

自然水路의 水理學的 洪水追跡 Hydraulic Flood Routing for Natural Channels

朴 琦 鎬* · 趙 顯 景** · 池 洪 基*** · 李 舜 鐸***
Park, Ki Ho · Cho, Hyeon Kyeong · Jee, Hong Kee · Lee, Soontak

Abstract

A nonlinear wave routing model is suggested for the routing of floods in the natural open channel networks. For the optimization of parameter of the proposed routing model, parameter adjustment is executed through the proposed objective function. The model treats backwater effect form upstream and downstream ends. Solution of formulated model is made possible on computer by adopting a nonlinear finite-difference scheme for the numerical analysis based on a combination of Lax-Wendroff scheme and Burstein-Lapidus modification. Comparison of the results of the proposed model to those of actual hydrograph and dynamic wave routing model denotes that the proposed model is as accurate as actual runoff hydrograph and faster the computer time than the dynamic routing model.

요 지

自然水路에 있어서 洪水波의 追跡을 위한 非線形 Wave Routing 모델이 제안되었다. 제안된 모델은 복잡한 自然河道의 네트워크에서 下流端에 傳達되는 洪水波의 形態 또는 傳達時間에 대한 精確한 解析 뿐만 아니라 合流點의 上流端과 下流端의 背水를 모두 고려할 수 있도록 고안되었다. 본 모델에 사용되는 媒介變數의 推定을 위하여 目的函數가 제시되었고 이에 따라 적용된 流域에 가장 적합한 媒介變數를 推定할 수 있었다. 非線形 有限差分方程式의 近似解를 구하기 위하여 Lax-Wendroff 方法과 Burstein-Lapidus 方法을 변형하여 사용하였다. 제안된 모델과 기존의 Dynamic Wave Routing 모델을 비교 적용한 결과, 두 모델 다 같이 洪水波의 傳達時間, 最高值 등이 잘 일치하고 있으나 計算時間은 제안된 모델이 짧게 나타났다.

1. 序 論

上流의 임의지점에 주어진 洪水波가 下流의 임의 지점을 통과할 때의 흐름의 형태, 시간 등을 解析

하는 河道追跡 方法은 水理學的 方法과 水文學的 方法이 있다. 특히 河口部, 背水의 영향을 받는 河道 및 과도한 洪水波가 傳播되는 河道 等에서의 洪

-
- * 九州大學 建設都市工學科 訪問研究員
 - ** 嶺南大學校 大學院 博士課程
 - *** 嶺南大學校 土木工學科 教授

水追跡은 水文學의 方法보다도 水理學의 方法이 正밀하고 效果적으로 이용되고 있다(池洪基와 朴埈鎬, 1994).

河川의 洪水追跡에 관한 水理學의 研究로는 Amein(1966)의 特性曲線法의 適用, Amein과 Fang(1970) 등의 有限差分法에 기초를 둔 explicit scheme과 implicit scheme에 관한 研究를 하였으며, Price(1974)는 洪水追跡을 위한 數值解析에서 解의 安定性, 收斂性 및 計算時間에 관한 研究를 하였다. 또한 Yevjevich와 Barnes(1970)의 數值解析 技法에 의한 洪水追跡, Yen(1981)과 Kabir(1984)의 數值的 洪水追跡, Fread(1989)의 DWOPER모델(Dynamic Wave Operational Model), Thomson과 James(1989)의 非定常 2次元流의 흐름追跡을 위한 FESWMS모델(Finite Element Surface-Water System Model) 등이 있다. 한편 國內에서는 이정웅(1977)의 特性曲線法에 의한 洪水追跡, 남선우와 박상우(1985)의 洪水追跡에서의 對流擴散모델, 유희정(1986)의 有限差分法에 의한 河川의 洪水波解析, 한건연(1986)의 洪水波解析을 위한 數值모델, 池洪基와 朴埈鎬(1994)의 流出豫測을 위한 水理學의 河道追跡 모델 등이 있었다.

일반적으로 自然水路는 하나의 河道區間만이 아니고 여러 개의 河道가 연결되어 복잡한 네트워크를 이루고 있다. 그러므로 自然水路의 洪水流 解析을 위해서는 河川의 合流點에서 背水를 고려하지 않으면 안된다. 기존의 研究(池洪基와 朴埈鎬, 1994)에서 적용한 모델은 支流를 독립적으로 취급하여 계산하지 않고 있다. 그러므로 본 研究에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 하나의 合流點에서 다음 合流點에 이르는 河道의 相互背水作用을 연속적으로 計算할 수 있도록 알고리즘을 構成해 보았다. 또한 計算에 영향을 미치는 媒介變數에 대한 最適值을 구하기 위하여 기존에 존재하는 資料와 計算된 水文曲線을 비교할 수 있는 目的函數를 제시하여 媒介變數의 最適值을 決定토록 하였다.

한편 본 研究에서 사용된 Wave Routing모델의 基本概念은 Yen(1981)과 Kabir(1984)의 研究結果를 이용하였다. 이들 研究結果를 토대로 본 研究에서는 媒介變數의 最適化를 위하여 增分動的

計劃(Incremental Dynamic Programming; IDP)技法(Park과 Lee, 1995)을 적용한 알고리즘을 開發토록 하였다.

