

水路網크기를 이용한 流出模型

A Runoff Model based on the Stream Magnitude

李	元	煥
Lee,	Won	Hwan
全	敏	遇
Jun,	Min	Woo

Abstract

A runoff model was established for the direct runoff hydrograph at each subareas by obtaining the storage coefficient based on stream magnitudes of geomorphic parameters. For this, the relationship between flowsection and channel distance from the outlet of each subareas was assumed as nonlinear equation, and compared with linear one.

The applicability of the runoff model to the real watershed was tested for the Bochung river basin. The results of the analysis show that the model was approved to be used for the prediction of small watershed having no runoff records and a linear equation between flowsection and channel distance from the outlet of each subareas was more similar to the observed data for the upper subarea with a steep slope and small area, on the other hand, nonlinear equation for the lower subarea with mild slope and relatively large area.

要 旨

本 연구는 流域의 地形學的 因子인 水路網크기 (Stream Magnitude) 를 기초로 하여 河道貯留만을 고려한 貯留常數를 決定하여, 各 小流域出口에서의 流出을 豫測하기 위한 方法 (流出模型) 을 연구한 것으로서, 河道媒介變數의 規則的인 變化性을 推論하기 위하여 Shreve 의 水路網크기 決定法을 適用하였다. 이를 위하여 흐름 斷面積과 出口로부터 河道를 따른 거리와의 關係를 非線型式으로 나타냄으로써 線型式에 의한 結果와 比較하였다.

本 연구에서 確立한 方法을 錦江水系內의 支流인 報靑川流域에 適用하므로써 實測值와의 比較 檢討를 통하여 未計測流域에 대한 適用性을 立證하였으며, 특히 河川傾斜가 急한 上流流域에서는 1次式, 그리고 河川傾斜가 완만한 下流流域에서는 3次式이 보다 더 實測值에 近似함을 알 수 있었다.

*正會員·延世大 土木工學科 教授

**正會員·忠北大 土木工學科 副教授

1. 序 論

未計測流域에서 利水 및 治水目的을 위한 水工 構造物의 最適設計을 위하여서는 보다 精確한 降雨-流出解析이 要求된다. 流域 出口에서의 水文曲線은 水文氣象因子와 地形 및 地質學의 因子에 의하여 영향을 받으며, 또한 水路網의 構成狀態에 의하여 직접적인 지배를 받는다.

일반적으로 水文曲線의 模擬發生技法은 貯水池 追跡模型에 기초를 두며 이와 같은 概念의 模型은 單一貯水池要素⁽¹⁾로 구성되는 간단한 구조를 갖거나, 一連의 貯水池要素^(2,3)로 구성된다.

流出解析에 관한 최근의 연구는 地形學的 媒介變數와 流出過程의 空間的 變化性의 效果에 중점을 두어 流出解析을 하므로서 地形學的 因子와 流出模型의 媒介變數사이의 物理的 特性을 논해주고 있다. 대표적인 例로서, 流域의 地形學的 媒介變數와 瞬間單位圖를 결합하므로서 流出解析을 한 Rodriguez-Iturbe와 Valdes⁽⁴⁾, 確率論的 接近方法에 의하여 瞬間單位圖의 媒介變數를 地形學的 因子로 나타낸 Gupta 등⁽⁵⁾, 地形學的 接近方法에 의하여 有效降雨의 空間的 變化性을 定量的으로 분석한 Corradin과 Singh⁽⁶⁾ 등의 연구를 들 수 있다.

Bell과 Vorst⁽⁷⁾는 全流域을 地形 및 地質學의 特性에 따라 분류하여 各 小流域에서의 地形學的 媒介變數를 획득하므로서 流出解析을 하였으며 媒介變數들의 水文學的 유의성을 논하였다. 이를 위하여 貯留量과 流出量의 非線型性이 全流域에 대하여 均一하며, 흐름단면적과 河道거리와의 關係를 線型性으로 가정하였다.

本 연구에서는 地形學的 因子 중 水路網크기, 흐름단면적 및 河道거리에 기초하여 河道貯留 常數를 결정하므로서 未計測流域에서의 流出을 豫測할 수 있는 方法을 確立하였으며, 貯留量과 流出量에 관한 非線型性의 空間的 變化性을 나타내기 위하여 全流域을 水位觀測地點에 따라 小流域으로 구분하므로서 貯水池追跡을 실시하였다. 이와 같은 小流域에서의 流出量算定을 위하여 河道貯留만을 고려하였으며, 흐름단면적과 本流를 따른 河道거리와의 關係를 非線型式으로 確立하므로서 貯留常數를 결정하였다. 本 연구의 結果로 確立된 流出模型의 適用性을 檢定하기 위하여 錦江水系內의 報青

川 流域을 選定하여 實測值와 比較分析하였다.

