

<論 文>

河川流出豫測을 위한 降雨—流出 모델

—Rainfall-Runoff Model for River Runoff Prediction—

池 洪 基*

Ji, Hong ki

南 宣 祐**

Nahm, Sun woo

李 舜 鐸***

Lee, Soontak

Abstract

To predict flood runoff from rainfall and watershed Characteristics, Nash's parameters of N , K are needed to be determined. Also parameters of IUH N and K are derived by the moment method.

Nash's model whose parameters are derived from rainfall characteristics is applied to the Wisteam basin, which is a tributary located in the Nakdong river. For the derivation of IUH by applying linear conceptual model, the storage constant, K , with the rainfall characteristics was adopted as $K=1.327 R_c^{0.603} \cdot R_k^{-0.754} \cdot R_s^{-0.074} \cdot API^{-0.120} \cdot R_t^{0.558} \cdot R_d^{-0.367}$ having a highly significant correlation coefficient, 0.970. Gamma function argument, N , derived with such rainfall characteristics was found to be $N=0.032 R_s^{-0.235} \cdot R_c^{-1.731} \cdot R_t^{1.351} \cdot R_k^{-0.878} \cdot R_d^{0.839} \cdot API^{0.183}$ having a highly significant correlation coefficient, 0.970.

From the tested results it is proved that Nash's IUH and consequently flood runoff can be predicted from rainfall characteristics.

要 旨

降雨와 流域特性으로부터 洪水流出을 豫測하기 위해서 Nash 모델의 媒介變數 N, K 가 決定될 필요가 있다. 또한 瞬間單位圖의 媒介變數 N, K 가 積率法에 의해서 유도되어야 한다.

降雨特性으로부터 誘導되는 Nash 모델의 媒介變數는 洛東江에 위치한 渭川流域에 적용하였다. 線型理論에 의한 瞬間單位圖의 誘導에 있어서 降雨特性으로서 貯溜常數 K 는 매우 높은 相關係數 0.97을 가진 $K=1.327 R_c^{0.603} \cdot R_k^{-0.754} \cdot R_s^{-0.074} \cdot API^{-0.120} \cdot R_t^{0.558} \cdot R_d^{-0.367}$ 을 採擇하였다. 이와 같은 降雨特性으로서 Gamma 函數 N 는 매우 높은 相關係數인 0.97로서 $N=0.032 R_s^{-0.235} \cdot R_c^{-1.731} \cdot R_t^{1.351} \cdot R_k^{-0.878} \cdot R_d^{0.839} \cdot API^{0.183}$ 으로 나타났다.

檢定 結果 Nash 모델의 瞬間單位圖와 이로 인한 洪水流出은 降雨特性으로부터 豫測될 수 있음이 立證되었다.

* 嶺南大學校 工科學 副教授

** 東國大學校 工科學 教授·工博

*** 嶺南大學校 工科學 教授·工博

1. 序 論

河川流域의 水文循環은 시스템 自體가 非線型性을 가지고 있으며, 偶然性和 變動性이 強하고 그 舉動을 精確히 豫測한다는 것은 매우 어려운 문제이다. 河川流域의 降雨-流出 시스템 內에서의 非線型이라 함은 單位流量圖法의 前提인 唯一性, 重疊性, 比例性에 基本을 둔 降雨-流出過程이 성립하지 않음을 의미하고 있다. 그러나 非線型 시스템의 降雨-流出過程을 解析하고 處理하는데 있어서는 理論과 實際 適用上의 難題點 때문에 일반적으로 시스템의 線型近似를 지향하고 있다.

線型 流出시스템의 解析은 Sherman 이 單位流量圖法 (Unit Hydrograph Method)¹⁾을 발표한 후 未計測流域의 流出解析을 위한 Snyder의 合成單位流量圖法 (Synthetic Unit Hydrograph Method)²⁾이 발표되었으며, 單位流量圖法에서의 有效雨量의 單位時間을 無限히 적게 하여 瞬間流入量에 대한 流出解析方法으로서 瞬間單位流量圖法 (Instantaneous Unit Hydrograph Method)의 理論이 Clark,³⁾ Nash,⁴⁾ Dooge⁵⁾ 등에 의하여 연구 발표되었다. 또한 非線型 流出시스템의 解析에 있어서는 貯溜函數法,⁶⁾ Tank 모델法,⁷⁾ Kinematic Wave法,⁸⁾ Volterra-Wiener Series法⁹⁾ 등이 연구 발표되었으며, 특히 非線型 流出모델로서는 線型모델의 基本적인 Convolution 積分을 일반화한 Volterra式¹⁰⁾과 流出解析에 있어서 Amorocho, Brandstetter 등에 의한 非線型應答系 理論의 응용에 의해서 非線型核이 구체적으로 解析되고 있다.¹¹⁾

그러나 洪水豫測의 實際適用에 있어서 強한 非線型性을 갖는 流出시스템에 情報制御理論이나 豫測理論을 형식적으로 적용하므로써 오히려 모델의 複雜性을 助長하는 경향이 있다. 이것은 降雨-流出過程이 決定論的 過程과 確率論的 過程의 複合形態로 構成되어 있기 때문이다.