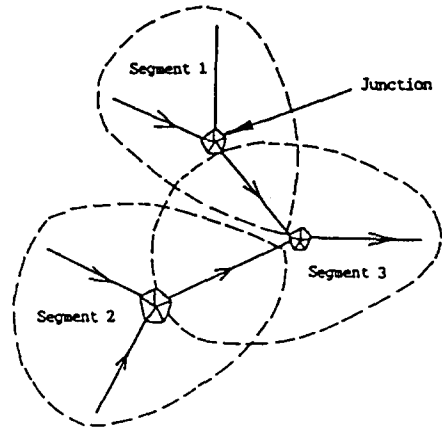


Fig. 1. Overlapping Segment of Channel

2. 흐름特性 및 洪水波의 基本理論

自然水路의 洪水波의 分析을 위한 數學的 모델링의 構成은 支配方程式(Governing Differential Equation)의 복잡성 때문에 실제에의 應用이 제한되어 왔으나 컴퓨터 數值解析 技法의 도입으로 그 計算이 가능하게 되었다. 본 研究에서는 Saint-Venant식에 의한 不定流의 數值模型化와 이를 이용한 Wave Routing 모델링 및 有限差分方程式의 數值解法이 간단히 언급되었다.

2.1 不定流의 模型化

自然水路에서 不定流의 水理學의 解析을 위하여 Saint-Venant식을 이용하였고, 側面流入이나 流出이 없는 角柱型水路(Prismatic Channel)를 식 (1) 및 (2)와 같이 나타내었다.

$$\bar{B} \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \bar{A} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{B} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{g} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} = \bar{g}(\bar{S}_x - \bar{S}_f) \quad (2)$$

여기서, \bar{A} = 흐름의 橫斷面, $\bar{V} = \frac{\bar{Q}}{\bar{A}}$ = 平均流速, \bar{Q} = 流量, \bar{h} = 흐름의 깊이, \bar{B} = 흐름의 上部幅, \bar{x} = 水路의 길이, \bar{t} = 時間, \bar{g} = 重力加速度, 水路底面 높이 (\bar{z})에서의 水路底面傾斜 (\bar{S}_z) = $d\bar{z}/d\bar{x}$, \bar{S}_f = 摩擦傾斜이며, Manning의 식 (3)을 이용하여 값을 구할 수 있다.

$$\bar{V} = \frac{\bar{C}_u}{n} \bar{R}^{2/3} \bar{S}_f^{1/2} \quad (3)$$

이때 \bar{C}_u 는 미터단위로는 1.0이며, 英國單位(English System)로는 1.486, n = Manning의 粗度係數, $\bar{R} = \bar{A}/\bar{P}$ = 動水半徑, \bar{P} = 潤邊이다. 식 (1)과 (2)에서 \bar{V} 과 \bar{h} 는 從屬變數이고 \bar{x} 와 \bar{t} 는 獨立變數이다.

한편 連續方程式에 의하여 정의되는 合流點에서의 條件은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Sigma Q_k = Q_o + \frac{ds}{dt} \quad (4)$$

그리고 이를 動的方程式(Dynamic Equation)의 형태로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$h_k + \frac{v_k^2}{2g} H_k = h_o + \frac{v_o^2}{2g} \quad (5)$$

이때 s = 合流點內的 貯留, H = 合流點에서의 損失水頭, v = 流速, k = 河道區間內的 流量, o = 河道區間 바깥에 흐르는 流量을 뜻한다. 대부분의 네트워크에서 合流點의 流量은 다른 곳 보다 작으므로 식(4)의 ds/dt 를 무시하고 식 (6)과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\Sigma Q_k = Q_o \quad (6)$$

또한 合流點에서 合流되는 支流의 흐름이 常流일 때 식 (5)는 運動互換 條件(Kinematic Compatibility Condition)에 의해서 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_k = h_o \quad (7)$$

2.2 Wave Routing 모델과 有限差分方程式의 數值解法

Saint-Venant식의 近似解에 의한 Wave Routing 모델링을 위하여 運動方程式을 간단한 형태로 바꾸어 쓰면 식 (2)를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_f = \frac{\partial h}{\partial x} \quad (8)$$

식 (3)과 (8)을 결합하여 식 (9)를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 x 축방향의 流量과 $-x$ 축 방향의 流量을 計算할 수 있다.

$$Q = KAR^{2/3} \frac{-\frac{\partial h}{\partial x}}{n \left| \frac{\partial h}{\partial x} \right|^{0.5}} \quad (9)$$

한편 식 (1)을 有限差分型으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{(Bh)_{A,i+1}^{j+1} + (Bh)_{A,i}^{j+1} - (Bh)_{A,i}^{j+1} - (Bh)_{A,i+1}^{j+1}}{\Delta t} \\ & + \frac{(AV)_{A,i+1}^{j+1} - (AV)_{A,i}^{j+1}}{\Delta x} \\ & + \frac{(BVh)_{A,i+1}^{j+1} - (BVh)_{A,i}^{j+1}}{\Delta x} \end{aligned} \quad (10)$$

