

선형저수지모형을 적용한 수리학적 홍수추적 Hydraulic Flood Routing using Linear Reservoir Model

전 민 우* / 조 용 수**

Jeon, Min Woo / Cho, Yong Soo

Abstract

Hydraulic flood routing was performed for unsteady flow in a natural river using Preissmann scheme. A Log-Pearson Type-III hydrograph is chosen arbitrarily as the upstream boundary condition and lateral inflow hydrographs for sensitivity analysis. For the application with an actual river system, upstream and lateral inflow hydrographs were estimated by the linear reservoir model and the Manning's equation was used as the downstream boundary condition. The unsteady flow model using the linear reservoir model as the inflow hydrographs was applied to Bochung stream basin and gives good results, and is approved to be used for the runoff prediction. As results of the sensitivity analysis, the proposed model may help to estimate the roughness coefficients when using the unsteady flow model with lateral inflow combined with the linear reservoir model.

Keywords : hydraulic flood routing, linear reservoir model, lateral inflow, Saint-Venant equation

요 지

자연하천의 부정류 홍수예측을 위하여 Preissmann 기법에 의한 수리학적 홍수추적을 실시하였으며, 민감도 분석을 위한 상류단과 측방유입수문곡선으로서 Log-Pearson Type-III를 사용하였다. 실제하천 적용에 있어서 유역에 대해서는 선형저수지 모형을 적용하고 하도망에 대해서는 수리학적 홍수추적을 실시하였다. 상류단과 측방유입수문곡선은 선형저수지 모형을 이용하여 산정하였으며, 하류단 경계조건으로서 Manning 공식을 이용하였다. 유입수문곡선으로서 선형저수지모형이 적용된 부정류모형을 보청천유역에 적용시킨 결과 실측치와 매우 근접한 수문곡선을 예측할 수 있었으며, 본 연구는 측방유입이 있는 경우, 선형저수지 모형을 이용한 수리학적 홍수예측이 가능하고, 부정류모형을 이용하여 흐름계산을 할 경우 조도계수 산정을 위한 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수리학적 홍수추적, 선형저수지 모형, 측방유입, Saint-Venant 방정식

* 충북대학교 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungbuk National Univ., Chungju, Chungbuk 361-763, Korea
(E-mail : minwoo@cbucc.chungbuk.ac.kr)

** 충북대학교 토목공학과 박사과정

Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Chungbuk National Univ., Chungju, Chungbuk 361-763, Korea

1. 서론

홍수추적의 목적은 상류에서 유입되는 수문곡선으로부터 하류지점의 수문곡선을 추적하는데 있으며, 해석 방법에는 수문학적 방법과 수리학적 방법이 있다. 수문학적 방법은 하도의 수리학적, 기하학적 특성을 갖는 매개변수를 통하여 유입량과 유출량을 결합하는 것으로서 일반적으로 두 가지 형이 있다. 첫째는 질량보존법칙에 기초하여 운동량방정식 대신 저류량과 유출량사이의 개념적 관계를 이용하는 것이며, Muskingum방법이 그 예이다. 둘째는 선형계 이론에 기초한 것이며, 예로서 단위충격에 대한 하도의 응답을 나타내는 순간단위유량도를 들수 있다(Moramarco 등, 1997).

수리학적 방법은 비정상 부등류인 개수로흐름에서 지배방정식인 편미분방정식의 연속방정식과 운동량방정식을 연립해서 초기조건과 경계조건을 주어서 수치해법으로 홍수추적을 수행하는 것이다. 이에 대한 수치해법에는 특성곡선법, 유한요소법, 유한차분법이 있으나, 1차원 해석의 경우 유한차분법이 계산의 정확도면에서 유리하여 일반적으로 많이 사용되고 있다. 유한차분법에는 양해법과 음해법이 있으며 음해법으로는 Preissmann기법이 우수한 것으로 알려져 있으며(한건연 등, 1994), 이종태(1982), 최성욱 등(1991), 한건연(1994)의 연구가 있다.

1980년대 이후 컴퓨터의 급속한 발전과 더불어 수리학적 홍수추적에 관한 연구가 활발하였으며, Moussa(1996)는 측방향 유입을 고려한 Saint-Venant방정식의 해석적 해를 구하였고, Moramarco(1997)는 선형화한 Saint-Venant방정식의 해석적 해를 측방향 유입량을 고려하여 구하였다. 최근 Perumal(1998)는 하도 특성으로 구성되는 매개변수를 유도하여 임의 단면형수로에 대해서 Saint-Venant방정식을 사용하여 수위 수문곡선 추적방법을 제안하였고, Ramesh 등(2000)은 Saint-Venant방정식으로부터 조도계수를 역추정하였다. Preissmann기법을 사용하여 Saint-Venant방정식을 하천수계에 적용한 국내의 연구로서는 윤용남과 박무중(1992), 이종태 등(1993), 지흥기와 박기호(1994), 김원 등(1996)의 연구가 있다.