따라서 降雨-流出系의 解析은 일반적으로 모델의 복잡성을 피하기 위하여 線型모델을 도입하고 있으며, 流域을 一聯의 線型貯水池로 취급하고 重合線型系 (Lumped linear system)의 기본조건인 比例假定과 重疊假定을 도입하여 有效雨量과 直接流出의 관계를 세우고 있다. 有效雨量의 持續時間이 無限이 작게 되어 數學的으로 Dirac-Delta 函數가 되는 水文曲線 即, 瞬間單位流量圖 (Instantaneous unit hydrograph; IUH)는 流域을 一聯의 線型貯水池로 취급하여 瞬間流入量에 대한 一般解를 구할 수 있다. IUH의 媒介變數 N 과 K 는 有效雨

量에 대한 直接流出의 反應에 따라 變化하며, 이들 媒介變數는 積率法 및 Laplace 變換法¹²⁾등에 의해서 구할 수 있다. 그러나 이들 媒介變數는 降雨特性이나 先行降雨事象에 의해서 變化하며, 그 관계는 回歸分析에 의하여 多重回歸式으로 표시할 수 있다.

본 연구에서는 中小流域의 河川에 있어서 實測된 降雨-流出 資料로부터 IUH의 媒介變數들을 구하고 대응하는 降雨特性和 先行降雨特性 因子들 사이의 多重回歸式을 유도할 수 있으며, 이들 關係式으로부터 임의의 豪雨에 의한 流出의 豫測을 試圖하였다.

2. 降雨-流出模型 理論

流域에 내린 降雨와 流出의 關係를 解析하는데 있어서는 流域을 概念的으로, 하나 또는 여러개의 線型貯水池로 취급할 수 있으며, 貯溜量 S 는 流出量 Q 에 比例하는 것으로 생각할 수 있다.

$$S = KQ \dots\dots\dots (2.1)$$

線型貯水池에 있어서 流入量 I 와 流出量 Q 의 差는 貯溜量의 時間的 變化率과 같게 되며, 다음과 같은 水文連續方程式으로 표시할 수 있다.

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

이와 같은 水文連續方程式에 식 (2.1)의 貯溜量을 대입하면 다음과 같은 線型微分方程式을 얻을 수 있다.

$$I - Q = K \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (2.3)$$

위의 線型微分方程式을 演算子의 型으로 표시하고 이를 流出量 Q 에 대하여 정리할 수 있다.

$$Q = e^{-\frac{t}{K}} \left[\frac{1}{K} \int I \cdot e^{\frac{t}{K}} dt + \text{const.} \right] \dots\dots\dots (2.4)$$

식 (2.4)에 流入量 I 가 瞬間的으로 발생한다고 가정하여 流入函數 I 에 Dirac-Delta 函數를 도입하면 線型貯水池로부터 流出量은

$$Q = e^{-\frac{t}{K}} \left[\frac{1}{K} \int e^{\frac{t}{K}} \delta(0+) dt + \text{const.} \right] \dots\dots\dots (2.5)$$

와 같으며, 식 (2.5)의 積分은 $t=0+$ 에서 函數의 값을 구한 Dirac-Delta 函數의 Laplace 變換과 같다.

여기서 初期條件을 $t=0, Q=0$ 라 놓고 정리하면

$$Q = \frac{1}{K} e^{-\frac{t}{K}} \dots\dots\dots (2.6)$$

이 되며, 이는 衝擊入力, 즉 瞬間入力에 의한 線型貯水池의 應答函數는 다음과 같은 IUH로 표시할 수 있다.

$$u(t) = \frac{1}{K} e^{-\frac{t}{K}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Nash 모델은 流域이 N 개의 동일한 線型貯水池들로 構成되어 貯溜量과 流出量이 線型的 關係를 가진다고

가정한 概念的 모델로서 N 번째의 貯水池를 통과한 流出量은 持續時間 t_0 인 有効降雨強度의 時間的 分布를 時間의 函數인 $I(\tau)$ 로 표시할 수 있다. 따라서 有効降雨量을 各 有限要素에 적용하였을 때 時間 t 에서 Duhamel 積分을 도입하고 線型單位流量圖의 重疊假定에 의하여 IUH의 核函數(Kernel function) $u(t, \tau)$ 와 入力函數 $I(\tau)$ 의 곱으로 直接流出量을 구하였다.

$$Q(t) = \int_0^{t' \leq t_0} u(t, \tau) I(\tau) d\tau \dots \dots \dots (2.8)$$

여기서 τ 는 時間變數이며, 時間의 限界는 $t \leq t_0$ 일 때는 $t' = t$ 이고 $t > t_0$ 일 때는 $t' = t_0$ 이다.

