

〈論 文〉

流出豫測을 위한 河道追跡 模型 Channel Routing Model for Streamflow Forecasting

池 洪 基* 朴 琦 鎬**
JEE Hong Kee, PARK Ki Ho

Abstract□ The purpose of this study is develop the algorithm of channel routing model which can be used for flood forecasting. In routing model, the hydraulic technique of the implicit scheme in the dynamic equation is chosen to route the unsteady varied flow. The channel routing model is connected with conceptual watershed model which is able to compute the flood hydrograph from each subbasin.

The comparative study shows that the conceptual model can simulate the watershed runoff accurately. As a result of investigating the channel routing model, the optimal weighting factor θ which fixes two points between time line is selected. And also, the optimal error tolerance which satisfies computing time and converge of solution is chosen.

요 지 : 본 研究에서는 河川流域의 流出過程의 解析 및 그 豫測을 위해서 水理學的 河道追跡模型을 적용하여 流域의 洪水流出量을 算定할 수 있는 豫測模型의 알고리즘 및 그 프로그램의 개발을 目的으로 하고 있다. 이때 사용된 河道追跡模型은 DWOPER 模型이며, 이와 결합되어 流域流出量의 算定은 概念的 模型이 사용되었다.

概念的 模型에서 계산된 流出量을 DWOPER 模型에 적용시킨 結果에 대해서 그 적합성을 實測資料와 比較分析한 結果, 水文曲線의 上昇部, 尖頭部 및 減少部에서 거의 接近된 河道追跡이 일어나므로 河道追跡이 비교적 잘 수행됨을 알 수 있다. 한편 河道追跡 模型의 원활한 수행을 위하여 加重 Factor θ 와 誤差의 허용치 ϵ 의 적절한 범위를 구하여 비교적 안정된 解를 구할 수 있었다.

1. 序 論

河道流出에 있어서 河道의 洪水流를 解析하는 方法은 水理學的 方法과 水文學的 方法이 이용되고 있다. 특히 河口部, 背水의 영향을 받는 河道 및 과도한 洪水流가 傳播되는 河道 등에서의 洪水追跡은 水文學的 方法보다 水理學的 方法이 精密하고 効果的으로 이용되고 있다. 河川의 洪水追跡에 관한 水理學的 研究로는 Amein(1966)¹⁾의 特性曲線法의 適用, Amein과 Fang(1970)²⁾ 등이 有限差分法에 기초를 둔 explicit scheme과 implicit scheme에 관한 研究를 하였으며, Price(1974)³⁾

는 洪水追跡을 위한 數值解析에서는 解의 安定性, 收斂性 및 計算時間 등에 진보적인 研究가 있었다. 특히 Yevjevich와 Barnes(1970)⁴⁾의 洪水追跡에 있어서 컴퓨터에 의한 數值解析技法으로 Kabir(1984)⁵⁾의 自然水路에 대한 數值的 洪水追跡, Fread(1989)^{6, 7, 8, 9)}의 非定常 1次元流라는 假定下에서 洪水追跡이 가능한 DWOPER模型 (Dynamic Wave Operational Model, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service ; NWS Version), 그리고 Thompson과 Wesley(1989)¹⁰⁾는 非定常 2次元流의 흐름追跡을 위한 FESWSM模型(Finite Element Surface-Water System Model) 등이 開發되어 이용되고

* 嶺南大學校 工科大學 土木工學科 教授

** 嶺南大學校 工科大學 土木工學科 講師

있다. 한편 國內에서는 이정웅(1977)¹⁵⁾의 特性曲線法에 의한 洪水追跡, 남선우·박상우(1985)¹⁶⁾의 洪水追跡에서의 對流擴散모델, 유희정(1986)¹⁷⁾의 有限差分法에 의한 河川의 洪水波 解析, 그리고 한건연(1986)¹⁸⁾의 洪水波 解析을 위한 數值模型 등의 研究가 있었다.

河道追跡模型은 河道의 흐름을 나타내는 Saint Venant 方程式을 變形시켜 Dynamic Wave 方程式이나 Kinematic Wave 方程式으로 誘導할 수 있으며, 이들의 解를 구하는 方法은 解析의 方法, 圖式의 方法 및 數值解法으로 나눌 수 있다. 그러나 최근에는 컴퓨터에 의한 數值解法, 즉 Saint Venant式으로 표시되는 偏微分 方程式을 有限差分法에 의해서 解를 구하는데 explicit scheme과 implicit scheme이 널리 이용되어 왔다.

그러므로 본 研究에서는 河道追跡을 遂行하는데 있어서 解析方法은 흐름을 非定常流의 1次元流라 가정하고 Dynamic Wave 方程式을 implicit scheme에 의해서 解析하는 Operational Dynamic Wave型(NWS에서 Fread가 개발한 1992년 Version)을 適用토록 하였다.

따라서 본 研究에서는 河川流域의 流出過程 解析과 豫測에 필요한 降雨-流出模型¹²⁾으로서 流域流出過程을 再現시킬 수 있는 流域追跡模型^{13, 14)}을 適用하고 河道追跡模型의 適用에 의하여 流域의 洪水流出을 豫警報할 수 있는 豫測模型을 確立코자 하였다.

