

실시간 유출예측을 위한 선행강우지수별 TF모형의 유도

Derivation of Transfer Function Models in each Antecedent Precipitation Index for Real-time Streamflow Forecasting

남선우* · 박상우**

Nahm, Sun Woo · Park, Sang Woo

Abstract

Stochastic rainfall-runoff process model which is mainly used in real-time streamflow forecasting is Transfer Function(TF) model that has a simple structure and can be easy to formulate state-space model. However, in order to forecast the streamflow accurately in real-time using the TF model, it is not only necessary to determine accurate structure of the model but also required to reduce forecasting error in early stage. In this study, after introducing 5-day Antecedent Precipitation Index (API5), which represents the initial soil moisture condition of the watershed, by using the threshold concept, the TF models in each API5 are identified by Box-Jenkins method and the results are compared with each other.

요 지

실시간 유출예측에서 주로 쓰이는 추계학적 강우-유출 과정모형은 모형구조가 간단하고 상태공간 모형으로 수식화하기에 용이한 TF모형이다. 이 모형을 이용하여 실시간 유출예측을 효율적으로 수행하기 위해서는 정확한 모형구조의 결정이 선행되어야 하며, 특히 예측초기의 오차를 줄일 수 있는 방법이 요구된다. 본 연구에서는 이를 위하여 유역의 초기습윤상태를 나타낼 수 있는 5일 선행강우지수를 threshold개념으로 도입하고, 각각의 TF모형을 Box-Jenkins 방법으로 등정하여 비교 검토하여 보았다.

1. 서 론

최근에는 수문계측망의 T/M화가 이루어짐에 따라 강우-유출과정을 상태공간모형(state-space model)으로 표시하고 filtering기법을 적용함으로써 홍수유출과 같은 단기유출을 실시간 예측하려는 많은 연구가 시도되고 있다. 이러한 연구는 복잡한 자연

하천유역에 있어서 수자원의 효율적 관리나 치수를 위한 유출예측의 정확성과 신뢰도를 높여준다고 하겠다.

시스템모형과 관측모형으로 구성되는 강우-유출 과정의 상태공간 모형화에는 확정론적 과정모형(process model)과 추계학적 과정모형이 이용될 수 있으며, 시스템잡음과 관측잡음이 동시에 존재한다고 생각되는 경우의 상태추정에는 일반적으로 추계학적 과정모형이 이용된다.⁽¹⁰⁾ 그 가운데 실시간 유

* 정희원 · 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정희원 · 동국대학교 대학원 토목공학과 박사과정

출예측에 주로 쓰이는 추계학적 과정모형은 유역을 하나의 black-box시스템으로 간주하고 강우와 유출간의 관계를 이 시스템에 대한 시간에 종속된 입력출력관계로 생각하여 선형으로 모형화한 Transfer Function(TF)모형 또는 ARMAX모형이다.^(7,18,22) 이 모형은 모형구조가 간단하고 상태공간모형으로 수식화하기에 용이하나, 실시간 관측자료의 순차적 이용과 filtering기법의 도입에 의한 최적의 유출예측을 수행하기 위해서는 정확한 모형구조의 결정이 선행되어야 한다.⁽¹⁹⁾

한편, 자연현상으로서 비정규성과 불확정성이 내포된 실제의 강우-유출과정은 비선형성이 강하고 유역의 초기토양습윤조건(initial soil moisture condition) 등에 의해 많은 영향을 받는다고 하겠다.⁽⁶⁾ 이러한 성질은 TF모형을 이용한 실시간 유출예측에 있어서 강우에 의하여 수문응답(hydrologic response)이 일어나는 유출수문곡선의 상승부 및 침투부에서 비교적 큰 예측오차를 초래하는 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 실시간 유출예측수문곡선의 상승부에 대한 예측오차를 줄이고자 유역의 초기습윤상태를 나타낼 수 있는 5일 선행강우지수(API5)를 도입하여 threshold개념⁽¹⁵⁾으로 분리하고, 이에 해당하는 각각의 TF모형과 API5를 고려치 않은 TF모형을 Box-Jenkins(1970) 방법⁽¹⁾으로 동정(identification)하여 비교 검토하였다. 여기서 API5의 threshold 분리를 위한 방법은 집락분석(cluster analysis)⁽¹⁷⁾을 이용하였으며, 추정된 모형의 적용가능성 및 타당성 여부는 모의발생(simulation) 방법에 의한 추정치를 통계학적 방법으로 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 TF모형의 유도

