

Muskingum 하도추적방법의 수문학적 재해석: 선형저수지모형과 선형하천모형의 선형결합

Hydrologic Re-Analysis of Muskingum Channel Routing Method: A Linear Combination of Linear Reservoir and Linear Channel Models

유철상* / 김하영**

Yoo, Chulsang / Kim, Hayoung

Abstract

This study hydrologically re-analysed the Muskingum channel routing method to represent it as a linear combination of the linear channel model considering only the translation and the linear reservoir model considering only the storage effect. The resulting model becomes a kind of instantaneous unit hydrograph, whose parameters are identical to those of the Muskingum model. That is, the outflow occurs after the routing interval Δt or concentration time T_c , and among the total amount of inflow, the x portion is translated by the linear channel model and the remaining $(1-x)$ portion is routed by the linear reservoir model with the storage coefficient K_c . The application result of both the Muskingum channel routing method and its corresponding instantaneous unit hydrograph to an imaginary channel showed that these two models are basically identical. This result was also assured by the application to the channel flood routing to the Kumnam and Gongju Station for the discharge from the Daechung Dam.

Keywords : Muskingum channel routing, linear channel, linear reservoir

요 지

본 연구에서는 Muskingum 하도추적모형을 수문학적으로 재해석하여 지체효과만을 고려하는 선형하천모형과 저류효과만을 고려하는 선형저수지모형의 선형결합으로 나타내었다. 유도된 모형은 일종의 순간단위도의 형태가 되며, 그 매개변수는 Muskingum 모형의 매개변수와 동일하다. 즉, 추적 시간간격 Δt 또는 지체시간 T_c 후에 최초의 유출이 발생하게 되고, 총 유입량 중 x 만큼은 선형하천모형에 의해 저류효과 없이 빠져나가고 나머지 $(1-x)$ 만큼은 선형저수지모형에 의해 저류상수 K_c 로 대변되는 저류효과를 나타내며 빠져나가는 형태이다. Muskingum 하도추적 모형과 그에 대응하는 순간단위도를 가상하도에 적용해 본 결과, 두 모형이 근본적으로 하도추적결과가 동일함을 확인하였다. 이러한 결과는 대청댐 방류량에 대한 금남 및 공주지점까지의 하도추적결과에서도 확인할 수 있었다.

핵심용어 : Muskingum 하도추적, 선형하천, 선형저수지

1. 서 론

대유역에서의 강우-유출 해석은 유역 분할을 수반한

다. 이는 물론 단위도의 한계 때문이다, 즉, 단위도 적용이 가능한 유역규모의 한계 때문에 유역을 단위도의 적용이 가능한 소유역으로 구분하고, 이들 소유역에 각각 단

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

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

** 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (e-mail: gkdudl85@korea.ac.kr)

위도를 적용하여 유출해석한 후 이를 하도추적하여 유역 출구에서의 유출을 파악하는 것이다(건설교통부, 2006; 2007; Guang-Te and Chen, 1996; Agirre et al., 2005). 물론 단위도의 적용이 가능한 최대 유역규모가 어느 정도인지에 대한 통일된 의견은 없다. 작게는 50 km²에서 크게는 1000 km²까지 다양한 의견들이 존재한다(건설교통부, 2006; 2007; Heergegen and Reich, 1974).

유역 분할 시에는 단일 유역으로 해석하는 경우와는 다른 문제가 발생한다. 그 하나가 유역의 출구에서 떨어진 소 유역으로 부터의 유출을 유역 출구까지 이동 시켜야 한다는 것이다. 이러한 과정을 소위 하도추적(channel routing)이라고 한다. 이 과정에는 물론 시간의 지체가 발생하고, 아울러 하도의 특성에 따른 저류효과도 수반된다. 따라서 하도추적 방법으로 제안된 모형들은 이러한 특성들을 어떻게 고려하느냐에 따라 그 특성이 달라진다. 예를 들어, 가장 간단한 하도추적 모형으로 소위 선형하천(linear channel) 모형, 선형저수지(linear reservoir) 모형, 선형하천과 선형저수지의 결합모형 등을 살펴볼 수 있다. 먼저 선형하천모형에서는 저류효과는 무시하고 지체효과만을 고려하므로 하도구간으로의 입력 수문곡선이나 하도구간 출구에서의 출력 수문곡선의 형태가 같게 된다. 반대로 선형저수지 모형은 지체효과에 대한 고려 없이 저류효과만을 고려하는 특성이 있다. 선형하천과 선형저수지의 결합 모형은 지체시간 이후에 하도에 유입된 유량이 일정한 저류효과를 가지고 하도에서 배출되는 형태를 보이게 한다.

이상에서 살펴본 모형들은 상당히 간단화 된 개념적인 것들이다. 실제로 현실적이지 않은 것처럼 보이기도 한다. 이에 반해 많이 사용되는 Muskingum 모형 또는 이의 개량형태인 Muskingum-Cunge 모형은 보다 정교한 것처럼 보인다(Barry and Bajracharya, 1995; Ponce et al., 1996). 그러나 이들 하도추적 모형의 경우에도 저류효과 및 지체효과가 반영되어 있다는 것은 기지의 사실이다. Muskingum 모형의 경우 극단적인 경우로서 선형하천 또는 선형저수지 모형을 포함한다는 것은 익히 알려져 있는 사실이기도 하다(Overton, 1966; Venetis, 1969; Singh and McCann, 1980; O'Connor, 1982; Szymkiewicz, 2002). 물론, 하도 홍수추적 모형의 형태가 유역 홍수추적에 사용되는 단위도의 형태와 달라, 그 특성을 쉽게 파악하기 어렵다는 문제점이 있기는 하다. 그러나 Muskingum 모형과 같은 하도 추적모형의 특성을 선형하천이나 선형저수지의 특성으로 분리하여 나타낼 수 있다면, 즉, 이 모형을 선형저수지와 선형하천의 결합으로 표현할 수 있다면, 유역에 발생한 강우가 소유역이나 하도를 거치면서 어떤 변화를 겪게 되는지 보다 명확하게 이해할 수 있게 되는 것

은 자명하다.

본 연구는 Muskingum 방법을 수문학적으로 재해석하여 지체효과만을 고려하는 선형하천 및 저류효과만을 고려하는 선형저수지 모형으로 구분하여 그들의 선형결합으로 나타내는 것을 목표로 한다. 이러한 시도가 가능하다면, 하도에서의 변화는 하도의 지체효과를 대변하는 지체시간과 하도의 저류효과를 나타내는 저류상수를 구분하여 추정하는 것이 가능해 진다. 아울러 하도에서의 저류효과 및 지체효과를 구분하여 나타낼 수 있다면 유역분할에 따른 유역 지체시간의 분할, 아울러 유역 저류효과의 분할 등이 가능해 진다. 궁극적으로 유역분할의 효과를 이론적으로 검증하는 데 크게 기여할 수 있게 된다.

