Rainfall duration (hr)	Total rainfall (mm)
1	2000.09.13 ~ 2000.09.17	100	169.35
2	2002.08.05 ~ 2002.08.16	278	432.01
3	2003.09.12 ~ 2003.09.13	35	81.94
4	2004.06.19 ~ 2004.06.22	73	347.16
5	2004.07.11 ~ 2004.07.17	142	309.00
6	2005.07.01 ~ 2005.07.01	12	112.13
7	2006.07.10 ~ 2006.07.19	221	471.60

이러한 3가지 방법을 이용하여 결정된 충주댐 유역 주요 수위관측소 지점별 대표 집중시간 및 저류상수는 Table 5와 같다. Russel 공식의 적용시 필요한 T_c 는 Eq. (15)를 이용하였다.

Table 5에서 관측자료에 근거한 T_c 와 K 는 호우사상별로 결정된 집중시간 및 저류상수를 산술평균한 결과이다. 강우-유출 과정의 비선형성과 분석에 사용된 호우사상의 수가 달라 결정된 T_c 와 K 의 신뢰도가 동일하다고 판단하기는 어렵다. 따라서 경우에 따라서는, Muskingum 하도추적모형의 저류상수 K_c 와 가중인자 x 가 비현실적으로 도출될 가능성이 있다.

5.2 하도의 x , K_c 및 하루 분할유역의 T_c , K 결정

Eqs. (11) and (12)를 이용하여 유역 내 하도구간별 집중시간 및 저류상수를 간단히 산정할 수 있으며, 아울러 Eq. (13)을 이용하여 Muskingum 하도추적모형의 가중인자 x 도 결정할 수 있다. 먼저 관측된 강우-유출 자료에 의해 결정된 유역 집중시간 및 저류상수를 이용하여 충주댐 유역 내 주요 하도구간의 집중시간, 저류상수 및 Muskingum 하도추

적모형의 가중인자 x 를 산정한 결과를 다음 Table 6의 2-4번째 열에 정리하였다. 이 결과에 따르면 Muskingum 하도추적모형의 가중인자 x 는 -0.77에서 1.60까지 다양하게 나타난다. 이 결과 중 x 가 음수이거나 1.0보다 크게 나타난 경우는 일단 물리적이지 못하다. 먼저, x 가 음수로 산정된 평창-신천 구간에 대해 추정된 음수의 x 값은 하류에 위치한 신천 수위관측소를 유역의 출구로 하는 유역의 저류상수가 상류 유역인 평창 지점에 대한 저류상수보다 더 작다는 문제에 기인한다(Table 5). 또한 신천-영월1 구간의 1보다 큰 x 값은 하류 유역과 상류 유역의 저류상수 차에 비해 집중시간의 차가 과대 산정되어 발생한 문제이다. 이러한 결과는 관측자료를 이용하여 매개변수를 결정하는 방법이 갖는 한계이다.

또한 경험식(Eqs. (15) and (16))으로부터 산정된 유역 집중시간 및 저류상수를 이용하여 충주댐 유역 내 주요 하도구간의 집중시간, 저류상수 및 Muskingum 하도추적모형의 가중인자 x 를 산정한 결과는 Table 6의 5~7번째 열과 같다. 이 결과에 따르면 충주댐 유역 내 모든 하도구간에 대한 x 가 이론적으로 적절한 범위인 0보다 크고, 1

Table 5. Basin Representative Concentration Time and Storage Coefficient Determined by Observation Data and by Empirical Formulas in Chungju Dam Basin