II. 河道流出模型

2.1 Dynamic Wave 模型

2.1.1 河道追跡 模型化

河川流域의 流出現象은 地表面流出과 河道追跡으로 나눌 수 있으며, 地表面流出은 支流流域別 小流域에 대하여 概念的 模型으로 流域流出을 計算하고 이들 小流域別로 計算된 流量은 다시 河道를 따라 再現시키게 된다. 특히 洪水時에 河道의 흐름은 非定常流이며, 흐름은 河道의 物理的인 要素에 크게 지배되고 있다. 그러나 河道의 흐름 特性과 物理的 要素에 따라 河道區間內에서 貯留量과 持續期

間은 그 변화가 심하며, 上流點의 水文曲線으로 부터 下流點의 水文曲線을 결정하기 위해서는 河道의 貯留效果에 대하여 엄밀한 分析이 필요하다. 河道의 洪水追跡을 위한 方法은 크게 水文學的 方法과 水理學的 方法으로 나눌 수 있다. 水文學的 追跡方法은 洪水波의 連續方程式에 기초를 둔 貯留方程式을 사용하고 있으며, 水理學的 追跡方法은 洪水時의 흐름을 水理學的으로 표시하는 非定常不等流의 支配方程式인 偏微分連續方程式 및 運動方程式을 사용하고 있다. 특히 背水의 영향이 심하고 河道斷面의 變動性이 심한 區間이나 洪水의 下流傳播를 追跡하는데는 水理學的 追跡法이 水文學的 追跡法보다 더욱 효과적이다.

水理學的 洪水追跡은 非定常流인 洪水流의 連續方程式과 運動量方程式인 Saint Venant方程式을 聯立해서 初期 및 境界條件에 따라 풀므로써 河道追跡을 수행할 수 있다. 그러나 이들 方程式의 형태는 偏微分方程式으로 표시되며, 方程式의 解를 구하는 方法으로는 解析的 方法, 圖式의 方法 및 數值解法으로 나눌 수 있다.

따라서 본 研究에서는 河道追跡을 수행하는데 있어서 흐름을 非定常流의 1次元流라 가정하고 運動量方程式 중에서 慣性力과 壓力項을 고려한 implicit scheme에 기초를 둔 Dynamic Wave 模型을 河道追跡의 基本 模型으로 選定하였다.

2.1.2 支配方程式의 誘導와 變形

河道에서 洪水流出은 非定常不等流이며, 이때 흐름을 支配하는 方程式은 連續方程式과 運動量方程式이다. 먼저, 非定常流를 支配하는 連續方程式은 河道의 微小區間 Δx 에서 流入量과 流出量의 차이인 貯留量의 변화와 같이 質量保存의 法則을 적용하여 河道의 單位幅當의 流量을 고려한 $A = y$ 및 $Q = AV$ 를 적용하면 식(2.1)과 같이 표시할 수 있다.

$$y = (\partial V / \partial X) + V(\partial y / \partial X) + (\partial y / \partial t) = 0 \quad (2.1)$$

다음으로, Newton의 第2法則에서 임의의 統制容積(control volume)에 작용하는 外力의 合은 運動量의 變化率과 같다. 따라서 河道의 運動量方程

式은 河道區間 Δx 에 작용하는 外力의 合과 河道區間 Δx 에서 運動量의 時間的 變化率에 따른 流速 V 가 時間 t 와 距離 X 에 따라 變하는 變數이므로 식(2.2)와 같이 표시할 수 있다.

$$(\partial V / \partial t) + V(\partial V / \partial X) + g(\partial y / \partial x) + (V / y)_i - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.2)$$

따라서 식(2.1)과 식(2.2)를 Saint Venant 方程式이라 하며, 이들 두 식을 聯立시켜 初期 및 境界條件에 맞추어 풀므로써 流速(V)과 水深(y)의 空間的(X) 및 時間的(t) 變化를 차례로 計算하면 (X, t)에서의 單位幅當의 流出量은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q(X, t) = V(X, t) \cdot y(X, t) \quad (2.3)$$

일반적으로 非定常不等流에서 慣性力과 壓力項은 매우 중요한 역할을 하므로 側方向流에 의한 運動量 變化를 무시할 때의 흐름을 dynamic wave 라 하며, 이 때의 連續方程式이나 運動量方程式은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$y(\partial V / \partial X) + V(\partial y / \partial X) + (\partial y / \partial t) \quad (2.4)$$

$$(\partial V / \partial t) + V(\partial y / \partial X) + g(\partial y / \partial X) + (V / y)_i - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.5)$$

여기서 dynamic wave는 水深에 비해서 水路幅이 넓은 自然河川에서의 洪水波의 移動이나 壩 破壞로 인한 下流의 洪水傳播를 대표할 수 있으므로 이들 計算을 위해서는 Saint Venant 方程式인 식(2.4) 및 식(2.5)를 풀어야 한다.