2. 선형저수지 및 선형하천 모형

2.1 선형저수지 모형

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

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

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

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

여기서, $I(t)$ 는 유입량을 나타낸다. 만일 단위(unit) 크기의 유입량이 순간적으로 저수지에 들어온다면, 위 미분방정식은 다음과 같이 변형시킬 수 있다. 즉,

$$K \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) = \delta(t) \quad (3)$$

여기서, $\delta(t)$ 는 Dirac Delta 함수로서 다음 관계를 만족한다.

$$\int \delta(t) dt = 1 \quad (4)$$

$$\int f(t) \delta(s) ds = f(s) \quad (5)$$

위 Eq. (3)의 해는 여러 가지 방법으로 구할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$Q(t) = \frac{1}{K} e^{-t/K} \quad (6)$$

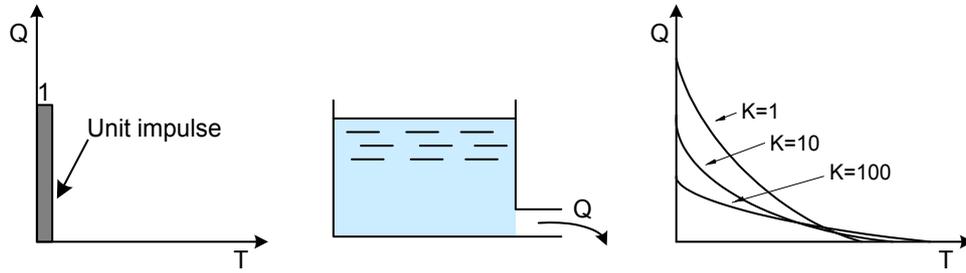


Fig. 1. Conceptual Diagram of Linear Reservoir Model

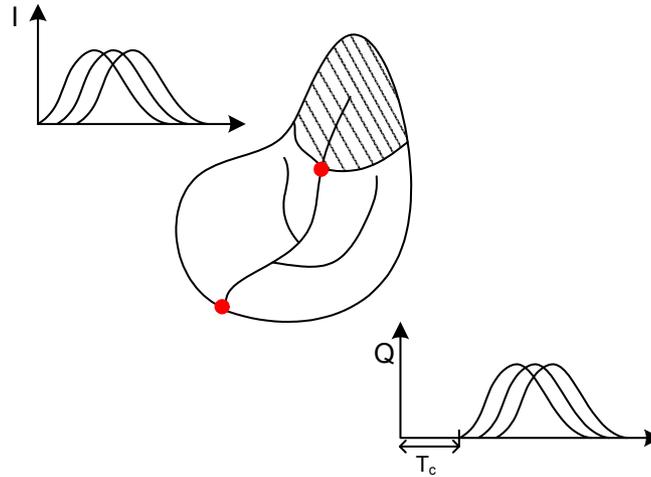


Fig. 2. Conceptual Diagram of Linear Channel Model

위 Eq. (6)은 선형저수지에서의 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 띠게 된다(Fig. 1). 이 선형저수지 모형은 비록 자연유역의 유출형태를 반영하지는 못하지만 해석상의 장점으로 인해 많이 거론되는 모형이다.

2.2 선형하천 모형

선형하천의 개념은 단순하다. 유량의 크기에 관계없이 주어진 하천 구간을 통과하는데 걸리는 시간은 동일하다(Fig. 2). 아울러 이 하천 구간 내에서는 어떠한 저류효과도 발생하지 않는다. 따라서 주어진 유입량 함수 $I=f(t)$ 에 대해서 다음과 같은 출력 함수를 갖는다.

$$Q(t) = f(t - T) \quad (7)$$

여기서, T 는 지체시간을 의미한다.

선형하천이론의 특성은 하도에서의 저류량이 상류단에서의 유입량에 의존한다는 점이다. 물론 상류단에서의 유입량의 규모는 T 시간 후 하류단에서의 유출량과 같다. 그

리나 저류량의 규모가 유출량을 지배하지 못하므로 둘 사이의 관계는 설정 불가능 하고, 반대로 유입량의 규모가 저류량을 지배하므로, 저류량은 유입량의 함수로 표현되는 것이다. 이러한 특성은 선형저수지의 개념과 정반대되는 개념이기도 하다.

3. Muskingum 하도추적 모형의 수문학적 재해석

Muskingum 모형에서는 하도에서의 저류량을 유입량 I 및 유출량 O 의 선형조합으로 표현한다(Fig. 3). 즉,

$$S = K_c \{O + x(I - O)\} = K_c \{xI + (1-x)O\} \quad (8)$$

여기서, K_c 는 저류상수, x 는 일종의 비례상수로서 유입량의 비율을 나타낸다. x 가 0인 경우 위 식은 선형저수지 모형이 되고, x 가 1인 경우에는 선형하천모형이 된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 참고로, x 가 1인 경우에 저류량은 유입량만의 함수로만 표현되므로, 저류량을 결정하는데 유출량의 비중이 없다는 것이거나 또는 유출량 자체가 없다는 것을 의미한다. 전자의 경우가 선형하천의 개념이 되는데, 이는 모든 유입량이 일정시간 지체 후 규모변화 없이 유출량으로 빠져나간다는 것을 의미한다. 후자의 경

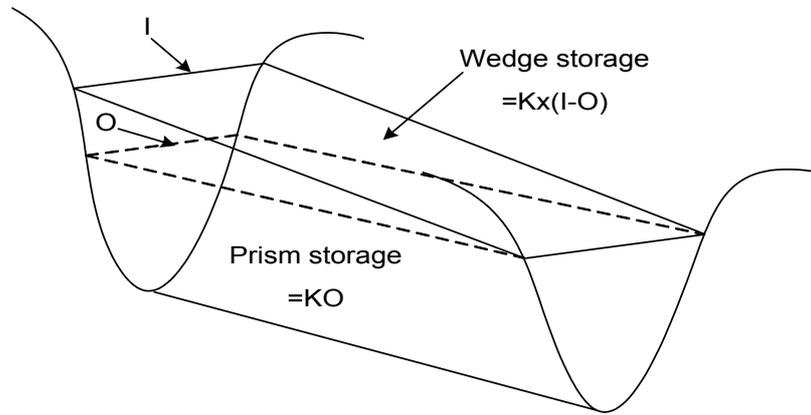


Fig. 3. Prism and Wedge Storages in a Channel Reach (Yoon, 2008)

우는 유입량이 순간적으로 배출된다는 것을 의미하므로 비현실적인 상황이 된다.