따라서 N 개의 貯水池로부터의 각각의 流出은

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \frac{1}{K} e^{-\frac{t}{K}} \\ q_2 &= \frac{1}{K} \left(\frac{t}{K}\right) e^{-\frac{t}{K}} \\ &\vdots \\ q_n &= \frac{1}{K(N-1)!} \left(\frac{t}{K}\right)^{N-1} e^{-\frac{t}{K}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.9)$$

와 같으며, 이를 Gamma 函數 $\Gamma(N)$ 으로 표시하면 다음과 같다.

$$u(t) = \frac{1}{K\Gamma(N)} \left(\frac{t}{K}\right)^{N-1} e^{-\frac{t}{K}} \dots \dots \dots (2.10)$$

여기서 식 (2.10)은 全流域에 均일하게 순간적으로 내린 單位有効雨量이 N 개의 線型貯水池를 통하여 流出되는 IUH의 縱距를 표시한다.

3. 瞬間單位圖의 媒介變數와 降雨特性

3.1 瞬間單位圖의 誘導

IUH는 積率法(Moment method)과 Laplace 變換에 의한 방법으로 유도할 수 있으나, 본 연구에서는 積率法을 적용하였다. 入力函數 $x(t)$, 衝擊應答函數 $u(t, \tau)$ 및 出力函數 $y(t)$ 의 積率 關係식을 유도하기 위하여 식 (2.8)을 時間 t 의 函數인 入出力系의 衝擊應答系로 표시하면

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) u(t, \tau) d\tau \dots \dots \dots (3.1)$$

原點에 대한 $y(t), x(t), u(t)$ 函數의 n 次 積率은 다음과 같이 정의된다.

$$M_y^{(n)} = \int_0^\infty t^n y(t) dt \dots \dots \dots (3.2)$$

$$M_x^{(n)} = \int_0^\infty t^n x(t) dt \dots \dots \dots (3.3)$$

$$M_u^{(n)} = \int_0^\infty t^n u(t) dt \dots \dots \dots (3.4)$$

식 (3.1)을 식 (3.2)에 대입하고 이를 $t = \tau$ 에서 $t = \infty$

까지 積分하면

$$M_y^{(n)} = \int_0^\infty x(\tau) \left\{ \int_\tau^\infty t^n u(t-\tau) dt \right\} d\tau \dots \dots \dots (3.5)$$

이고, 식 (3.5)의 內部積分은 $(t-\tau)$ 를 (ω) 로 치환하여 표시하면

$$\int_0^\infty t^n u(t-\tau) dt = \int_0^\infty (\tau+\omega)^n u(\omega) d\omega \dots \dots \dots (3.6)$$

와 같으므로 $y(t)$ 의 n 次 積率은

$$M_y^{(n)} = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} M_u^{(i)} \int_0^\infty x(\tau) \tau^{n-i} d\tau \dots \dots \dots (3.7)$$

와 같다. 여기서 식 (3.7)의 積分은 原點에 관한 $(n-i)$ 번째의 積率과 같으므로

$$M_y^{(n)} = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} M_u^{(i)} M_x^{(n-i)} \dots \dots \dots (3.8)$$

과 같이 표시할 수 있으며, 식 (3.8)을 二項定理로 표시하면 다음과 같다.

$$M_y^{(n)} = [M_u + M_x]^n \dots \dots \dots (3.9)$$

따라서 IUH의 1次 積率式은

$$M_u^{(1)} = \frac{1}{K^N(N-1)!} \int_0^\infty t^N e^{-\frac{t}{K}} dt \dots \dots \dots (3.10)$$

이며, 식 (3.10)을 積分하여 정리하면

$$M_u^{(1)} = NK$$

이고 식 (3.11)을 식 (3.9)에 대입하면 IUH의 1次 積率은 다음과 같다.

$$M_n^{(1)} = M_u^{(1)} + M_x^{(1)} = NK \dots \dots \dots (3.12)$$

역시 같은 방법으로 IUH의 2次 積率은 다음과 같다.

$$M_u^{(2)} = M_y^{(2)} - M_x^{(2)} - 2NKM_x^{(1)} = N(N+1)K^2 \dots \dots \dots (3.13)$$

3.2 媒介變數와 降雨特性

IUH의 媒介變數는 流域과 降雨의 特性에 따라 변화하며, 流域의 임의의 地點에 대해서는 降雨特性에 支配된다. 降雨特性으로는 分析코자 하는 豪雨의 總降雨量, 持續期間, 歪曲度, 尖度 및 先行降雨指數 등이 일반적으로 Nash 모델의 IUH 媒介變數인 N 와 K 에 영향이 미치는 것을 알 수 있으며, 이들의 관계는 多重回歸分析에 의하여 그 관계식을 설정할 수 있다.

多重回歸모델(Multiple regression model)로서는 線型 모델(Linear model)과 對數-線型모델(Log-linear model)로 나눌 수 있으며, IUH의 媒介變數 N 와 K 를 각각 獨立變數 y 라 하고 降雨特性 因子들을 說明變數 x_i 라 한다면 그 관계식은 각각 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} y &= a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \\ y &= b_0x_1^{b_1}x_2^{b_2} \dots x_n^{b_n} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3.14)$$

