

推計學的 特性을 考慮한 實時間流出 豫測

Real-Time Forecasting for Runoff Considering Stochastic Component

鄭 夏 禹* · 李 南 鎬** · 韓 炯 根***
Chung, Ha Woo · Lee, Nam Ho · Han, Hyung Geun

Summary

The objective of this study is to develop a real-time runoff forecasting model considering stochastic component. The model is composed of deterministic and stochastic components. Simplified tank model was selected as a deterministic runoff forecasting model. The time series of estimation residual resulting from the tank model simulation was analyzed and was best suited to the second-order autoregressive model. ARTANK model which combined the tank model with the autoregressive process was developed. And it was applied to a BANWEOL basin for validation. The simulation results showed a good agreement with the observed field data.

I. 緒 論

우리나라는 각종 産業의 發達로 生工業用水 및 農業用水의 需要가 急增하고 있는 반면, 水質汚染의 加速化 등으로 利用可能한 水資源量이 減少하고 있는 趨勢에 있다. 또한 대부분의 農業用貯水池는 10年頻度 旱魃을 극복할 수 있도록 計劃되어 지는데, 빈번히 旱魃時에 물 不足現像을 겪는 實情에 있다. 이러한 與件을

克服하기 위해서는, 계속적인 新規 水資源 施設의 開發이 必要하지만 막대한 開發費用이 필요하므로, 既存의 水資源을 效率的으로 利用할 수 있는 水管理 方案이 必要하다.

最近에 水資源 利用의 合理化를 圖謀하기 위한 水管理 方法들에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 農業用 水資源 管理分野에서는 農業用水의 合理的 利用을 위한 灌溉組織의 효율적인 操作 計劃 樹立의 重要性이 증대되고 있는데, 이를

* 서울大學校 農業生命科學大學

** 安城農業專門大學

*** 서울大學校 大學院

키워드: 時系列, 推計學的 模型, 自己相關圖, 偏自己相關圖, 實時間 豫測, 탱크模型, 流出量

위해서는 우선 貯水池나 河川의 流出量에 대한 正確한 實時間 流出豫測模型의 開發이 眞實히 要求된다.

現在 開發된 實時間 流出豫測模型들은 주로 洪水로 인한 下流의 人命과 재산피해를 최소한으로 줄이기 위한 洪水豫警報를 目的으로 개발되어 왔다. 그러나 최근에는 기존의 水資源을 합리적으로 管理하기 위해 日別 總流出量의 實時間豫測을 위한 모형들이 개발되어 운영되고 있다. Cluckie, et al²⁾은 실시간 유출예측을 위한 Online 媒介變數 補正方法으로서 순차계산법, 순환최소자승법 및 Kalman filtering에 대해 比較하였다. Box와 Jenkins¹⁾는 概念模型에 의한 豫測值과 實測值과의 殘差時系列에 대해 ARIMA模型을 適用시켜 本 結果 AR模型을 適用하는 것이 妥當한 것으로 발표되었고, Marivoet와 Vandewiele⁶⁾는 洪水流出의 實時間 豫測을 위해 概念模型과 自己回歸(Autoregressive, AR)模型의 結果를 組合한 改善된 模型을 開發하고 對象流域에 適用하여 滿足할 만한 結果를 얻었다. 국내에서도 Kalman filtering기법 등을 이용한 실시간 유출예측모형이 많이 개발되어 사용되고 있다. 鄭의¹⁴⁾는 實測 降雨-流出量 資料에 의해 灌溉用水로 사용되는 河川日 流出量의 實時間豫測을 위해 탱크模型의 基本 알고리즘을 利用한 適應模型을 開發하여 半月 流域에 適用하였던 바 좋은 結果를 나타내었다. 李¹²⁾등은 Kalman filtering 降雨-流出模型의 적용을 위한 基本模型으로 線形貯水池模型과 탱크模型을 선정하고, Filtering 기법을 이용하여 강우-유출모형의 豫測誤差를 Filtering하여 정확한 流出豫測을 가능토록 하였고, 李¹³⁾등은 雨量觀測所가 미비된 소유역에서 실시간 유출 예측을 위해 시스템방정식으로 AR(2)를 택하여 Kalman filtering하는 실시간 유출예측모형을 개발하여 榮山江 流域의 流出解析을 실시한 바 있다.