Basin / Gauge station		Observed (Lee et al., 2012)		Empirical formula		
		T_c (hr)	K (hr)	Lee et al. (2012)		Russel
				T_c (hr)	K (hr)	K (hr)
Upper south Han river basin	Jeongseon2	11.5	14.7	12.74	13.46	12.57
	Yeongwol	19.9	17.0	19.11	18.33	18.84
	Yeongweol2	19.7	15.9	18.64	17.98	18.38
	Songcheon	8.3	11.3	8.54	9.92	8.42
	Najeon	8.0	8.6	8.47	9.86	8.35
Pyeongchang river basin	Bangrim	7.2	9.1	8.02	9.46	7.91
	Sanganmi	7.3	7.0	7.20	8.71	7.10
	Baekokpo	5.3	6.8	4.52	6.11	4.46
	Jangpyeonggyo	4.9	6.4	4.74	6.34	4.67
	Imokjeong	3.4	5.7	3.71	5.26	3.66
	Pyeongchang	9.9	14.2	10.27	11.42	10.13
	Panun	13.0	13.6	11.97	12.83	11.80
	Jucheon	9.0	13.6	10.98	12.02	10.83
	Yeongweoll	18.0	15.1	15.14	15.35	14.93
	Anheung	5.1	5.2	7.00	8.53	6.90
	Sincheon	11.6	13.1	12.10	12.94	11.93
Dam basin	Yeongchun	21.8	18.8	19.64	18.72	19.37
	Chungju dam	25.4	25.2	27.90	24.45	27.51

Table 6. Muskingum Parameters of Major Stream Section Estimated Using T_c and K on Table 5 in Chungju Dam Basin

Stream Section	Observation (Lee et al., 2012)			Empirical Formula				
	T_c (hr)	K_c (hr)	x	Lee et al. (2012)			Russel	
				T_c (hr)	K_c (hr)	x	K_c (hr)	x
Imokjeong - Pyeongchang	6.5	8.5	0.38	6.56	6.16	0.53	6.47	0.51
Pyeongchang - Sincheon	1.7	-1.1	-0.77	1.83	1.52	0.60	1.80	0.51
Najeon - Yeongweol2	11.7	7.3	0.80	10.17	8.12	0.50	10.03	0.51
Sincheon - Yeongweol1	6.4	2.0	1.60	3.04	2.41	0.63	3.00	0.51
Yeongweol1 - Yeongchun	3.8	3.7	0.51	4.50	3.37	0.67	4.44	0.51
Yeongweol2 - Yeongchun	2.1	2.9	0.36	1.00	0.74	0.69	0.99	0.51
Yeongchun - Chungju dam	3.6	6.4	0.28	8.26	5.73	0.72	8.14	0.51
Baekokpo - Bangrimgyo	1.9	2.3	0.41	3.50	3.35	0.52	3.45	0.51
Bangrim - Sincheon	4.4	4.0	0.55	4.08	3.48	0.59	4.02	0.51
Yeongwol - Yeongchun	1.9	1.8	0.53	0.53	0.39	0.69	0.53	0.51

보다 작은 값으로 산정되었음을 확인할 수 있다.

다음으로 Eq. (17)과 같은 집중시간과 저류상수 간의 비례관계를 고려하여, 즉 Russel 계수를 이용하여 산정한 T_c , K 를 이용하여 충주댐 유역 내 주요 하도구간의 집중시간, 저류상수 및 Muskingum 하도추적모형의 가중인자 x 를 산정한 결과는 Table 6의 8~9번째 열과 같다. 동일한 Russel 계수가 적용되므로 유역 내 모든 하도구간에 대하여 Muskingum 하도추적모형의 가중인자 x 는 0.51로 결정된다.

추가로 Table 6에 제시된 결과들 중 경험식으로부터 결정된 T_c , K 를 이용한 경우, 몇몇 하도구간에 대해 Muskingum 하도추적모형의 T_c 가 1시간보다 작게 산정되는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 고려하는 강우-유출 자료는 모두 시자료이므로 집중시간이 1시간보다 작아지는 것은 무의미하다. 앞서 설명한 바와 같이 집중시간은 유입량의 영향이 유출량에 반영되기까지의 최소시간을 의미하므로 집중시간이 1시간보다 작으면 시자료에서는 유입량의 영향이 유출량에 바로 반영되는 것처럼 나타나게 된다. 따라서 집중시간이 1시간보다 작게 산정되는 경우에는 집중시간을 1시간으로 가정하여 사용하는 것이 보다 적절하다.