유역을 하나의 black-box 시스템으로 간주하면, 이 시스템에 대한 출력치인 유출량 Q_t 는 이산시간에 대하여 입력치인 강우량 P_t 의 시계열과 다음과 같은 선형관계로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_t &= v_0 P_t + v_1 P_{t-1} + v_2 P_{t-2} + \dots + \varepsilon_t \\ &= (v_0 + v_1 B^1 + v_2 B^2 + \dots) P_t + \varepsilon_t \\ &= v(B) P_t + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 v_0, v_1, v_2, \dots 를 충격반응함수(impulse response function), $v(B)$ 를 TF라 하며, ε_t 는 여러가지 원인에 의한 오차(disturbance or noise), B 는 후진 연산자(backward-shift operator)로서 $B^n P_t = P_{t-n}$ 을 나타낸다.

식 (1)에서 TF의 특성은 충격반응함수인 가중치(weight) v_0, v_1, v_2, \dots 에 의하여 결정되나, 이론적으로 무한히 많은 수의 계수들을 포함하는 $v(B)$ 를 이용하기란 상당히 어렵다. 따라서 Box-Jenkins(1970)는 동적 선형시스템(dynamic linear system)에 대하여 식 (1)과 동등한 관계식을 식 (2)와 같이 쓸 수 있다고 하였다.

$$\delta(B)Q_t = \omega(B)P_{t-b} + \varepsilon_t \quad (2)$$

여기서, $\delta(B) = 1 - \delta_1 B^1 - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r$

$$\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B^1 - \omega_2 B^2 - \dots - \omega_s B^s$$

b = 주어진 충격에 대한 시스템의 반응시간(delayed time)

식 (2)의 형태는 식 (1)에 비하여 일반적으로 상당히 적은 수의 매개변수를 가지며, 현재의 유출량이 과거의 유출량계열과 종속관계를 이루므로, 가장 최근에 관측된 유출량을 연속적으로 이용할 수 있는 실시간 유출예측에서는 주로 식 (2)를 과정모형으로 이용하고 있다.

식 (2)의 모형동정 즉, $\delta(B)$ 와 $\omega(B)$ 의 차수 r 과 s 및 지체시간 b , 매개변수 등의 결정은 식 (1)과 (2)사이의 $v(B) = \delta^{-1}(B) \cdot \omega(B) B^b$ 의 관계로부터 구할 수 있으며, v_0, v_1, v_2, \dots 는 식 (3)과 같이 입력치 시계열 P_t 로부터 발생될 수 있는 사전백색화(whitening)된 계열 α_t 와 이에 대응하여 변화된 출력치계열 β_t 사이의 교차상관함수(cross-correlation function)로부터 구해진다.

$$\alpha_t = \phi(B) \theta^{-1}(B) P_t \quad (3)$$

$$\beta_t = \phi(B) \theta^{-1}(B) Q_t \quad (4)$$

$$v_k = \frac{\sigma_\beta}{\sigma_\alpha} \rho_{\alpha\beta}(k), \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

여기서 α_t 는 독립적으로 동일하게 분포된 백색잡음(Gaussian white noise)이며, σ_α 와 σ_β 및 $\rho_{\alpha\beta}(k)$ 는 각각 α_t 와 β_t 의 표준편차 및 교차상관함수이다.

2.2 API5의 threshold 분리방법

강우초기에 유역의 토양함수정도는 유역의 평균 침투능 또는 직접유출 잠재력과 직결된다고 하겠으며, 이를 선행강우량 및 그 발생시간과 관련시켜 양적으로 표시하는 방법중의 하나로 식 (6)과 같은 선행강우지수 API를 들 수 있다.^(2,6)

$$API_t = a_1P_1 + a_2P_2 + \dots + a_tP_t \quad (6)$$

여기서 P_t 는 해당 강우보다 t 일 선행하는 강우량이고, a_t 는 경과시간에 따른 가중지수로서 보통 $1/t$ 을 이용하는데, 홍수사상에 대한 강우-유출과정의 해석에서는 일반적으로 t 를 5일까지로 취한다.

