

〈論 文〉

線型貯水池 模型의 媒介變數研究

(A study on parameters of linear reservoir models)

高 在 雄** · 徐 榮 濟*
Ko, Jae-Ung Suh, Young-Jea

Abstract

The purpose of this study is to estimate the parameters of linear reservoir models in order to derive the Instantaneous unit hydrograph from a given small experimental watershed.

The linear reservoir model is a conceptual model, consisting of cascade or parallel equal linear reservoirs, preceded by a linear channel which involved Nash, SLR(single linear reservoir) and 2-PLR(two-parallel linear Reservoir) model. The Nash model have two parameters N and K , single linear reservoir has one parameter K_1 and two-parallel linear reservoirs have two parameters K_1, K_2 ; where N denote the number of reservoirs and K is the storage coefficient of each reservoirs.

1. 序 論

지금까지 우리나라 河川의 設計洪水量 計算은 未計測 中小河川 流域이 많으므로 大部分 外國의 公式을 修正補完하여 쓰거나 또는 그대로 使用함으로 地形的, 流域特性別 相異한 條件에서 이를 適用함은 多少 모순을 안고 있는 實情이다.

지금까지 實務에 應用된 公式은 일찌기 1851年 Mulvaney⁹⁾가 提案한 合理式에서부터 1921年 梶山⁴⁾이 發表한 韓國河川 最大洪水量 公式까지 모두가 尖頭洪水量을 算定하기 위한 것으로 時間別 水文曲線을 誘導하기 위한 노력은 1980年代까지 單位圖를 除外하고는 尹, 鮮于, 朴 等에 의한 漢江, 錦江, 洛東江의 綜合單位流量圖²⁰⁾ 誘導例밖에 없다. 그러나 國內에서도 局部的^{14), 17)}으로 大河川에서 大淸潭이나 榮山江 河口堰 設計時 탱크模型²²⁾이 適用되기 始作하였으며 錦江, 平澤과 插橋川 大單位農業開發事業에서는 無次

元單位圖와 單位圖가 各各 活用되었다.

本研究는 農業振興公社에서 實測한 論山 塔亭池流域의 降雨一流出量 記錄을 바탕으로 最近 水文學分野에서^{5), 7), 8)} 활발히 研究開發되고 있는 線型貯水池 流出模型을 適用하여 瞬間單位圖^{1), 10), 11), 12)} (IHU)를 誘導함과 同時에 各 模型이 가지는 媒介變數를 決定 比較하기 위한 것으로 Nash와 SLR(single linear reservoir)⁷⁾, 2-PLR(two-parallel linear reservoir)²³⁾ 模型의 設計 適用與否를 檢討하였다. 그리고 위의 模型變數推定을 Nash는 모멘트법으로 N, K 값을 推定하였으며 線型貯水池 模型은 回旋積分方程式에 線型貯水池 模型理論을 unit pulse 함수를 適用 瞬間單位圖(IUH) 基本式으로 使用하였다.

2. 基本理論

2.1 線型貯水池 模型¹⁵⁾ (linear reservoir model)

線型貯水池 模型은 하나의 集水流域을 貯水池

** 建國大學校, 工大 教授

* 農業振興公社 技術支援課

로 假想하여 流量을 推定하는 方法으로 模型의 貯留量 S 가 流量 Q 에 비례한다고 생각하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = KQ \quad (1)$$

여기서 K 는 貯留常數이다. 時間에 대한 貯水池의 流入量 $I(t)$ 와 流出量 $Q(t)$ 의 變化에 따라 連續方程式을 適用하면

$$I - Q = \frac{ds}{dt} \quad (2)$$

가 되고 여기서 流入量을 無視한 水文曲線의 減水部(Recession curve)만 생각하면 $I=0$ 이므로

$$\frac{ds}{dt} = -Q \quad (3)$$

이 된다. (1)식에 (2)식의 미분항을, $t=0$ 일 때 $Q=Q_0$ 를 대입하여 풀면

$$Q_t = Q_0 e^{-t/k} \quad (4)$$

이 된다. 또 $t=0$ 일 때 線型貯水池의 單位體積을 考慮하면 $S(0)=1$ 이므로 이것을 (1)식에 適用하면

$$Q_0 = \frac{1}{K} \quad (5)$$

가 되고 이것을 다시 (4)식에 대입하면

$$Q(t) = U(0, t) = \frac{1}{K} e^{-t/k} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. (6)식이 바로 Nash와 線型貯水池 模型의 單位 충격함수(Unit Pulse)로 사용되었다.