본 연구에서는 자연하천의 유출예측을 위하여 Preissmann기법에 의한 수리학적 홍수추적을 실시하였으며, 민감도 분석을 위한 상류단과 측방향 유입수문곡선으로서 Log-Pearson Type-III를 사용하였다. 실제하천에 적용에 있어서, 유역에 대해서는 상류단 경계조건

과 측방향 유입을 위하여 수문학적 접근방법인 선형저수지 모형을 이용하였으며 하도에 대해서는 수리학적 접근방법인 Saint-Venant방정식에 의하여 홍수추적을 하였다. 하류단 경계조건으로서는 유출예측 목적을 위하여 Manning공식을 적용하였으며, 하류단에서 실측치와 비교검토하여 모형의 적용성을 검토하였다.

2. 지배방정식 및 수치해법

2.1 지배방정식

하천의 홍수류는 시간적, 공간적으로 변하는 비정상 부등류이며, 흐름을 지배하는 1차원 개수로흐름의 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로 이루어진 Saint-Venant 방정식으로서 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (2)$$

여기서 x 와 t 는 독립변수로서 각각 종단거리와 시간, 그리고 Q 는 유량, A 는 횡단면적, q 는 하천 단위길이당 측방향 유입량, y 는 수심, g 는 중력가속도, S_0 는 하상경사, 그리고 S_f 는 하상의 마찰경사로서 광폭 직4각형 단면에 대하여 Manning공식을 사용하면 식 (3)과 같다.

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{b^2 y^{10/3}} \quad (3)$$

여기서 n 는 조도계수, b 는 수면폭이다.

2.2 유한차분법

개수로흐름의 지배방정식에 대한 유한차분법은 Preissmann의 음해법이 많이 사용되고 있으며, 이 방법은 임의 시간과 거리구간에서 비선형 지배방정식에 대하여 선형화된 해를 준다. 임의 함수 f 와 i 에 대한 시간과 거리의 편미분을 유한차분 격자망에서 다음과 같은 차분식으로 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{\alpha}{2} (f_{i+1}^k + f_i^k) + \frac{(1-\alpha)}{2} (f_{i+1}^{k+1} + f_i^{k+1}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{(f_{i+1}^{k+1} + f_i^{k+1}) - (f_{i+1}^k + f_i^k)}{2\Delta t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\alpha}{\Delta x} (f_{i+1}^{k+1} - f_i^{k+1}) + \frac{1-\alpha}{\Delta x} (f_{i+1}^k - f_i^k) \quad (6)$$

여기서, f 는 y 와 Q 에 관한 함수이며, i 와 k 는 각각

공간 및 시간격자를 나타내고 α 는 가중치로서 $\alpha=0$ 이면 완전양해법, $\alpha=1$ 이면 완전음해법이 된다. $0.55 < \alpha \leq 1.0$ 이면 안정한 해를 얻을 수 있고, 보통 $\alpha=0.6 \sim 0.7$ 을 사용하며, 본 연구에서는 $\alpha=0.6$ 을 사용한다 (Chaudhry, 1993).

식 (4)~(6)의 차분식을 지배방정식 (1)과 (2)에 적용하고, 각 격자점의 미지변수들을 수심 y 와 유량 Q 로 하여 다음의 차분식 (7)과 (8)을 유도할 수 있다.

$$b(y_i^{k+1} + y_{i+1}^{k+1}) - b(y_i^k + y_{i+1}^k) + \frac{2\Delta t}{\Delta x} \\ \alpha(Q_{i+1}^{k+1} - Q_i^{k+1}) + \frac{2\Delta t}{\Delta x}(1-\alpha)(Q_{i+1}^k - Q_i^k) \\ - 2\Delta t\alpha q_i^{k+1} - 2\Delta t(1-\alpha)q_i^k = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{2\Delta t} [(Q_{i+1}^{k+1} + Q_i^{k+1}) - (Q_i^k + Q_{i+1}^k)] + \frac{\alpha}{b\Delta x} \\ \left[\frac{(Q_{i+1}^{k+1})^2}{y_{i+1}^{k+1}} - \frac{(Q_i^{k+1})^2}{y_i^{k+1}} \right] + \frac{1-\alpha}{b\Delta x} \left[\frac{(Q_{i+1}^k)^2}{y_{i+1}^k} - \frac{(Q_i^k)^2}{y_i^k} \right] \\ - gbS_o \frac{\alpha}{2} (y_{i+1}^{k+1} + y_i^{k+1}) - gbS_o \frac{1-\alpha}{2} (y_{i+1}^k + y_i^k) + \frac{gn^2}{2b} \alpha \\ \left[\frac{(Q_{i+1}^{k+1})^2}{(y_{i+1}^{k+1})^{7/3}} - \frac{(Q_i^{k+1})^2}{(y_i^{k+1})^{7/3}} \right] + \frac{gn^2}{2b} (1-\alpha) \\ \left[\frac{(Q_{i+1}^k)^2}{(y_{i+1}^k)^{7/3}} - \frac{(Q_i^k)^2}{(y_i^k)^{7/3}} \right] + \frac{gb\alpha^2}{2\Delta x} [(y_{i+1}^{k+1})^2 - (y_i^{k+1})^2] \\ + \frac{gb\alpha(1-\alpha)}{\Delta x} [(y_{i+1}^k + y_i^{k+1}) - (y_i^k + y_{i+1}^k)] + \\ \frac{gb(1-\alpha)^2}{2\Delta x} [(y_{i+1}^k)^2 - (y_i^k)^2] = 0 \quad (8)$$