2. 流域의 地形學的 構造: 水路網 크기

自然河川流域에서 流出現象은 水文學的, 地形學的 特性因子에 의하여 多樣한 應答特性을 나타낸다. 이와같은 河川流域의 地形學的 構造의 定量的 分析은 Strahler [8]의 次數法則 또는 Shreve [9]의 水路網크기 (stream magnitude) 결정법에 의하여 規則性있게 나타낼 수 있다. Strahler의 方法은 水路網의 構成形態를 분석하는데 편리한 반면에 Shreve의 方法은 河川의 水路網 構成의 크기를 比較하는데 有利하다.

Shreve의 水路網크기 결정법은 支流를 갖지않는 溪流를 크기 1이라하고 크기 m과 n가 결합하면 크기 (m+n)의 河道를 형성한다. 그러므로 河道區間內 임의 支點에서의 水路網크기는 결국 그 流域內 계류의 數와 같다. 이를 系統的으로 나타내면 그림 1과 같다.

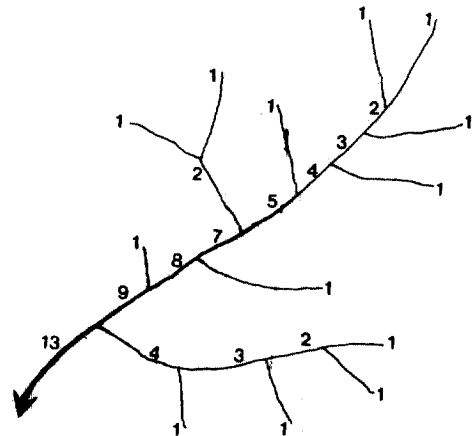


그림 1. 水路網 크기의 概念圖

3. 地形學的 媒介變數

河道흐름은 水文曲線의 모양에 직접적인 영향을 주기때문에 河道에서의 地形學的 特性因子는 流出解析의 重要한 要素이다. 河道特性值은 水源(溪流)에서 出口까지 河道를 통하여 흐르는 시간을 지배하며 흐름단면적-流出量 關係에 영향을 미친다.

河道區間內 임의 地點에서의 흐름단면적 Y, 流出量을 Q, 流速을 V 라 하면 흐름단면적과 流速은 다음의 식(1) 및 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = A Q^B \quad (1)$$

$$V = \alpha Q^\beta \quad (2)$$

여기서 A, B, α , β 는 各河道斷面에서 흐름에 관한河道特性値의 조합된 효과를 나타내는媒介變數이며水路網크기에 따라 변한다.

이와같은水路網크기는定量化를 위하여 Shreve의 방법을 택하였으며, 媒介變數 A, B, α , β 와水路網크기간의回歸分析을 통하여水路網크기에 대한媒介變數의 규칙적인變化性을推論할 수 있다.

4. 流出追跡模型

流域內的降雨는流域特性因子的 영향을 받아出口에서流出로 나타난다. 이와 같은流域特性的空間的變化를 나타내기 위하여 Laurensen 模型 [3]을 택하여流出解析을 하였다. Laurensen 模型은全流域으로 분할하여有效降雨의空間的分布를 고려하였으며, 임의小流域으로부터의流出을 다음小流域으로의入力으로 하여貯水池追跡을 실시하는 것이다.

各小流域에서貯留量 S와流出量 Q는 다음式 (3)과 같이非線型關係를 갖는다고 가정한다.

$$S = K Q^m \quad (3)$$

여기서 K, m은各小流域에 대하여 결정하여야 할常數이다.

K와 m은일반적으로觀測된降雨-流出資料를 사용하므로最適化過程에 의하여 결정될 수 있으나, 이와같은最適化過程은不變的物理的特性을 갖는計測된流域에만 적용할 수 있고, 同一流域에서 각각 다른觀測期間에 대하여相異한最適値들이 얻어진다⁽⁴⁾.

Mein 等⁽¹⁾은 흐름단면을廣幅矩形斷面으로 가정하고, Manning의平均流速公式를 적용하므로서 K를 다음式(4)와 같이 나타내었다.

$$K = \frac{n^{0.6} D_{0.4} L}{P^{0.3}} \quad (4)$$

여기서 D=河川幅(m)

I =水路傾斜

L =水路길이

式(4)는 다음과 같은假定을 기초로 하고 있다.