이때 식 (10)은 A河道區間에서 合流點을 기준으로 上流境界地點과 下流境界地點의 流量을 計算할 수 있도록 나타낸 것이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 $i=1, 2, \dots, M-1$ 은 A河道區間을 나눈 區劃數이고 $J+1$ 은 計算된 값을 이미 알고 있는 段階의 數이며, Δt 는 時間의 增分値이다. 또한 식 (9)를 식 (10)의 형태로 有限差分型으로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$(Q)_{A,i+1}^{j+1} = \frac{K(A)_{A,i+1}^{j+1} ((R)_{A,i+1}^{j+1})^{2/3}}{n_{A,i+1}}$$

$$\frac{(h)_{A,i+1}^{j+1} - (h)_{A,i}^{j+1}}{\Delta x}$$

$$\left| \frac{(h)_{A,i+1}^{j+1} - (h)_{A,i}^{j+1}}{\Delta x} \right|^{0.5} \quad (11)$$

이때 $(Q)_{A,i+1}^{j+1}$ 의 近似解를 구하기 위하여 Lax-Wendroff 方法과 Burstein-Lapidus 方法을 변형하여 대입해 보면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(Q)_{A,i+1}^{j+1} = (Q)_{A,i}^j + \Delta t / 2 [(H)_{A,i}^j$$

$$+ 0.25(H)_{A+0.5,i+0.5}^{j+1} J + (H)_{A+0.5,i-0.5}^{j+1}$$

$$+ (H)_{A-0.5,i-0.5}^{j+1} J + (H)_{A-0.5,i+0.5}^{j+1}$$

$$- \Delta t / (4\Delta x) [(F)_{A+1,i}^j - (F)_{A-1,i}^j$$

$$+ (F)_{A+0.5,i+0.5}^{j+1} - (F)_{A-0.5,i+0.5}^{j+1}$$

$$- (F)_{A+0.5,i-0.5}^{j+1} - (F)_{A-0.5,i-0.5}^{j+1}] \quad (12)$$

이때 F와 H는 x축과 t에 대한 벡터의 값이며, 만일 흐름을 2次元流로 가정했다면 벡터값 G를 포함시켜 z축에 대한 解析을 할 수 있다. 본 研究에서는 흐름을 1次元流 Saint-Venant식으로 가정하였으므로 z축에 대한 解析은 제외하였다. 만일 벡터값 G를 포함시킨다면 식 (12)를 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(Q)_{A,i+1}^{j+1} = (Q)_{A,i}^{j+1} + \Delta t / 2 [(H)_{A,i}^j$$

$$+ 0.25(H)_{A+0.5,i+0.5}^{j+1} J + (H)_{A+0.5,i-0.5}^{j+1}$$

$$+ (H)_{A-0.5,i-0.5}^{j+1} J + (H)_{A-0.5,i+0.5}^{j+1}$$

$$- \Delta t / (4\Delta x) [(F)_{A+1,i}^j - (F)_{A-1,i}^j$$

$$+ (F)_{A+0.5,i+0.5}^{j+1} - (F)_{A-0.5,i+0.5}^{j+1}$$

$$- (F)_{A+0.5,i-0.5}^{j+1} - (F)_{A-0.5,i-0.5}^{j+1}]$$

$$- \Delta t / (4\Delta z) [(G)_{A,i+1}^j - (G)_{A,i-1}^j$$

$$+ (G)_{A+0.5,i-0.5}^{j+1} - (G)_{A-0.5,i+0.5}^{j+1}$$

$$- (G)_{A-0.5,i-0.5}^{j+1} \quad (13)$$

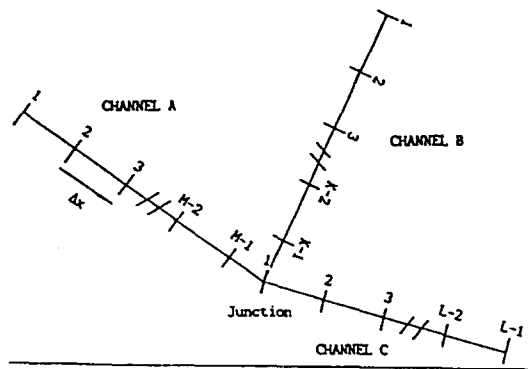


Fig. 2. Schematic Diagram of Segmented Natural Channel

3. 모델의 適用 및 分析

본 研究에서 適用된 流域은 기존의 研究 結果(池洪基와 朴琦鎬, 1994)와 比較 分析이 용이하고 精確한 降雨, 水位 및 流量資料가 있는 IHP 洛東江 渭川代表流域(A=475.2 km²)(國際水文開發計劃, 1982~1989)을 선정하였다. 對象流域에는 降雨觀測所(自記) 11個所와 水位觀測所(自記) 6個所가 있으며, 1982년부터 1994年 現在까지 약 13년간에 걸쳐서 水文觀測이 실시되고 있다. 河道區間의 測量成果는 1982년에 IHP 研究事業의 일환으로 本流와 主要 支流에 대하여 실시한 縱橫斷測量成果와 洛東江沿岸開發 設計書로 부터 引用하였다.