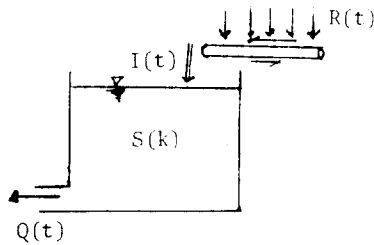


그림 1. Single linear reservoir

2.2 Nash 模型의 理論

Nash(1959)¹⁰⁾는 線型貯水池 模型을 계단식으로 만든 것으로 우선 두개의 線型貯水池의 貯留常數 K 가 同一하다고 假定하여 첫번째 貯水池에서 誘導된 瞬間單位圖(IUH)를 $(n-1)$ 개의 貯水池를 통하여 數學的으로 回旋積分 方程式을 利用 誘導하였다. 이 過程은 水文學會誌^{5),7),8)}를

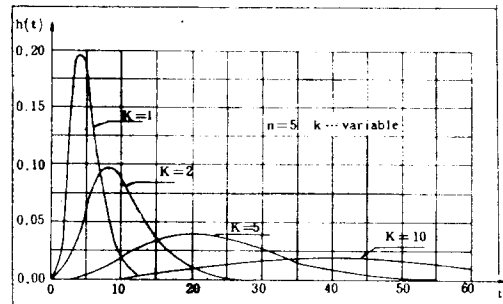


그림 3 The dependence of the system function on the coefficient K of the linear reservoirs.

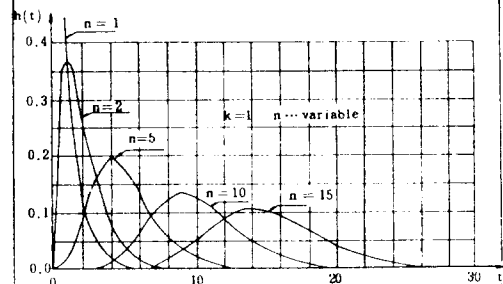


그림 4 The dependence of the system function on the number of linear reservoirs(n).

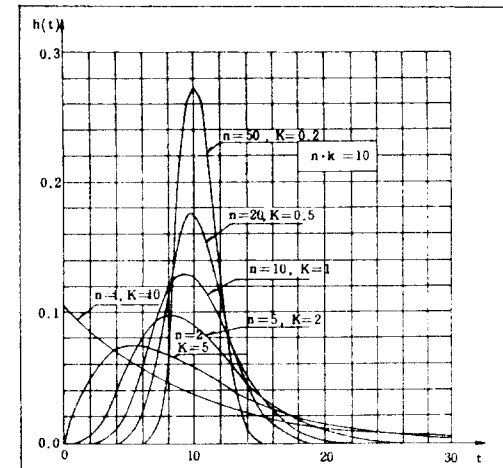


그림 5 The dependence of the system function on n and K , the time-lag (nK) being constant.

통하여 수차례 소개되었으므로 本稿에서 생략한다.

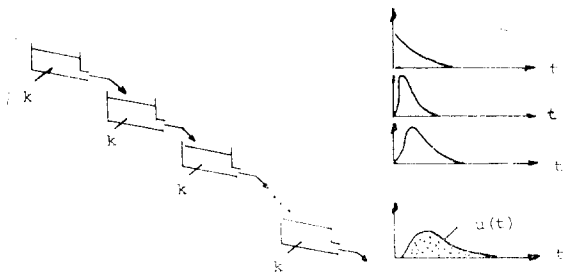


그림 2. A Cascade of linear reservoirs

2.3 平行線型貯水池模型 (Parallel-linear reservoir model)

平行線型貯水池模型²³⁾의 連續的인 流出을 나타내는 一般式은 2.1에서 誘導된 單位 충격함수 (6)식을 利用하여 그림 6의 S-curve에서 誘導할 수 있다.