本 研究은 確定論的인 TANK 模型에 의한

模擬發生誤差에 대한 時系列分析을 實施하고, 이 誤差를 再現할 수 있는 推計學的 模型을 構成하여 이를 確定論的인 模型과 組合하여 河川 日流出量의 實時間 豫測에 活用할 수 있는 지의 與否에 대해 檢討하는데 그 目的이 있다.

II. 模型의 開發

1. 實時間流出豫測

本 研究에서는 다음 時間 段階의 流出 $Q(t+1)$ 를 좀더 정확히 豫測하기 위해, Sugawara에 의해 개발된 確定論的인 TANK 模型에 의한 豫測值 $Q_{\text{tank}}(t+1)$ 에 推計學的인 模型에 의해 模擬 發生된 誤差 $Z(t+1)$ 를 고려하는 實時間 流出模型을 構成하였는데 式(1)과 같이 表示할 수 있다.

$$Q(t+1) = Q_{\text{tank}}(t+1) + Z(t+1) \dots\dots\dots(1)$$

가. 탱크模型⁸⁾

탱크模型은 河川流出量을 誘導하기 위해 Sugawara가 開發한 總括型 模型으로, 自然現狀에서 일어나는 각각의 水文循環過程을 概念化할 수 있도록 탱크의 個數와 配列方法을 組合하여 만든 降雨-流出關係를 模型化한 것이다. 일반 적으로 河川 流出現狀의 各 成分을 概念化하기 위해 전형적인 4段 直列組合이 주로 사용된다.

그러나, 우리나라의 灌溉用 貯水池 流域의 대부분이 小規模이고, 流路長이 짧다는 點을 勘案하여 金등⁸⁾은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 3個의 탱크를 이용하는 單純模型을 시도하였는데, 本 研究에서도 이 單純化된 模型을 導入 하였다.

나. 推計學的 模型

時系列(time series)이란 時間에 따라 連續的 으로 發生되는 임의의 觀測值의 集合으로 時間 $t=1, 2, 3 \dots N$ 에 대하여 $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_N$ 으로 表現한다. 時系列에서 임의의 時間區間에 대한 統計的 特性이 變하지 않을때 定常的(statio-

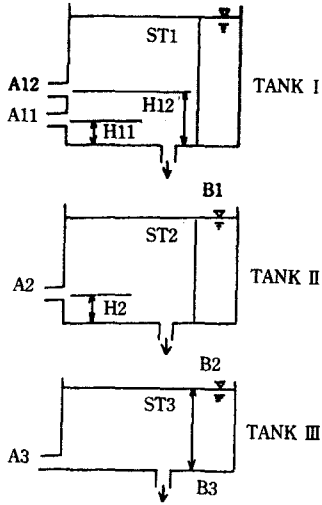


Fig. 1. Schematic diagram of the TANK model

nary)인 時系列이라고 한다. 또한, 原時系列은 보통 確定論的인 成分과 推計學的인 成分의 組合으로 構成되어 있는데, 前者는 水문사상이 入力-流出關係를 維持하면서 確定的인 法則에 따라 發生하는 것이고, 後者는 確率法則에 따라 無作爲하게 發生하는 水文時系列을 指稱한다. 傾向性 分析과 週期性 分析을 통해 原時系列에서 確定論的인 成分을 除去하여, 새로운 殘差成分의 時系列을 誘導한다. 이 새로운 時系列이 時間에 대해 定常的인 特性을 가진다면, 時系列 $Z_t(t=1, 2, 3, \dots, N)$ 는 自己回歸模型(AR)으로 다음과 같이 表示될 수 있다.