2.2 Dynamic Wave 模型의 數值解法

2.2.1 Implicit 有限差分法

implicit scheme은 支配方程式인 偏微分方程式을 有限差分式으로 표시할 때 임의의 한 時間 段階에서 모든 값이 前時間 段階에서의 모든 값으로 표시되기 때문에 非線形代數式(nonlinear algebraic

equation)을 反復 計算(iteration)에 의해서 解를 計算하게 되므로 未知數를 동시에 구하게 된다. implicit scheme은 explicit scheme의 數值的 安定性이 요구되는 時間段階의 크기(time-step size)의 限界性을 극복하기 위하여 연구되기 시작하였다. 즉, explicit scheme이 解의 安定性에 필요한 時間 段階가 매우 짧은 時間이 필요하다면 implicit scheme은 이보다 훨씬 긴 時間段階로서도 安定性을 確保할 수 있다.

따라서 implicit 有限差分法은 weighted four point方法을 이용할 수 있으며, 空間 導函數 $\partial V / \partial x$ 와 變數 V 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 空間 導函數는 (j)번째와 ($j + 1$)번째의 다른 時間帶에서 計算되며, 이는 $(V_{i+1}^j - V_i^j)$ 와 $(V_{i+1}^{j+1} - V_i^{j+1})$ 로 나타난다. 여기서 加重 factor θ 는 空間 導函數를

$$\partial V / \partial x \approx \theta(V_{i+1}^{j+1} - V_i^{j+1}) / \Delta x + (1 - \theta)(V_{i+1}^j - V_i^j) / \Delta x \quad (2.6)$$

로 나타내는데 사용되며, 平均值 V 는

$$V = \theta(V_{i+1}^{j+1} - V_i^{j+1}) / 2 + (1 - \theta)(V_{i+1}^j - V_i^j) / 2 \quad (2.7)$$

로 나타낼 수 있다.

2.2.2 有限差分 方程式

短時間에 發生하는 豪雨에 의한 각 支流의 洪水 流出이 河川本流로 合流하여 넓은 河幅의 河川으로 流入되는 洪水流의 傳播는 壩破壞로 인한 洪水波의 形態와 유사하며, 이런 波形을 模擬시키기 위해서는 Saint-Venant 方程式이 필요하다.

Saint-Venant 方程式을 이용하여 動力學的 洪水 追跡을 실시하기 위한 4개의 格點을 사용한 有限 差分形態의 連續量方程式은 식(2.8) 및 식(2.9)의 형태로 變形시켜 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \theta(Q_{i+1}^{i+1} - Q_i^{i+1}) - q_i^{i+1} \Delta x_i) + (1 - \theta) \\ & (Q_{i+1}^i - Q_i^i - q_i^i \Delta x_i) + (\Delta x_i / 2\Delta t_i) \\ & \{(A + A_0)_i^{i+1} + (A + A_0)_{i+1}^{i+1} \\ & - (A + A_0)_i^i - (A + A_0)_{i+1}^i\} = 0 \quad (2.8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Delta x_i / 2\Delta t_i (Q_i^{i+1} + Q_{i+1}^{i+1} - Q_i^i - Q_{i+1}^i) \\ & + \theta(\beta Q^2 / A)_{i+1}^{i+1} - (\beta Q^2 / A)_i^{i+1} \\ & + g A_i^{i+1} \{h_{i+1}^{i+1} - h_i^{i+1} + (S_f)_i^{i+1} \Delta x_i \\ & + (S_c)_i^{i+1} \Delta x_i\} - (\beta q V_x)_i^{i+1} \Delta x_i \\ & + (W_f B)_i^{i+1} \Delta x_i + (1 - \theta) \\ & \{(\beta Q^2 / A)_{i+1}^i - (\beta Q^2 / A)_i^i\} \\ & + g A_i^i \{h_{i+1}^i - h_i^i + (S_f)_i^i \Delta x_i \\ & + (S_c)_i^i \Delta x_i\} - (\beta q V_x)_i^i \Delta x_i \\ & + (W_f B)_i^i \Delta x_i = 0 \quad (2.9) \end{aligned}$$

따라서 Manning의 공식은 S_f (摩擦傾斜)에 관하여 풀 수 있고 $|Q|$ 는 크기 Q^2 를 가진다. 한편 흐름이 常流인가 射流인가에 따라서 S_f 가 陽의 記號나 陰의 記號를 가지며, 河道에 있어서 斷面의 擴張과 縮小일때에 생기는 損失에너지는 擴張 損失係數 K_e 와 함께 上流流速의 差의 平方根에 比例하고 이를 식으로 나타내면 식(2.10)과 같다.

$$\begin{aligned} (S_c)_i &= \{(K_e)_i / 2g \Delta x_i\} \\ & \{(Q/A)_{i+1}^2 - (Q/A)_i^2\} \quad (2.10) \end{aligned}$$

2.2.3 有限差分 解法

非線形方程式의 體制 構成은 $(j+1)$ 時間帶의 未知의 h 와 Q 의 函數關係로 표시될 수 있으며, Newton-Raphson方法에 의해 每 時間帶 마다 未知의 $2N$ 項은 試算値가 非線形方程式에 代入되어서 $(j+1)$ 時間의 計算過程을 거쳐 解에 접근되어 간다. 이들 Q 와 h 의 試算値는 처음 條件 또는 全時間帶에 걸쳐 計算된 數値로 부터 결정된다. 試算値를

非線形方程式에 代入함으로써 $2N$ 개의 殘差가 나타나고 k 번째 反復 計算에 의한 殘差를 구할 수 있다.