5.3 영춘-충주댐 하도구간에 대한 검토

본 연구에서는 Muskingum 하도추적모형의 매개변수로 관측자료에 근거하여 결정한 T_c , K_c 및 x 를 고려하였으며 그 값은 각각 3.6 hr, 6.4 hr 및 0.28로 나타난다. Table 2에 따르면 일반적인 유역의 경우 x 는 0.4166~0.625 범위 내에서 결정된다고 검토한 바 있다. 본 연구에서 적용한 x

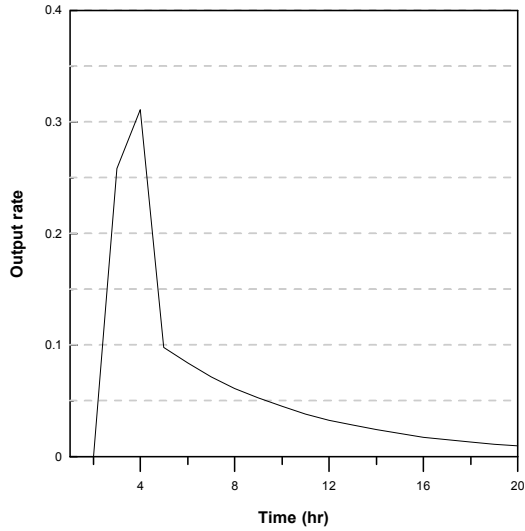
는 0.28로 이러한 범위보다는 다소 작은 값이지만, 자연하천의 x 범위인 0.179~0.333 내에 해당함을 확인할 수 있다. 먼저, 대상구간인 영춘-충주댐 하도구간에 대해 산정된 매개변수들로부터 Muskingum 순간단위도 및 측방유입에 대한 Clark 단위도를 살펴본 결과는 다음 Fig. 6과 같다.

이를 근거로 본 연구에서 고려한 7개 호우사상에 대한 하도추적 결과를 정리하면 다음 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서는 본 연구에서 대상 유역의 전체 유출수문곡선을 얻는 과정이 각 호우사상별 그래프 3개로 나타나 있다. 먼저 좌측에 있는 그림(Fig. 7, left)은 잔유역에 대한 Clark 모형 적용 결과, 즉 대상유역에 대한 측방유입 결과이며, 가운데 그림(Fig. 7, middle)은 Muskingum 하도추적모형의 유입량인 영춘 지점의 유량이다. 잔유역에 대한 측방유입 결과와 Muskingum 하도추적을 수행한 결과를 함께 고려하면, 대상 유역에 대한 유출결과(Fig. 7, right)를 산정할 수 있다. 이러한 유출결과는 충주댐 유입량 관측자료(Fig. 7, right의 표식)와 비교함으로써 추정된 매개변수의 적절성을 검토해 볼 수 있다. 이와 관련하여 본 연구에서 모의한 충주댐 유역에 대한 유출수문곡선의 침투시간 및 침투 유출량을 관측자료와 비교하면 다음 Table 7과 같다.

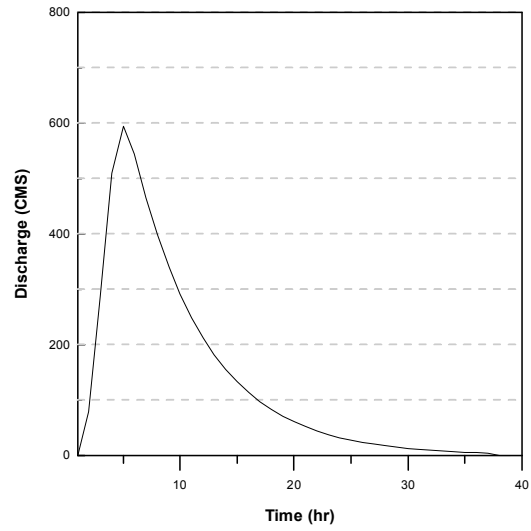
Table 7의 결과로부터 본 연구에서 고려한 전체 호우사상에 대해 모의한 유출수문곡선은 관측자료에 비해 침투시간은 0~6시간 지체되어 나타났으며, 침투유량은 -14.0%에서 +28.09% 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히 본 연구에서 고려한 대부분의 호우사상들의 경우,

첨두시간은 0~2시간 지체되었으며, 첨두유량은 $\pm 13\%$ 정도 차이만 나타냈다. 이는 관측오차를 비롯한 불확실한

관측자료가 갖는 한계에도 불구하고 적절한 유출모의가 가능함을 제시한 결과로 판단할 수 있다.