여기서 IUH의 媒介變數 N 와 K 에 영향을 미치는 說

明變數의 選擇은 逐次多重回歸分析(Analysis of stepwise multiple regression)에 의하여 결정할 수 있으며, 그 結果式은 임의의 豪雨로 인한 降雨特性으로부터 IUH의 媒介變數를 구하므로써 直接流出의 豫測에 이용될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 說明變數로서 總降雨量(Total rainfall; R_t), 降雨持續期間(Rainfall duration; R_d), 降雨中心時間(Rainfall centroid; R_c), 降雨分布의 歪曲度(Rainfall skewness; R_s), 降雨分布의 尖度(Rainfall kurtosis; R_k) 및 先行降雨指數(Antecedent precipitation index; API)를 취하였으며, 이들 說明變數와 IUH의 媒介變數 N 및 K 의 관계는 다음과 같은 多重回歸式으로 표시할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} N &= f(R_t, R_d, R_c, R_s, R_k, API) \\ K &= f(R_t, R_d, R_c, R_s, R_k, API) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.15)$$

3.3 流出率과 基底流出의 特性

流出率(Runoff rate; R_r)에 영향을 미치는 要素는 先行降雨事象, 總降雨量 및 降雨持續期間 등이 있으며 이들의 관계도 역시 前節과 같은 多重回歸 關係式으로 표시할 수 있다.

$$R_r = f(R_t, R_d, API) \dots\dots\dots(3.16)$$

그러므로 IUH에 적용하기 위한 有效雨量의 산정은 여러 방법이 있으나 앞에서 流出率이 결정되므로써 一定比 분리에 의하여 쉽게 결정할 수 있다.

그리고 基底流出과 直接流出의 境界를 直線으로 구분했을 때 基底流出의 傾斜(Baseflow slope; B_s)를 先行降雨와 豪雨의 特性值들에 의해서 영향을 받는 것으로 생각할 수 있으며, 이들 關係를 다음과 같은 多重回歸關係式으로 표시할 수 있다.

$$B_s = f(R_t, R_d, R_c, R_s, R_k, API) \dots\dots\dots(3.17)$$

4. 實際流域에의 適用

4.1 瞬間單位圖의 決定

본 연구에서 사용된 地點은 비교적 정밀한 降雨量 및 流量資料가 있는 IHP 代表流域인 洛東江 渭川流域의 古老水位標地點으로서 流域面積은 109.73km²이며, 周邊에 設置된 3개 降雨觀測所(石山, 華山, 華水)로부터 流域平均雨量과 流量資料를 1983~1986년 동안의 기간 중에서 선정하여 分析에 이용하였다. 分析에 이용된 豪雨의 說明變數인 總雨量(R_t), 持續期間(R_d), 降雨中心時間(R_c), 降雨分布歪曲度(R_s), 降雨分布尖度(R_k), 및 先行降雨指數(API), 初期流量(Q_0) 및 直接流出量의 基底分間(DR)은 Table 4.1과 같다.

또한 主要豪雨들의 IUH 媒介變數 N, K 는 식 (3.12)와 식 (3.13)으로부터 구하였으며, 그 結果는 Table 4.2와 같다.

Table 4.2의 Nash 모델의 IUH 媒介變數 N 및 K 와 Table 4.1의 降雨特性 因子들에 대하여 각각 逐次多重回歸分析을 실시한 結果 Table 4.3(a) 및 (b)와 같은 結果를 얻었으며, N 와 K 는 다음과 같은 多重回歸式임을 알 수 있다.

$$N = 0.032R_s^{-0.235} \cdot R_c^{-1.731} \cdot R_t^{1.351} \cdot R_k^{-0.678} \cdot R_d^{0.839} \cdot API^{0.183} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$K = 1.327R_c^{0.603} \cdot R_k^{-0.754} \cdot R_s^{-0.074} \cdot API^{-0.120} \cdot R_t^{0.558} \cdot R_d^{-0.367} \dots\dots\dots(4.2)$$

여기서 N 와 K 의 重相關係數는 各各 0.970이며, F 值는 10.548, 10.588로서 有意水準이 0.01에 해당하는

Table 4.1 Basic characteristics of storm

Date	Variable	R_t (mm)	R_d (hr)	R_c (hr)	R_s	R_k	DR (hr)	API (mm)	Q_0 (m ³ /sec)
83.	06.20	42.080	11.000	2.685	1.889	3.810	22.000	11.042	0.330
	06.29	60.350	17.000	8.177	1.325	1.896	68.000	36.611	8.700
	07.22	106.895	7.000	6.881	7.530	3.646	16.000	19.086	6.010
84.	04.18	60.770	24.000	9.286	1.342	1.931	65.000	2.959	5.508
	06.07	71.050	13.000	4.394	1.870	3.738	38.000	15.034	4.257
	07.04	95.420	28.000	10.951	1.311	1.851	109.000	17.290	3.969
	07.23	54.420	14.000	8.029	1.293	1.789	62.000	26.107	4.265
	08.21	36.100	10.000	3.288	1.187	1.503	46.000	3.493	5.510
85.	08.17	79.960	32.000	13.186	1.355	1.984	86.000	18.176	6.910
	08.26	92.900	17.000	8.960	2.036	4.512	43.000	24.949	5.414
86.	07.21	53.757	13.000	7.368	1.425	2.176	50.000	12.521	1.047

Table 4.2 Results of dependent variable

Date	Variable	N	K	R _r	B _s
83.	06.20	3.010	2.014	0.288	0.315
	06.29	2.148	5.483	0.623	0.093
	07.22	1.100	6.413	0.487	0.374
84.	04.18	1.701	7.291	0.117	0.155
	06.07	3.082	3.882	0.387	0.303
	07.04	4.005	8.606	0.410	0.203
	07.23	2.107	7.071	0.415	0.091
85.	08.21	2.648	5.518	0.169	0.173
	08.17	1.968	10.248	0.472	0.107
	08.26	1.299	4.226	0.499	0.083
86.	07.21	1.455	7.161	0.358	0.074

매우 높은 相關을 나타내고 있다.

