

# 하도추적 모형의 비교 연구

신용노<sup>1)</sup>, ○박상근<sup>2)</sup>, 우형민<sup>2)</sup>, 채효석<sup>2)</sup>, 윤재홍<sup>3)</sup>

## 1. 서론

하도에서의 홍수 추적이란 어떤 하도구간에서 유입수문곡선에 대한 유출수문곡선을 계산하는 절차를 말한다. 하도추적 방법을 선택하는 데는 여러 가지 기준이 있겠으나, 특히 결과의 정확성이라는 면과 절차의 간결성을 고려한다. 이러한 관점에서 기존의 저류함수모형의 하도추적 방법은 홍수파의 이동효과는 고려할 수 있으나 실제 하도에서 하도 저류로 인한 홍수 수문곡선의 Diffusion 효과에 대한 분석이 미미하다. 따라서 홍수파의 하도추적시 홍수 수문곡선의 Diffusion 효과를 적절히 반영하며, 정확도가 우수한 하도추적 방법으로 알려진 Muskingum 하도추적 방법, Muskingum-Cunge 하도추적 방법 모형을 비교 검토하였다.

## 2. 하도 추적 모형 이론적 검토

수문학적 하도추적에 사용되는 방정식은 다음의 연속방정식과 저류방정식(운동식)을 사용하여 나타낸다.

$$\bigcirc \text{ 연속방정식} \quad \bar{I} - \bar{O} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1)$$

$$\bigcirc \text{ 저류방정식(또는 운동식)} \quad S = K Q^P - T_1 Q \quad (2)$$

$$S = K[xI + (1-x)O] \quad (3)$$

현재 홍수예경보에 사용되고 있는 저류함수법은 하천 유역이나 하도에 대한 저류량과 유출량 사이의 관계를 나타내는 저류방정식(2)을 연속방정식(1)과 조합하여 홍수유출량을 산정하는 방법으로써, 이는 유출 현상의 비선형성을 나타내기 위하여 강우-유출 변환과정에 유역저류 과정을 도입하고, 그것을 매개변수로 하여 저류량과 유출량의 관계식을 성립시켜 저류량의 물수지를 계산하여 유출해석을 하게 된다. 여기에서 저류량  $S$ 와 유출량  $Q$ 와의 관계, 즉 유역 또는 하도의 저류상수  $K$ ,  $P$ 는 과거의 강우-유출 자료에서 구할 수 있으며,  $S$ 와  $Q$ 의 관계가 결정되면  $Q$ 는 유역의 평균강우량  $R_{ave}$  또는 하도의 유입량  $I$ 를 연속식에 대입하여 직접유출량  $Q$ 를 산정할 수 있다. 이러한 저류함수 모형의 장점은 다음과 같다.

- 자연계에서 발생하는 홍수유출은 서서히 변화하는 부정류인데 본 방법은 이러한 특성을 제대로 고려하여 유출해석을 수행할 수 있다.
- 본 방법의 적용에 필요한 제 변수(parameters)는 기왕의 강우 및 유출 자료로부터 쉽게 결

1) 한국수자원공사 수자원연구소 선임 연구원(042-860-0317)  
2) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원  
3) 한국수자원공사 수자원연구소 책임연구원

정할 수가 있다.

- 홍수유출의 일반적인 특성인 비선형성이 충분히 고려된다.
- 본 방법에 의한 유출 계산 알고리즘이 매우 단순하여 소형 전자 계산기 로도 홍수유출 계산이 가능하며, 복잡한 대하천 유역에도 여러개의 소유역 및 하도로 구분하여 축차적으로 원하는 지점에서의 홍수유출 계산이 가능하다.

반면, 유역의 복잡 다양한 특성이 단순히  $K$ ,  $P$  등의 계수에 의해 반영되므로 분석기간이 긴 경우 (단위 강우사상이 연속적으로 발생하여 침투 유출량이 2번 이상 발생할 경우 포함)에는 물리적 요소가 불명확하게 되어 홍수유출 계산정도를 떨어뜨리게 되는 단점도 있다. 저류함수법에 의한 유출계산에 필요한 매개변수에는 유역저류상수  $K$ ,  $P$  및 지체시간  $T_d$ 과 하도에서의 매개변수인 하도저류상수  $K$ ,  $P$  및 지체시간  $T_l$  등이 있다.