$$Z_t = \sum_{k=1}^p (\phi_{p,k} \cdot Z_{t-k}) + a_t \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서, P 는 AR模型의 次數(order), $\phi_{p,k}$ ($k=1, 2, \dots, p$)는 AR模型의 媒介變數이고, a_t 는 平均値가 0이고 分散이 σ_a^2 인 獨立時系列로서 偶然成分을 表示한다. 만약, 이 새로운 時系列이 時間에 대해 定常的인 特性을 가지지 않을 경우에는 다음과 같이 標準化해야 한다.

$$Z_t = \frac{X_t - \bar{X}_t}{S_{xt}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

여기서, X_t 는 非定常的인 時系列이고 \bar{X}_t 및 S_{xt} 는 각각 時系列의 平均値와 標準偏差이다.

일반적으로 AR模型을 構成하기 위해서는 模型을 判別(indentification)한 다음, 判別된 模型의 媒介變數를 決定하는 段階가 필요하다.

1) 模型의 判別

Box와 Jenkins¹⁾는 遲滯時間別로 自己相關係數(γ_p)와 偏自己相關係數($\phi_{p,p}$)를 計算하고 遲滯時間에 따라 圖示한 自己相關圖(ACF)와 偏自己相關圖(PACF)를 利用하여 일반적인 ARIMA 模型의 次數(Order)를 決定하는 方法을 提示하였다. 이에 의하면, AR모형으로 表示될 수 있는 時系列의 ACF와 PACE는 p 의 次數에 따라 固有한 特性을 가진다. 즉, 次數 $p=1$ 이면 ACF는 遲滯 k 가 增加함에 따라 指數曲線으로 急激히 減少하고, 次數 $p \geq 2$ 이면 ACF는 週期性을 가진 形態를 나타내며 遲滯 k 의 增加에 따라 AR(1)의 경우보다 多少 緩慢하게 減少되며 上下로 움직인다. 또한, PACF는 AR(p)模型의 最終係數 $\phi_{k,k}$ 로 AR모형의 次數 p 를 決定하는데 重要한 役割을 한다. 즉, 時系列을 AR(p)模型으로 假定할때, 標準誤差(S.E.) $1/N^{1/2}$ 에서 $k \leq p$ 인 경우는 $\phi_{k,k} \approx 0$ 이며, $k > p$ 인 경우에는 有意하게 0과 差異가 없다.

2) 媒介變數의 決定⁵⁾

위에서와 같은 ACF와 PACF의 特性을 利用하여 AR模型의 適當한 次數 p 가 決定되면, 最少自乘法, Maximum Likelihood Method 및 Yule-walker 方程式 등을 利用하여 媒介變數를 決定하게 되는데, 本 研究에서는 式(4)와 같은 Yule-walker方程式을 使用하였다.

p 次 AR模型의 最終項인 p 項의 AR係數 $\phi_{p,p}$ 를 偏自己相關係數라고 하는데, 式(4)로 推定한다.

$$\phi_{p,p} = \frac{\gamma_p - \sum_{k=1}^{p-1} (\phi_{p-1,k} \cdot \gamma_{p-k})}{1 - \sum_{k=1}^{p-1} (\phi_{p-1,k} \cdot \gamma_k)} \quad \dots\dots(4)$$

또한, k 項의 AR係數를 $\phi_{p,k}$ 라 하면, $\phi_{p,k}$ 는

$$\phi_{P,K} = \phi_{P-1,K} - \phi_{P,P} \cdot (\phi_{P-1,P-k}) \dots\dots\dots(5)$$

이다. 여기서, γ_k 는 遲滯 k 에 대한 自己相關係數이다.