貯留量 $S(0)=1$ 로 할 경우 그림 6에서

$$S^*(t) = \frac{i}{D} \int_0^t U(0, t) dt \quad (7)$$

으로 나타낼 수 있고 $S^*(t)$ S-curve 를 나타낸다.

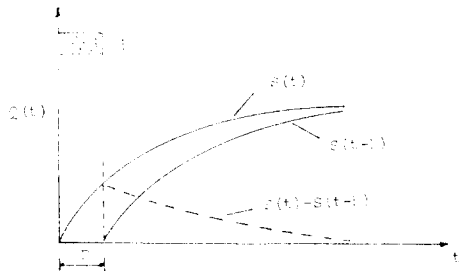


그림 6. S-curve

여기서 $t=t-D$ 의 瞬間時間과 $i=1\text{cm/hr}$ $D=1$ 時으로 假定하여 IUH를 誘導하면

$$S^*(t) = \int_0^t U(0, t-D) dt \quad (8)$$

이다. 여기서 $(t-D)=\tau$ 라 치환하고 (6)식을 대입하면

$$S^*(t) = \int_0^t \frac{1}{K} e^{-\tau/k} d\tau = 1 - e^{-t/k} \quad (9)$$

$$S^*(t) = (1 - e^{-t/k}) \quad (10)$$

이 된다. 만약 T 時間의 單位圖를 $U(T, t)$ 라 하면 線型貯水池 模型의 連續的인 流出은

$$U(T, t) = \frac{1}{T} \int_{t-D}^t U(0, \tau) d\tau \quad (11)$$

$$= \frac{1}{T} (-e^{-t/k} + e^{-\tau/k})$$

$$= \frac{1}{T} (e^{T/k} - 1) e^{-t/k} \quad (12)$$

이 되고 그림 7에서와 같이 2개의 平行線型貯水池 模型(2-PLR)의 流出을 나타내는 一般式은 (12)식에서

$$U(T, t) = \frac{1}{T} \frac{1}{2} (e^{T/k_1} - 1) e^{-t/k_1} + \frac{1}{T} \frac{1}{2} (e^{T/k_2} - 1) e^{-t/k_2} \quad (13)$$

식으로 나타낼 수 있으며 貯留常數 K 를 K_1 과 K_2 로 나누어 2개의 媒介變數를 利用하게 된다.

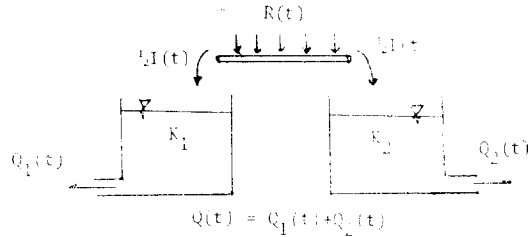


그림 7. General run off system of 2-PLR model

2.4 適用된 模型의 媒介變數 算定

Nash 模型의 媒介變數 N, K 는 觀測된 降雨一流出 水文曲線으로 모멘트법^{5), 8)}에 의해 구하였으며 SLR와 2-PLR 模型의 媒介變數 K_1 과 K_2 는 觀測된 水文曲線의 代表減水曲線(Master depression curve)¹⁵⁾을 利用하여 初期變數로 삼았다.

3. 使用資料 및 分析方法

3.1 使用資料

本 分析에 適用된 對象流域은 錦江의 支流인 論山川 上流部에 築造된 塔亭貯水池의 集水流域으로서 農業振興公社가 세계은행에 塔亭池 물管理 指針書를 提出하기 위해 設置된 水文觀測所 資料를 인용하였다. 그러나 W_2 (Un Ju) 地點과 W_3 (Sanbuk) 地點의 水位觀測所는 普通水位標로서 時間別 資料가 不充分하여 단지 W_1 (Incheon) 地點의 自記水位 記錄值만을 利用하였으며 時間別 降雨資料는 Thiessen 綫에 의거 面積雨量을 算定하였다(그림 8, 그림 9 참조).