Muskingum 방법을 적용하여 하도 추적을 수행하는 경우 주의해야 하는 점은 추적 시간간격 Δt 의 결정이다. 일반적으로 도달시간의 1/3~1/2 정도가 고려된다고 하나, 보다 엄밀하게는 $\Delta t > 2K_c x$ 가 되도록 Δt 가 결정되어야 한다(윤용남, 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.

이 추적 시간간격 Δt 는 저류량에 공헌하는 유입량의 비율에 따라 크게 달라진다. 먼저, 저류량 산정 시 유입량의 비중이 큰 경우(예를 들어 $x \geq 0.5$), 추적 시간간격 Δt 는 최소한 저류상수인 K_c 가 된다. 즉, 유입량의 영향이 유출에 반영되기 위해서는 K_c 시간이 무조건 경과해야 한다. 유입량의 비중이 최대가 되어 $x=1$ 이 되면, 추적 시간간격 Δt 는 최소 $2K_c$ 가 된다. 즉, 유입량의 영향은 최소 $2K_c$ 시간 후에도 유출량에 반영된다. 즉, 유입량의 비중이 상당히 큰 경우에 Muskingum 모형에서의 집중시간은 최소 K_c 에서 최대 $2K_c$ 까지의 크기를 갖는다는 결과가 된다. 이와 같이 유역의 저류상수보다 집중시간이 크다는 것은 물론 비현실적이다. 저류효과가 작아 선형하천에 부합해야 하는 경우 이므로 급경사의 긴 하천 구간에서나 가능한 경우이다.

위 경우와는 반대로 저류량에서 차지하는 유입량의 비가 작게 되면, 즉, $x < 0.5$ 인 경우에는 최소 추적 시간간격 Δt 가 K_c 보다 작은 값이 된다. 아주 극단적인 경우로서 $x=0$ 가 되면 유입량의 영향이 유출량에 순간적으로 반영될 수 있다는 결과가 된다. 이 경우가 다른 아닌 선형저수지의 개념이며, 따라서 집중시간은 0이 되고, 실제적으로는 아주 짧은 하천구간에서나 가능한 경우가 된다. 보다 현실적인 경우로서 $0 < x < 0.5$ 인 경우를 살펴볼 수 있으

며, 이 경우에는 추적 시간간격 Δt 가 저류상수 K_c 보다 더 작게 나타날 수 있다. 즉, 집중시간이 저류상수보다 작을 수 있으며, 따라서 일반적인 중규모 또는 대규모 유역에서의 상황이 이런 경우에 해당된다.

위와 같이 Muskingum 모형에서의 저류량은 선형하천 및 선형저수지의 개념을 함께 포함한 것이다. 즉, 유입량 중 x 만큼은 선형하천으로 빠져나가고(즉, 저류효과 없이 지체시간만을 고려하여), 나머지 $(1-x)$ 만큼은 선형하천에서와 동일한 시간 지체 후 저류상수 K_c 를 갖는 선형저수지를 통해 빠져나가게 되는 것이다. 따라서 순간단위도의 경우에서처럼 유입량을 순간유입인 Dirac Delta 함수로 가정하면, 그 응답함수는 다음과 같이 표현된다.

$$O(t) = x\delta(t - T_c) + (1-x)\frac{1}{K_c}e^{-(t-T_c)/K_c} \quad (9)$$

위 Eq. (9)에서 알 수 있듯이 순간단위도에서 첫 번째 항은 선형하천모형을 나타내는 부분이고, 두 번째 항은 선형저수지모형을 나타낸 부분이다. 첫 번째 항은 Eq. (7)에서처럼 저류효과없이 T_c 의 지체시간이 지난 후 유입량이 출구로 빠져나오는, 전체 유입량 중 x 만큼만 선형하천 모형의 영향을 받는 것이다. 두 번째 항은 Eq. (6)에서처럼 저류상수 K_c 를 갖는 선형저수지를 통해 빠져나오는 유출량을 표현한 것으로, 선형저수지를 통해 빠져나오는 유출량도 선형하천모형의 지체시간과 동일한 시간 지체 후 유출이 발생하기 시작하며, 이는 전체 유입량 중 $(1-x)$ 에 해당하는 부분이다. 따라서 전체순간단위도는 시간 T_c 에 $x+(1-x)/K_c$ 만큼의 첨두가 발생하고, 이후 $(1-x)/K_c$ 가 지수적으로 감소하는 형태의 유출응답을 나타낸다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

위 식과 같이 나타난 Muskingum 모형을 충격응답함수 또는 일종의 순간단위도로 보면 다음과 같은 중요한 특성을 유도할 수 있다. 먼저, 집중시간은 간단히 T_c 가 된

다. Eq. (9)의 첫째 항과 둘째 항 모두 집중시간이 동일하게 T_c 로 정의된다. 두 번째로 전체 유량에 대한 저류효과는 저류상수 K_c 로 정의된다. 비록 전체 유량 중 $(1-x)$ 부분만이 저류효과에 영향을 받기는 하지만, 저류상수 자체가 전체유량에 대해 평균적으로 구해진 값이므로 이 값이 바로 전체 유량에 대한 저류상수가 되는 것이다. 위 Eq. (9)에서 보면 저류효과가 발휘되는 부분 유량에 대한 저류효과가 $1/(1-x)$ 만큼 증가되어 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이 부분에서 발휘된 저류효과를 전체유량에 대해

평균하면 전체 유량에 대한 저류효과가 되는 개념이다. 이상과 같은 내용은 유역분할 시 일반적으로 적용되는 하도추적 방법인 Muskingum 방법을 수문학적인 선형저수지 및 선형하천의 결합으로 표현하고, 아울러 그 특성을 집중시간 및 저류상수로 표현한 것으로 정리된다. 이러한 내용은 하도 추적부분에서 고려되어야 할 집중시간 및 저류상수의 영향을 파악하는데 매우 중요하다.

4. 적용 사례

4.1 가상 하도의 경우

다음 사례는 윤용남(2008)에서 소개하고 있는 Muskingum 하도 추적의 예제 (Fig. 5)를 본 연구에서 제시한 순간단위도로 재해석 한 것이다. 당연히 Muskingum 모형을 사용하여 하도 홍수추적을 수행할 때에는 저류상수 K_c 와 가중인자 x 가 먼저 결정되어야만 한다. 저류상수 K_c 와 가중인자 x 는 사전에 주어진 유입 및 유출수문곡선을 이용하여 산정할 수 있다.