2. 模型의 構成

本 研究에서는 推計學的 特性을 考慮한 實時間 流出模型을 構成하여 Fig. 2와 같은 實時間 流出模型의 計算節次를 圖示하고 있다. 임의의 時間 $t+1$ 日에 대한 流出豫測을 위해서는 탱크 模型으로 $Q_{\text{tank}}(t+1)$ 을 計算하고, 實測流出量 $Q(t) \sim Q(t-p)$ 을 利用하여 t 日 $\sim t-p$ 日의 誤差 $Z(t) \sim Z(t-p)$ 을 計算한다. 이 誤差로 부터 다음 時間段階의 誤差 $Z(t+1)$ 을 模擬發生한 다음 이를 $Q_{\text{tank}}(t+1)$ 에 考慮해 주어 正確한 流出을 豫測하게 된다.

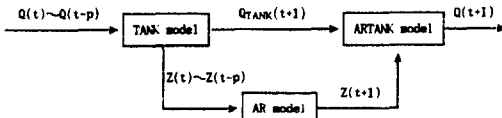


Fig. 2. Schematic description of ARTANK algorithm

III. 模型의 應用

1. 對象流域 및 水文資料

模型의 適用을 위해 京畿道 華城郡 半月面에 位置한 流域面積이 4.80km^2 인 小流域을 選定하였다. 選定된 流域의 主要 特性은 Table-1에서 보는 바와 같은데, 流路長은 3.85km , 形狀係數는 0.32 , 最大起伏量은 435.7m , 및 河川의 平均傾斜는 $31.4\text{m}/\text{km}$ 이다. 또한 流域의 土地利用狀況은 被服特性과 密接한 關係를 갖는데, 全體 流域面積의 87% 가 山林地로 대부분을 차지하고 農耕地는 12% 에 지나지 않는다.

한편, 媒介變數 補正 및 檢定을 위해 1986年 4月 \sim 10月까지의 實測流出量이 使用되었고, 降雨量 資料는 本 流域에서 約 8km 에 位置한 水原測候所에서 觀測한 資料가 利用되었다.

Table-1. Physiographical characteristics of the watershed

Characteristics	Values	Units
Catchment area	4.80	km^2
Length of the stream	3.85	km
Shape factor	0.32	
Maximum relief	435.7	m
Relief ratio	0.113	
Mean slope of the stream	31.4	m/km
Stream density	1.45	EA/km^2
Land use : paddy	7	%
upland	5	%
forest	87	%
etc.	1	%

주) 貯水池 水管理 研究¹⁰⁾

2. 媒介變數의 補正

가. 탱크模型

Fig. 1에 圖示되어 있는 單純化된 탱크모형의 媒介變數는 總 13個로 構成되어 있다. 流出孔의 係數, 流出孔의 높이 및 浸透孔의 係數는 時間에 따라 變하지 않는 媒介變數로 過去의 降雨-流出量 資料를 利用하거나 金등⁸⁾에 의해 提示된 過去의 實測資料가 없는 流域에서도 媒介變數의 推定이 可能하도록 媒介變數와 流域特性因子와의 關係를 考慮한 回歸關係式을 利用하여 補正한다.

本 研究에서는 模型의 媒介變數 補正을 위해 金등⁸⁾에 의해 提示된 無計測 流域에서도 使用할 수 있는 回歸式을 利用하여 媒介變數를 決定하였는데, 그 結果는 Table-2와 같다.