위의 차분식들은 4개의 미지변수 (h_{i+1}^{k+1} , h_i^{k+1} , Q_{i+1}^{k+1} , Q_i^{k+1})를 갖는다. 만일 N 을 공간 격자점수라 하면 $2N$ 개의 미지수가 생기며, 계산구간수는 $(N-1)$ 이 되므로 각 공간 격자점에 대하여 식 (7)과 (8)을 적용하면 $2(N-1)$ 개의 식을 얻는다. 따라서 2개의 경계조건식이 추가되면 선형연립방정식의 해로부터 $2N$ 개의 수위 및 유량보정치를 얻을 수 있다.

시간준위 k 에서의 변수값들이 주어지면 차분식들은 결국 $(k+1)$ 시간 준위에서의 h_i^{k+1} 과 Q_i^{k+1} 을 미지변수로 하는 $2N$ 개의 연립방정식이 구성되며, 운동량방정식의 차분식인 식 (8)은 h_i^{k+1} 과 Q_i^{k+1} 에 대한 비선형방정식이 되므로 Newton-Raphson의 반복해법에 의하여 해를 구할 수 있다. 이 방법은 Newton-Raphson법에 의하여 이루어지는 $2N$ 개의 선형방정식

을 각 시간단계마다 적용하여 $2N$ 개의 미지변수를 구하며, 각 미지변수마다 초기치를 주어서 반복해법에 의하여 수정한다. 잔차dhi, dQi가 영(zero)에 가깝게 되도록 변수값 h_i 와 Q_i 를 결정하며, $(J+1)$ 번째 반복계산에서 변수값은 식 (9) 및 (10)과 같고, 구체적인 계산방법은 Chow 등(1988)과 Ciriani 등(1977)에 의하여 상세히 기술되어 있다.

$$h_i^{j+1} = h_i^j + dh_i \quad (9)$$

$$Q_i^{j+1} = Q_i^j + dQ_i \quad (10)$$

3. 민감도 분석

3.1 유입수문곡선에 의한 영향

유입수문곡선에 의한 민감도 분석을 위하여 오차를 포함하지 않은 관측자료를 필요로 하며, 이를 모의하기 위한 상류단 경계조건으로서 유입수문곡선과 측방유입수문곡선은 식 (11)과 같은 Log-Pearson Type-III의 수문곡선을 사용하게 되며 그림 1과 같이 설정하였다. 이때 측방향 유입수문곡선은 $tp=3hr$, $qp=0.001m^2/s$ 를 사용하고 상류단 유입수문곡선은 $tp=3hr$, $Qp=20m^3/s$ 를 사용하였으며, 하류단 10km 지점에서의 유출수문곡선을 나타내었다.

$$Q_t^k = Q_b + (Q_p - Q_b) \left(\frac{t}{t_p} \right)^{t_p/(t_g - t_p)} \exp\left(\frac{t_p - t}{t_g - t_p} \right) \quad (11)$$

여기서 Q_t^k 는 시간별 유입유량, Q_b 는 기저유량, Q_p 는 첨두유량, t_g 는 수문곡선 도심까지의 시간, t_p 는 첨두시간을 의미한다. 한편 하류단 경계조건은 Manning공식을 사용하며, 식 (12)와 같다.

$$Q_N^{k+1} = \frac{b\sqrt{S_0}}{n} (y_N^{k+1})^{5/3} \quad (12)$$

동일한 조건하에서 측방향 유입수문곡선을 $tp=5hr$ 으로 증가하였을 때의 유출수문곡선은 그림 2에 나타내었고, 반대로 그림 1과 동일한 측방향 유입수문곡선에 대하여 상류단 유입수문곡선을 $tp=7hr$ 으로 증가하였을 때의 유출수문곡선을 그림 3에 나타내었다. 이때 유입수문곡선들의 전체유량은 동일하도록 하였다. 그 결과 상류단 유입 첨두시간이 길어지고 유입수문곡선이 완화됨에 따라 하류단 유출수문곡선의 첨두유량이 감소되며, 그 감소폭은 상류단 유입수문곡선을 완하시킨 경우에