殘差가 거의 0에 접근하도록 하여 未知의 Q 와 h 의 값을 구해주면 方程式을 풀 수 있다. 非線形代數 시스템 方程式을 푸는데는 Newton-Raphson 反復法을 사용할 수 있으며, 다음과 같이 벡터로 구성되는 식(2.11)의 시스템 方程式을 생각할 때

$$f(x) = 0 \quad (2.11)$$

여기서 $x = (Q_1, h_1, Q_2, h_2, \dots, Q_N, h_N)$ 는 未知方程式 벡터이고 k 번 反復 후에는 $x_k = (Q_1^k, h_1^k, Q_2^k, h_2^k, \dots, Q_N^k, h_N^k)$ 가 되며, 이러한 非線形方程式을 線形化하면

$$f(x^{k+1}) \approx f(x^k) + J(x^k)(x^{k+1} - x^k) \quad (2.12)$$

여기서, $J(x^k)$ 는 Jacobian으로서 x^k 에 구해져서 $f(x)$ 의 1차 偏微分 값으로 구해져서 係數行列이며, 식(2.12)의 오른쪽 項은 x^k 의 線形벡터函數이다. 근본적으로 反復過程은 殘差 $f(x^{k+1})$ 가 0으로 되도록 x^{k+1} 을 결정하는 過程이며, 이러한 過程은 $f(x^{k+1}) = 0$ 으로 두고 식(2.12)를 쓰면

$$J(x^k)(x^{k+1} - x^k) = -f(x^k) \quad (2.13)$$

으로 부터 解를 구하고, 알고 있는 Δx^k 로 부터 x^{k+1} 을 결정한다. 이러한 過程은 $(x^{k+1} - x^k)$ 가 許容値 보다 작을 때까지 反復된다. 식(2.12)에서 $J(x^k)$ 는 h 와 Q 에 대한 非線形方程式의 Jacobian이고 $-f(x^k)$ 는 殘差벡터의 陰의 값이다.

III. 流域의 適用 및 分析

본 研究에서 概念的模型的 理論과 알고리즘을 實際 河川流域에 적용하여 流域流出計算을 실시하고 그 결과를 河道追跡模型인 Dynamic Wave模型에 적용시켜 流域의 綜合的인 洪水豫測을 수행할 수 있도록 하였다.

한편 適用對象 流域은 비교적 精밀한 降雨, 水位 및 流量 등의 資料가 있는 IHP 洛東江 渭川代表流域(A = 472.5km²)을 선정하였으며, 流域內의 降雨 觀測所(自記) 11개소와 水位觀測所(自記) 6개소는 1982년부터 1990년 현재까지 약 8년간에 걸쳐서 水文觀測이 실시되고 있다. 河道區間의 測量成果는 1982년에 IHP 研究課業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 인용하였다.

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. 3. 1(a)와 같이 本流와 비교적 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. 1(b)와 같이 6개의 小流域(B₁, B₂, ..., B₆)과 4개의 河道區間(C₁, C₂, C₃, C₄)으로 나누어 概念的으로 표시하였다.

따라서 流域의 河道追跡 過程은 上流에서 本流를 따라 小流域의 流域流出水文曲線을 각 河道에 再現시키면서 河道의 追跡과 合算을 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.

3.2. 模型媒介變數의 推定

洪水豫測을 위한 流出模型은 앞에서 제시한 流域流出模型과 河道流出模型으로 나누어 각 模型의 媒介變數들을 推定토록 하였다. 먼저, 流域流出模型인 概念的模型의 媒介變數 推定은 模型의 効用度(ME)를 기준으로 自動檢定(Auto-calibration)이 될 수 있도록 하였다. 다음으로, 河道流出模型은 Fread가 開發한 DWOPER模型(NWS, 1992 Version)을 중심으로 渭川流域의 最適模型 媒介變數를 推定토록 하였다.

3.2.1 河道의 條件

洪水流의 河道追跡은 각 水位標 地點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 流域流出模型으로부터 計算된 流域流出을 각 河道區間에 再現시켰으며, 이 때 河道의 幾何學的 因子인 線形性和 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)別 測點과 距離 및 累加距離는 Fig. 3. 2와 같다.