나. 推計學的 模型

模型의 媒介變數 推定을 위해 1986年 4月부터 7月까지 4個月間의 實測 日流出量의 資料를 利用하였다. 實測 日流出量의 時系列에서 TANK 模型에 의한 確定論的인 成分을 除去하고 얻어진 誤差 時系列을 定常時系列化한 後의 ACF와 PACF는 各各 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. ACF를 보면, γ_1 및 γ_2 가 Anderson의 95% 信賴區間에

Table-2. Calibrated parameters of the TANK model

A11	A12	A2	A3	H11	H12	H2	B1	B2	B3	ST1	ST2	ST3
0.14	0.18	0.19	0.0075	5	50	5	0.36	0.18	0.02	0.0	0.0	105

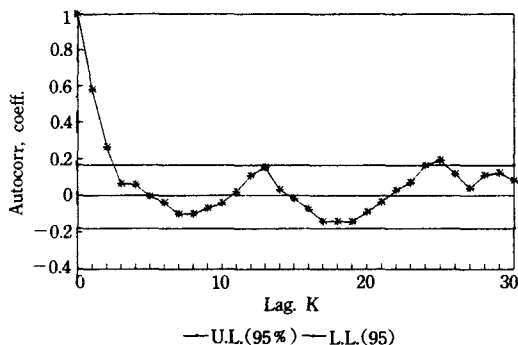


Fig. 3. Serial Correlation Coefficient of error series with tolerance limits

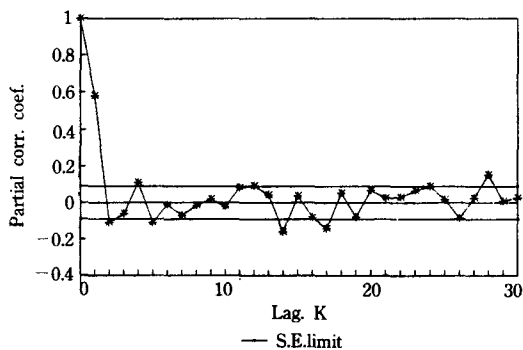


Fig. 4. Partial Autocorrelation Coefficient of error series with tolerance limits

有意하여 時間的 持續性을 가지며, 指數函數의 減少함을 알 수 있다. 또한, PACF는 遲滯時間 $k=1, 2$ 에서 95% 有意水準에 有意하고, $k>2$ 에서는 유의하게 0임을 알 수 있다. 따라서 이 두 그림으로 부터 誤差 時系列을 再現할 수 있는 適切한 推計學的인 模型의 形態는 AR(2)임을 알 수 있다. 그러나, 이 時系列을 AR(1) 및 AR(3)으로 假定을 하고 각각의 경우에 대해 式(4) 및 式(5)를 利用하여 媒介變數를 推定하고, 이 結果를 利用하여 豫測한 값과 實測值와

Table-3. Estimated parameter of AR(p) model for $p=1, 2, 3$

Model type	$\phi_{1,1}$	$\phi_{2,2}$	$\phi_{3,3}$	RMS error
AR(1)	0.588	*	*	0.8836
AR(2)	0.650	-0.108	*	0.8787
AR(3)	0.643	-0.072	-0.057	0.8794

比較한 結果를 Table-3에 보이고 있는데, AR(2)의 RMS가 0.8787로 가장 적은 값을 보이기는 하나 AR(1) 및 AR(3)의 RMS와 별 差異가 없음을 알 수 있다.

따라서, 本 研究에서는 推計學的 成分을 AR(2) 模型으로 하여 ARTANK 模型을 構成하고 實時間 流出豫測에 利用하였다. 즉, 式(1)은 ARTANK 模型으로 流出量 $Q(t)$ 는 確定論的인 TANK 模型의 推定值 $Q_{tank}(t)$ 와 誤差에 대한 推計學的 模型의 推定值 Z_t 의 組合으로 表示할 수 있는데 式(6)과 같다.

$$Q(t) = Q_{tank}(t) + 0.650 Z_{t-1} - 0.108 Z_{t-2} + at \dots\dots\dots(6)$$

3. 模型의 檢定

本 研究에서 開發한 推計學的 特性을 考慮한 實時間流出豫測模型 ARTANK의 檢定을 위해 1986年 8月 1日~1986年 10月 31日 까지의 日 流出量 資料를 使用하였다.