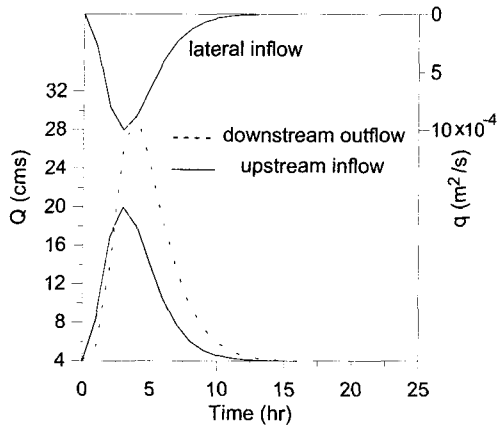


그림 1. 기준 수문곡선

측방향 유입수문곡선 : $t_p=3\text{hr}$, $q_p=0.001\text{m}^2/\text{s}$
 상류단 유입수문곡선 : $t_p=3\text{hr}$, $Q_p=20\text{m}^3/\text{s}$

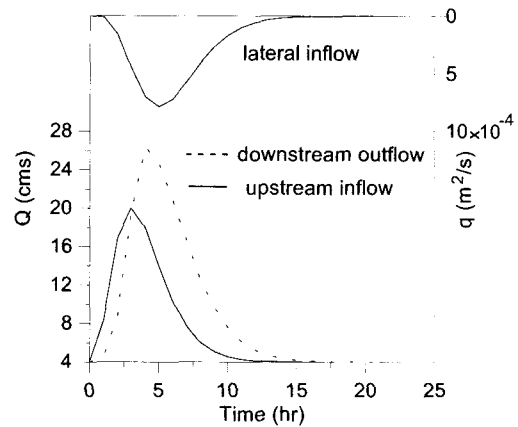


그림 2. 수문곡선 비교

측방향 유입수문곡선 : $t_p=5\text{hr}$, $q_p=0.00078\text{m}^2/\text{s}$
 상류단 유입수문곡선 : $t_p=3\text{hr}$, $Q_p=20\text{m}^3/\text{s}$

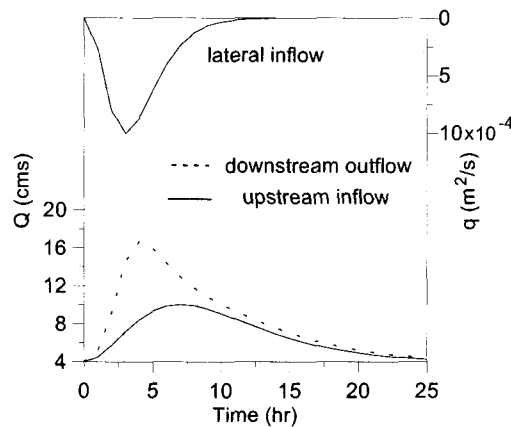


그림 3. 수문곡선 비교

측방향 유입수문곡선 : $t_p=3\text{hr}$, $q_p=0.001\text{m}^2/\text{s}$
 상류단 유입수문곡선 : $t_p=7\text{hr}$, $Q_p=8.8\text{m}^3/\text{s}$

더 크게 나타났다.

그림 3의 경우는 매우 완화된 상류단 유입의 경우로서, 하류단의 침투시간이 상류단의 침투시간보다 빠르게 나타난 것은 매우 우세한 측방향 유입수문곡선의 영향때문인 것으로 생각된다.

3.2 조도계수 및 하도경사에 의한 영향

조도계수의 변화에 따르는 수문곡선의 영향을 검토하기 위하여 하류단지점(10km)에서의 수문곡선을 구하

여 그림 4에 나타내었다. 이 경우 상류단 및 측방향 유입수문곡선을 일정하게 두고 $n=0.01, 0.06$ 및 0.12 에 대하여 분석한 결과 조도계수가 커질수록 하류단 지점의 수심은 깊어지고 침투시간이 길어짐을 확인할 수 있다.

하도경사의 변화에 따르는 수문곡선의 영향을 검토하기 위하여 조도계수를 0.02 로 일정하게 두고 하류단 10km 지점에서의 수문곡선을 분석하였다. $S_o=0.0001, 0.0005$ 및 0.05 에 대한 결과를 그림 5에 나타내었으며,