3.1 流域 流出系의 構成

適用對象 流域인 渭川流域의 水系構造는 Fig. 3과 같이 本流와 比較적 큰 1개의 支流로 構成되어 있으며, 水位標 地點을 기준으로 小流域을 分割하였다. 한편 이들 水系構造를 Fig. 3(b)와 같이 6개의 小流域(B₁, B₂, ..., B₆)과 4개의 河道區間

으로 나누고 上流에서 本流를 따라 小流域의 流出 水文曲線을 각 河道에 再現시키면서 河道의 追跡과 합산을 병행하여 각 水位標 地點에서 流出水文曲線을 計算하고 이 때의 實測 流出水文曲線과 比較할 수 있도록 하였다.

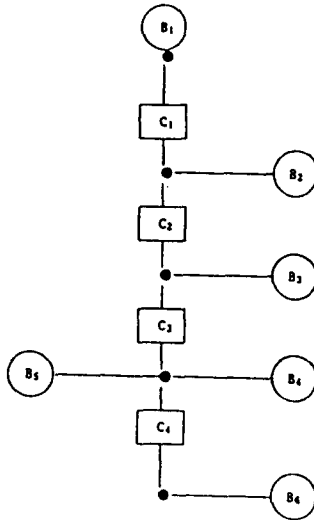


Fig. 3. Schematic of Applied Natural Channel Network

3.1.1 河道의 條件

洪水流의 河道追跡은 각 水位標 地點間을 河道區間으로 하는 河道流域 4個所 및 小流域 2個所(東谷 및 孝令 上流流域) 등 6個所의 小流域에 대하여 流域流出모델로 부터 계산된 流域流出을 각 河道區間에 再現시켰으며, 이때 河道의 幾何學的 因子인 線形性과 橫斷面의 特性은 河道의 縱橫斷 測量成果를 이용하였다. 그리고 河道區間의 小區間 (Reach)에 대한 測點과 距離 및 累加距離는 Fig. 4와 같다. 河道의 抵抗을 나타내는 粗度係數 n 은 現地踏査에 의해서 河床의 骨材構成 및 河川狀態 등을 조사하여 판단의 資料로 하고 이를 Horton의 標準値와 比較하여 河道의 小區間別 粗度係數의 初期値로 사용하였다.

3.1.2 境界條件과 初期條件

本流流域 4個所와 支流流域 2個所(東谷 및 孝令

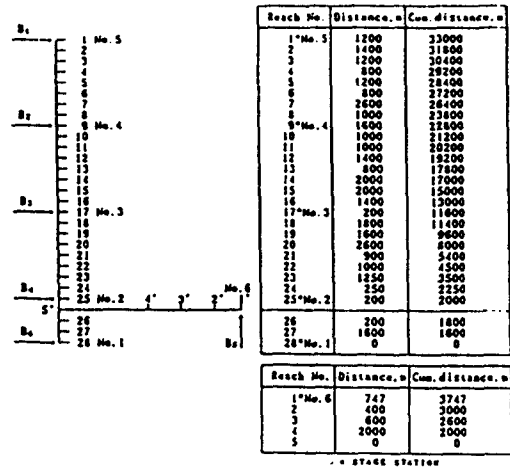


Fig. 4. System Schematic of Wi Stream

上流流域) 등 6個所의 小流域에 대하여 流域流出 모델로 最上流部 斷面과 最下流部 斷面에서 취할 수 있는 境界條件은 다음 3가지 ① $Q=Q(t)$, ② $y=y(t)$, ③ $Q=f(y)$ 경우 중 하나가 된다. 따라서 河道에 걸쳐서 나타나는 모든 格子點에 대해서 이미 알고 있거나, 假定에 의한 流量과 水深을 初期條件으로 정한다. 여기서 일정한 流量과 水深을 가지는 定常流에서 初期條件이 설정되면 流量과 水深은 河道의 傾斜와 摩擦項으로 표시될 수 있다. 본 研究에서는 기존의 研究 結果(池洪基와 朴琦鎬, 1994)와 比較 分析을 용이하게 하기 위하여 本流 및 支流의 最上流部 斷面에서의 境界條件은 ① $Q=Q(t)$ 條件을 채택하였으며, 本流 最下端에서는 ② $y=y(t)$ 條件을 사용하였다. 또한 河道斷面 測量成果資料와 각 河道區間의 初期流量을 이용하여 水深을 計算하고 이를 定常流로 假定한 다음, 이 때의 流量과 水深을 初期條件으로 사용하였다.

3.2 모델媒介變數의 最適化

計算에 영향을 미치는 媒介變數에 대한 最適値를 구하기 위하여 기존에 존재하는 資料와 計算된 水文曲線을 比較할 수 있는 目的函數를 제시하여 媒介變數의 最適値를 決定하였으며, Fig. 5에 나타난 바와 같은 目的函數를 이용하여 媒介變數의 最適値