(1) 모든小流域에서의貯留는小流域內的本流河道에서만 발생한다.

(2) 小流域內的河道크기, 粗度 및 流量은全區

間에 걸쳐一定하다.

Bell과 Vorst [7]는 두번째 가정에 대하여全流域에서河道 거리에 따른 흐름단면적이線型的으로 변화하며, 全流域에 대하여 m을一定하다고 가정하므로서常數 K를式(5)와 같이 나타내었다.

$$K = \frac{L}{2} \left[A_0 + A_L \left[\frac{W_L}{W_0} \right]^B \right] \quad (5)$$

여기서添字 0은小流域出口점에서의 값이며, 添字 L은小流域本流始點에서의 값을 의미하며, L은小流域本流의入口로부터出口點까지의水路길이 그리고 W는流域面積을 의미한다.

本 연구에서는 m을水路網크기에 따르는變數로 보았으며, K와 m을地形學的媒介變數로 나타내기 위하여 다음의變數를 정의하였다.

X = 小流域出口로부터上流方向으로河道를따른 임의점까지의 거리(km)

t = 시간(sec)

S(X, t) = 出口로부터上流方向으로 임의거리 X인地點에서의河道貯留量(m³)

Y(X, t) = 小流域出口에서의流出量(m³/s)

Q₀(t) = 小流域出口에서의流出量(m³/s)

Q_L(t) = 小流域本流始點에서의流入量(m³/s)

S₀(t) = 小流域本流에서의河道貯留量

a(t), b(t) = 시간에 따른貯留量的變化를 나타내는變數

일반적으로河道 흐름단면적 Y는流域出口로부터上流方向으로의 거리 X가 증가함에 따라 감소한다. 따라서本 연구에서는實測가능한境界條件의數를 고려하여 이들의關係를 다음式(6)과 같이 두개의未知數를 포함하는3次式으로 가정하였다.

$$-Y = a + bX^3 \quad (6)$$

여기서 -는 X가 증가함에 따라서 Y가 감소하는 것을 의미한다. 그러므로 임의시간 t에서貯留量 S와河道거리 X와의關係는式(6)을거리 X에 대하여積分하므로서式(7)과 같이 된다.

$$S = -Y X = aX + \frac{b}{4} X^4 + S_0 \quad (7)$$

X=0에서는 a = -Y₀ = -A₀Q₀B₀

X=L에서는 a + bL³ = -Y_L = -A_LQ_LB_L

따라서 b = 1/L³(A₀Q₀B₀ - A_LQ_LB_L)

X=L에서는 S=0이므로

$$aL + \frac{b}{4} L^4 + S_0 = 0$$

$$S_0 = -aL - \frac{b}{4} L^4 = \frac{1}{4} L A_0 Q_0 B_0 \left(3 + \frac{Y_L}{Y_0} \right) \quad (8)$$

$Y = Q/V$, $V = \alpha Q^\beta$ 이며, β 를 全流域에 대하여 一定한 값으로 보면 式(8)은 다음 式(9)와 같다.

$$S_0 = \frac{L}{4} A_0 Q_0 B_0 \left\{ 3 + \frac{\alpha_0}{\alpha_L} \left[\frac{Q_L}{Q_0} \right]^{1-\beta} \right\} \quad (9)$$

式(9)에서 임의시간 t 에서의 流量比 Q_L/Q_0 는 流域面積比 W_L/W_0 와 近似的으로 같으며, 式(3)과 비교하면 貯留常數 K 와 m 은 다음 式(10)과 같다.

$$K = \frac{L}{4} A_0 \left\{ 3 + \frac{\alpha_0}{\alpha_L} \left[\frac{W_L}{W_0} \right]^{1-\beta} \right\} \quad (10)$$

$$m = B_0$$

만일, 均一斷面의 水路인 경우는 $\alpha_0 = \alpha_L$, $Q_0 = Q_L$ 이 되면 $m = 0.6$ 이라면 式(10)은 式(4)와 같게 되므로 式(10)은 本流를 따른 흐름단면의 크기와 流出量의 변화를 고려한 一般式이다.