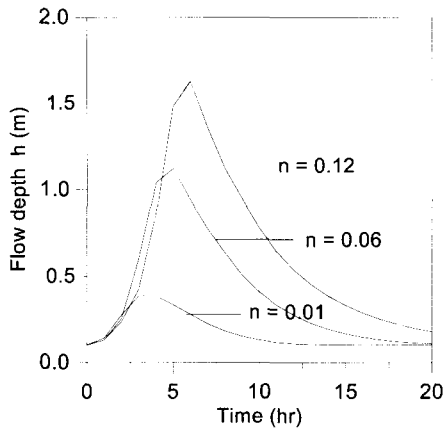


그림 4. 조도계수에 의한 영향

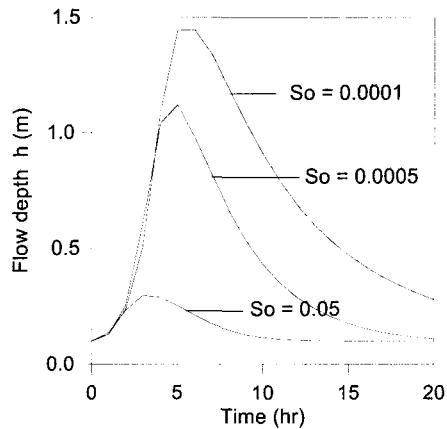


그림 5. 하도경사에 의한 영향

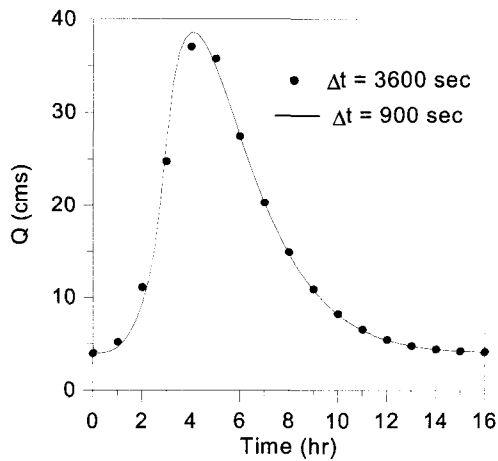


그림 6. Δt, Δx의 변화에 대한 수문곡선

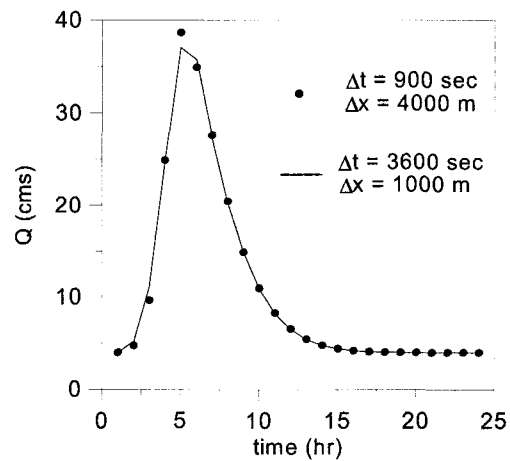


그림 7. Δt, Δx가 조도계수에 미치는 영향

하도경사가 완만할수록 하류단 지점의 수심은 깊어지고 침투시간이 길어짐을 알 수 있다.

3.3 Δt, Δx에 의한 영향

$n=0.02$, $So=0.005$ 로 일정하게 두고 $\Delta x=1000m$, $2000m$, $4000m$, $\Delta t=1hr$, $0.5hr$, $0.25hr$ 으로 변화시켜 하류단 20km지점에서의 침투유량을 구하여 표 1에 나타내었다. 그 결과 $\Delta t=1hr$, $\Delta x=1000m$ 의 경우와 비교하여 타 수문곡선들은 침투유량이 약간 크게 나타났으나 전체모양은 유사하였으며, 예로서 $\Delta x = 1000m$ 에 대한 $\Delta t=900sec$ 와 $\Delta t=3600sec$ 때의 수문곡선을 그림 6에 나타내었다.

$\Delta t=1hr$, $\Delta x=1000m$, $n=0.02$ 를 사용하여 모의한

수문곡선을 기준자료로 설정하여, Δx 와 Δt 를 변화시켰을 때 관측자료와의 오차지승합을 최소로 하는 최적의 조도계수를 구하였다. 그 결과를 표 1에 나타내었으며, Δt 가 1hr, 0.5hr, 0.25hr으로 변화할 때 Δx 는 1000m, 2000m, 4000m 증가함에 따라 n 값은 0.02~0.0226까지 변화함을 보여 주고, 최대 0.0026의 차이를 나타내었다. Δx 구간별 차이는 $\Delta t=1hr$ 에서 0.0002, 0.5hr에서 0.0004, 0.25hr에서 0.0009로서 Δt 가 작아 질수록 n 의 차이는 점차 커짐을 알 수 있다. 하류단 20km지점에서의 관측치($\Delta t=3600sec$, $\Delta x=1000m$, $n=0.02$)와 계산치($\Delta t=900sec$, $\Delta x=4000m$, $n=0.0226$)의 수문곡선을 그림 7에 나타내었으며, $\Delta t=900sec$ 의 경우 침투유량이 약간 크게 나타났다.

표 1. Δt , Δx 에 의한 민감도 분석

$\Delta t(\text{hr})$	$\Delta x(\text{m})$	수문곡선에 미치는 영향: 침투유량(cms)	조도계수에 미치는 영향		
			n	오차자승합	침투유량
1	1000	37.028	0.0200	기준자료	37.028
	2000	37.055	0.0200	2.375×10^{-3}	37.055
	4000	37.158	0.0202	3.87×10^{-2}	37.079
0.5	1000	38.774	0.0210	5.820	38.657
	2000	38.696	0.0211	5.626	38.568
	4000	38.391	0.0214	5.212	38.193
0.25	1000	38.557	0.0217	6.954	38.344
	2000	38.557	0.0219	7.249	38.325
	4000	38.491	0.0226	9.234	38.120

4. 모형의 적용

4.1 대상유역 및 수문자료

측방향 유입이 있는 경우, 선형저수지 모형을 적용한 수리학적 홍수추적모형의 적용성을 검토하기 위하여 실제유역에서 유출을 예측하였다. 이를 위하여 국제수문 개발계획(IHP) 대표시험유역인 금강수계의 보청천유역