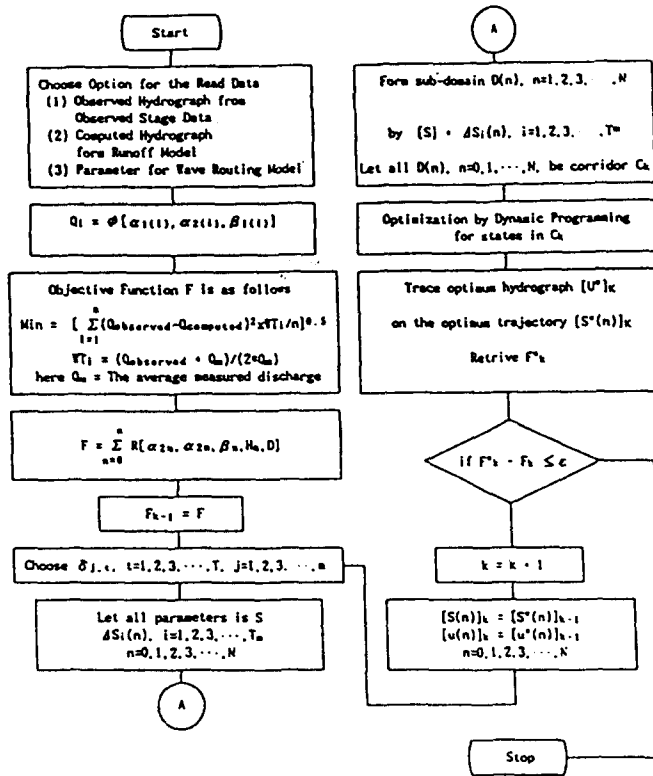


Fig. 5. Procedure of Auto Parameter Calibration with IDP

를 결정토록 하였다. 자동검정(Auto-calibration)에 의한 매개변수들의最適化를 위하여適用된最適化技法은 IDP를 이용하였다. Wave Routing 모델에適用된 매개변수로는 인접한時間線上의 두개의格子點 사이의位置를 지정하는加重 Factor θ 와 誤差의許容值 ϵ 이 있다.

그結果 과거의研究結果(池洪基와 朴埗鎬, 1994)는 θ 를 0.55~0.63의範圍가適合한 것으로 나타났으나 본研究結果 0.57~0.61의範圍에서解의收斂이 잘되는 것을 알 수 있었다. 기존의研究結果(池洪基와 朴埗鎬, 1994)에서는水深의許容值를 3cm, 流量의許容值를 本流에서 5CMS, 支流에서 2CMS로 하였으나 본研究에서는 流量의許容值를 本流에서 4CMS, 支流에서 2CMS, 最大演算 反復回數를 20회로 정하여 實行하였다.

4. 分析 結果의 比較

본 장에서는 기존의研究(池洪基와 朴埗鎬, 1994)에서適用한 바 있는 渭川流域에 본研究에서 제시한 Wave Routing 모델과 Dynamic Wave Routing 모델을適用하여比較 分析해 보았다. 그結果 양 모델 모두 우수한結果를 나타내었고 본研究에서 제시한 Wave Routing 모델의計算時間이 Dynamic Wave Routing 모델보다 다소 짧아졌음을 알 수 있었다.

4.1 모델의 適用

본研究에서는 기존의研究(池洪基와 朴埗鎬, 1994)와는 달리河道追跡 효과를 집중적으로比較 分析하기 위하여 각地點의流入量은 流出모델로

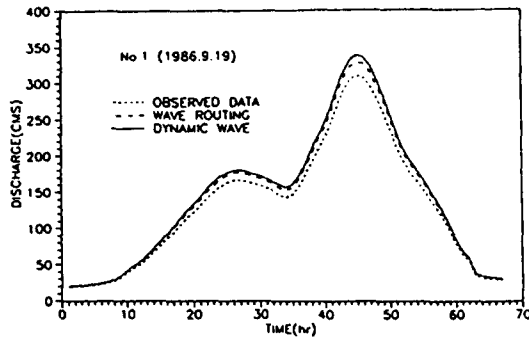
Table 1. Comparison of Flood Flow by Dynamic Wave Routing Model and Wave Routing Model