Muskingum 하도추적은 식 (1)과 (3)을 사용한다. 여기에서  $\bar{I} = \Delta t$  시간동안의 평균 유입량,  $\bar{O} = \Delta t$  시간동안의 평균 유출량,  $\Delta S = \Delta t$  시간 동안 저류량의 변화를 나타내고,  $K$ 는 구간 내 저류량의 유출량에 대한 비를 나타내는 저류상수로 시간의 단위를 가진다. 이 값은 홍수파의 분석에 의하면 홍수의 유하시간과 같다고 한다.  $x$ 는 하천구간의 총저류량에 공헌하는 유입량과 유출량의 상대적인 중요성을 표시하는 무차원 변수이다.  $\Delta t$  시간의 시작과 끝을 1과 2로 나타내면 다음과 같이 위의 식 (1)을 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_2 + I_1}{2} - \frac{O_2 + O_1}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t} \quad (4)$$

여기에서  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $O_1$ ,  $S_1$ 은 기지의 변수이므로 이 관계를 나타내는 식 (3)을 이용해서 위 식을 다시 나타내면 다음과 같다.

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (5)$$

$$C_0 = -\frac{Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad C_2 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (6)$$

$C_0 + C_1 + C_2 = 1$ 이다. 위에서 사용된  $\Delta t$ 는 추적기간을 의미하는데,  $\Delta t \leq 2Kx$  인 경우에는  $C_0 \leq 0$  이 되므로  $\Delta t > 2Kx$  로 선정되어야 한다. 그리고 하도추적 과정의 계산상의 안정성과 정확성을 확보하기 위해서는  $K$  값의 범위를 다음과 같은 조건에서 검토하여야 한다(U. S. Army Corps of Engineers, 1990).

$$\frac{1}{2(1-x)} \leq \frac{K}{N \times \Delta t} \leq \frac{1}{2x} \quad (7)$$

여기에서  $N$  값은 하나의 하도를 몇 개의 하위 계산 구간으로 나눌 것이지를 나타내는 수이다. Muskingum 하도추적 방법은 미국의 대표적인 하도추적 방법으로 미공병단의 HEC-1 모형과 미 기상국의 NWSRFS(National Weather Service River Forecast System) 모형을 이용하여 홍수에 경보 업무에 활용되고 있다. 이 방법은 수문관측 자료를 이용하여 매개변수의 정량화가 가능하므로 매개변수의 보정이 쉽고, 계산결과 해석이 손쉽다는 장점이 있다.

Muskingum-Cunge 하도추적 방법은 유로의 지형 자료를 이용한 운동파(kinematic wave) 방

정식을 이용한 홍수 추적방법으로써, 기존의 수문자료에 의하여 추정하는 매개변수 값을 운동과 방정식의 차분근사식으로부터 결정을 하는 것이다. 이는 운동과의 차분근사에서 발생하는 수치확산항을 확산파(diffusion wave) 방정식에서 유도되는 수리확산항과 조화시킴으로써 흔히 자연하천에서 볼 수 있는 유하에 따른 홍수와의 침투유량의 감소, 즉 확산과적인 흐름을 재현 할 수 있다 (김진수, 1995). 이 방법은 매개변수의 산정이 유량과 하도특성 자료로부터 계산되고, 홍수와의 가변성을 고려한 계산 시간이나 계산 격자의 크기 등이 정확성과 안정성등을 고려하여 적정하게 선택되어진다. 우선 운동과 방정식을 공간적으로는 중앙 차분을 하고 시간적으로는 가중치 X를 주어 차분하면 다음과 같다.

$$\frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1-X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{\Delta t} + c \frac{(Q_{j+1}^n - Q_j^n) + (Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1})}{2\Delta x} = 0$$

위의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_0 Q_j^{n+1} + C_1 Q_j^n + C_2 Q_{j+1}^n \quad (8)$$

각각의 계수는 다음과 같다.