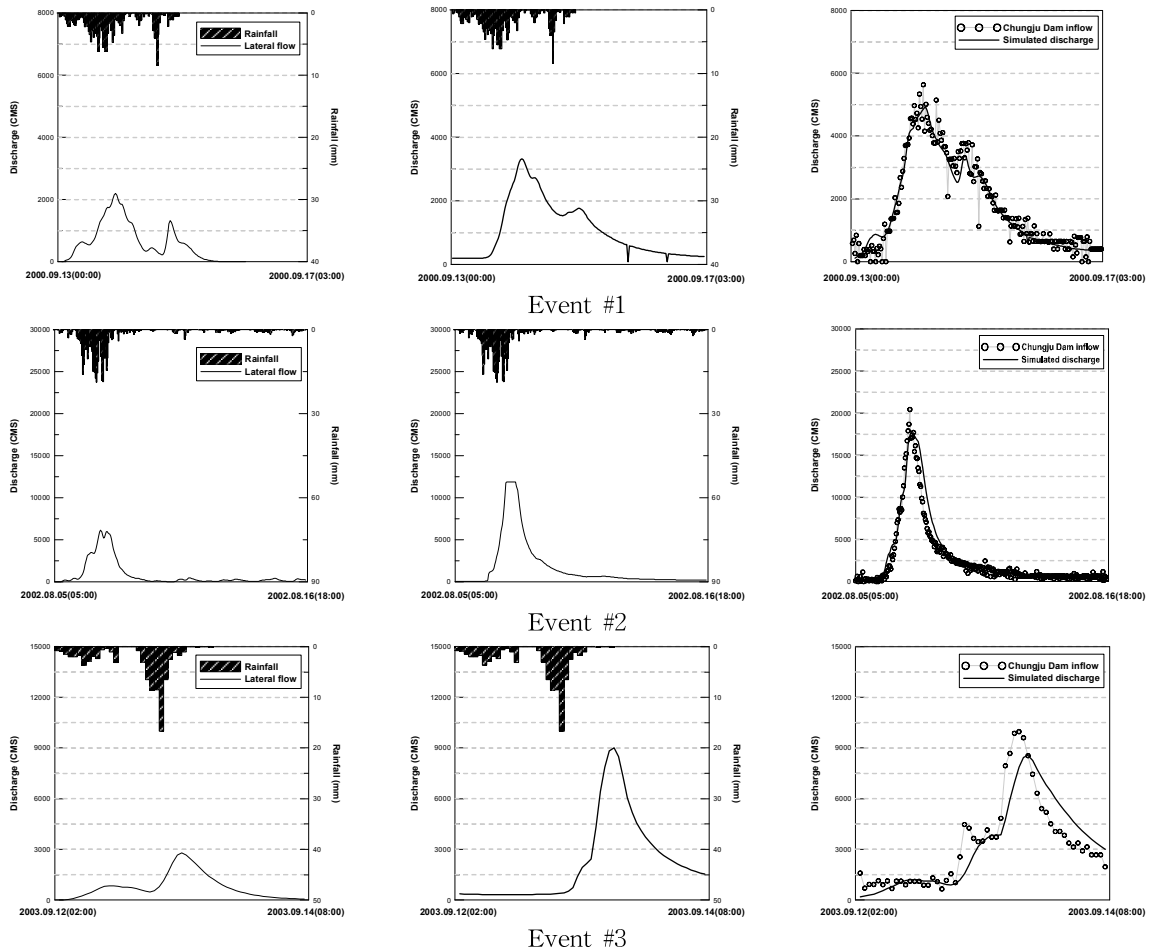


(a) 1-hr UH for Muskingum channel routing



(b) 1-hr UH for lateral inflow

Fig. 6. Runoff Model Considered in This Study