4.2 流出率과 基底流出의 推定

有效雨量을 決定하기 위한 流出率(R_r)은 Table 4.1의 降雨特性 因子인 總降雨量(R_t), 降雨持續期間(R_d),

先行降雨指數(API)에 대한 逐次多重回歸分析에 의하여 그 상관식이 얻어졌으며 그 결과는 Table 4.4와 같고, R_r은 다음과 같은 관계식을 알 수 있다.

$$R_r = 0.052 API^{0.585} \cdot R_t^{0.137} \cdot R_d^{-0.072} \dots \dots \dots (4.3)$$

여기서 R_r의 重相關係數는 0.977이고 F值는 49.549으로서 有意水準 0.01에 해당하는 매우 높은 相關을 나타내고 있다.

또한 基底流出의 分離는 初期流出量 Q₀에서 直接流出과 基底流出의 境界가 된다고 생각할 수 있는 境界面의 傾斜(Baseflow slope; B_s)가 豪雨의 樣相인 總降雨量(R_t), 降雨持續期間(R_d), 降雨重心時間(R_c), 降雨의 歪曲度(R_s)와 先行降雨指數(API) 및 直接流出의 持續時間(DR)에 영향을 받는 것으로 보아서 이들 관계에 대하여 逐次多重回歸分析을 실시한 결과는 Table 4.5와 같다. 여기서 B_s의 관계식은

$$B_s = 0.0006 \cdot DR^{1.844} \cdot API^{-0.069} \cdot R_t^{-0.504} \cdot R_c^{-2.188} \cdot R_s^{2.833} \cdot R_d^{1.241} \dots \dots \dots (4.4)$$

이며, 重相關係數는 0.969이고 F值는 10.095로서 有意水準 0.01에 해당하는 매우 높은 相關을 나타내고 있다.

Table 4.3(a) Results of stepwise multiple regression analysis (N)

Step	Variable	Regression formula	Standard Error	Multiple Reg. Coeff.	F-value
1	R _s	N=2.579 R _s ^{-0.402}	0.154	0.530*	3.513*
2	R _s , R _c	N=4.678 R _s ^{-0.431} · R _c ^{-0.301}	0.147	0.650**	2.926*
3	R _s , R _c , R _t	N=0.095 R _s ^{-0.943} · R _c ^{-0.949} · R _t ^{1.297}	0.116	0.826**	5.005**
4	R _s , R _c , R _t , R _K	N=0.024 R _s ^{-0.910} · R _c ^{-2.380} · R _t ^{1.957} · R _K ^{-0.653}	0.094	0.906***	6.840**
5	R _s , R _c , R _t , R _K , R _d	N=0.026 R _s ^{-0.515} · R _c ^{-1.535} · R _t ^{1.639} · R _K ^{-0.699} · R _d ^{0.507}	0.088	0.932***	6.617**
6	R _s , R _c , R _t , R _K , R _d , API	N=0.032 R _s ^{-0.235} · R _c ^{-1.371} · R _t ^{1.351} · R _K ^{-0.878} · R _d ^{0.839} · API ^{0.183}	0.067	0.970***	10.548**

Significant level ; * ; 0.1, ** ; 0.05, *** ; 0.001

Table 4.3(b) Results of stepwise multiple regression analysis(K)

Step	Variable	Regression formula	Standard Error	Multiple Reg. Coeff.	F-value
1	R _c	K=1.435 R _c ^{0.717}	0.124	0.798*	15.831*
2	R _c , R _k	K=2.886 R _c ^{0.605} · R _k ^{-0.538}	0.087	0.916***	20.750*
3	R _c , R _k , R _s	K=3.274 R _c ^{0.530} · R _k ^{-0.305} · R _s ^{0.295}	0.071	0.952***	22.714*
4	R _s , R _K , R _s , API	K=3.363 R _c ^{0.633} · R _k ^{-0.744} · R _s ^{0.294} · API ^{-0.070}	0.072	0.958***	16.698*
5	R _c , R _k , R _s , API, R _t	K=1.465 R _c ^{0.467} · R _k ^{-0.836} · R _s ^{0.217} · API ^{-0.075} · R _t ^{0.308}	0.075	0.962***	12.380*
6	R _c , R _k , R _s , API, R _t , R _d	K=1.327 R _c ^{0.630} · R _k ^{-0.754} · R _s ^{-0.074} · API ^{-0.120} · R _t ^{0.558} · R _d ^{-0.367}	0.075	0.970***	10.588**