이러한 API5는 실제 토양의 함수량은 아니나 유역의 습윤정도를 나타낼 수 있는 지수라 하겠다. 따라서 유역의 초기토양함수정도를 API5에 대한 임의의 T값에 대하여 건조 및 습윤상태 즉, $API_5 < T$ 및 $API_5 \geq T$ 로 분리하여 생각하고 이에 대한 각각의 TF모형을 유도한다면, 이는 유출예측의 정도를 높일 수 있는 방법중의 하나라 하겠다.

그러나 API5의 threshold분리를 위한 T값의 기준이 불분명하므로 본 연구에서는 다음과 같은 다변량해석의 한 방법인 집락분석을 시도하였다.⁽¹⁷⁾

1) API5 및 이와 관련된 p 개의 변수를 선정하고, n 개의 호우사상에 대하여 그 값을 측정한다. 본 연구에서는 API5와 관련된 변수로서 강우초기의 손실강우강도 I_i 와 유출상승부의 초기유량 Q_b 를 이용하였다.

2) 단계 1)에서 구한 $n \times p$ 의 자료로부터 식 (7)과 같은 유사성행렬(similarity matrix)을 유도한다.

$$D_{ij} = \left\{ \sum_{m=1}^p |X_{im} - X_{jm}|^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

여기서 D_{ij} 는 p 차원 공간에서의 i 번째 변량 X_i 와 j 번째 변량 X_j 사이의 거리이며, 변량사이의 유사성이 클수록 그 거리는 작아진다.

3) 단계 2)에서 구한 유사성행렬로부터 적절히 선택된 cluster algorithm을 이용하여 k 개의 집락을 구하고, 이를 반복하여 집락의 수를 줄여 나가 API5에 대한 threshold값 T 를 추정한다.

2.3 모형의 검정

관측된 유출량 Q_t 는 식 (8)과 같이 확정론적 성분

q_t 와 추계학적 성분인 잡음(noise) η_t 의 선형합으로 생각할 수 있다.

$$Q_t = q_t + \eta_t \quad (8)$$

식 (8)의 확정론적 성분 q_t 는 on-line 또는 off-line 방법에 의하여 식 (9)와 같이 등정된 TF(r, s, b)모형에 q_t 의 초기값과 입력치 시계열 P_t 가 주어질 때 순환 모의발생(recursive simulation)되는 추정치라 하겠다.

$$q_t = \hat{\delta}_1 q_{t-1} + \dots + \hat{\delta}_r q_{t-r} + \hat{\omega}_b P_{t-b} - \hat{\omega}_1 P_{t-b-1} - \dots - \hat{\omega}_s P_{t-b-s} \quad (9)$$

따라서 TF(r, s, b)모형에 대한 적합도검정(goodness-of-fit test)은 관측된 유출량 Q_t 와 모의발생된 유출량 q_t 에 대하여 다음과 같은 평균잡음 $\bar{\eta}$, RMSE (root mean square error) 및 결정계수 R^2 을 이용하였으며, 여기서 RMSE값이 작고 R^2 값이 클수록 최적하다고 하겠다.