(a) Station: No.1, Storm: June 19, 1986

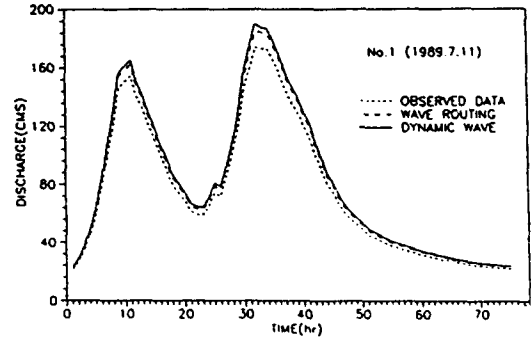
Time (hr)	Observed Data (CMS)	Dynamic Wave Routing (CMS)	Wave Routing (CMS)	Time (hr)	Observed Data (CMS)	Dynamic Wave (CMS)	Wave Routing (CMS)
1	19.789	21.234	20.838	35	146.216	160.399	156.012
2	19.958	21.415	21.016	36	156.109	171.252	166.568
3	20.271	21.751	21.345	37	172.076	188.767	183.605
4	21.139	22.882	22.259	38	190.578	209.064	203.347
5	22.009	23.616	23.175	39	207.663	227.806	221.576
6	23.043	24.725	24.264	40	225.228	247.075	240.318
7	24.907	26.725	26.227	41	247.269	269.770	262.352
8	27.555	29.567	29.015	42	270.126	294.707	286.604
9	32.231	35.164	34.197	43	289.642	315.999	307.310
10	39.046	42.599	41.428	44	304.351	332.047	322.916
11	44.606	48.665	47.327	45	310.228	338.459	329.152
12	49.965	54.512	53.013	46	307.674	335.672	326.442
13	57.369	62.590	60.869	47	297.244	324.293	315.376
14	66.234	72.201	70.274	48	280.395	305.911	297.499
15	75.402	82.264	80.002	49	259.695	283.327	276.315
16	84.651	92.354	89.815	50	236.067	257.549	251.175
17	93.756	102.475	99.663	51	212.160	231.467	225.738
18	104.389	114.097	110.965	52	192.068	209.546	204.360
19	114.342	124.976	121.546	53	177.156	193.277	188.494
20	122.532	133.927	130.252	54	165.923	181.022	176.542
21	131.059	143.247	139.316	55	153.824	167.822	163.669
22	141.203	154.335	150.099	56	140.282	153.048	149.260
23	149.109	162.976	158.503	57	127.396	138.989	135.167
24	156.930	171.524	166.817	58	112.780	123.043	119.660
25	162.581	176.075	172.824	59	95.898	104.625	101.748
26	166.173	179.965	176.642	60	78.831	86.005	83.640
27	166.709	180.546	177.212	61	63.889	69.703	67.786
28	164.809	178.488	175.192	62	54.477	59.434	57.800
29	161.936	175.377	172.138	63	34.300	37.421	36.392
30	159.466	172.702	169.512	64	32.321	35.262	34.293
31	155.662	168.582	165.469	65	30.739	33.536	32.614
32	152.089	164.712	161.671	66	29.501	32.186	31.301
33	146.030	160.195	155.814	67	28.538	31.135	30.279
34	142.420	156.235	151.962				

(b) Station: No.1, Storm: July 11, 1989

Time (hr)	Observed Data (CMS)	Dynamic Wave Routing (CMS)	Wave Routing (CMS)	Time (hr)	Observed Data (CMS)	Dynamic Wave (CMS)	Wave Routing (CMS)
1	21.293	23.420	22.379	39	130.272	141.085	138.479
2	26.263	28.887	27.602	40	120.542	130.547	128.136
3	34.551	38.003	36.313	41	112.278	123.169	119.801
4	45.194	49.709	47.499	42	100.654	110.417	107.398
5	59.258	65.178	62.280	43	90.278	99.035	96.327
6	77.194	84.906	81.131	44	80.858	88.701	86.275
7	99.190	109.099	104.249	45	74.278	81.483	79.255
8	120.721	132.781	126.878	46	66.701	73.171	71.170
9	146.257	156.934	154.009	47	60.272	66.118	64.310
10	150.344	161.319	158.312	48	55.798	61.210	59.536
11	154.327	165.593	162.506	49	52.279	57.036	55.468
12	140.724	150.997	148.182	50	48.741	53.176	51.714
13	132.107	141.751	139.109	51	45.172	49.283	47.927
14	120.297	129.079	126.673	52	43.175	47.104	45.809
15	110.807	118.896	116.680	53	41.224	44.975	43.739
16	100.278	107.598	105.593	54	39.270	42.844	41.665
17	90.220	98.430	95.723	55	37.398	40.801	39.679
18	80.197	87.495	85.089	56	36.287	39.589	38.501
19	74.082	80.823	78.601	57	34.982	38.165	37.221
20	68.297	74.512	72.463	58	33.624	36.684	35.776
21	61.238	66.811	64.974	59	32.582	35.547	34.667
22	59.178	64.563	62.788	60	31.503	34.370	33.519
23	58.861	64.217	62.452	61	30.248	33.001	32.184
24	65.138	71.066	69.111	62	29.591	32.284	31.485
25	74.082	80.972	78.749	63	28.278	30.851	30.088
26	71.722	78.392	76.240	64	27.831	30.364	29.612
27	85.208	93.132	90.576	65	28.128	29.160	28.358
28	100.833	110.210	107.185	66	26.117	28.494	27.710
29	120.197	131.375	127.769	67	25.278	27.578	26.820
30	145.178	158.680	154.324	68	24.680	26.926	26.185
31	160.172	175.068	170.263	69	24.057	26.246	25.524
32	174.080	190.269	185.047	70	23.572	25.717	25.010
33	173.272	187.654	184.188	71	23.182	25.292	24.596
34	172.853	187.200	183.743	72	22.732	24.801	24.119
35	165.272	178.990	175.684	73	22.522	24.572	23.896
36	155.880	168.818	165.700	74	22.023	24.027	23.366
37	145.272	157.330	154.424	75	21.828	23.814	23.160
38	136.932	148.297	145.559				



(a) Station: No.1, Storm: June 19, 1986



(b) Station: No.1, Storm: July 11, 1989

Fig. 6. Comparison of Result by Dynamic Wave Routing Model and Wave Routing Model

Table 2. Sensitivity Analysis of Dynamic Wave Routing Model and Wave Routing Model