ARTANK 模型으로 $t-2$ 日과 $t-1$ 日의 實測日 流出量을 利用해서 t 日의 日 流出量을 豫測하고 이 結果를 實測值 및 TANK 模型에 의한 模擬發生值와를 比較하였는데, 그 結果는 Fig. 5~ Fig. 7과 같다. (平水時와 低水時의 日 流出量을 精確히 나타내기 위해 半對數紙를 使用하였음.)

Fig. 5~Fig. 7과 같이 ARTANK 模型에 의한 流出量 推定이 尖頭流量 部分을 除外하고는 대체적으로 TANK 模型보다 改善된 것으로 나타나고 있어 물管理 目的으로 使用하는데 效果的인 것으로 생각된다. 특히 模型의 減退曲線의

下降部와 平水位 部分에서는 상당히 改善된 것을 볼 수 있다.

또한 Table-4는 檢定期間에 대한 實測值, TANK 模型值 및 ARTANK 模型值의 月別 水收支 狀況을 나타내주고 있다. 總 實測流出量은 327.82mm이고, ARTANK 模型에 의한 豫測值는 282.00mm로서 그 差異는 45.82mm로 TANK模型에 의한 誤差 101.34mm 보다 상당히 改善된 것을 알 수 있다.

以上の 結果에서 보면 ARTANK 模型은 實時間에 求해지는 流出資料를 利用하여 河川의 日流出量을 豫測하는데 有用하게 活用할 수 있을 것으로 판단된다.

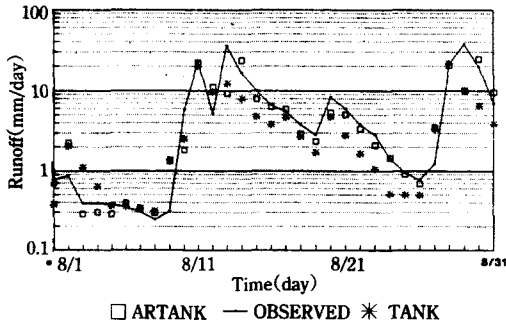


Fig. 5. Observed and forecasted daily runoff by ARTANK model and TANK model (AUG.)

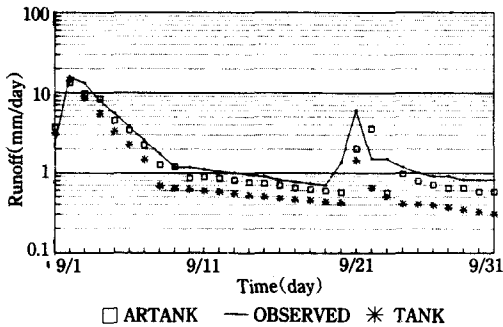


Fig. 6. Observed and forecasted daily runoff by ARTANK model and TANK model (SEP.)

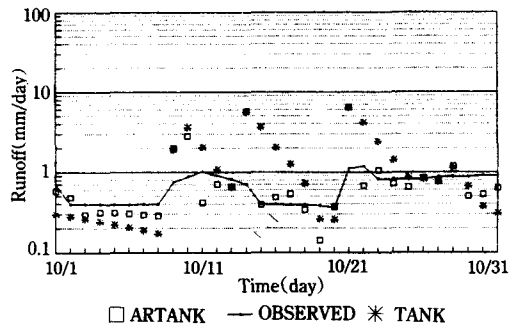


Fig. 7. Observed and forecasted daily runoff by ARTANK model and TANK model (OCT.)