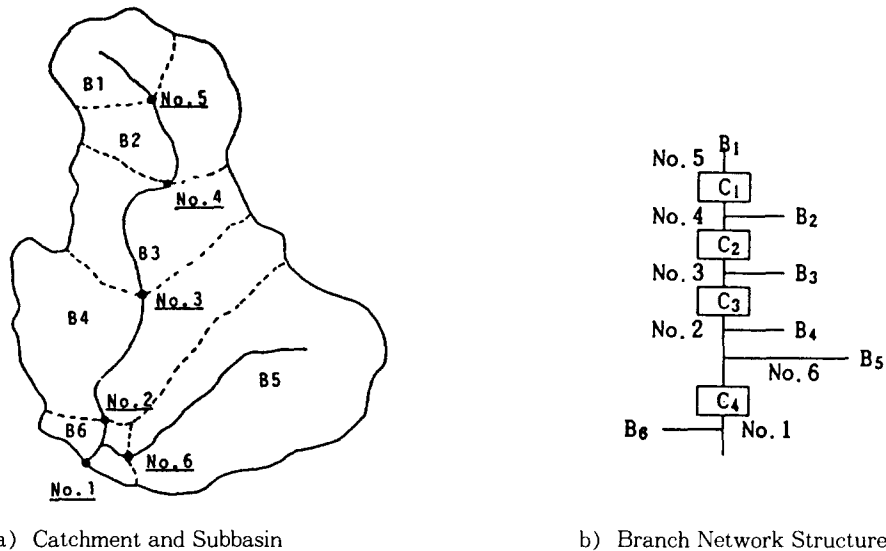


Fig. 3. 1. Stream Network Study Basin

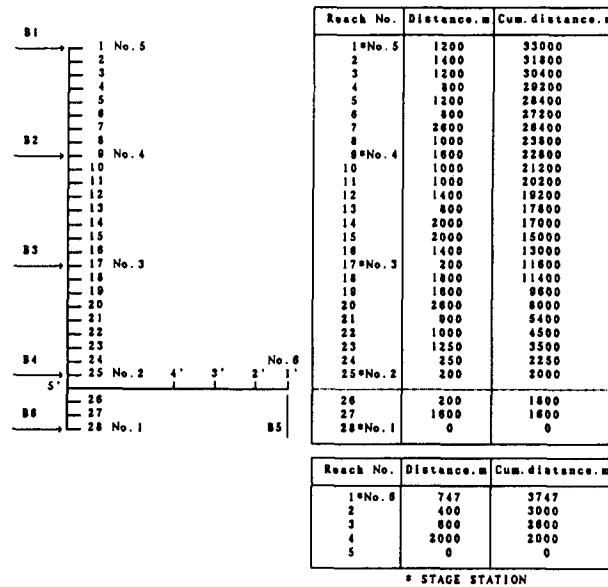


Fig. 3.2 System Schematic of Wi Stream

한편 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 調査하여 判斷의 資料로 하고 이를 Horton의 標準値와 비교하여 河道의 小區間別 粗度係數의 初期値로 사용하였다.

3.2.2 境界條件과 初期條件

最上流部 斷面과 最下流部 斷面에서 취할 수 있는 境界條件은 다음 3가지 경우 중 하나가 된다.

- ㉑ $Q = Q(t)$
 - ㉒ $y = y(t)$
 - ㉓ $Q = f(y)$
- (3.1)

河道에 걸쳐서 나타나는 모든 格子點에 대해 이미 알고 있거나, 가정에 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 本流 및 支流의 最上流部 斷面에서의 境界條件은 ㉑ $Q = (t)$ 條件을 채택하였으며, 本流 最下端에서는 ㉒ $y = y(t)$ 條件을 사용하였다. 또한 河道斷面 測量成果 資料와 각 河道區間的 初期流量을 이용하여 水深을 계산하고 이를

定常流로 가정한 다음 이 때의 流量과 水深을 初期條件으로 사용하였다.

3.2.3 解의 收斂條件

인접한 時間線上의 두 개의 점 사이의 위치를 지정하는 加重 Factor θ 는 數值解析 技法에서 解의 安定性에 큰 영향을 주며, 0에서 1까지의 범위를 가진다. θ 가 0이 되면 數值解析 方法은 explicit scheme이 되며, $0.5 < \theta < 1$ 일 때 安定解를 가지고 이 때 微分方程式은 아무런 條件이 없이 構成된다. $\theta < 0.5$ 일 때 安定한 解를 구하기 위해서는 微分方程式을 構成하는 條件이 필요하고, θ 의 값이 0.5일 때 漸變流이고 粗度係數가 큰 河道의 흐름에서 정확하고 安定한 解를 가진다. 반면에 急變流이고 粗度係數가 작은 河道의 흐름에 대해서는 解가 振動하게 되고, θ 가 0.5에서 1에 가까와 짐에 따라 數值解析上 解의 精密度는 떨어진다. θ 의 값이 0.5이고 解의 安定性이 낮을 경우 θ 를 0.55에서 0.60 정도로 증가시키므로써 解의 安定性을 증가시킬 수 있다.

따라서 θ 의 값을 0.5부터 시작함으로써 解의 不正確性을 감소시킬 수 있으며, 가장 적당한 θ 값은 河道의 摩擦成分과 河道의 傾斜에 따라서 결정된다. Amein과 Fang(1970)은 $\theta = 0.5$ 인 4개 格子

를 가지는 implicit scheme를 제안하였으며, Fread (1981)⁹⁾에 의해서 개발된 Dam Break洪水追跡모델에서는 $\theta=0.6$ 을 사용하고 있다. 본 研究에서는 θ 의 값을 0.5에서 1.0까지 다양하게 변화시켜 본 결과 0.55에서 0.63까지의 범위에서 비교적 安定한 解를 얻을 수 있었다.

3. 2. 4 水深의 許容值, 流量의 許容值 檢討

Newton의 反復計算法에서 水深의 許容值는 3 cm을 사용하여 비교적 만족한 結果를 얻을 수 있었고, 流量의 許容值는 5CMS(本流) 및 2CMS(支流)를 사용하였으며, Newton의 反復計算法에 사용되는 最大 反復 횟수는 10회를 사용하였다. 여기서 Newton의 反復計算法에 사용되는 水深과 流

量의 許容值와 最大 反復 횟수는 컴퓨터 實行時間과 收斂條件에 큰 영향을 미치므로 신중한 선택이 필요함을 알 수 있었다.