3.2 直接流出과 有効雨量의 分離

資料蒐集된 流出量 記錄值에서 直接流出과 有効雨量 分離는 水文曲線減水部 變曲點 以後의 流量이 $Q_t = Q_0 e^{-t/k_0}$ 에 比例한다는 條件에서 流量

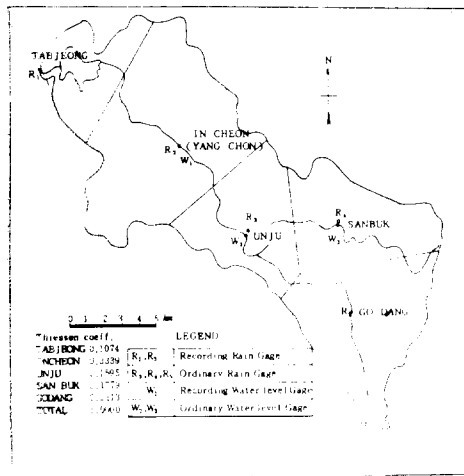


그림 8. Map showing of TABJEONG

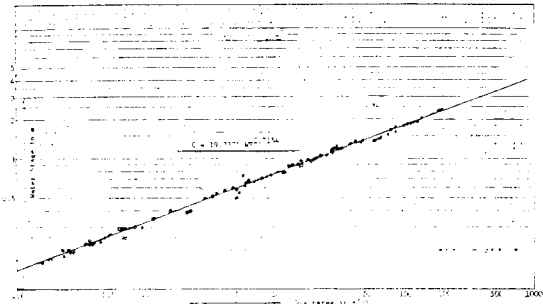


그림 9. Rating curve at INCHEON

一時間과의 水文曲線을 半代數紙에 플로팅하여 傾斜急變點法으로 分離하여 有効雨量은 初期損失과 一定損失雨量法으로 나누어 取하였다.

<표 1> Watershed Characteristics of TABJEONG

Area (km ²)	Stream length (km)	Shape factor	Relief ratio	Stream mean slope (m/km)	Land Use (%)				
					Rice paddy	Up-land	Woods	Village or others	Total
138.6	25.54	0.211	0.029	6.35	5.0	7.0	85.0	3.0	100

3.3 分析方法

本 分析에서는 論山 塔亭池 流域에서 觀測된 降雨一流出 資料中 洪水水文曲線이 比較의 뚜렷한 '84年 洪水記錄 3件을 蒐集하여 Nash 模型의 媒介變數 N , K 는 모멘트法으로 그리고 SLR 과 2-PLR 模型의 媒介變數 K_1 , K_2 는 代表減水曲線 (Master depression curve)에서 計算된 값을 初期變數로 假定하였다. 그리고 實測值에서 誘導된 各 模型의 初期 媒介變數는 最適化하는 過程에서 Rosenbrock(1960)^{13,16),21)} 이 開發한 Hill crimb 方法을 利用하여 F 값을 目的函數로 삼았으며 또 降雨發生 時間과 流出發生時間의 間격은 水路지체시간으로 假定하여 1時間씩 變化시켜가면서 行하였다.

4. 檢討 및 考察

4.1 實測值와의 比較

3件의 洪水發生 記錄으로 水路지체시간을 한

시간씩 주변서 Nash 模型과 SLR, 2-PLR 模型의 變數들을 最適化 한 結果 수로지체 시간은 大部分의 降雨發生件에서 3時間 範圍로 나타났으며 RMS 값은 0.002~0.005 범위(7月 12日 SLR 模型만 除外)로 比較의 모든 模型이 유사한 값으로 誘導되었다. 그리고 尖頭洪水量(Q_p)의 誤差도 10% 미만이었으며 全體 瞬間單位圖(IUH) 體積도 0.95cm 以上으로 나타났다. 그러나 標本에서 誘導된 가장 適合한 IUH는 RMS 값으로 判別하였으며 複合降雨一流出記錄의 回旋檢定을 위한 代表 IUH는 S_1 洪水에서 SLR 模型, S_2 , S_3 洪水에서는 Nash 와 2-PLR 模型의 瞬間單位圖를 利用하였다(表 2).