흐름단면적 Y 와 河道거리 X 와의 관계를 2次式으로 가정하면 式(11)과 같으며, 1次式의 경우는 式(12)와 같다.

$$K = \frac{L}{3} A_0 \left\{ 2 + \frac{\alpha_0}{\alpha_L} \left[\frac{W_L}{W_0} \right]^{1-\beta} \right\} \quad (11)$$

$$K = \frac{L}{2} A_0 \left\{ 1 + \frac{\alpha_0}{\alpha_L} \left[\frac{W_L}{W_0} \right]^{1-\beta} \right\} \quad (12)$$

5. 流出追跡 過程

自然河川區間에서 流入量 I 와 流出量 Q 와의 差는 貯留量의 時間적 變化率 $\Delta S/\Delta t$ 와 같으며 式(7)과 같이 표시된다.

$$I - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (13)$$

임의 小流域에서의 流出量 Q 는 式(3)에 의하여 구할 수 있으며 式(13)에 의하여 貯留量 S 가 계산된다. 이와같이 降雨로 인한 貯留量 S 와 既存貯留量을 합하여 總貯留量으로 하며, 다시 式(3)에 의하여 流出量이 修正되어 初期流出量과 修正된 流出量의 比가 誤差限界를 만족할 때까지 流出量과 貯留量을 修正, 반복 계산한다(그림 2 참조). 이와같은 계산과정을 各 小流域에 대하여, 그리고 時間별 有效降雨에 대하여 실시하므로써 임의의 小流域에서의 時間별 流出量을 얻을 수 있다. 이때

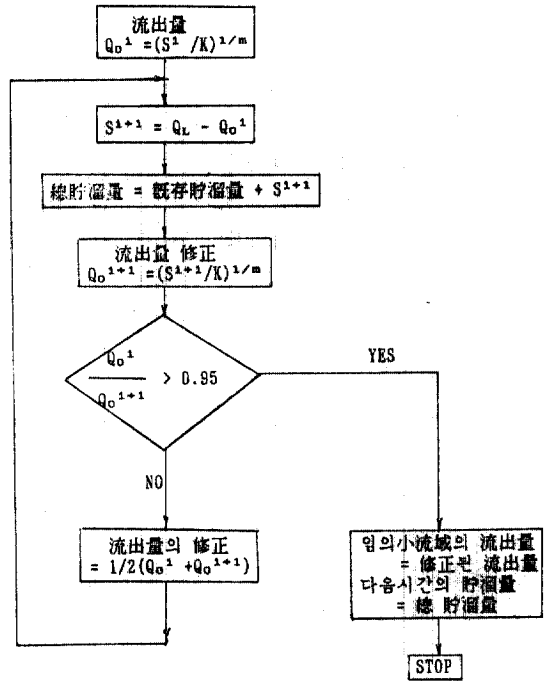


그림 2. 流出追跡過程의 흐름도

임의의 小流域으로의 流入量은 上流小流域으로 부터의 流出量과 有效降雨量을 합한 값을 사용하며, 支流가 存在할 경우는 支流로부터의 流出量을 합하여 流入量으로 한다. 이와 같은 流出追跡過程의 계산흐름도는 그림 2와 같다.

6. 適用例 및 檢討分析

6.1 對象流域 및 資料

地形學的 因子인 水路網크기, 흐름단면적 및 河道거리에 기초하여 河道貯留 媒介變數(A, B, α, β)를 결정하므로써 未計測流域에서의 流出을 豫測하기 위하여 錦江水系内の 支流인 報靑川 流域을 택하였다.

報靑川流域에서는 5개地點에서 流速, 흐름단면적 및 流量이 관측되고 있으며 12개地點에서 降雨가 관측되고 있다. 1984년과 1987년의 IHP 보고서⁽¹³⁾에 수록된 實測資料를 分析에 사용하였으며, 本流의 水位觀測地點에 따라 全流域을 4개의 小流域으로 나누었으며, 各 小流域 出口에서의 流出을 豫測하므로써 實測値와 比較 檢討하고자 한다.