을 대상으로 하였으며, 대상유역에는 5개의 수위표지점이 있으나 그 중 최상류인 산성지점과 이평지점을 선정하였다. 유역도는 그림 8과 같고 대상구간의 상하류단 경계는 그림 9와 같으며, 대상유역의 유역특성인지는 표 2와 같다. 여기서 산성과 이평지점의 조도계수는 IHP보고서(1985-2000)의 수심과 유속의 실측자료를 사용하여 Manning 공식으로 역추정하여 평균치를 취하

표 2. 하도 및 유역특성

지점명	A(km^2)	L(km)	S ₀	b(m)	n			
					1985	1990	1999	2000
산 성	53.7	13.05	0.0054	14.6	0.1943	0.1222	0.1952	0.1396
이 평	79.5	16.03	0.0047	70.6	0.1184	0.0923	0.1112	0.1125

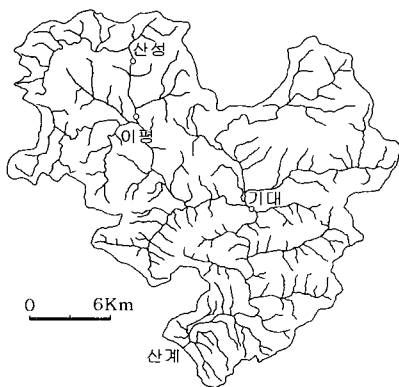


그림 8. 보청천 유역도

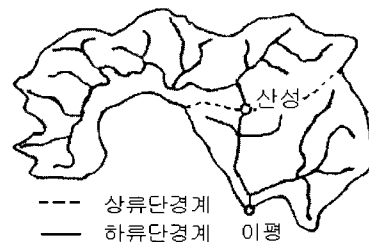


그림 9. 상하류단 경계

표 3. 유출수문곡선 예측을 위한 자료

강우사상	산 성			이 평		
	저류상수	침투유량 (m ³ /s)	침투시간 (hr)	저류상수	침투유량 (m ³ /s)	침투시간 (hr)
1985.7.12	6.69	101.91	9	7.82	115.02	9
1985.9.18	5.34	122.09	8	7.51	136.29	10
1990.9.12	4.92	30.43	3	7.53	36.58	6
1999.9.10	4.32	73.50	9	6.67	112.27	11
2000.6.26	7.92	40.75	8	8.81	69.64	8

였으며, 수면폭 b는 흐름단면적과 수심자료로부터 구하여 평균치를 취하였다.

4.2 상류단 유입수문곡선 및 측방향 유입수문곡선

최근 유역에서의 분포형 강우 유출해석을 위하여 수치지도에 의해서 하도망을 추출하고, 유역에 대해서는 지표면 및 지표하 홍수류해석을 실시하며, 하도망에 대해서는 수리학적 홍수추적에 의한 연구가 필요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는, 유역에 대해서는 선형저수지 모형에 의하여 하도에 대한 상류단 유입량과 측방향 유입량을 산정하였고 하도망에 대하여는 Saint-Venant방정식의 Preissmann 해석에 의한 홍수추적을 실시하였다.

본 연구에서는 산성 수위표지점을 상류단, 이평 수위표지점을 하류단으로 하고 측방향 유입수문곡선을 고려하여 상류단 유입수문곡선을 홍수추적하므로써 하류단에서의 유출수문곡선을 구하여 하류단 수위표지점의 실측 유출수문곡선과 비교하였다. 상류단 유입수문곡선과 측방향 유입수문곡선의 재현을 위하여 선형저수지 모형을 적용하며, 추적기간 Δt 의 시점 1과 종점 2의 값으로 나타낸 차분식은 식 (13)과 같다.

$$Q_2 = \frac{(I_1 + I_2)\Delta t + Q_1(2K - \Delta t)}{2K + \Delta t} \quad (13)$$

여기서 I는 유입량, K는 저류상수이다. 따라서 측방향 유입수문곡선 q_i^{k+1} 와 상류단 유입수문곡선 Q_{i+1}^{k+1} 를 시간과 공간의 함수로 나타내면 각각 식 (14) 및 (15)와 같으며, 여기서 유역폭은 B(m), K(sec), Δt (3600sec), I(mm/hr), A(km²)의 단위를 갖는다.

$$q_i^{k+1} = \frac{\{2/(3.6 \times 10^6)\} I B \Delta t + q_i^k (2K - \Delta t)}{2K + \Delta t} \quad (14)$$

$$Q_{i+1}^{k+1} = \frac{(2/3.6) I A \Delta t + Q_i^k (2K - \Delta t)}{2K + \Delta t} \quad (15)$$

하류단 경계조건식으로는 수위수문곡선, 유량수문곡선 또는 수위-유량관계곡선(rating curve)이 사용된다 (Chow 등, 1988). 본 연구에서는 하류단의 홍수량 예측목적을 위하여 등류가정하에 하류단의 경계조건식으로서 식 (12)와 같은 Manning공식을 사용하며, 비선형 제약조건식이 된다.