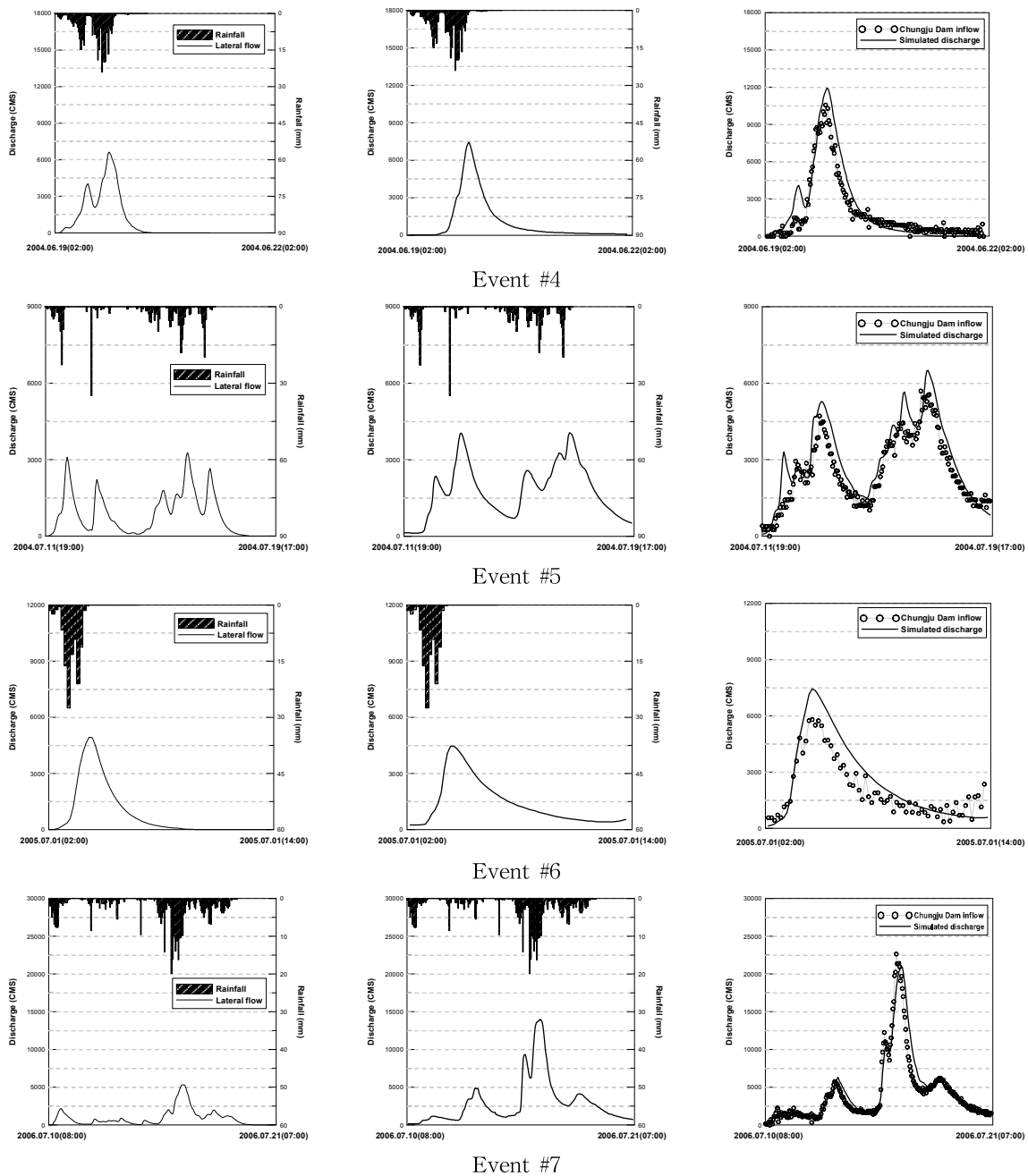


Fig. 7. Runoff Results on the Study Basin (left: lateral flow, middle: discharge at the Yeongchun gauge station, right: total flow)