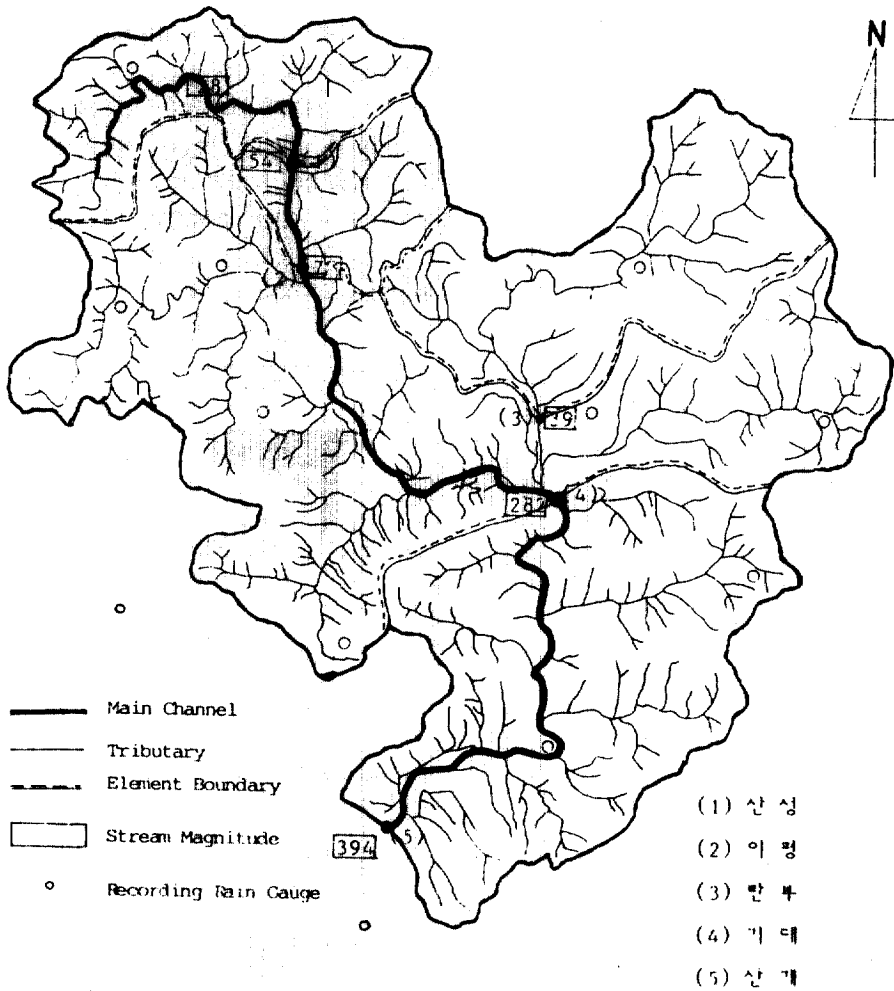


그림 3. 報育川 流域圖: 水路網 크기 및 水路網 構成

표 1. 媒介變數 A, B($Y=AQ^{\beta}$) 값의 比較

小流域名	流域面積 Km ²	水路網크기	水路傾斜 m/Km	1987년		1984년	
				A	B	A	B
山城	53.7	54	5.55	6.0444	0.5175	2.7488	0.7511
梨平	79.5	75	4.69	3.8280	0.6971	3.6725	0.7198
炭釜	72.5	39	7.80	9.9930	0.5396	3.1768	0.7129
其大	346.5	282	3.19	14.9338	0.4542	8.7064	0.5099
山桂	475.6	394	3.20	3.1745	0.5716	14.4625	0.3356

6.2 地形學的 因子 分析

報育川 流域圖는 그림3과 같으며 各 觀測地點에 서의 水路網크기를 표시하였다.

1984년과 1987년의 實測資料를 사용하므로써 얻

어진 媒介變數 A와 B는 표 1과 같으며, 流速과 流出量에 관한 媒介變數 α 와 β 는 표3과 같다. 이 때 β 값은 全流域에 대하여 一定한 값으로 보아 β 의 平均値를 구하면 0.4621이다.