4.3 유출수문곡선 예측

상류단인 산성지점의 유입수문곡선으로부터 하류단인 이평지점의 유출수문곡선을 예측하였으며 두 지점간 추적거리는 2.98km이고 $\Delta x=200m$, $\Delta t=3600sec$ 를 사용하였다. 선형저수지 모형의 저류상수 K값은 유효강우와 직접유출 수문곡선의 질량중심 사이의 시간을 측정하여 결정하였다. 예측에 적용된 자료는 두 지점간 일관성있는 자료를 선정하였으며, 저류상수와 함께 표 3에 나타내었다.

5개 강우사상에 대하여 홍수추적을 실시하여 계산된 이평지점의 유출수문곡선은 그림 10 ~그림 14와 같다. 상류단 유입이 우세한 경우(그림 10과 11)는 하류단 유출수문곡선의 침투시간이 상류단 유입수문곡선의 침투시간에 의하여 영향을 받으나, 그러하지 못한 경우(그림 12, 13, 14)는 하류단 유출수문곡선의 침투시간이 측방 유입수문곡선의 침투시간에 의하여 영향을 받음을 알 수 있다.

침투유량과 침투시간에 대한 실측치와 예측치를 표

표 4. 실측치와 예측치의 비교

강우사상	침투시간(hr)		침투유량(m ³ /s)		
	실측치	예측치	실측치	예측치	오차(%)
1985. 7. 12	9	9	115.02	125.72	9.3
1985. 9. 18	10	10	136.29	148.41	8.9
1990. 9. 12	6	5	36.58	40.99	12.0
1999. 9. 10	11	9	112.27	107.09	4.6
2000. 6. 26	8	9	69.64	66.99	3.8

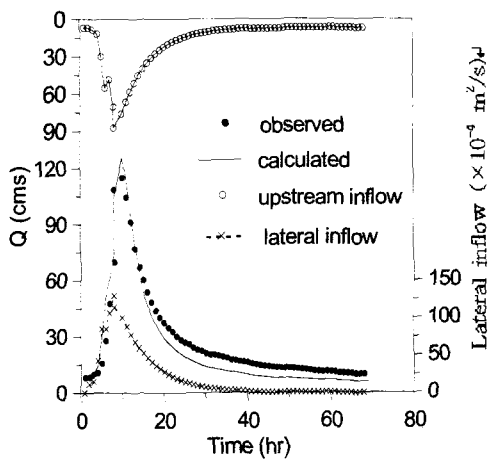


그림 10. 유출수문곡선 비교(1985. 7. 12)

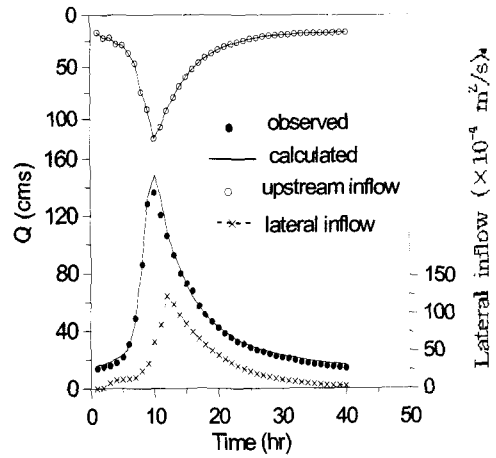


그림 11. 유출수문곡선 비교 (1985.9.18)

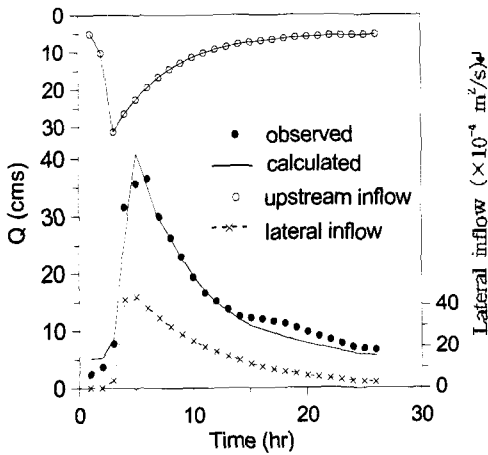


그림 12. 유출수문곡선 비교 (1990.9.12)

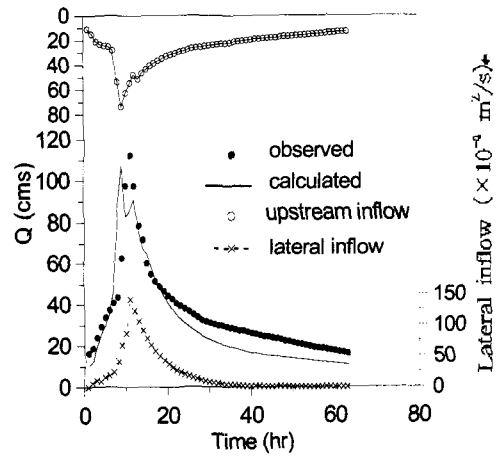


그림 13. 유출수문곡선 비교 (1999. 9.10)