사실 이러한 오차의 원인은 관측자료에서 살펴볼 수 있다. 먼저, 본 연구에서 고려한 호우사상 2, 4, 5 및 7의 경우, 충주댐 유입량의 첨두시간이 영춘 지점 유출량의 첨두시간보다 빠르게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 상류 지점보다 하류 지점에서 먼저 첨두유량이 발생한 것을 의미하며, 영춘 수위관측소의 소위 자료에서 발생하는 관측 오차, 수위-유량 관계곡선식 자체의 불확실성, 충주댐의

저류효과로 인한 유입량의 변동성 등 다양한 원인 때문에 발생한 것으로 판단된다. 이와 더불어, 본 연구에서 제안한 방법을 국내·외 다양한 유역에 적용하는데 있어 저수지에 의한 배수영향을 추가적으로 고려하고, 첨두시간을 10분 단위와 같이 짧은 단위로 분석함으로써 앞서 언급한 오차의 원인에 대한 문제점들을 어느 정도 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7. Comparison Results on the Peak Time and Peak Flow

# of Storm events	Peak time, T (hr)					Peak discharge, Q (m ³ /sec)		
	Observed data			This study	Difference ΔT	Observed data	This study	Difference $\Delta Q/Q \times 100$
	Yeongchun	Chungju dam	ΔT					
1	51	53	2	54	+1	5635.1	4909.1	-12.88
2	62	60	-2	62	+2	20437.0	17892.4	-12.45
3	34	35	1	37	+2	9972.0	8574.3	-14.02
4	55	54	-1	56	+2	10569.1	11926.6	+12.84
5	138	132	-6	138	+6	5694.2	6493.0	+14.03
6	14	14	0	14	0	5806.7	7437.4	+28.08
7	155	152	-3	158	+6	22650.0	19947.8	-11.93

6. 결 론

본 연구에서는 선형시스템의 기반 아래 유역분할에 따른 하도구간에 대한 Muskingum 하도추적모형의 매개변수 결정방법을 제안하였다. 분할된 충주댐 유역을 대상으로 추정된 집중시간 및 저류상수로부터 Muskingum 하도추적모형의 매개변수를 결정하고, Clark 단위도를 이용하여 잔유역에 대한 유출특성을 추가적으로 고려함으로써 유출수문곡선을 작성하였으며, 그 결과를 관측자료와 비교해 보았다. 특히, 영춘-충주댐 하도구간으로 구분된 분할유역에서 발생한 7개의 호우사상에 대해 유출특성을 살펴보고, 본 연구에서 제시한 방법의 적용성을 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

먼저, 유역분할에 의해 발생하는 하도의 집중시간 및 저류상수는 상류 분할유역과 상류 분할유역을 포함한 하류 유역의 집중시간 및 저류상수의 차로써 표현 가능하다. 이와 같은 방법으로 산정된 하도구간에서의 저류상수는 Muskingum 하도추적모형의 저류상수와 동일하며, 가중인자 역시 집중시간과 저류상수와의 비를 이용하여 간단히 산정할 수 있음을 확인하였다.

Russel 계수와 Muskingum 모형의 가중인자는 서로 반비례 관계에 있으며 일반적으로 적용되고 있는 Russel 계수의 범위에 해당하는 가중인자의 범위는 0.4166~0.625인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 충주댐 유역 내 수위관측소를 유역출구로 하는 유역들에 대해 관측자료와 경험식을 이용하여 집중시간 및 저류상수를 산정하였으며 이로부터 결정된 Muskingum 모형의 가중인자는 대부분 해당 범위 내에서 적절한 값으로 나타났다.