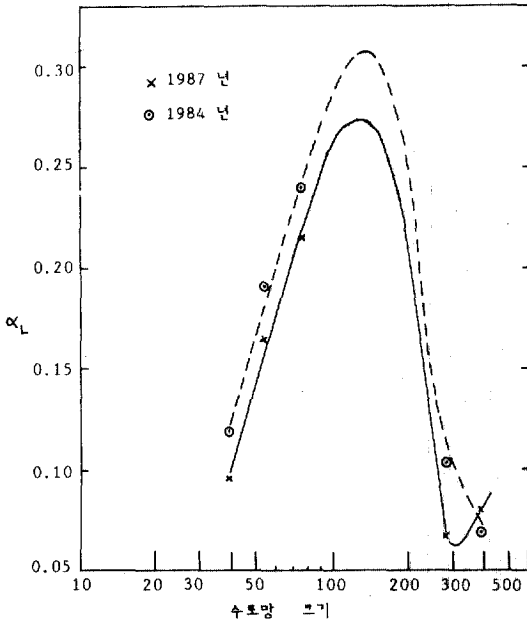


그림 4. α_L 과 水路網크기 간의 關係曲線

표 2. 媒介變數 $\alpha, \beta (V=\alpha Q^\beta)$ 값의 比較

小流域名	1987년		1984년	
	α	β	α	β
山城	0.1614	0.4849	1.1907	0.4315
梨平	0.2154	0.3614	1.2398	0.3166
炭釜	0.0949	0.5037	1.1189	0.4506
其大	0.0671	0.5457	1.1093	0.5013
山桂	0.0789	0.4422	1.0688	0.5830

표 3. 貯留常數 K 값의 比較

地域名	1987년			1984년		
	1次式	2次式	3次式	1次式	2次式	3次式
山城	61.92	53.76	49.68	23.13	21.10	20.09
梨平	14.99	14.84	14.77	14.07	14.03	14.01
其大	125.22	156.64	172.35	77.24	94.17	102.64
山桂	58.73	58.70	58.69	206.18	227.24	237.77

年度別 A와 B의 값, 그리고 α 와 β 의 값은 一定한 값이 되어야 하지만 표1 및 표2와 같이 差異를 나타내는 것은 水位觀測地點에서의 河床變動 및 觀測誤差에 기인하는 것으로 생각된다. 式(10)의 適用을 위하여 임의의 水路網크기에 대한 α_L 의 값을

결정하여야하므로, 5개 觀測地點에 대한 α 값과 水路網크기 간의 回歸分析을 하였으며 그 결과는 그림 4 및 式(14)와 같다. 여기서 SM은 水路網크기를 의미한다. 式(10), 式(11) 및 式(12)에 의하여 얻어진 貯留常數 K값은 표3과 같다.

$$1987년 : \alpha_L = -0.126 + 0.007SM - 3.843 \times 10^{-5} SM^2 + 0.0055 \times 10^{-5} SM^3 \quad (14)$$

$$1988년 : \alpha_L = -0.096 + 0.007SM - 3.585 \times 10^{-5} SM^2 + 0.0049 \times 10^{-5} SM^3$$

6.3 流出水文曲線의 豫測

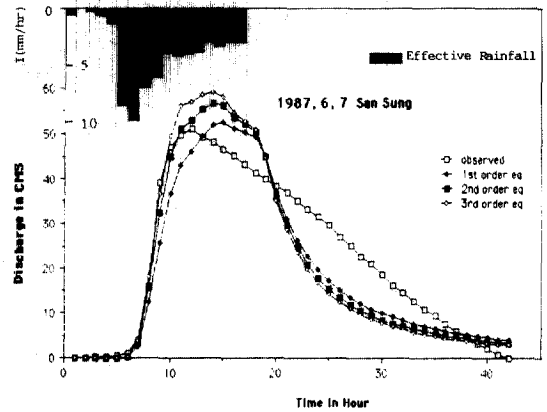


그림 5. 流出水文曲線의 比較(山城 1987. 6. 7)

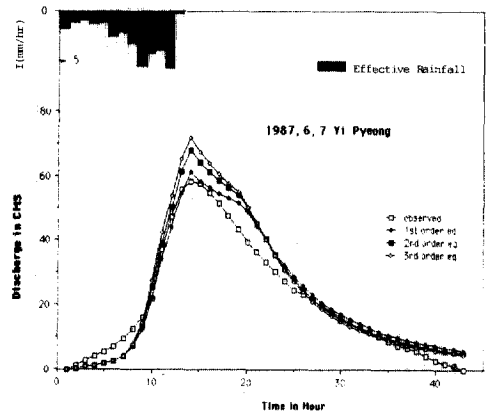


그림 6. 流出水文曲線의 比較(梨平, 1987. 6. 7)

이와 같이 하여 결정된 K값과 m값을 사용하여 5節의 流出追跡過程을 適用하므로써 1984년 7월 11일과 6월 7일 降雨에 대하여 本流 4개 地點의 直接流出을 豫測하였다.

流出分離를 위하여 여러 방법들이 사용되고 있으나 본 연구에서는 流出分離와 有效降雨을 逆推

定할 수 있는 Hino [12] 방법을 사용하였으며, 報育川流域의 本流 4 개地點에 대하여 流出을 豫測한 결과를 實測値와 함께 그림 5-그림 12에 나타내었다.