Channel (Storm)	Sensitivity Analysis	BIAS		RMS		ME	
		Dynamic Wave Routing	Wave Routing	Dynamic Wave Routing	Wave Routing	Dynamic Wave Routing	Wave Routing
No.1(1989.7.11)		6.69	4.66	7.75	5.47	0.978	0.987
No.1(1986.9.19)		10.70	7.41	13.51	9.33	0.977	0.989
No.2(1989.7.11)		4.43	2.92	5.04	3.49	0.975	0.988
No.2(1986.9.19)		5.38	3.73	6.67	4.62	0.974	0.987
No.3(1989.7.11)		2.41	1.66	2.98	2.04	0.977	0.989
No.3(1986.9.19)		2.78	1.92	3.38	2.34	0.971	0.986
No.4(1989.7.11)		1.56	1.07	1.88	1.28	0.974	0.988
No.4(1986.9.19)		2.15	1.48	2.58	1.78	0.969	0.985

Table 3. Comparison of Peak Discharge(Time) of Dynamic Wave Routing Model and Wave Routing Model

Channel (Storm)	Peak Discharge Peak Time	Peak Discharge(CMS)			Peak Time(Hour)		
		Observed	Dynamic Wave Routing	Wave Routing	Observed	Dynamic Wave Routing	Wave Routing
No.1(1989.7.11)		174.1	190.3	185.0	24	24	24
No.1(1986.9.19)		310.2	338.5	329.2	45	45	45
No.2(1989.7.11)		113.1	123.7	120.3	23	23	23
No.2(1986.9.19)		158.1	173.5	168.7	44	44	44
No.3(1989.7.11)		66.3	72.5	70.5	30	30	30
No.3(1986.9.19)		87.4	95.9	93.3	45	45	45
No.4(1989.7.11)		35.3	38.6	37.5	28	28	28
No.4(1986.9.19)		73.2	76.0	78.9	45	45	45

부터 구한 값을 사용하지 않고 流域內的 6個所의 自記水位觀測所의 自記水位 觀測記錄으로부터 水位-流量曲線式에 적용한 觀測流量을 流入量으로 사용하였다.

따라서 지금까지 自然河道의 水理學的 洪水追跡 方法으로 Dynamic Wave Routing 모델과 Wave Routing 모델을 實際豪雨(1986. 9. 19 및 1989. 7. 11 豪雨)에 적용해 본 結果는 Table 1 및 Fig. 6과 같이 計算되었다. 여기서 기존 研究(池洪基와 朴琦鎬, 1994)의 分析 結果보다 BIAS, ME (Model Efficiency), RMS(Root Mean Square) 및 尖頭流量이 훨씬 정확함을 알 수 있었다. 또한 3.2절에서 설명된 바와 같이 加重值, 誤差의 限界 및 反復演算 回數, 初期條件 등을 最適化 技法을 이용하여 算定한 結果, 河道追跡이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있었으나 Dynamic Wave Routing 모델의 경우 Wave Routing 모델보다 尖頭值 部分에서 觀測流量보다 조금 과도한 값이 計算됨을 알 수 있었다. 이는 Dynamic Wave Routing 모델의 結合이 아니라 Wave Routing이 媒介變數 最適化技法의 알고리즘을 포함하고 있으므로 좀더 觀測值에 접근된 값이 計算되고 있음을 알 수 있었다. 본 研究에서 사용한 Dynamic Wave 모델의 경우도 만일 媒介變數 最適化 알고리즘을 포함시킬 수 있다면 보다 더 정확한 값을 계산할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 모델別 比較研究

본 研究에서 제안된 Wave Routing 모델과 기존의 Dynamic Wave Routing 모델을 이용하여 自然河道에서 河道追跡을 실시한 結果 Table 2 및 3에 나타난 바와 같이 BIAS, ME, RMS, 尖頭流量이 잘 計算되어 짐을 알 수 있다.

본 研究에서 사용된 資料는 時間資料로서 河道追跡의 경우 때로는 分單位까지로 표현될 수 있을 만한 精밀한 計算結果가 요구되므로, 향후 分單位의 精밀한 資料를 사용할 경우 과연 Wave Routing 모델이 잘 計算이 될지는 의문이다. 그러나 본 研究의 結果로는 Wave Routing 모델과 Dynamic Wave Routing 모델 모두가 適用된 流域의 4개

河道 區間에서 水文曲線의 上昇部, 尖頭部, 減少部, 減少時間 등이 實測流量의 資料에 보다 일치하는 경향을 나타내고 있으므로 自然水路에서 河道追跡이 잘 수행되고 있음을 알 수 있었다. 計算에 소요되는 時間으로는 매킨토시 파워PC의 경우 Dynamic Wave Routing 모델이 약 4분, Wave Routing 모델이 약 3분이 소요되어 Wave Routing 모델의 경우가 計算時間이 절약됨을 알 수 있었다.

5. 結 論

지금까지 自然水路에서의 洪水追跡을 위하여 下流端에 傳達되는 洪水波의 形態 또는 傳達時間에 대한 精確한 解析 뿐만 아니라 合流點의 上流端과 下流端의 背水를 모두 고려할 수 있도록 고안된 Wave Routing 모델을 제안하였다. 이때 有限差分方程式의 近似解를 구하기 위하여 Lax-Wendroff 方法과 Burstein-Lapidus 方法이 적용되었으며, 媒介變數의 最適化를 위하여 IDP技法이 이용되었다. 제안된 Wave Routing 모델과 기존의 Dynamic Wave Routing 모델을 比較하여 다음의 結果를 얻을 수 있었다.