Significant level ; * ; 0.01, ** ; 0.025, *** ; 0.001

Table 4.4 Results of stepwise multiple regression analysis (R_r)

Step	Variable	Regression formula	Standard Error	Multiple Reg. Coeff.	F-value
1	API	$R_r = 0.070 API^{0.614}$	0.053	0.973*	160.850*
2	API, R_t	$R_r = 0.048 API^{0.590} \cdot R_t^{9.106}$	0.054	0.975*	77.675*
3	API, R_t, R_d	$R_r = 0.052 API^{0.585} \cdot R_t^{0.137} \cdot R_d^{-0.072}$	0.055	0.977*	49.549*

Significant level ; * ; 0.001

Table 4.5 Results of stepwise multiple regression analysis (B_s)

Step	Variable	Regression formula	Standard Error	Multiple Reg. Coeff.	F-value
1	DR	$B_s = 1.664 DR^{-0.615}$	0.216	0.591**	4.838*
2	DR, API	$B_s = 2.482 DR^{-0.606} \cdot API^{-0.166}$	0.220	0.632**	2.666*
3	DR, API, R_t	$B_s = 0.358 DR^{-0.616} \cdot API^{-0.285} \cdot R_t^{0.547}$	0.220	0.691***	2.131*
4	DR, API, R_t, R_c	$B_s = 0.0015 DR^{0.132} \cdot API^{-0.261} \cdot R_t^{1.794} \cdot R_c^{-1.390}$	0.166	0.864****	4.412**
5	DR, API, R_t, R_c, R_s	$B_s = 0.0004 DR^{1.461} \cdot API^{-0.212} \cdot R_t^{0.797} \cdot R_c^{-1.763} \cdot R_s^{1.492}$	0.149	0.911****	4.851**
6	$DR, API, R_t, R_c, R_s, R_d$	$B_s = 0.0006 DR^{1.844} \cdot API^{-0.069} \cdot R_t^{-0.504} \cdot R_c^{-2.188} \cdot R_s^{2.833} \cdot R_d^{1.241}$	0.100	0.969****	10.095***

Significant level ; * ; 0.1, ** ; 0.05, *** ; 0.025, **** ; 0.001

4.3 洪水流出水文曲線の豫測

豫測하려는 豪雨의 降雨特性으로부터 식 (3.3)을 이용하여 流出率(R_r)을 구하고 이로부터 豫測豪雨의 有效雨量(R_t)를 一定比分離에 의하여 推定한다. 또한 IUH의 媒介變數 N 와 K 는 식 (4.1)과 식 (4.2)로부

터 推定하여 豫測豪雨의 IUH를 유도하고, 여기에 豫測豪雨의 有效雨量을 적용함으로써 直接流出 水文曲線을 식 (2.8)로부터 구할 수 있다. 그리고 基底流出은 식 (4.4)의 直接流出과 基底流出의 境界面 傾斜로부터 推定할 수 있으며, 이에 基底流出은 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

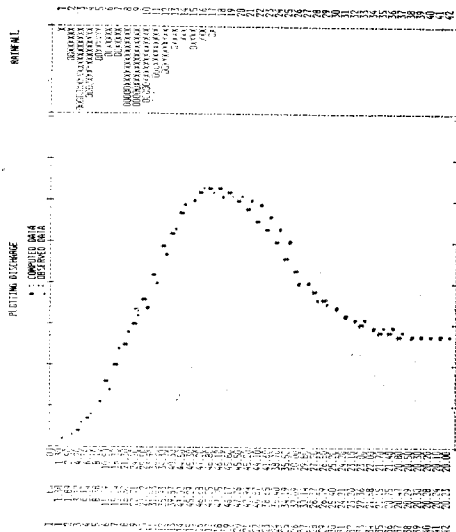


Fig. 4.2(a) Comparison of observed and forecasting flood hydrograph (1985. 8. 20)

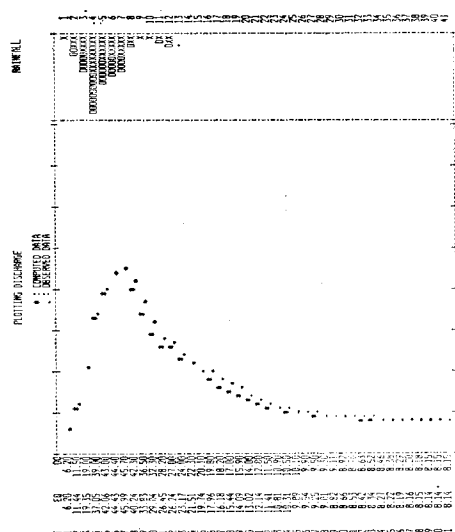


Fig. 4.2(b) Comparison of observed and forecasting flood hydrograph (1985. 9. 15)