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - q_i) \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - q_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (12)$$

3. 분석 및 결과고찰

3.1 대상유역 및 분석자료

본 연구의 대상유역은 현재 진행중인 국제수문계 발계획(IHP)의 대표유역 가운데 하나인 평창강 수계의 방림지점으로서, 유역면적은 519.69 km²이며 11개의 자기유량기록계가 설치되어 있다. 분석자료는 1983년-1990년까지 관측된 호우사상중 비교적 관측정도가 양호한 19개의 사상을 선택하여 시간별 유출량과 Thiessen 가중치에 의한 유역평균 강우량을 이용하였으며, 각 호우사상의 발생일시와 자료수, 5일 선행강우량(API5) 및 지수(API5), 초기손실강우강도 I_i , 유출상승부의 초기유량 Q_b 등은 표

표 1. 분석호우의 자료 현황

호우사상	발생일시	자료수(hr)	AP5(mm)	API5(mm)	I _i (mm/hr)	Q _b (m ³ /sec)
1	83. 7. 2. 4:00	118	43.3	16.8	1.2	46.5
2	84. 7. 2. 15:00	152	39.5	17.9	1.1	47.9
3	85. 5. 12. 18:00	65	9.1	1.9	4.9	26.3
4	86. 7. 16. 13:00	46	50.4	11.5	1.3	48.4
5	7. 18. 11:00	123	69.7	45.2	0.1	191.9
6	87. 7. 15. 7:00	143	69.9	17.7	2.5	35.1
7	7. 21. 8:00	123	89.9	21.7	3.7	59.1
8	7. 27. 2:00	99	138.0	43.2	0.3	80.8
9	88. 7. 12. 8:00	179	29.0	9.9	1.1	39.6
10	7. 19. 18:00	115	36.6	7.5	7.1	31.4
11	89. 7. 11. 6:00	116	10.2	7.5	2.1	28.2
12	7. 15. 2:00	95	57.3	11.5	0.8	35.6
13	7. 20. 12:00	105	61.5	14.8	3.9	48.9
14	7. 24. 17:00	217	61.9	20.7	1.7	55.9
15	90. 5. 13. 18:00	96	20.1	7.7	6.6	41.1
16	6. 20. 12:00	57	70.1	58.0	0.6	113.1
17	6. 24. 5:00	144	124.0	38.0	1.7	110.9
18	7. 17. 1:00	94	78.6	32.5	0.2	143.4
19	9. 10. 9:00	135	40.8	27.9	4.1	71.8

1과 같다. 그리고 그림 1은 API5의 threshold분리를 위한 자료 API5 및 I_i, Q_b의 분포도이다.

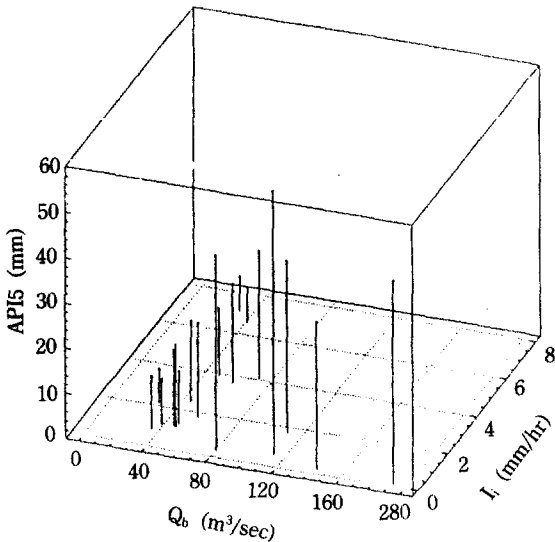


그림 1. API5의 threshold분리를 위한 자료의 분포도

3.2 분석 및 검정

먼저 API5의 분리를 위한 threshold값 T를 구하기 위해서 표 1의 API5 및 I_i, Q_b의 자료와 SPSS package의 Cluster Analysis 프로그램을 이용하여 집락분석을 실시한 결과 그림 2와 같은 Dendrogram을 유도하였다.

그림 2의 Dendrogram에서 집락(cluster)은 크게 G1과 G2로 나눌 수 있으며, 이 두 개의 집락에 대한 호우사상들로부터 T값을 추정할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 G2에 해당하는 호우사상들이 너무 적은 관계로 적당한 T값을 얻기가 힘들었다. 따라서 그림 2의 Dendrogram을 G1', G2', G3', G4'의 4개 집락으로 다시 세분하고 이에 대한 각 집락별 유사성을 고려한 결과 G1'와 (G2', G3', G4')의 두 개 군으로 묶을 수 있었으며, 이로부터 API5에 대한 상관분석 및 도식적 해석을 실시한 결과 API5의 분리를 위한