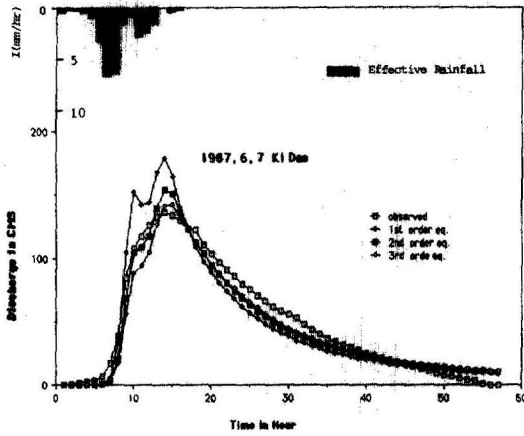


그림 7. 流出水文曲線의 比較(其大, 1987. 6. 7)

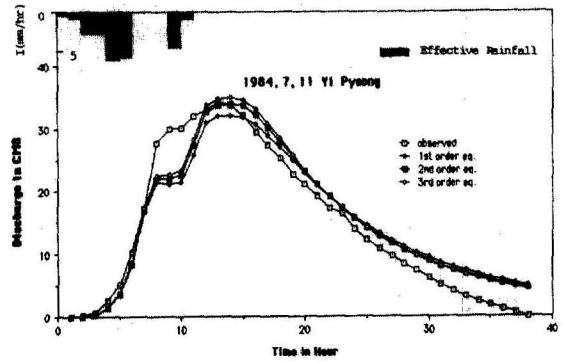


그림 10. 流出水文曲線의 比較(梨平, 1984. 7.11)

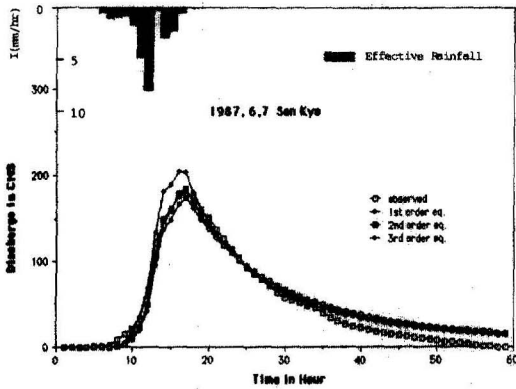


그림 8. 流出水文曲線의 比較(山桂, 1987. 6. 7)

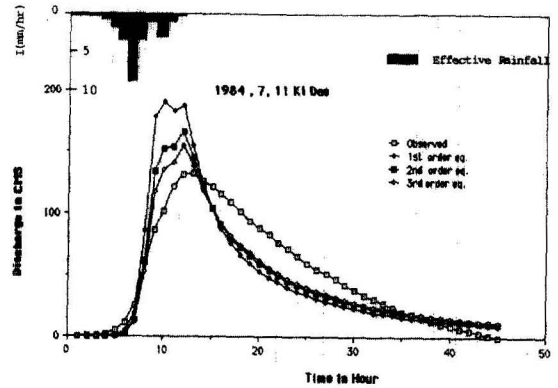


그림 11. 流出水文曲線의 比較(其大, 1984. 7. 11)

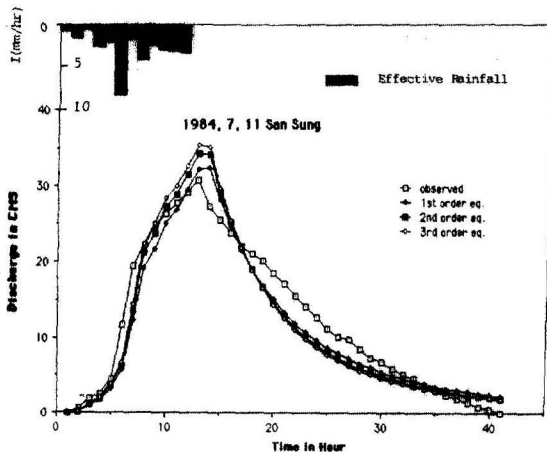


그림 9. 流出水文曲線의 比較(山城, 1984. 7. 11)