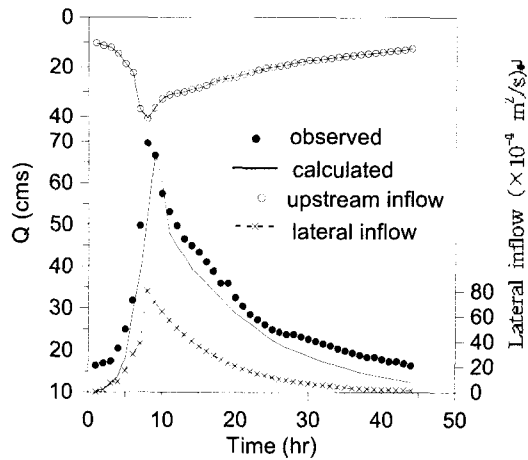


그림 14. 유출수문곡선 비교 (2000.6.26)

4에 나타내었으며, 첨두유량의 오차가 12% 이내로서 수문곡선의 첨두부가 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 선형저수지 모형을 적용하여 상류단과 측방향 유입수문곡선을 모의하여 수리학적 모형에 적용 하므로써, 임의 상류지점으로부터 하류지점의 유출수문곡선예측이 가능하리라 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수리학적 홍수추적과 수문학적 홍수추적을 결합한 유출예측기법을 제시하였으며 수리학적 홍수추적으로서는 부정류모형을 적용하고 수문학적 홍수추적은 선형저수지 모형을 적용하였다. 민감도분석을 위한 하류 경계조건으로 Manning 공식을 사용하고 상류단과 측방유입수문곡선을 위하여는 Log-Pearson Type-III 모형을 사용하였다. 그 결과 Δx 를 변화시켰을 때 조도계수의 변화가 거의 없었고, 첨두유량의 변화가 극히 작으므로 측방향유입을 고려한 개수로 부정류모형을 사용하여 흐름계산을 할 경우 조도계수 산정을 위한 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

실제하천에서의 적용성을 위하여 보청천유역의 유출예측을 하였다. 이 경우 상류단과 측방유입수문곡선을 위하여 선형저수지모형을 사용하였으며 하류단 경계조건으로서 유출예측목적에 위하여 Manning 공식을 사용하였다. 그 결과 예측된 유출수문곡선이 실측치와 매우 근접하게 나타났으며, 본 연구는 측방향유입을 고려한 유역에서, 선형저수지 모형으로부터 하천 단위길이당 측방향 유입유량을 모의하여 하류단의 신뢰할수 있는 유출예측이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 김원, 우효섭, 김양수 (1996). "1차원 St. Venant 방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍서류 특성 분석." **한국수자원학회지**. 제29권, 제1호, pp. 163-179.
- 윤용남, 박무종 (1992). "수리학적 홍수추적에 의한 댐 방류시 하류수위 및 주요 하도구간별 홍수도달 시간의 예측." **한국수문학회지** 제25권, 제3호, pp. 115-124.
- 이종태 (1982). "Preissmann 기법에 의한 1차원 부정류의 해석." **한국수문학회지**. 제15권, 제1호, pp. 57-62.
- 이종태, 한건연, 서병하 (1993). "한강의 홍수규모에 따른 인도교 수위의 조석영향분석." **한국수문학회지**. 제26권, 제2호, pp. 67-77.
- 지흥기, 박기호 (1994). "유출예측을 위한 하도추적 모형." **한국수문학회지**. 제27권, 제1호, pp. 141-150.
- 최성욱, 여운광, 주철, 김창완, 오규창 (1991). "양해법과 음해법을 이용한 영산강에서의 부정류해석." **한국수문학회지**. 제24권, 제4호, pp. 49-57.
- 한건연, 박재홍, 이종태 (1994). "개수로에서의 상류-사류 천이영역에 대한 부정류 해석." **한국수문학회지**. 제27권, 제2호, pp. 85-96.
- Chaudhry, M.H. (1993). *Open-channel flow*. Prentice Hall.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

- Ciriani, T.A., Maione, U., and Wallis, J.R. (1977). *Mathematical models for surface water hydrology*. John Wiley & Sons.
- Maramarco, T., Fan, Y., and Bras, R.L. (1997). "Analytical solution for channel routing with uniform lateral inflow." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 707-713.
- Moussa, R. (1996). "Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow." *Hydrological process*, Vol. 10, pp. 1209-1227.
- Perumal, M., and Ranga Raja, K.G. (1998). "Variable-parameter stage-hydrograph routing method I: Theory." *J. of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 3, No. 2, pp. 109-114.
- Ramesh, R., Datta, B., Bhallamudi, S.M., and Narayana, A. (2000). "Optimal estimation of roughness in open channel flow." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 299-303.

(논문번호:02-47/접수:2002.07.29/심사완료:2002.11.25)