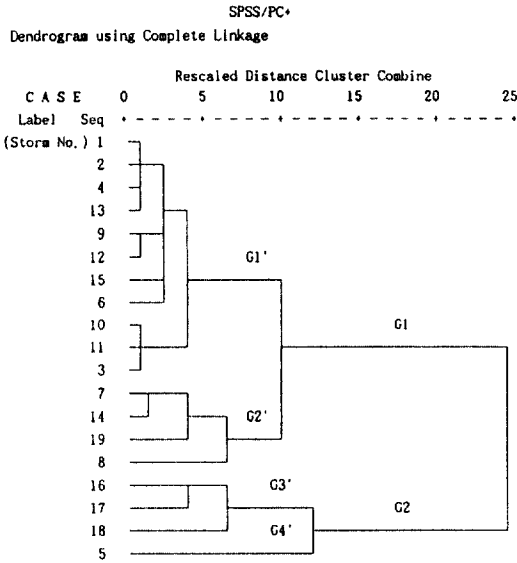


그림 2. API5의 분리를 위한 집락분석의 결과 (Dendrogram)

threshold값 T는 약 20 mm 정도로 추정되었다.

그리고 이러한 T값을 이용한 $API5 < T$ 및 $API5 \geq T$ 인 경우의 TF모형과 API5를 고려치 않은 TF모형의 분석에는 표 1의 19개 호우사상을 1983년-1989년까지의 14개 사상과 1990년에 발생한 5개 사상으로 분할하여 각각 모형의 등정과 등정된 모형의 검정에 이용하고자 하였다. 특히, 1983년-1989년까지의 API5별로 분리된 각 호우사상들은 유도될 각 TF모형이 유역에 대한 대표성을 갖도록 하고자 Moore와 O'Connel(1978)⁷⁾의 방법과 같이 강우량 및 유출량의 시계열 평균치들을 각 호우사상들 사이에 교차상관함수를 구하기 위한 지체시간(lag)만큼 삽입하여 하나의 계열로 만들었다.

이와 같이 구성된 자료로부터 입출력 시계열의 교차상관함수를 구하기 위한 입력시계열의 사전백색화 모형은 식 (13)과 같이 ARMA(3, 2)의 형태로 분석되었다.

$$(1 - 1.375B - 0.017B^2 + 0.392B^3)P_t = (1 - 0.516B - 0.483B^2)\alpha_t \quad (13)$$

이 식에 입출력 시계열자료를 적용하면 입력시계열에 대한 백색잡음계열(white noise series) α_t 와 이에 대응하여 변환되는 출력시계열 β_t 를 구할 수