本 研究에서 사용된 DWOPER模型은 대형기종의 컴퓨터 뿐만 아니라 개인용 컴퓨터로도 충분히 수행이 가능한 프로그램이었으며, 본 프로그램은 1개의 河道區間을 계산하는데 IMB PC 386호환기종과 IBM AT호환형 기종에서 각각 약 1분 및 5분의 實行時間이 소요되었다. 또한 河川의 幾何學的 特性을 나타내는 測量資料가 實際 計算에 있어서 收斂條件 및 模型의 精度에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

Table 3.2 Results of Discharge and Peak Time

Storm	Peak Discharge(CMS)					Peak Time(hr)		
	No.	No. 2	No. 3	No. 4	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
1983.6.20	582.2	451.3	237.8	201.1	18	19	17	14
	(576.4)	(400.3)	(256.5)	(186.5)	(19)	(18)	(16)	(15)
1986.9.19	294.3	193.5	107.0	89.6	45	44	45	45
	(310.2)	(158.1)	(87.4)	(73.2)	(45)	(45)	(34)	(45)
1987.7.14	829.5	519.7	315.9	232.3	34	35	34	36
	(865.6)	(438.1)	(266.3)	(195.8)	(34)	(36)	(35)	(35)
1987.7.22	181.0	136.1	82.6	62.9	27	26	26	25
	(193.4)	(119.9)	(72.7)	(55.8)	(27)	(25)	(25)	(24)
1989.7.11	182.4	128.4	75.3	40.1	24	23	30	28
	(174.1)	(113.1)	(66.3)	(35.3)	(24)	(22)	(29)	(27)

* () : Observed Value

Table 3.3 Results of Sensitivity Analysis

STORM	No. 1			No. 2			No. 3			No. 4		
	BIAS	RMS	ME	BIAS	RMS	ME	BIAS	RMS	ME	BIAS	RMS	ME
1983.6.20	31.18	22.26	0.976	18.78	13.27	0.979	9.08	5.57	0.985	7.35	4.79	0.985
1986.9.19	28.12	20.07	0.929	13.73	9.76	0.926	6.90	4.96	0.923	5.24	3.79	0.918
1987.7.14	55.66	33.71	0.961	31.71	21.05	0.951	18.15	11.71	0.954	13.07	8.40	0.958
1987.7.22	16.06	12.17	0.951	8.56	6.68	0.947	4.79	3.74	0.949	3.31	2.61	0.954
1989.7.11	13.41	10.36	0.939	7.88	6.13	0.950	4.28	3.29	0.962	2.64	2.10	0.957

RMS : Root Mean Square, ME : Model Efficiency, BIAS : Bias

3.3. 分析結果의 比較考察

본 研究에서 수행된 河道追跡模型은 DWOPER 模型으로서 流域流出模型에서 가장 우수한 模型으로 선정된 傳達函數模型에 의해서 計算된 流出을 DWOPER模型에 적용시킨 結果에 대하여 適合性을 分析하였다. 適用地點은 본 研究의 分析流域 中에서 水位觀測地點인 武城(No.1), 竝川(No.2), 美城(No.3) 및 古老(No.4) 地點에 既往의 5개 豪雨를 대상으로 河道追跡을 실시하여 洪水流出水文曲線을 얻고 이를 實測 洪水水文曲線과 比較하였다.

첫째, 洪水流出水文曲線의 比較에서 洪水流의 河道追跡에 의한 洪水流出水文曲線은 대체로 實測 洪水流出水文曲線의 上昇部, 尖頭部 및 減少部에서 거의 접근된 河道追跡이 되고 있음을 알 수 있었다.

둘째, 洪水流出水文曲線의 尖頭部의 適合性을 判定할 수 있는 尖頭發生時間은 각 地點의 既往의 豪雨를 대상으로 洪水流出을 追跡해 본 結果 Table 3.2와 같았다. 여기서 計算된 尖頭流量은 대체로 實測值에 接近되고 있으나 전반적으로 實測值보다 작은 값이 計算되었으며, 尖頭發生時間은 河道追跡 結果와 實測水文曲線을 比較해 볼 때 역시 1時間 以內의 차이를 나타내고 있으므로 河道追跡이 비교적 잘 수행되고 있음을 알 수 있었다.

셋째, 適合性 判斷에 있어서는 각 水位標 地點에 대하여 既往의 豪雨를 대상으로 概念的 模型과 河道追跡 模型을 결합시킨 計算值와 實測值를 대상으로 RMS, Bias 및 ME는 Table.3.3과 같았다. 여기서 RMS는 流域流出模型 보다 적게 나타나고 있으며, ME와 Bias는 대체로 流域流出模型보다 불리한 것으로 判定되었다. 이러한 현상은 河道追跡의 過程에서 誤差가 累積되어 발생한 것으로 判定되며, 이는 DWOPER모형이 원래 緩傾斜의 河川을 대상으로 개발되었으나 본 分析에 적용한 流域은 中小河川流域으로서 비교적 急傾斜 河川이므로 適用에 있어서 보다 많은 豪雨를 對象으로 分析과 檢討가 필요한 것으로 判定된다.