4.2 模型의 媒介變數檢定

4.1에서 選定된 RMS 값이 가장 작은 模型의 瞬間單位圖로서 複合降雨一流出記錄에 適用하여 實際로 單純降雨에서 誘導된 各 模型의 媒介變數가 實驗流域의 流出形態와 어느 程度 一致하는가를 살펴 보았다. 즉 세가지 洪水에서 얻은

〈표 2〉 Comparison of Modelling Parameters

Date	Applied model	Channel delay time	Parameters				Q _p (mm)			T _p (hr)		RMS	F	Depth of IUH (m)
			Starting		Final		Observed	Computed	Error rate (%)	Observed	Computed			
			K ₁ (N*)	K ₂ (K)	K ₁ (N*)	K ₂ (K)								
5. 13(S ₁)	NASH	3	1.476	8.705	1.311	9.177	1.70	1.543	-9.2	12	13	0.0033	0.448	0.996
	SLR*	4	16.8	—	11.405	—	1.70	1.812	+6.6	12	13	0.0027	0.301	0.993
	2-PLR	3	2.7	16.8	10.298	14.480	1.70	1.701	+2.0	12	12	0.0042	0.736	0.988
6. 19(S ₂)	NASH*	2	1.706	8.965	1.315	12.104	0.71	0.687	-3.2	8	7	0.0027	0.086	0.976
	SLR	3	16.8	—	17.576	—	0.71	0.767	+8.3	8	6	0.0037	0.158	0.947
	2-PLR	3	2.7	16.8	15.900	16.585	0.71	0.827	+16.5	8	6	0.004	0.189	0.958
7. 12(S ₃)	NASH	3	1.125	5.069	1.007	5.213	4.79	4.84	+1.0	8	8	0.0058	1.65	0.997
	SLR	3	16.8	—	4.077	—	4.79	5.82	+21.5	8	8	0.0109	5.86	0.999
	2-PLR*	3	2.7	16.8	3.317	9.857	4.79	4.685	-2.2	8	8	0.0056	1.509	0.977

*는 Parameter 검정에 사용된 IUH
 * ()는 Nash-model의 Parameter 임.

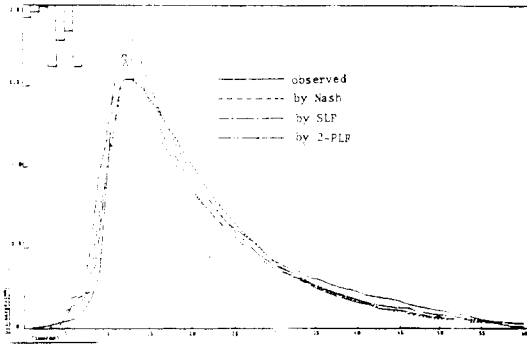


그림 10. Observed & Computed Flood Hydrograph for S₁

가장 적합한 3가지 모델의 瞬間單位圖를 長期 間의 降雨에 回旋하여 다양하게 나타난 實際流出 記錄과 比較하여 봄으로서 今回 誘導된 模型

의 媒介變數 適用與否를 檢討함과 함께 瞬間單位圖의 適合性도 檢定하였다. 그 結果 RMS 값은 3個模型 공히 0.003 범위로 나타났으며 總流出體積 오차도 10% 미만이었고 SLR와 Nash 模型의 相關性도 대단히 높았다(表 3).

5. 結 論

以上과 같이 論山川 上流部에 位置한 塔亭池 流域의 實測된 時間別 降雨量과 自記水位計의 流出量 資料를 利用하여 Nash 模型과 SLR, 2-PLR 模型의 媒介變數들을 推定함과 同時에 誘導된 瞬間單位圖를 複合降雨에 回旋하여 檢討하였으며 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