Table-4. Monthly result of verification test(1986. 8. 1~1986. 10. 31)

Month	Rainfall (mm)	Observed (mm)	TANK model		ARTANK model	
			simulated (mm)	Absolute error(mm)	simulated (mm)	Absolute error(mm)
8	274.6	227.40	132.53	94.86	184.55	42.85
9	80.9	79.69	50.09	29.60	66.17	13.52
10	113.2	20.73	43.86	-23.13	31.28	-10.55
Total	468.7	327.82	226.48	101.34	282.00	45.82

日別操作 등을 위해서는貯水池나 하천의流出量에 대한正確한實時間流出豫測이要求된다.本研究에서는小規模灌溉用貯水池의無計測流域에서使用할수있도록單純化된탱크模型의基本알고리즘에推計學的特性을考慮한實時間流出模型ARTANK를開發하고,實測資料가 있는半月流域에서그適用性을檢討한結果를要約하면다음과같다.

1. 確定論的인 TANK 模型에 의한 模擬發生誤差에 대하여 時系列 分析을 實施한 結果, 時間的 持續性이 強한 AR(2) 模型의 適合함을 보였다.

2. 誤차를 再現할 수 있는 推計學的 模型 AR(2)의 係數는 0.650, -0.108로 t日의 豫測誤차는 t-1日의 誤차에 주로 左右됨을 알 수 있다.

3. 日別 流出量의 경우 ARTANK 模型에 의한 結果가 탱크模型에 의한 結果와 比較할 때 상당히 改善된 結果를 보인다.

4. ARTANK 模型은 平水位와 低水位의 日流出量에 대해 비교적 精確한 豫測을 할 수 있는 것으로 判斷되어 灌溉地區의 實時間 操作에 이용이 가능할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

1. Box, G. E., and G. M. Jenkins, 1970, Time Series Analysis: Forecasting and Control, Holden-Day, Inc., San Francisco, pp. 46-84.
2. Cluckie, I. D., D. A. Harwood & R. Harpin, 1980, Three Systems Approaches to Real-Time Rainfall Runoff Forecasting, Hydrological Forecasting, Proc. of the Oxford Symposium, IAHS-AISH Publ. No. 129, pp. 389-396.
3. Drooper, N. R., and H. Smith, 1986, Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons.

- Inc., New York, pp. 709.
4. Gupta, R. K., and H. S. Chauhan, 1986, Stochastic Modeling of Irrigation Requirements, Vol. 112, No. 1, Journal of Irrigation and Division.
5. Kottegoda, N. T., 1980, Stochastic Water Resources Technology, MACMILLAN PRESS LTD, pp. 111-166.
6. Marivoet, J. L., and G. L. Vandewiele, 1980, A Real Time Rainfall-Runoff Model, Hydrological Forecasting, Proc. of the Oxford Symposium, IAHS-AISH Publ. No. 129, pp. 409-418.
7. Montgomery, D. C., and L. A. Johnson, 1976, Forecasting and Time Series Analysis, McGraw-Hill Book Co., pp. 304.
8. 金顯榮, 朴承禹, 1986, 流域特性에 따른 탱크모형 媒介變數의 變化, 韓國農工學會誌, 28(2), pp. 42-52.
9. 박무중, 윤용남, 1989, Multiplicative ARIMA 模型에 의한 月流量의 推計學的 模擬豫測, 韓國水文學會誌, 22(3), pp. 331-339.
10. 서울大學校 農業開發研究所, 1985-1988, 貯水池 물管理 研究, 農林水産部, 農業振興公社.
11. 尹龍南, 전시영, 1985, ARMA(1, 1) 多季節 模型에 의한 河川流量의 模擬發生, 韓國水文學會誌, 19(1), pp. 75-83.
12. 李舜擇, 李永朱, 1990, Kalman Filtering에 의한 河川流域의 降雨-流出모델, 수공학는총, Vol. 33, pp. 34-39.
13. 李元煥, 李英錫, 1986, Kalman Filter에 의한 Online 流出豫測, 韓國土木學會誌, 6(2), pp. 57-65.
14. 鄭夏禹, 李南鎬, 朴承禹, 1990, 河川 日流出量의 實時間豫測, 韓國農工學會誌, 32(3), pp. 47-55.