$$C_0 = \frac{c(\Delta t/\Delta x) - 2X}{2(1-X) + c(\Delta t/\Delta x)} \quad C_1 = \frac{c(\Delta t/\Delta x) + 2X}{2(1-X) + c(\Delta t/\Delta x)} \quad C_2 = \frac{2(1-X) - c(\Delta t/\Delta x)}{2(1-X) + c(\Delta t/\Delta x)}$$

수치 확산 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_n = c\Delta x \left( \frac{1}{2} - X \right) \quad (9)$$

확산 근사식에서 나오는 수리학적 확산 계수는 다음과 같다.

$$v_h = \frac{Q_0}{2T S_0} = \frac{q_0}{2 S_0} \quad (10)$$

위의 두 식의 확산 계수 값을 사용하여 매개변수 X에 대한 다음의 관계를 나타낼 수 있다.

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{q_0}{S_0 c \Delta x} \right) \quad (11)$$

여기에서 X 값을 구하는 데에는 다음의 4가지 수치적 또는 물리적인 요소가 사용된다.

- reach length(수로구간 길이)  $\Delta x$
- reference discharge per unit width(단위폭당 기준 유량)  $q_0 (=Q_0/B_0)$
- kinematic wave celerity(운동파속)  $c$
- bottom slope(바닥 경사)  $S_0$

Ponce와 Yevjevich(Ponce and Yevjevich, 1978)는 Muskingum-Cunge방법을 Courant 수와 Cell Reynolds 수를 사용하여 개선하였다. 우선 파속과 격자의 진행 속도의 비를 나타내는 Courant 수는 다음과 같다.

$$C = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (12)$$

그리고 격자의 확산 계수는 식(9) 수치 확산 계수에서  $X=0$  일 때를 나타내므로 다음과 같다.

$$v_g = c \frac{\Delta x}{2} \quad (13)$$

Cell Reynolds 수는 수리학적 확산계수와 격자 확산계수와의 비로 다음과 같다.

$$D = \frac{q_0}{S_0 c \Delta x} \quad (14)$$

그러므로 이 값을 식 (11)에 대입하면 다음의 관계를 나타낼 수 있다.

$$X = \frac{1}{2}(1 - D) \quad (15)$$

그러므로 Courant 수와 Cell Reynolds 수를 사용하여 다시 계수들을 나타내면 다음과 같다.

$$C_0 = \frac{-1 + C + D}{1 + C + D} \quad C_1 = \frac{1 + C - D}{1 + C + D} \quad C_2 = \frac{1 - C + D}{1 + C + D} \quad (16)$$

이상에서 열거한 Muskingum-Cunge 방법의 장점을 요약하면 아래와 같다.

- 측방 유입류의 고려가능
- 모형에 사용되는 변수값들이 하도에서 발생하는 물리현상에 기초함
- 계산되어진 해가 계산시간 간격에 독립적
- 다양한 하도와 수문학적 조건에도 적용이 가능

그리고 단점은 다음과 같다.

- 흐름의 배수효과(backwater effect)를 고려할 수 없음
- 매우 평탄한 경사에서 빠르게 증가하는 수문곡선의 추적시 적용의 한계

본 연구에서는 기존 저류함수 모형의 하도추적 방법의 보완시 HEC-1 Version 4.0에서 사용된 Muskingum 및 Muskingum-Cunge 알고리즘을 이용하였다.

### 3. 하도 추적 모형의 적용

기존의 저류함수모형의 하도추적 방법 및 위에서 제시된 두가지 하도추적 방법을 이용하여 낙동강 유역의 '93년 7월 홍수를 선정하여 그 적용성을 살펴보았다(한국수자원공사, 1999). 그림 1과 표 1에서 보듯이 93년 홍수는 낙동강 수계 중상류에 위치한 왜관 수위관측소에서는 Double-Peak 양상을 보인다. 그러나 진동 수위관측소에서는 수문곡선이 하류로 전달되면서 하도저류로 수문곡선의 형태가 완만해져 많이 둔화된 것을 볼 수 있다. 그리하여 왜관지점에서는 하도추적 방법간 커다란 차이를 보이지 않지만, 진동 지점에서는 저류함수법에 의한 하도추적 방법이 다른 방법보다 확산효과가 적어 상류 유입 수문곡선의 형태가 덜 완만한 것을 알 수 있다. 그리고 실제 홍수 기 댐 운영시에는 매개변수의 보정과정의 용이성과 수행시간이 상당히 중요하다. 위의 3가지 하도