윤용남(2008)에 나와 있는 유입 및 유출 수문곡선은 Fig. 5(a)와 같다. 아울러 주어진 자료를 이용하여 결정된 가중인자 x 와 저류상수 K_c 는 각각 0.25, 1.5일이다. 이렇게 결정된 저류상수 K_c 와 가중인자 x 를 고려하면, $\Delta t > 2K_c x$ 이어야 하므로 최소 추적 시간간격 Δt 는 18 시간 이상이어야 한다. 윤용남(2008)에서는 Δt 를 24시간, 즉, 1일로 결정하였다. K_c 에 1.5일, x 값에는 0.25, Δt 는 1일을 대입하여 Muskingum 모형의 매개변수 C_0, C_1, C_2 를 구하면 각각 0.077, 0.538, 0.385이 되므로, 유출량 O_2 는 $0.077I_2 + 0.538I_1 + 0.385O_1$ 에 따라 산정된다.

다음으로 결정된 Muskingum 모형에 대한 순간단위도를 유도해 보자. 이 순간단위도는 Muskingum 모형과 동일한 매개변수를 사용하게 된다. 즉, 가중인자 x 와 저류상수 K_c 는 각각 0.25, 1.5일이고, 지체시간 T_c 는 추적 시간간격 Δt 와 동일한 1일을 사용하게 된다. Fig. 6과 같이

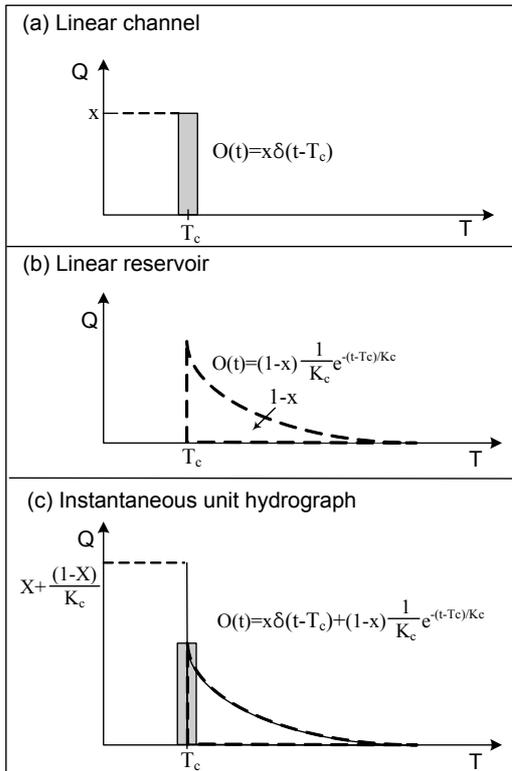
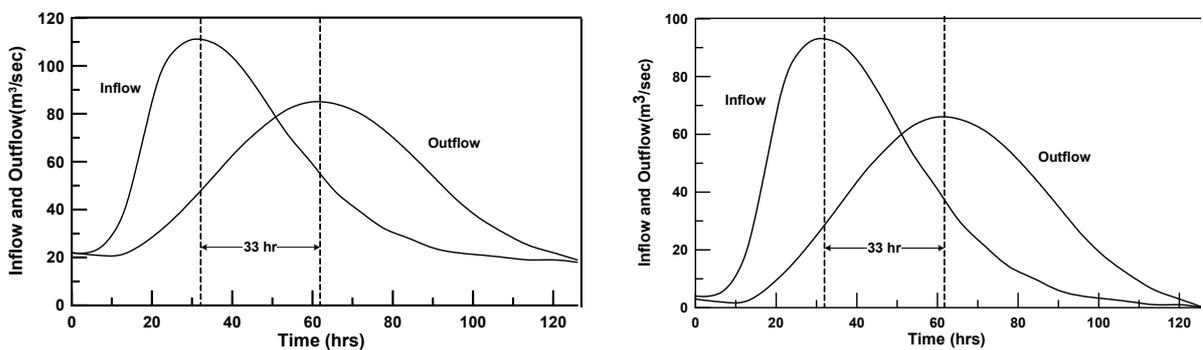


Fig. 4. IUH Model for Channel Flood Routing Composed of Linear Channel and Linear Reservoir Model



(a) Inflow and outflow data with base flow (Yoon, 2008) (b) Inflow and outflow data without base flow
Fig. 5. Inflow and Outflow Data for the Muskingum Channel Flood Routing with Respect to Base Flow

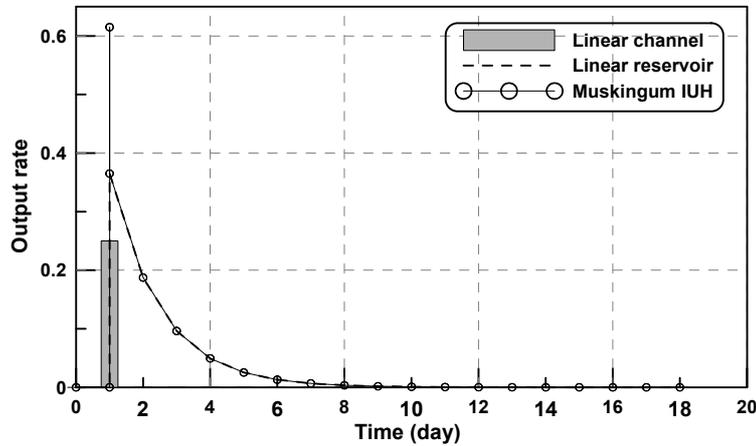
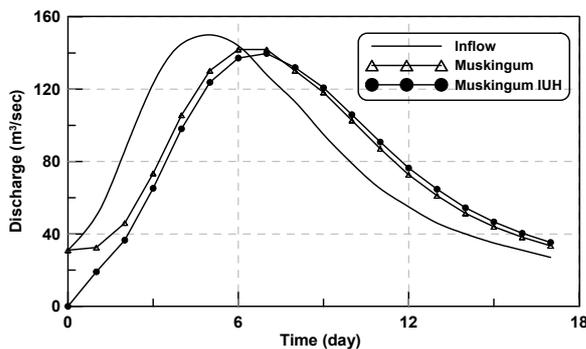
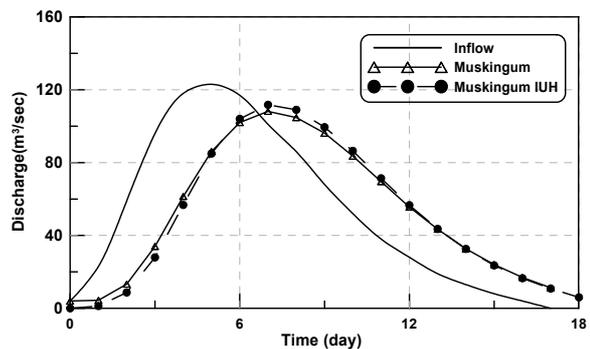