3.4 模型의 適用

지금까지 河道追跡模型을 대상으로 새로운 模型의 構造와 理論을 전개하고 이를 수행할 수 있는 알고리즘과 프로그램을 개발하여 河道流域의 洪水流를 豫測할 수 있도록 앞에서 分析하여 推定한 各模型의 媒介變數를 他 豪雨事象(1989. 7. 13 및 1989. 8. 21 發生)에 대하여 適用하고 適用結果를 分析 檢討하였다.

본 研究에서 筆者가 연구 개발한 概念的 模型에 의하여 計算된 流出을 DWOPER 模型에 적용시킨 結果에 대하여 適合性을 分析하였다. 適用地點은

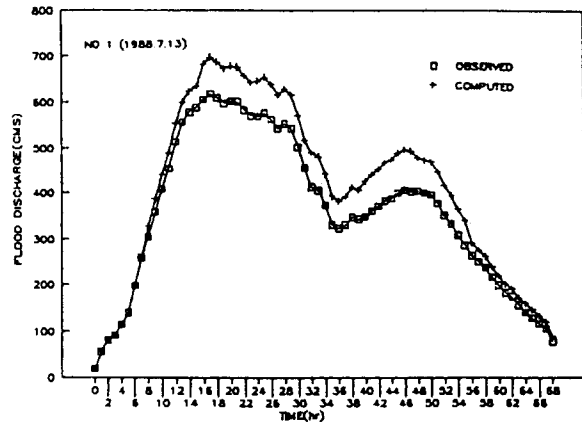


Fig. 3.3 (a) Comparison of Flood Hydrographs by Channel Routing Model

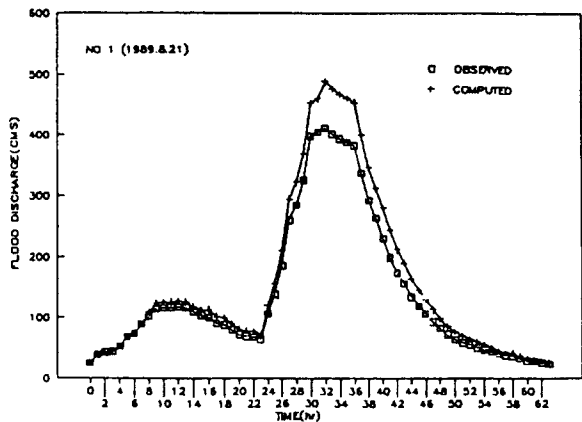


Fig. 3.3 (b) Comparison of Flood Hydrographs by Channel Routing Model

본 研究의 分析流域 중에서 最下流의 水位觀測地點인 武城(No. 1) 地點에 대해서 2개의 適用 豪雨를 대상으로 河道追跡을 실시하여 洪水流出水文曲線을 얻고 이를 實測 洪水水文曲線과 비교한 결과는 다음과 같았다.

첫째, 洪水流出水文曲線의 비교에서 洪水流의 河道追跡에 의하여 계산된 洪水流出水文曲線은 Fig. 3.3(a) 및 (b)와 같이 대체로 實測洪水流出水文曲線과 거의 일치하는 결과를 나타내고 있었으며, 水文曲線의 上昇部, 尖頭部 및 減少部에서 거의 접근된 河道追跡이 되고 있음을 알 수 있었다.

둘째, 洪水流出水文曲線의 尖頭部의 適合性を 判定할 수 있는 尖頭流量과 尖頭發生時間은 Table 3.4와 같았다. 먼저 計算된 尖頭流量은 대체로 實測值에 접근되고 있으나 전반적으로 實測值보다 작은 값이 計算되었으며, 그리고 尖頭發生時間은 河道追跡 結果와 實測水文曲線을 比較해 볼 때 역시 近소한 時間 差異를 나타내고 있으므로 河道追跡이 비교적 잘 수행되고 있음을 알 수 있었다.

Table 3.4 Results of Peak Discharge and Peak Time(No. 1)

Storm	Peak Discharge(CMS)		Peak Time(hr)	
	Observed	Computed	Observed	Computed
1988. 7. 13	618.8	697.7	17	17
1989. 8. 21	411.6	488.3	32	32

Table 3.5 Results of Sensitivity Analysis(No.1)

(Unit : CMS)

Storm	Bias	RMS	ME
1988. 7. 13	50.54	58.44	0.906
1989. 8. 21	21.13	30.75	0.951

* RMS : Root Mean Square, ME : Model Efficiency, Bias

셋째, 適合性 判定에 있어서는 RMS, Bias 및 ME는 Table 3.5 과 같았다. 여기서 RMS, ME 및 Bias는 대체로 流域流出模型보다 불리한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 河道追跡의 過程에서 誤差가 累積되어 발생한 것으로 판단되며, 이는 DWOPER模型이 원래 緩傾斜의 河川을 대상으로

개발되었으나 본 分析에 적용한 流域은 中小河川流域으로서 비교적 急傾斜 河川이므로 適用에 있어서 보다 많은 豪雨를 對象으로 분석과 檢討가 필요한 것으로 판단된다.