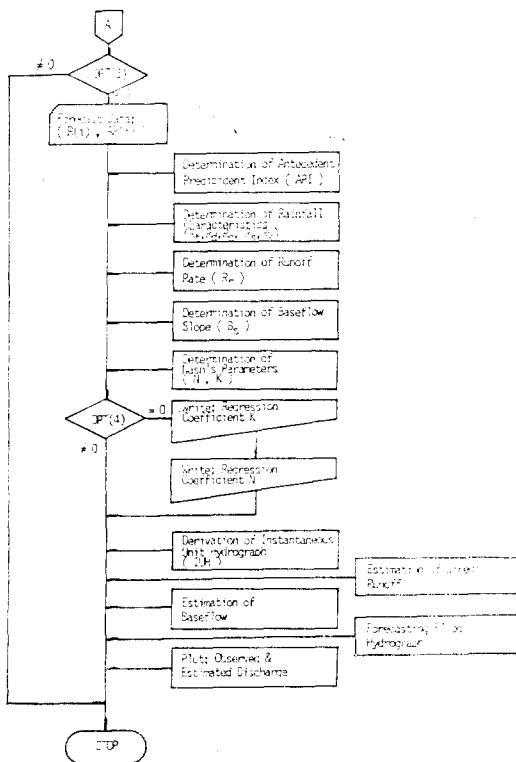
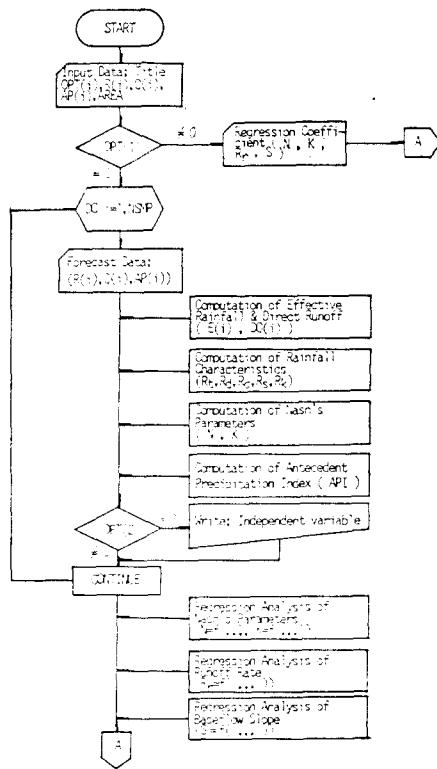


Fig. 4.1 Flowchart of forecasting process

$$Q_0 = Q_0 + B_s \cdot (t) \dots \dots \dots (4.5)$$

따라서 豫測하려는 豪雨의 洪水流出은 식 (2.8)과 식 (4.5)의 각 時間別 合成에 의하여 豫測하고, 그 過程은 Fig. 4.1과 같은 計算順序에 의하여 豫測하였다.

以上과 같은 방법으로 1985년 8월 20일과 9월 15일 豪雨에 대하여 檢定을 實施한 結果는 Fig. 4.2(a)

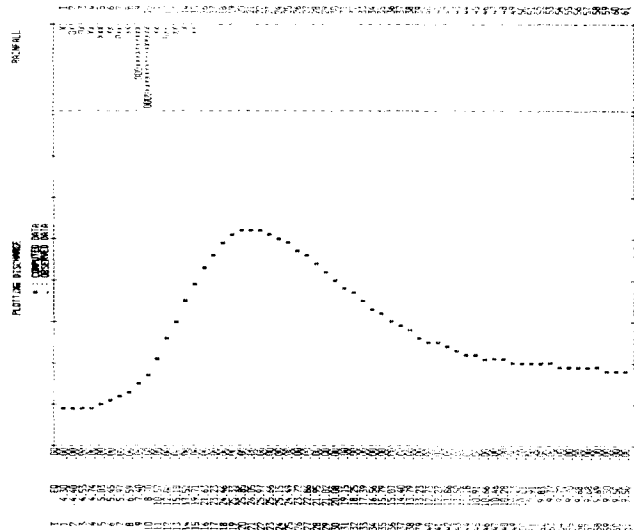


Fig. 4.3(a) Forecasting flood hydrograph

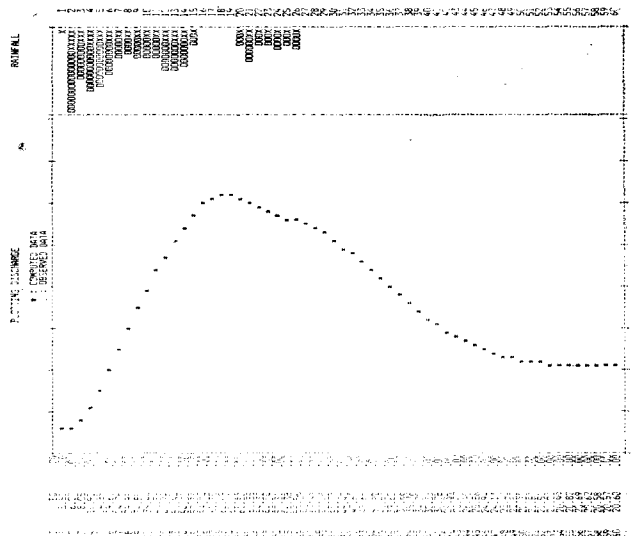


Fig. 4.3(b) Forecasting flood hydrograph

및 (b)와 같다. 檢定된 洪水水文曲線을 비교해 보면 水文曲線의 형태와 尖頭流量이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

또한 降雨一流出의 적용성을 과약하기 위하여 임의의 豫想되는 豪雨를 單一豪雨와 複合豪雨에 대하여 豫測을 실시한 결과 Fig. 4.3(a) 및 (b)와 같은 相異한 降雨樣相을 說明하는 뚜렷한 洪水流出 水文曲線을 豫測하고 있음을 確認할 수 있었다.