Fig. 6. IUH Corresponding to the Muskingum Model Determined



(a) Outflow Hydrographs Calculated by Applying the Muskingum Method and Its Corresponding IUH with Base Flow



(b) Outflow Hydrographs Calculated by Applying the Muskingum Method and Its corresponding IUH without Base Flow

Fig. 7. Comparison of Outflow Hydrographs Calculated by Applying the Muskingum Method and Its Corresponding IUH with Respect to Base Flow

유도된 순간단위도에서 막대그래프는 선형하천모형을 나타내는 것으로 시간간격 Δt , 즉 1일의 지체시간이 지난 후 가중인자 x 의 크기만큼을 나타낸다. 점선은 선형저수지 모형으로 1일의 지체시간이 지난 후 최대값이 나타나고 이후 지수적으로 감소하게 된다. 선형하천모형과 선형저수지모형의 합으로 나타나는 순간단위도의 경우, 1일의 지체시간에서 선형하천모형과 선형저수지모형의 합이 나타나고, 이후에는 선형저수지 모형만을 따라 지수적으로 감소하는 형태를 보인다.

Muskingum 모형과 이에 해당하는 순간단위도를 이용하여 유출량을 산정해 보면 Fig. 7과 같다. 두 가지 방법 모두에서 첨두시간과 첨두유량이 매우 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 특히 유입수문곡선과 유출수문곡선에서의 첨두시간 차이가 2일로 적용한 저류상수 K_c 와 동일하게 나타난다. 이는 관측된 유입수문곡선과 유출수문곡선의 첨두시간 차이를 저류상수로 결정하는 경험적인 방법과도 일치하는 결과이기도 하다. 그러나 두 경우에서의

큰 차이점이 있는데 이는 바로 초기값에서 나타난다. Muskingum 모형을 적용하는 경우 초기값을 기저유출로 간주하여, $Q_1 = I_1$ 로 가정하고 유출량을 산정한다. 그러나 순간단위도를 적용하는 경우에는 기저유출을 따로 고려해 주어야 한다. 그렇지 않으면 기저유출을 0으로 취급하여 Fig. 7(a)에서와 같이 $t=0$ 일 때 Muskingum 모형을 적용한 경우와 순간단위도를 적용한 경우의 유출량이 다르게 나타나게 된다. 초기값에서 기저유출만큼의 차이가 발생하고, 두세 번의 추적 시간간격동안 Muskingum 모형으로 산정한 유출량과 순간단위도로 산정한 유출량이 어느 정도 차이를 보이지만 이내 곧 줄어들어 두 방법으로 산정한 유출량이 거의 비슷하게 된다.

기저유출을 제거한 경우를 비교해 보면 Fig. 5(b)와 같다. 이 경우 역시 동일한 매개변수를 사용하여 Muskingum 모형과 순간단위도 (Fig. 6)를 통해 유출을 산정하면 Fig. 7(b)와 같다. 기저유출이 제거되어 초기유량이 거의 0에 가깝기 때문에 Muskingum 모형을 적용하여 구한 유출량

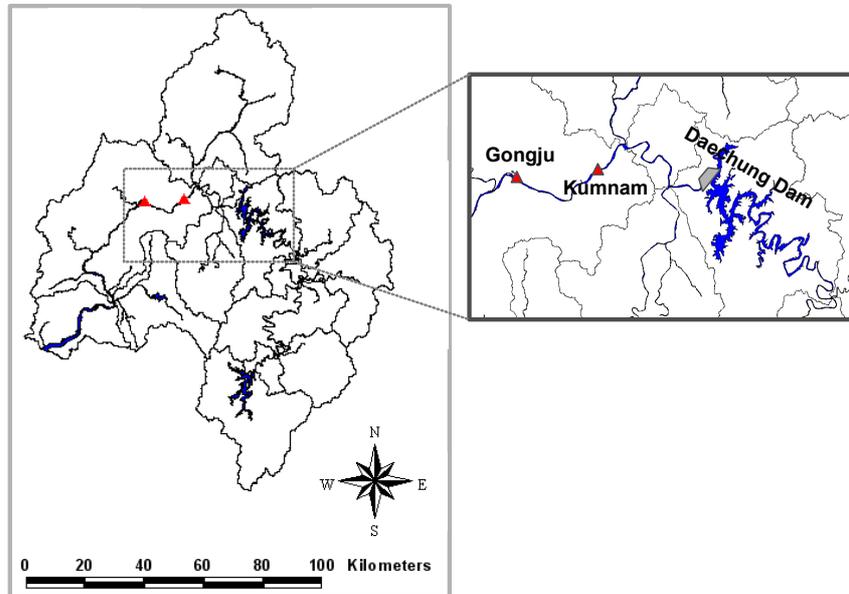


Fig. 8. Study Channel in the Geum River Basin

과 순간단위도를 적용하여 구한 유출량이 초기값에서부터 유출수문곡선이 끝날 때까지 거의 비슷한 값을 보이게 된다. 기저유량을 제거한 경우에는 초기유량으로 발생한 차이가 전체적으로 미미해서 Muskingum 모형과 이에 대응하는 순간단위도를 적용한 결과를 유의하게 차별화 하지 못하며 따라서 이 경우에는 두 모형이 개념적으로 동일함을 확인할 수 있다.

4.2 대청댐 방류량에 대한 하도 홍수추적

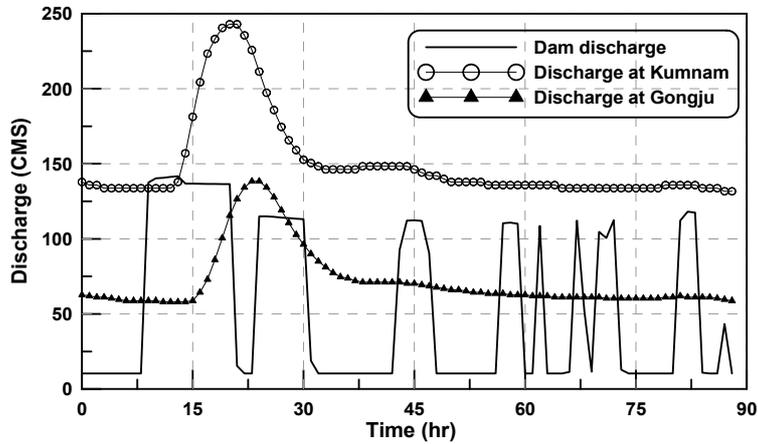
본 연구에서의 두 번째 적용사례로서 대청댐 방류량에 대한 하도홍수추적을 수행하였다. 하도추적 대상 첫 번째 구간은 대청댐과 댐 하류 33.6 km 지점인 금남 수위관측소까지의 하도이며, 두 번째 구간은 금남 수위관측소와 16 km 떨어진 공주 수위관측소까지의 하도이다 (Fig. 8). 대상하도는 금강유역에 속해 있으며, 금강유역은 유역면적 9886 km², 유로연장 393.2 km이다. 유역 내에는 용담댐과 대청댐 두 개의 다목적 댐이 있으며, 이 중 대청댐은 하구로부터 약 150 km 상류인 금강 본류의 중·하류부에 위치한다. 유역면적은 4134 km²이고, 총 저수용량은 14억 9천만 m³으로 유역 내 연간 총 16억 5천만 m³의 용수를 공급하고 있다 (박봉진 등, 1997).