추적 방법 중 저류함수법에 의한 모형의 보정이 제일 어려웠고, 그중 Muskingum 방법이 수월하였으며, 결과의 신뢰도 또한 우수함을 보여주었다. 이러한 결과를 바탕으로 하도추적 모형으로 Muskingum 방법 및 Muskingum-Cunge 방법을 사용하는 것이 저류함수법보다 더 나은 결과를 보여줄 수 있었다.

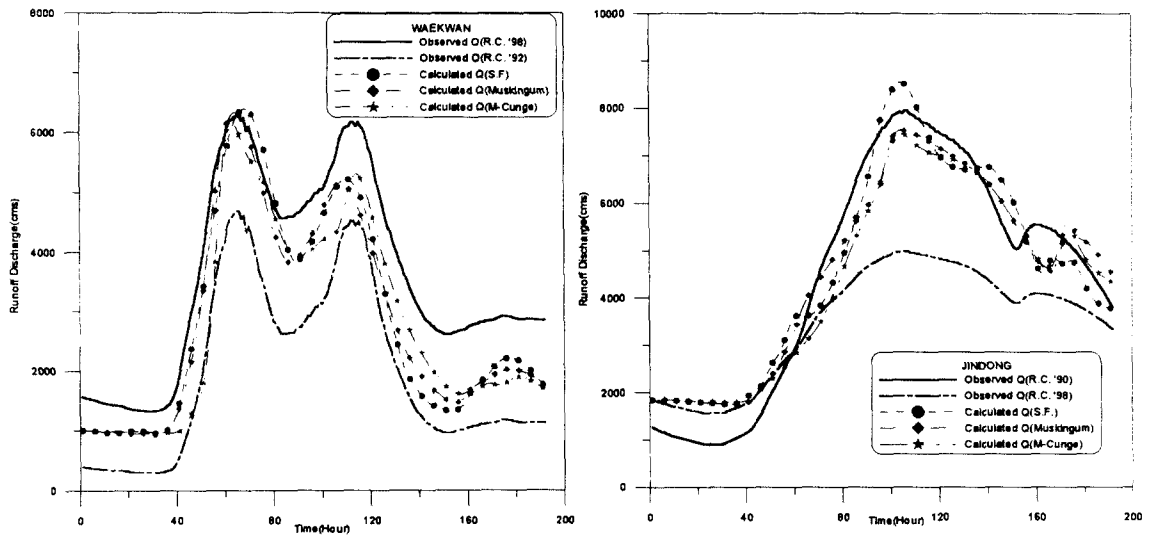


그림 1. '93년 7월 홍수 계산 결과(왜관, 진동)

표 1. 하도추적 방법에 따른 Peak 홍수량 및 발생시간 비교

		Peak 홍수량	Peak 발생시간	비고
		'93년	'93년	
왜관	관측값	6284.3	8월9일 17시	
	저류함수법	6390.1(+106.8)	8월9일 20시(+3)	
	Muskingum 법	6324.7(+40.4)	8월9일 16시(-1)	
	Muskingum -Cunge 법	6192.4(-91.9)	8월9일 15시(-2)	
진동	관측값	7966.0	8월 11 일 10시	
	저류함수법	8556.5(+590.5)	8월 11 일 8시(-2)	
	Muskingum 법	7542.8(-423.2)	8월 11 일 9시(-1)	
	Muskingum -Cunge 법	7533.5(-432.5)	8월 11 일 7시(-3)	

#### 4. 참고 문헌

1. 한국수자원공사(1999), KOWACO 홍수분석 모형 개발(1차년도).
2. Ponce, V. M. and Yevjevich, V. (1978), "Muskingum-Cunge method with variable parameters", J. Hydraulic division, ASCE, Vol. 104, No. HY3, pp. 1663-1667.
3. U. S. Army Corps of Engineers (1990), HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, pp. 26 ~ 34.