5. 結 論

본 연구에서는 中小流域의 河川에 대한 洪水流出을 豫測하기 위하여 Nash의 線型貯水池 流出모형을 적용하여 IUH 媒介變數 N 와 K , 流出率 및 基底流出 傾斜를 目的變數로 하고 降雨特性 因子를 說明變數로 하는 相互變數間의 逐次多重回歸分析을 實施한 결과 매우 相關성이 높은 回歸式을 誘導할 수 있었으며, 이로부터 降雨一流出 豫測을 위한 알고리즘을 設定한 結果는 다음과 같다.

(1) IUH의 媒介變數와 降雨特性 因子間에는 높은 相關성이 있음을 알 수 있었으며, N 와 K 의 重回歸式으로부터 豫測豪雨의 精度높은 IUH를 誘導할 수 있었다.

(2) 流出率과 基底流出傾斜를 降雨特性과 先行降雨特性에 대하여 重回歸分析을 한 결과 相關성이 높은 關係式을 誘導할 수 있었으며, 이로부터 有效雨量과 基底流出의 算定에 이용할 수 있었다.

(3) 制限된 降雨一流出 記錄으로부터 誘導된 IUH, 流出率, 基底流出傾斜의 多重回歸式에 의한 洪水 水文曲線의 豫測 結果는 實測流量에 대하여 매우 接近되고 있었으며, 보다 많은 長期間의 資料로부터 媒介變數들의 關係式을 誘導할 때 본 연구에서 제시된 洪水豫測 알고리즘은 中小流域의 河川에 널리 이용될 수 있을 것으로 思料된다.

References

- Sherman, L.K. (1932) Stream Flow from Rainfall by the Unit-Graph Method. Engineering News Record, Vol. 108, pp. 501~505.
- Snyder, F. F. (1938) Synthetic Unit Hydrograph. Trans. Am. Geophys. Union. 19, Pt. 1, pp. 447~454.
- Clark, C.O. (1945) Storage and the Unit Hydrograph. Trans. of ASCE, Vol. 110, Paper No. 2261, pp. 1419~1446.
- Nash, J.E. (1957) The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph. Intern. Assoc. Soci. Hydrology, Pub. 45, Vol. 3, pp. 114~121.
- Nash, J. E. (1959) Systematic Determination of Unit Hydrograph Parameter. J. of Geophys. Res., Vol. 64, No. 1, pp. 111~115, January, 1959.
- Nash, J.E. (1960) A Unit Hydrograph Study, with Particular Reference to British Catchments. Pro. Inst. Civil Engineering, Vol. 17, pp. 249~282, November, 1960.
- Nash, J.E. (1960) A Note on an Investigation into two Aspects of the Relation between Rainfall and Storm Runoff. Intern. Assoc. Soci. Hydrology, pub. 51, pp. 567~578.
- Nash, J.E. (1959) A Note on the Muskingum Flood-Routing Method. J. of Geophys. Res., Vol. 64, No. 8, pp. 1053~1055.
- Dooge, J.C.I. (1959) A General Theory of Unit Hydrograph. Journal of Geop. Res., Vol. 64, No. 2, pp. 241~259.
- Dooge, J.C.I. (1965) Analysis of Linear Systems by Means of Laguerre Function, Journal of Society for Industrial & Applied Mathematics (Control). Series A. 2, No. 3, pp. 396~408.
- 木村俊光, 貯溜函數法 I, II, 土木技術資料, 1975, Vol. 4, No. 4, 1962.
- Sugawara, M. and Maruyama, F. (1956) A Method of Prevision of the River Discharge by Means of a Rainfall Model, Publ. No. 42 de 1 Ass. International d'Hydr. Symposis Darcy. Tome III, pp. 71~76.
- Lighthil, M.J. and Whithn, G.B. (1955) On Kinematic Waves I, Flood Movements in Long Rivers, Royal Soc. London Proc. A., Vol. 227, pp. 286~316.
- Winer, N. Response of a Non-linear device to noise, Radiation Lab., MIT Report, No. 129, 1942.
- Volterra, V. (1960) Theory of Functionals of Integro-Differential Equations, Dover Publication.
- Amorocho, J. (1963) Measure of the Linearity of Hydrologic Systems, Journal of Geophysical Research, Vol. 68, No. 8, pp. 2237~2249.
- Amorocho, J. and Orlob, E.T. (1961) Non-linear Analysis of Hydrologic Systems Water Resources. Cent., Contrib. 40, Univ. Calif., Berkeley, Calif., pp. 147.
- 全時永, 尹泰勳, 線型貯水池 流出模型과 降雨特性, 大韓土木學會 學術發表會 論文集, 1984.