(1) 본 研究에서 제안된 Wave Routing 모델의 경우, 適用된 流域의 4개 河道에서 水文曲線의 上昇部, 尖頭部, 減少部 등이 實測流量의 資料에 거의 일치하는 경향을 나타내고 있으므로 自然水路에서의 河道追跡이 잘 수행되고 있음을 알 수 있다. 또한 제안된 모델과 Dynamic Wave Routing 모델을 比較한 結果, 두 모델 다 같이 洪水波의 到達時間, 最高值 등이 잘 일치하고 있으나 計算時間은 제안된 모델이 짧게 나타났다.

(2) 河道追跡의 效果를 집중적으로 比較 分析하기 위하여 각 地點의 流入量을 流出모델로부터 구하지 않고 觀測流量을 流入量으로 사용한 結果, 기존 研究(池洪基와 朴琦鎬, 1994)의 分析 結果 보다 減少時間 및 尖頭流量의 數值가 정확함을 알 수 있었다. 그러나 본 모델을 自然河道의 洪水追跡에 適用하기 위해서는 流域의 特性을 잘 반영할 수 있는 보다 精밀한 流出모델의 개발이 병행되어야 함을 알 수 있다.

(3) Wave Routing 모델에 適用된 媒介變數로는 인접한 時間線上의 두 개의 점사이의 位置를 指定하는 加重 Factor θ 와 誤差의 許容值 ϵ 이 있으며, 본 研究에서 使用된 θ 의 경우 0.57에서 0.61의 範圍에서 解의 收斂이 잘 되었다. 기존의 研究結果(池洪基와 朴埼鎬, 1994)에서는 水深의 許容值를 3cm, 流量의 許容值를 本流에서 5CMS, 支流에서 2CMS로 하였으나 본 研究에서는 流量의 許容值를 本流에서 4CMS, 支流에서 2CMS, 反復演算回數를 20회 實行한 結果 所要 計算時間은 Dynamic Wave Routing 모델이 약 4분, Wave Routing 모델이 약 3분이 所要되어 計算時間에 있어서 Wave Routing 모델이 우수함을 알 수 있었다.

본 研究에서 使用된 資料는 時間資料이나, 流域의 河道追跡의 경우에 때로는 分單位까지로 表現될 수 있을 만큼 精밀한 計算 結果를 얻기 위해서는 향후 分單位의 精밀한 資料를 使用한 경우에도 精確한 計算이 가능할지에 대한 研究가 必要하다. 또한 식 (13)에서 제시한 바와 같이 보다 복잡한 自然河道에서의 精밀한 河道追跡을 實行하기 위하여 2次元의 精밀 좌표를 使用하는 研究가 必要할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 研究는 嶺南大學校 '93 自由公募課題 學術研究造成費 支援에 의해서 수행되었으며, 이에 감사한다.

參 考 文 獻

國際水文開發計劃(IHP) 代表流域 研究調查 報告書. (1982~1989). 建設部.
 남선우, 박상우 (1985). “對流擴散모델을 이용한 洪水追跡에 관한 研究.” 韓國水文學會誌, 제18권, 제3호, pp. 205-212.
 유희정 (1986). “有限差分法에 의한 河川의 洪水波 解析에 관한 研究,” 碩士學位論文, 中央大學校.
 이정웅 (1977). “特性曲線法에 의한 洪水追跡,” 碩士

學位論文, 延世大學校.
 池洪基, 朴埼鎬 (1994). “流出解析을 위한 河道追跡 模型.” 韓國水文學會誌, 第26卷, 第5號, pp. 334-339.
 한건연 (1986). “Fill Dam의 破壞에 따른 洪水波 豫測模型의 開發,” 博士學位論文, 延世大學校.
 Amein, M. (1966). “Stream routing on computer by characteristics.” *Water Resources Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 356-368.
 Amein, M., and Fang, C.S. (1970). “Implicit flood routing in natural channels.” *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 96, No. HY7, pp. 123-131.
 Fread, D.L. (1989). “NWS dam breach models for microcomputers.” *ASCE Annual Conference of Irrigation and Draining Division*, Portland, Oregon, pp. 1411-1418.
 Kabir, N. (1984). “Numerical flood routing for natural channels,” Ph.D. dissertation, Washington State University.
 Park, K.H., and Lee, S.T. (1995). “Optimal operating rules for integrated reservoir system with IDP in Nakdong river basin Korea.” *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources*, Vol. 8, No. 2, pp. 141-147.
 Price, R.K. (1974). “Comparison of four numerical methods for flood routing.” *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 100, No. HY7, pp. 971-980.
 Thompson, J., and James, W.P. (1989). “Two-dimensional river modeling of buckhorn creek near shiloh alabama.” *Research, Development and Technology*, Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike McLean, Virginia.
 Yen, B.C. (1981). “Diffusion-wave flood routing in channel networks.” *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 107, No. HY6, pp. 423-429.
 Yevjevich, V., and Barnes, A.H. (1970). “Numerical computer methods of solution.” *Hydrology Paper*, Colorado State University.
 <접수: 1994년 8월 9일>