1) 今回 誘導된 3個模型 공히 實測資料만 만족하면 洪水流出解析에는 設計模型으로 充分히

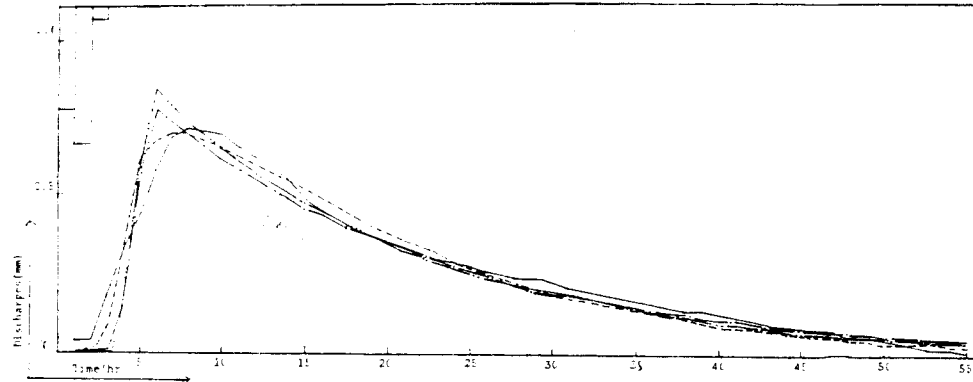


그림 11. Observed & Computed Flood Hydrograph for S₂

〈표 3〉 Test of Estimated Parameters for Complex Hydrograph

Date	Type	Parameters		RMS	Observed $\sum Q$ (mm)	Computed $\sum Q$ (mm)	Error rate (%)	r
		$K_1(N)$	$K_2(K)$					
'84. 7. 1~7. 5.	S_1 , SLR	11.405	—	0.00362	109.96	103.52	-6.44	0.942
	S_2 , Nash	1.315	12.104	0.00324	109.96	103.47	-6.49	0.895
	S_3 , 2-PLR	3.317	9.857	0.00296	109.96	102.69	-7.27	0.771

() Nash-model parameters

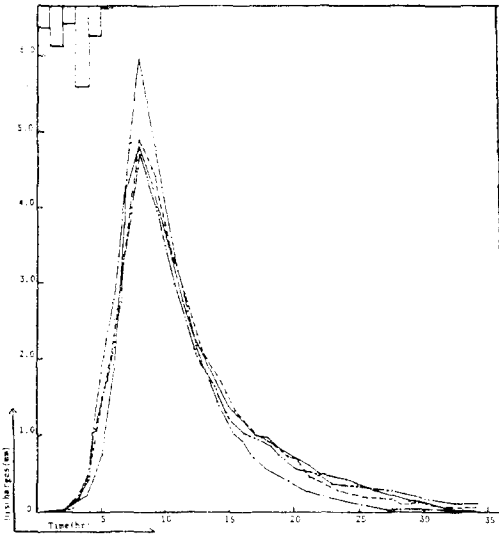


그림 12. Observed & Computed Flood Hydrograph for S_3

활용할 수 있는 正確도가 檢定되었다.

2) 洪水流出에 適用할 模型은 長期流出과는 달리 降雨—流出量 關係를 線形으로 模型化 하여도 만족할 만한 結果를 얻을 수 있었다.

3) 實驗流域의 降雨—洪水 水路 遲滯시간은 今回分析에서 概略적으로 3~4 hr 範圍로 나타났다.

4) S_3 洪水는 事前降雨가 많은 豪雨期間中 발취된 資料로서 瞬間單位圖 誘導에는 不適合 하였다.

5) S_1 , S_2 洪水에서 얻은 各 模型의 媒介變數 範圍는 Nash 模型의 N , K 값은 $N=1.3$, $K=9.0\sim 12.0$ 그리고 平行貯水池 模型의 K 값은 10~17 範圍로 나타났다(表 2).

짧은 期間('83. 6~'84. 12) 동안 觀測된 資料이므로 不充分하여 여러면으로 分析해 보지 못한 점이 아쉽다. 앞으로 自然發生的인 水文現象의