본 연구는 하도추적만을 대상으로 하므로 강우가 발생하지 않는 시점에서의 댐 방류사례를 선택하였다. 본 연구에서 채택한 사례는 2004년 4월 10일 9시부터 4월 13일 21시까지 발생한 대청댐 방류이다. 대청댐 방류량 자료는 유량의 형식으로 획득하였으며, 금남 및 공주 수위관측소 자료는 수위자료를 획득한 후 수위-유량관계곡선을 이용하여 유량자료로 변환하였다 (Fig. 9(a)). 그러나 Fig. 9(a)

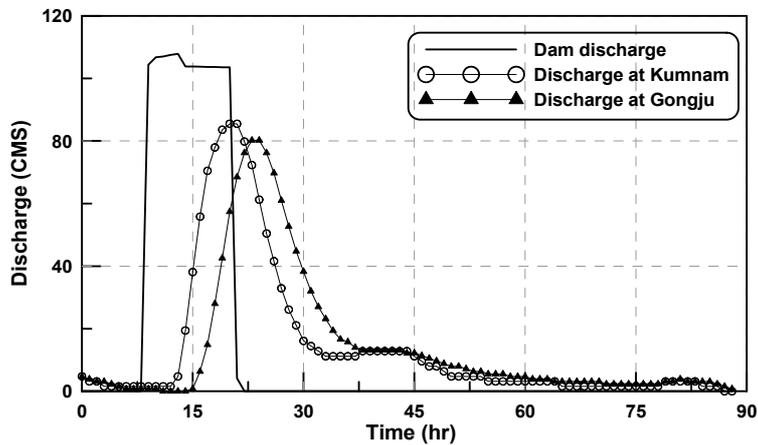
에서도 살펴볼 수 있는 것처럼, 세 개의 수문곡선은 서로 다른 유량수준을 나타내고 있으며, 특히 기저유량의 차이가 매우 큰 것으로 나타난다.

본 연구에서는 먼저 댐 방류량의 하도추적을 목적으로 하므로, 먼저 기저유량을 배제한 후 직접유출량을 분리하였다. 다음으로 댐 방류량 및 금남과 공주지점의 수문곡선 형태, 아울러 유량수준을 고려하여 해석에 적용할 대상 방류량을 선정하였다. 금남 및 공주지점의 수문곡선을 고려하면 처음 두 번의 방류를 상류지점의 유입 수문곡선을 해야 할 것 같았으나, 검토 결과 첫 번째 방류만을 고려하는 것이 하류에서의 수문곡선과 더 잘 일치하는 것으로 파악되었다. 그러나 여전히 총 유출에 약간의 차이가 있었으며, 댐 방류량을 기준으로 총 유출이 유사하도록 수문곡선을 미세 조정하였다. 물론 이러한 조정은 매우 조심스러운 것이기는 하나, 본 연구의 목적이 Muskingum 하도추적 방법과 본 연구에서 제시하는 순간단위도를 비교하는 것이므로 유도되는 결과에 큰 영향을 주지는 않을 것으로 판단하였다. 최종적으로 하도추적에 이용된 수문곡선은 Fig. 10(b)와 같다.

하도추적은 대청댐-금남, 금남-공주로 구분하여 각각 수행하였다. 먼저 대청댐에서 금남 지점까지의 자료를 살펴보면, 4월 10일 9시부터 4월 13일 21시까지 총 1263.44 m³/sec의 유량이 방류되고, 금남 지점에서는 이로부터 5시간 후인 14시부터 서서히 유량이 증가하기 시작하여 방류시작 11시간 후, 4월 10일 20시에 85.51 m³/sec의 첨두 유량에 달하게 된다. 유입 및 유출수문곡선이 주어졌을 때, 두 수문곡선의 첨두유량 발생시간차가 홍수파의 통과 시간과 비슷하여 저류상수 K 로 간주할 수 있다 (정중호



(a) Daechung Dam Discharge and Runoff Measurements at Kumnam and Gongju Stations



(b) Inflow and Outflow Hydrographs Used in this Study

Fig. 9. Inflow and Outflow Data Preparation for Muskingum and IUH Model Application

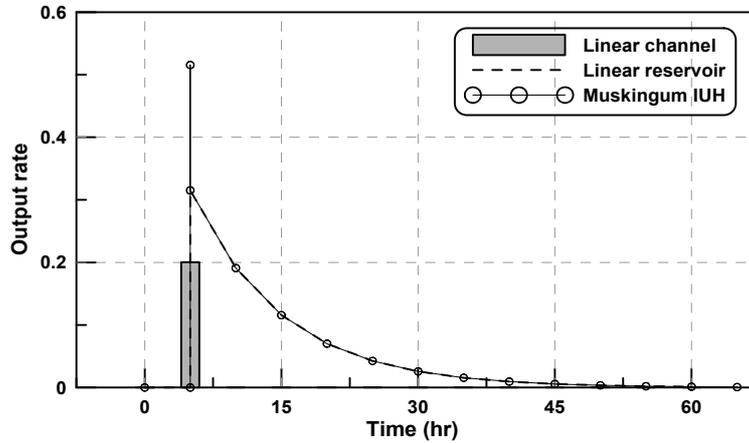
와 윤용남, 2003; 윤용남, 2008; Chow et al., 1988). 그러나 댐 방류량의 경우 일반적인 수문곡선처럼 서서히 증가하는 형태가 아닌 방류시작 시간부터 바로 첨두유량을 보이기 때문에 유입량과 유출량의 첨두유량 발생 시간 차이가 타 사례에서와 같은 유의한 의미를 가진다고 할 수 없다. 그보다도 4월 10일 14시 즉, 방류 시작 5시간 후부터 금남 지점 유출 수문 곡선에서 유량이 증가하고 있기 때문에 대청댐에서 방류한 유량이 5시간 후부터 금남지점에 영향을 미쳤다고 보는 것이 합리적인 것으로 보인다. 다시 말해 대청댐 방류 5시간 경과 후 유입량의 영향이 유출량에 반영되기 시작하므로 관측 자료를 바탕으로 보았을 때 대청댐과 금남 지점 사이의 하도에서는 지체시간이 5시간이라는 것을 유추할 수 있다.