본 연구에서는 관측자료로부터 산정한 유역별 집중시간 및 저류상수를 이용하여 영춘-충주댐 구간을 대상으로 Muskingum 하도추적을 수행한 후, 하류 분할유역에 대한

유출특성을 추가적으로 고려함으로써 전체 유역에 대한 유출수문곡선을 작성하였다. 그 결과, 충주댐 유입량을 의미하는 관측자료와 비교하여 침투 유출량의 경우, -14.02%에서 +28.08%의 차이를 보였으며 침투 시간은 0~6시간 지체되어 나타났다. 이는 관측오차를 비롯한 불확실한 관측자료가 갖는 한계에도 불구하고 결정된 Muskingum 모형의 매개변수가 적절함을 확인할 수 있는 결과이며, 좀 더 신뢰할만한 강우-유출 자료가 가용하다면, 보다 정교한 검증이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다(KRF-2008-313-D01083). 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Agirre, U., Goñi, M., López, J.J., and Gimena, F.N. (2005). "Application of a unit hydrograph based on sub-watershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph." *Catena*, Vol. 64, No. 2-3, pp. 321-332.
- Ahn, T.J., Paik, S.W., and Lee, E.G. (2004). "Linear program models for determination of Muskingum routing coefficients." *Journal of Hankyong National University*, HKNU, Vol. 26, No. 1, pp. 173-181.
- Bengtsson, L. (1991). "Effective concentration time for design storms in complex urban basins." *Atmospheric Research*, Vol. 27, pp. 137-150.
- Beven, K. (1979). "On the generalized kinematic routing

- method." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1238-1242.
- Brush, L.M. (1961). "Drainage basins, channels and flow characteristics of selected streams in central Pennsylvania." *U.S. Geological Survey Professional Paper*, Vol. 282-F, pp. 145-175.
- Carlston, C.W. (1969). "Downstream variations in the hydraulic geometry of streams: special emphasis on mean velocity." *American Journal of Science*, Vol. 267, pp. 499-509.
- Chen, C.T. (1999). *Linear system theory and design*. Oxford University Press, pp. 7-11.
- Cho, H.-K. (2008). "A study on the optimization of parameters for Muskingum routing method." *Journal of Korean Society of Industrial Application*, KSIA, Vol. 11, No. 1, pp. 27-34.
- Clark, C.O. (1945). "Storage and the uni hydrograph." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Dooge, J.C.I., Strupczewski, W.G., and Napiorkowski, J. (1982). "Hydrodynamic derivation of storage parameters of muskingum model." *Journal of Hydrology*, Vol. 54, No. 4, pp. 371-387.
- Fan, P., and Li, J.C. (2006). "Diffusive wave solutions for open channel flows with uniform and concentrated lateral inflow." *Advances in Water Resources*, Vol. 29, pp. 1000-1019.
- Furey, P.R., and Gupta, V.K. (2003). "Affect of temporal variability and the width function on the peak-flow scaling exponent in the Goodwin creek basin." *American Geophysical union, Fall meeting 2003*, abstract#H21B-05.
- Gill, M.A. (1978). "Flood routing by the Muskingum method." *Journal of Hydrology*, Vol. 36, No. 3-4, pp. 353-363.
- Gonwa, W.S., and Kavvas, M.L. (1986). "A modified diffusion equation for flood propagation in trapezoidal channels." *Journal of Hydrology*, Vol. 83, pp. 119-136.
- Guang-Te, W., and Chen, S. (1996). "A linear spatially distributed model for a surface rainfall-runoff system." *Journal of Hydrology*, Vol. 185, No. 1-4, pp. 183-198.
- Hayami, S. (1951). "On the propagation of flood waves." *Disaster Prevention Research Institute Bulletin*, Vol. 1, pp. 1-16.
- Heergegen, R.G., and Reich, B.M. (1974). "Unit hydrographs for catchments of different sizes and dissimilar regions." *Journal of Hydrology*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 143-153.
- Jeong, J.H., and Yoon, Y.N. (2007). *Design practices in water resources*, Goomi Press.
- Jeong, J.H., Kim, S.W., and Yoon, Y.N. (2006). "Development of an estimation method for storage coefficient." *2006 Korea Water Resources Association Symposium*, KWRA, pp. 135-143.
- Jung, S.W. (2005). *Development of empirical formulas for the parameter estimation of Clark's watershed flood routing model*. Ph. D. dissertation, Korea University.
- Kim, J.C., Yoon, Y.J., and Kim, J.H. (2005). "The derivation of GIUH by means of the lag time of nash model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 10, pp. 801-810.
- Krein, A. (2001). "Use of artificial flood events to demonstrate the invalidity of simple mixing models." *Hydrological Sciences*, Vol. 46, No. 4, pp. 611-622.
- Lee, J. (2012). *Analysis for basin concentration time and storage coefficient through theoretical characteristic and development of empirical formulas*. Ph. D. dissertation, Korea University.
- Lee, J., and Yoo, C. (2011). "Decision of basin representative concentration time and storage coefficient considering antecedent moisture conditions." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 11, No. 5, pp. 255-264.
- Lee, J., Yoo, C., and Sin, J. (2012). "Theoretical backgrounds of basin concentration time and storage coefficient and their empirical formula." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 2, pp. 155-169.
- Leopold, L.B. (1953). "Downstream change of velocity in rivers." *American Journal of Sciences*, Vol. 251, pp. 606-624.
- Leopold, L.B., and Maddock, T.F. (1953). "The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications." *Geological Survey Professional Paper*, Vol. 252, pp. 1-64.