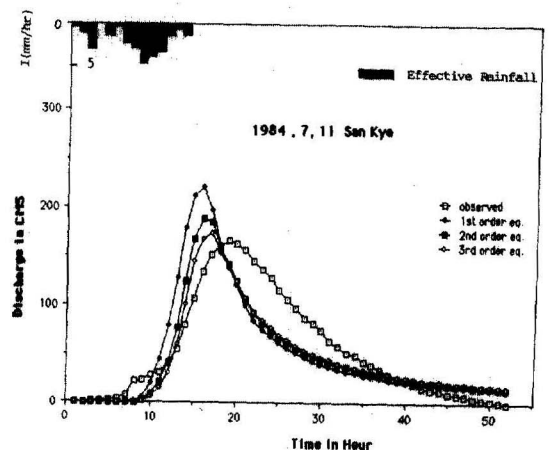


그림 12. 流出水文曲線의 比較(山桂, 1984. 7.11)

尖頭流量과 그 發生時刻은 實測値와 잘 一致하고 있음을 알 수 있으며, 水文曲線 下降部 後尾에서의 差異는, 임의의 小流域에서 累積되어 생긴 誤差로 생각된다. 豫測水文曲線을 비교한 결과, 流域面積이 작고 水路傾斜가 急한 上流流域에서는 흐름 단면적과 河道거리와의 關係를 1次式으로 가정하는 것이 가능하지만, 流域面積이 크고 傾斜가 완만한 河流流域에서는 3次式으로 解析하는 것이 더 좋은 豫測値를 나타내었다.

7. 結 論

本 연구는 流域의 地形學的 因子인 水路網크기, 흐름단면적 및 河道거리에 기초하여 流域의 河道貯留常數를 결정하므로써 流出을 豫測하는 模型을 確立한 것으로서 결과는 다음과 같이 要略할 수 있다.

1) 流出資料가 없는 中小河川流域에서 水路網크기에 기초하여 本 연구에서 確立한 流出模型을 이용하면 간편하게 보다 精確한 流出을 豫測할 수 있음을 확인하였다.

2) 流域面積이 작고 河道傾斜가 急한 上流流域에서는 흐름 단면적과 河道거리와의 關係가 1次式에 近似한 반면에, 流域面積이 크고 河道傾斜가 완만한 河流流域에서는 3次式에 近似한 傾向이 나타남을 확인하였다.

參 考 文 獻

1. Clark, C.O., "Storage and the Unit Hydrograph", *Trans. A.S.C.E.*, Vol. 110, pp. 1419~1446, 1945.
2. Nash, J. E., "On the Instantaneous Unit Hydrograph", *Inter, Assoc. Sci., Hydrol. Publ.*, Vol. 45(3), pp. 114~121, 1957.
3. Laurenson, E.M., "A Catchment Storage Model for Runoff Routing", *J. Hyd.* (2), pp. 141~163, 1964.
4. Rodriguez-Iturbe, I and J.B. Valdes, "The Geomorphological Structure of Hydrologic Response", *W. R. R.*, Vol. 15, pp. 1409~1420, 1979.
5. Gupta, V.K., E. Waymire and C.T. Wang, "A Representation of an Instantaneous Unit Unit Hydrograph from Geomorphology", *W. R. R.* Vol. 16, pp. 855~862, 1980.
6. Corradini, C. and V.P. Singh, "Effect of Spatial Variability of Effective Rainfall on Direct Runoff by a Geomorphologic Approach", *J. of Hyd.*, (81), pp. 27~43, 1985.
7. Bell, F.C. and Vorst, P.C., "Geomorphologic Parameters of Representative Basins and their Hydrologic Significance", Australian Water Resources Council Technical Paper NO. 58, 1981.
8. Strahler, A.N., "Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks", In V.T. Chow (ed.), *Handbook of Applied Hydrology*, pp. 4/39~4/76, 1964.
9. Shreve, R.L., "Infinite Topologically Random Channel Networks", *J. Geol.*, (75), pp. 178~186, 1967.
10. Bell, F.C., "Relationships between physical Properties of Catchments and Mathematical Parameters of Conceptual Catchment Models", Ph. D. Thesis, Univ. of N.S.W.
11. Mein, R.G., Laurenson, E.M., McMahon, T.G., "Simple Nonlinear Model for Flood Estimation", *J. Hydraul. Div., ASCE*, 100(HY11), pp. 1507~1518, 1974.
12. Hino, M., Haseve, M., "Identification and Prediction of Nonlinear Hydrologic Systems by the Filter Separation Autoregressive Method", *J. Hydrol.*, 68, 181~210, 1984.
13. 建設部, 國際水文開發計劃 (IHP) 代表試驗流域 研究調查 報告書, 1984, 1987.

(接受: 1989. 5. 8)