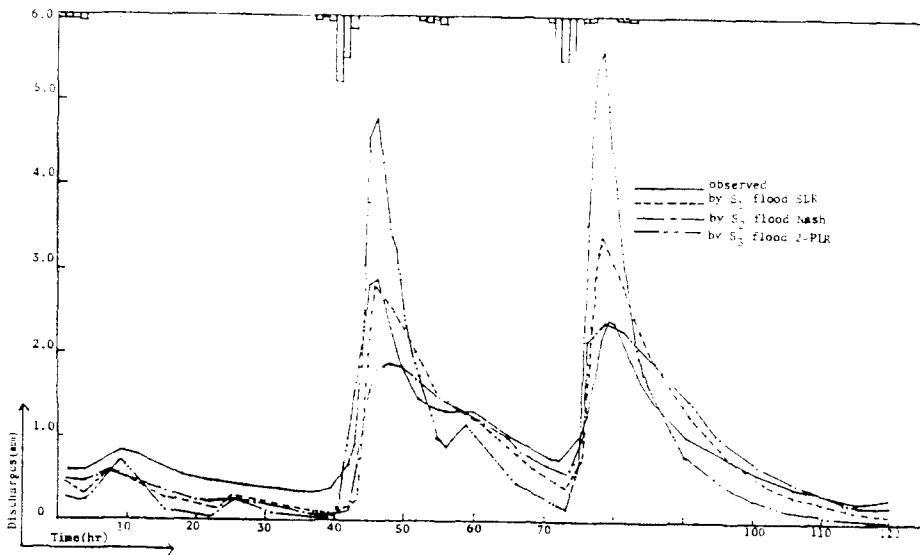


그림 13. Test of Complex Hydrograph for estimated Parameters

正確한 규명은 계속적인 觀測없이는 不可能하다
는 것과 우리나라에서도 實驗流域을 확대 선정
하여 外國에서 發表된 여러 模型의 媒介變數를
流域實情에 맞게 誘導하여야 할 것으로 사료된
다.

參 考 文 獻

1. Dooge, J.C.I.(1959) : A general theory of unit hydrograph, J. Geoph. Res. vol. 64, 241~256.
2. Fleming, G.(1975) : Computer simulation techniques in hydrology, Elsevier, N.Y.
3. Fleming, G.(1979) : Deterministic models in hydrology, F.A.O., 2~4.
4. Gajiyama(1921) : 鮮于仲皓, 水文學, 330.
5. 池洪基, 南宣祐, 李舜鐸(1986) : 河川流出豫測을 위한 降雨一流出모델, 水文學會誌 제19권 4호.
6. J. Nemeec(1972) : Engineering hydrology, Mcgraw-Hill publ. Co.
7. 金裁螢, 尹龍男(1986) : 小流域의 洪水流出計算을 위한 單一線形貯水池模型의 適用, 水文學會誌 제19권 1호.
8. 李舜鐸, 李永禾(1986) : 線型-非線型 洪水流出 모델의 比較研究, 水文學會誌 제19권 3호.
9. Mulvaney, T.J.(1851) : On the use of self-registering rain and flood gauges, Inst. Civ. eng. Ireland. Dublin.
10. Nash, J.E.(1957) : The form of Instantaneous unit hydrograph, IASH, publ. 45, vol. 3, 114~121.
11. _____(1958) : Determining runoff from rainfall, proc. Inst. civil engs. 10, 163~184.
12. _____(1960) : A note on an investigation into two aspects of the relation between rainfall and storm runoff. IASH, publ. 51, 567~578.
13. Natural Environment Research council(1975) : Flood studies Report, London, p.518.
14. Nippon Koei(1973) : 大清탐 妥當性 調査報告書, 建設部
15. Raudsiky, A.J.(1979) : Hydrology, Pergamon Press. p.215, p.184.
16. R.T. Clarke(1973) : Mathematical models in hydrology. F.A.O., 19, 154~155.
17. San Yu(1975) : 榮山江(Ⅱ)段階 水文報告書, 農業振興公社
18. Schultz, E.F.(1973) : Problems in applied hydrology, Fort Collins, Water resources publ., Colorado.
19. Seyhan, E.(1979) : Application of statistical methods to hydrology, Inst. of earth scie. Ams. Holland.
20. 鮮于仲皓, 尹龍男, 朴成宇 (1974) : 洪水量 算定을 위한 合成單位圖 誘導, 建設部
21. 鮮于仲皓(1984) : 季節流域 模型을 使用한 流量的 空間的 分布 決定. 水文學會誌 제17권 2호
22. Sugawara(1956) : A method of revision of the river discharges by means of a rainfall model, IASH. publ. 42.
23. U.S. Dep. of Agriculture(1973) : linear theory of hydrogical systems, Technical Bulletin.
24. Volker, A.(1983) : lecture notes in hydrology. Inter. course in hydrology, Delft. Holland.
25. 王如意(1973) : 應用水文學(下冊)