- Manfreda, S., Fiorevino, M., and Iacovellis, V. (2005). "DREAM: a distributed model for runoff, evapotranspiration, and antecedent soil moisture simulation." *Advanced in Geosciences*, Vol. 2, pp. 31-39.
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT). (2006). *Establishment of integrated flood management in Han river basin*.
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT). (2007). *Report for guidelines of flood estimation*.
- Molnár, P., and Ramírez, J.A. (1998). "Energy dissipation theories and optimal channel characteristics of river networks." *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 1809-1818.
- Moussa, R. (1996). "Analytical hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow." *Hydrological Processes*, Vol. 10, pp. 1209-1227.
- Nash, J.E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 45, No. 3, pp. 114-121.
- Overton, D.E. (1966). "Muskingum flood routing of upland streamflow." *Journal of Hydrology*, Vol. 4, pp. 185-200.
- Russel, S.O., Sunnell, G.J., and Kenning, B.F.I. (1979). "Estimating design flows for urban drainage." *Journal of Hydrology*, Vol. 105, No. 1, pp. 43-52.
- Sabol, G.V. (1988). "Clark unit hydrograph and R-parameter estimation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.
- Shome, M.L., and Steffler, P.M. (2006). "Flood plain filling by a monoclinial flood wave." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 5, pp. 529-532.
- Venetis, C. (1969). "The IUH of the Muskingum channel reach." *Journal of Hydrology*, Vol. 7, No. 4, pp. 444-447.
- Viessman, W., Lewis, G.L., and Knapp, J.W. (1989). *Introduction to Hydrology*. Harper and Row Publishers Inc., Newyork, USA.
- Wilson, E.M. (1974). *Engineering Hydrology*. Macmillan, London.
- Wong, T.S.W. (2002). "Generalized formula for time of travel in rectangular channel." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 6, pp. 445-448.
- Yoo, C. (2009). "A theoretical review of basin storage coefficient and concentration time using the Nash model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 3, pp. 235-246.
- Yoo, C., and Kim, H. (2010). "Hydrologic re-analysis of Muskingum channel routing method: A linear combination of linear reservoir and linear channel models." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 12, pp. 1051-1061.
- Yoo, C., and Shin, J. (2010). "Decision of storage coefficient and concentration time of observed basin using Nash model's structure." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 6, pp. 559-569.
- Yoon, Y.N. (2008). *Hydrology*. Cheongmoongak Press, pp. 513-523.

논문번호: 12-116	접수: 2012.10.30
수정일자: 2013.01.09/01.29	심사완료: 2013.01.29