Muskingum 하도추적모형의 가중인자 x 와 저류상수 K_c 는 대청댐 방류량과 금남 지점의 유량을 바탕으로 추정할 수 있다. 대청댐 방류량과 금남 지점의 유출량을 입력 자료로 사용하고 Muskingum 모형과 이에 해당하는 순간단위도를 이용하여 하도추적을 수행할 경우, 금남 지

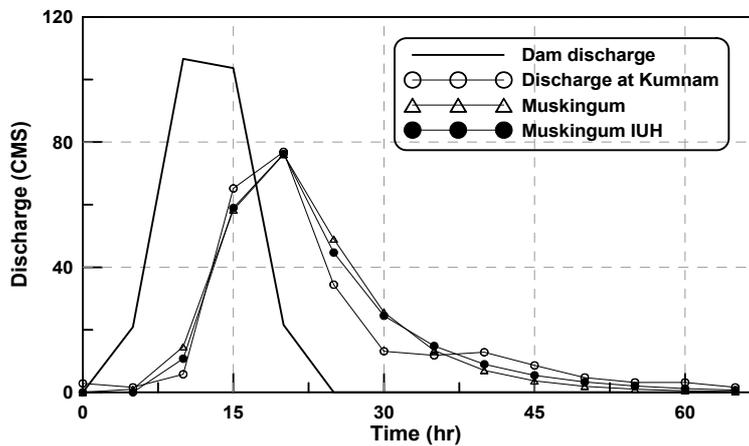
점의 관측 유출량과 가장 유사한 모의를 할 수 있는 매개변수를 역으로 구하면 가중인자 x 는 0.20, 저류상수 K_c 는 약 10시간으로 추정된다. 추적 시간간격 Δt 는 $2K_c x$ (4.00 시간)보다 크고, 저류상수 K_c 보다 작으며, $2K_c x$ 로 추정된 시간과 가장 가까운 5시간으로 설정하였다. 이는 관측 자료에서 유추한 지체시간과도 동일한 시간이다.

결정된 저류상수 K_c , 가중인자 x 및 추적 시간간격 Δt 를 이용하여 결정한 Muskingum 모형의 매개변수 C_0 , C_1 , C_2 는 각각 0.047, 0.429, 0.524이다. 따라서 유출량 O_2 는 $0.047I_2 + 0.429I_1 + 0.524O_1$ 에 따라 산정된다. 또한 동일한 매개변수를 사용하여 대청댐에서 금남 지점 사이의 하도에 대한 순간단위도를 유도하면 Fig. 10(a)와 같다. Fig. 10(a)의 순간단위도는 5시간, 즉 지체시간 T_c 에서 최대값이 발생하고, 이후 선형 저수지 부분과 동일한 형태로 지수적으로 감소하는 형태를 가진다.

Muskingum 모형과 Muskingum 모형의 순간단위도를 사용하여 유출량을 모의하기 위해서는 주어진 관측 자료가 추적 시간간격 Δt 에 맞춰 수정되어야만 한다. 대청댐



(a) IUH Model Derived for the Channel Reach between Daechung Dam and Geumnam Station



(b) Flood Routing Results

Fig. 10. Comparison of Flood Routing Results Using the Muskingum Method along with Its Corresponding IUH Method

에서 금남 지점 사이의 하도의 경우에는 추적 시간간격 Δt 가 5시간으로 선정되었으므로, 1시간 간격으로 주어진 관측 자료는 5시간 간격의 대표값으로 대체되어야 한다. 다시 말해, 1시간의 관측 자료를 5시간 간격으로 평균 내어 이 평균값을 하도추적을 위한 유입량으로 사용되어야 한다. 따라서 대청댐에서 금남 지점 사이의 하도에 대한 유입량은 Fig. 10(b)의 실선과 같고, 이는 Fig. 9(b)의 유입량과는 약간 다른 형태를 보이고 있다.

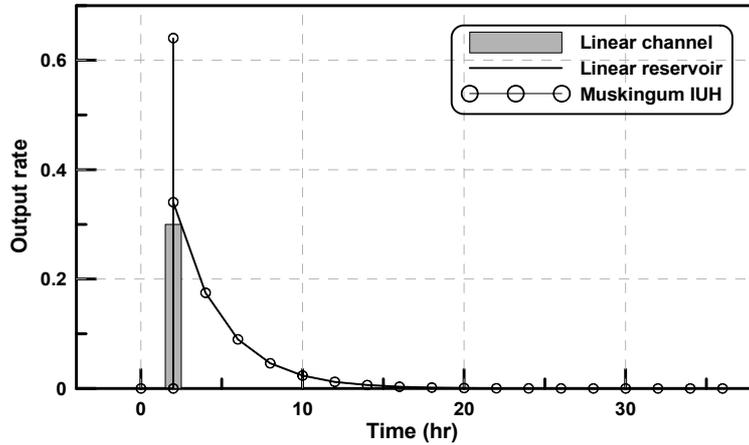
Fig. 10(a)의 순간단위도와 Muskingum 모형을 이용한 하도추적 결과는 Fig. 10(b)와 같다. 두 가지 방법을 사용하여 산정한 유출량은 유입수문곡선(대청댐 방류량)의 형태를 반영하기 때문에 유출수문곡선의 꼬리부분은 정확하게 모의하지는 못하지만, 모두 동일한 첨두시간(약 20시간)에 매우 유사한 첨두유량(약 $76 \sim 77 \text{ m}^3/\text{sec}$)을 보이고 있다.

금남 지점에서부터 공주 지점까지의 하도추적 역시 대청댐 에서부터 금남 지점의 하도추적과 동일한 방법으로

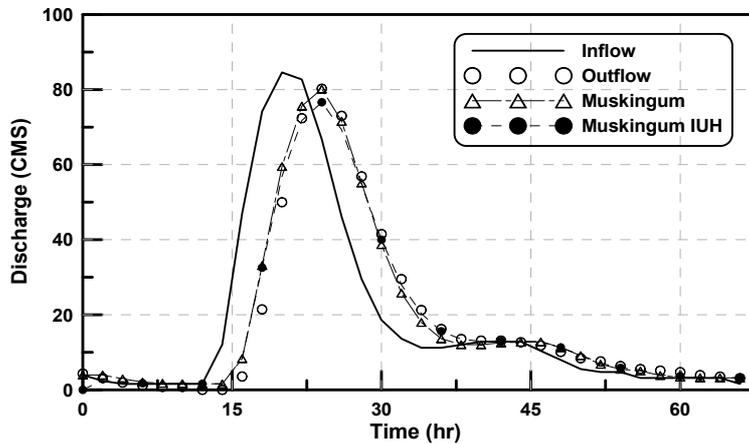
수행되었다. 앞서 살펴본 관측 자료에서 대청댐 방류의 영향이 금남 지점에서는 5시간 후에 나타났다면, 공주 지점에서는 8시간 후에 나타나 4월 10일 17시부터 유량이 증가하기 시작한다. 대청댐에서 금남지점까지의 도달시간이 5시간이라면, 대청댐에서 공주지점까지의 도달시간은 8시간이라는 것을 대략 유추할 수 있다.