IV. 結 論

본 研究에서는 洪水豫測을 위한 確定論的 流出模型을 개발하기 위하여 流出模型을 概念的으로 표현할 수 있는 流域流出 模型과 洪水流의 河道追跡 模型을 確定論的 觀點에서 檢討하여 模型化를 시도하였다. 특히, 非正常流의 河道追跡에 있어서는 流域의 綜合的인 流出解析과 豫測을 수행할 수 있는 Dynamic Wave模型의 適用에 중점을 두고 研究하였다. 따라서 지금까지 研究된 流域流出模型과 河道追跡 模型에 대한 結果를 정리하면 다음과 같다.

(1) 非正常不等流의 河道追跡에서 Dynamic Wave 模型을 適用하고, 流域流出模型과 結合시킨 結果 實測值에 매우 접근하는 精確한 洪水豫測이 수행됨을 알 수 있었다.

(2) 時間線上 두개의 점 사이의 위치를 지정하는 가중 Factor θ 는 數值解析 技法의 解를 수렴시키는 데에 큰 영향을 미친다. 따라서 θ 가 0.5~1의 범위에서 일반적으로 安定解를 구할 수 있으나, 본 研究에서는 θ 의 값을 0.5에서 1.0까지 0.01의 증분치로 다양하게 변화시켜 본 結果 0.55에서 0.63까지의 범위에서 비교적 安定한 解를 얻을 수 있었다.

(3) 수치해석 기법인 Newton-Rapson법에서 오차의 허용치 ϵ 은 반복된 step수를 결정하는 중요한 요소가 된다. 따라서 본 研究에서는 水深의 허용치를 3cm로 하고 流量의 허용치는 本流에서 5CMS, 支流에서 2CMS, 最大 演算 反復數를 10회로 할 때 解의 收斂條件과 演算時間을 둘다 만족시킬 수 있었다.

감사의 글

본 研究는 韓國學術進興財團의 '93공모과제(지방대 육성 중점) 학술연구조성비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사한다.

參 考 文 獻

1. Amein, M.(1966) Stream Routing on Computer by Characteristics, Water Resources Research, Vol. 2, No.2, No.1.
2. Amein, M. and Fang, C. S. (1970) Implicit Flood Routing in Natural Channels, J, of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 96, No. HY 12.
3. Price, R. K.(1974) Comparison of Four Numerical Methods for Flood Routing, J, of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 100, No. HY 7.
4. Yevjevich, V. and Barnes, A. H.(1970) Numerical Computer Methods of Solution, Hydrology Paper, Colorado State University.
5. Kabir, N.(1984) Numerical Flood Routing for Natural Channels, Ph. D. Paper.
6. Danny L. and Fread, M.(1981) Some Limitations of Dam-Break Flood Routing Models, ASCE Fall Convention, St. Louis, Missouri.
7. Fread, D. L.(1984) An Implicit Dynamic Wave Model for Mixed Flows in Storm Sewer Networks, Intl. Symp. on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control, Univ. of Kentucky, Lexington, KY, pp. 215~222.
8. Fread, D. L.(1987) NWS Dam Breach Models for Microcomputers, ASCE Annual Conference of Irrigation and Draining Division, Portland, Oregon.
9. Fread, D. L. and Lewis, J. M.(1988) FLDWAV : Generalized Flood Routing Model, ASCE, Proceedings of National Conference on Hydraulic Engineering, Colorado Springs, Colorado, pp. 6.
10. Thompson, J. and Wesley P. James(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 22101-2296.
11. Moore, R. J. and O'Connell, P. E.(1979) Real-Time Forecasting of Flood Events Using Transfer Function Noise Model, Part I, A Report on Work Carried Out Under Contract to the Water Research Centre, Medmenham, UK.
- Moore, R. J.(1980) Real-Time Forecasting of Flood Events Using Transfer Function Noise Models, Part 2, A. Report on Work Carried Out Under Contract to the Water Research Centre, Medmenham, UK.
12. 池洪基·南宮祐·李舜鐸(1986) 河川流出豫測을 위한 降雨-流出모델, 韓國水文學會誌, 製19卷, 第4號
13. 池洪基(1989) 概念的모델에 의한 河川流出豫測, HBV모델 및 Tank모델을 中心으로, 嶺南大學校 工業技術研究所 研究報告, 第17卷, 第1號.
14. 池洪基(1989) 數值解法에 의한 洪水追跡모델, 嶺南大學校 工業技術研究所 研究報告, 第17卷, 第2號.
15. 이정웅(1977) 特性曲線法에 의한 洪水追跡, 延世大學校 碩士學位論文.
16. 南宮祐·박상우(1985) 對流擴散모델을 이용한 洪水追跡에 관한 研究, 韓國水文學會 論文集, Vol. 18, No.3.
17. 유희정(1986) 有限差分法에 의한 河川의 洪水波解析에 관한 研究, 中央大學校 博士學位論文.
18. 한건연(1986) Fill Dam의 破壞에 따른 洪水波豫測模型的 開發, 延世大學校 博士學位論文.
19. 건설부, 국제수문개발계획(IHP) 대표유역 연구조사 보고서, 1982~1989.
20. 建設部, 洛東江 沿岸開發 設計書, 1983.