대상하도에 대한 가중인자 x 와 저류상수 K_c 는 각각 0.32와 3.11시간으로 결정되었다. 이때 추정된 저류상수 K_c 는 관측 자료에서 나타난 금남 지점의 첨두유량과 공주 지점의 첨두유량 발생시간차와 비슷한 값을 알 수 있다. 추적 시간간격 Δt 는 $2Kx$ (1.99시간)보다 커야 하고, 저류상수 K_c 보다는 작아야 하며, $2Kx$ 로 선정된 1.99시간과 가장 유사한 값을 사용해야 하므로 2시간으로 설정하였다.

Fig. 11(a)는 각각의 매개변수를 대입하여 구한 Muskingum 모형의 순간단위도를 나타낸 것이다. Fig. 11(a)의 순간단위도는 2시간, 즉 지체시간 T_c 에서 첨두가 발생



(a) IUH Model Derived for the Channel Reach between Geumnam and Gongju Station



(b) Flood Routing Results

Fig. 11. Comparison of Flood Routing Results Using the Muskingum Method along with Its Corresponding IUH Method

하고, 이후 선형 저수지 부분과 동일한 형태로 지수적으로 감소한다. 또한 하도추적을 수행하기 전 주어진 1시간 단위의 관측자료를 2시간 시간간격에 맞춰 변환하여야 하는데, 1시간 단위의 관측자료를 2시간 간격으로 평균 내어 평균값을 하도추적을 위한 유입량으로 사용하였다.

Muskingum 모형과 이에 대응하는 순간단위도를 이용하여 하도추적을 수행하면 그 결과는 Fig. 11(b)와 같다. Muskingum 모형의 경우, 결정된 저류상수 K_c , 가중인자 x 및 추적 시간간격 Δt 를 적용하여 매개변수 C_0, C_1, C_2 를 구하면 각각 0.001, 0.641, 0.358이 된다. 따라서 유출량 Q_2 는 $0.001I_2 + 0.641I_1 + 0.358Q_1$ 에 따라 산정된다. 하도추적 결과, 금남 지점과 공주 지점 사이의 관측 유입량은 관측 유출량과 비슷한 형태를 띠고 있어 모의된 유출량 역시 관측 자료와 비슷한 형태로 나타난다. Muskingum 방법 및 이에 대응하는 순간단위도를 이용한 하도추적 결과 모두 동일한 침투시간(24시)에 유사한 침투유량(약 $76 \sim 80 \text{ m}^3/\text{sec}$)을 나타냄을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Muskingum 하도추적모형을 수문학적으로 재해석하여 지체효과만을 고려하는 선형하천모형과 저류효과만을 고려하는 선형저수지모형의 선형결합으로 나타내었다. 유도된 모형은 일종의 순간단위도의 형태가 되며, 그 매개변수는 Muskingum 모형의 매개변수와 동일하다. 즉, 추적 시간간격 Δt 또는 지체시간 T_c 후에 최초의 유출이 발생하게 되고, 총 유입량 중 x 만큼은 선형하천모형에 의해 저류효과 없이 빠져나가고 나머지 $(1-x)$ 만큼은 선형저수지모형에 의해 저류상수 K_c 로 대변되는 저류효과를 나타내며 빠져나가는 형태이다.

Muskingum 하도추적 모형과 그에 대응하는 순간단위도를 가상하도에 적용해 본 결과, 두 모형이 근본적으로 동일한 하도추적결과가 나타남을 확인하였다. 이러한 결과는 대청댐 방류량에 대한 금남 및 공주지점까지의 하도추적결과에서도 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 하도에

서의 유출특성변화를 저류상수 K_c 와 지체시간 T_c 을 이용하여 나타낼 수 있다는 것을 의미하며, 아울러 특정 소유역과 전체유역 사이에 저류상수 및 집중시간이 어떠한 관계를 갖게 되는지를 파악하는 데에도 중요한 역할을 하게 될 것이다. 추가로 측방유입의 문제 등이 해결된다면, 유역분할에 따른 유역 지체시간의 분할이나 유역 저류효과와 분할 등이 이론적으로 가능할 수도 있을 것이다. 유역을 분할함에 따라 홍수량이 달라지는 문제 또한 이러한 연구를 통해 이론적으로 해결할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

건설교통부 (2006). **한강권역 유역종합치수계획 수립**.
 건설교통부 (2007). **홍수량 산정기법 가이드라인 보고서**.
 윤용남 (2008). **수문학**, 청문각, pp. 513-523.
 박봉진, 강권수, 정관수 (1997). “대청댐 방류에 따른 금강 하류부의 홍수추적.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제2호, pp. 131-141.
 정중호, 윤용남 (2003). **수자원설계실무**, 구미서관, pp. 200-205.
 Agirre, U., Goñi, M., López, J.J., and Gimena, F.N. (2005). “Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash’s instantaneous unit hydrograph.” *Catena*, Vol. 64, No. 2-3, pp. 321-332.
 Barry, D.A., and Bajracharya, K. (1995). “On the

Muskingum-Cunge flood routing method.” *Environmental International*, Vol. 21, No. 5, pp. 485-490.
 Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, pp. 243-260.
 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.
 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.
 O’Connor, K.M. (1982). “Derivation of discretely coincident forms of continuous linear time-invariant models using the transfer function approach.” *Journal of Hydrology*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 1-48.
 Overton, D.E. (1966). “Muskingum flood routing of upland streamflow.” *Journal of Hydrology*, Vol. 4, pp. 185-200.
 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.
 Singh, V.P., and McCann, R.C. (1980). “Some notes on Muskingum method of flood routing.” *Journal of Hydrology*, Vol. 48, No. 3-4, pp. 343-361.
 Szymkiewicz, R. (2002). “An alternative IUH for the hydrological lumped models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 259, No. 1-4, pp. 246-253.
 Venetis, C. (1969). “The IUH of the Muskingum channel reach.” *Journal of Hydrology*, Vol. 7, No. 4, pp. 444-447.

논문번호: 10-070	접수: 2010.08.02
수정일자: 2010.10.25/11.30	심사완료: 2010.11.30