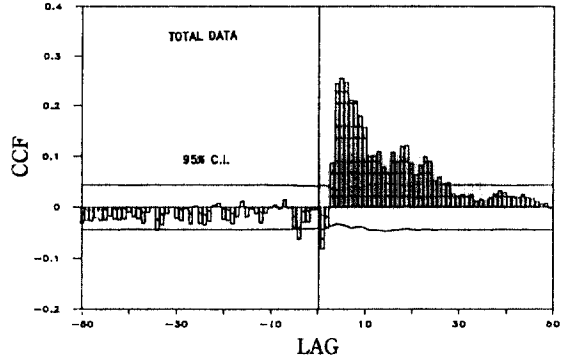


그림 3. 1983년-1989년까지의 전 자료에 대한 CCF

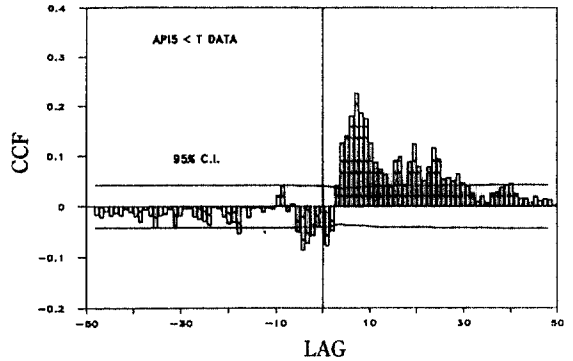


그림 4. 1983년-1989년까지의 API5 < T인 자료에 대한 CCF

있다. 그림 3은 1983년-1989년까지의 API5를 고려치 않은 전체 입출력 시계열자료를 식 (13)에 적용하여 구한 α_t 와 β_t 계열의 교차상관함수이며, 그림 4와 5는 각각 API5별로 분리된 입출력 시계열자료에 대한 동일한 방법의 교차상관함수이다. 여기서, 주어진 충격에 대한 시스템의 반응시간은 교차상관계수가 95% 신뢰구간을 벗어나 첫번째 양의 값을 보이는 지체시간이 되므로 그림 3-5에서의 매개변수 b는 모두 약 3시간으로 추정된다.

한편, 그림 3-5에서 식 (2)의 $\omega(B)$ 에 영향을 주는 교차상관함수의 첨두발생시간과 첨두까지의 상승부에 대한 교차상관계수들이 서로 상이하게 나타났는데, 이는 유역의 초기습윤상태의 고려여부에 따라 TF모형이 달라지고 있음을 의미한다. 또한 식 (2)의 $\delta(B)$ 에 영향을 주는 교차상관함수의 하강부는 일반적으로 1차 또는 2차 지수감소(exponential decay)하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구의 결과는 하

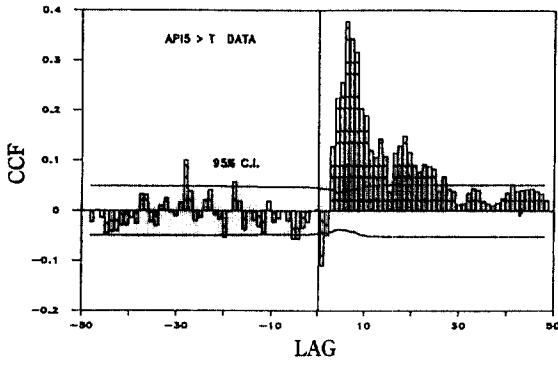


그림 5. 1983년-1989년까지의 API5>T인 자료에 대한 CCF

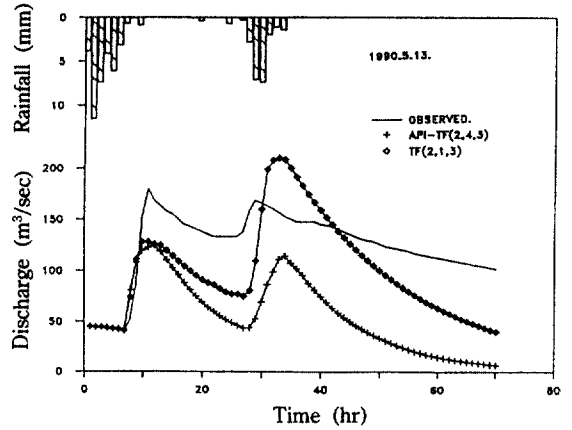


그림 6. 각 TF모형으로부터 모의된 유출량의 비교도 (API5<T, 1990. 5. 13)

강부의 끝부분에서 비교적 큰 요철을 보이고 있다. 이것은 유출량의 크기와 자료수가 다른 여러 개의 호우사상을 하나의 계열로 만들어 분석한 결과인 것으로 생각된다. 따라서 본 연구의 $\delta(B)$ 에 대한 분석은 주로 침투부분에 가까운 교차상관함수의 하강부에 대해서 고려하고자 하였다. 표 2는 이러한 교차상관함수들을 식 (5)에 대입하고, $v(B)=\delta^{-1}(B) \cdot \omega(B)B^b$ 의 관계로부터 최소자승법으로 분석하여 등정한 각 TF(r, s, b)모형의 최적 차수 및 매개변수의 추정치이다.

표 2에서 TF(2, 1, 3)모형은 API5를 고려치 않은 모형이며, API5<T TF(2, 4, 3)모형 및 API5>T TF

(1, 3, 3)모형은 각각 API5별로 유도된 모형이다. 표 3은 이와같이 등정된 각 TF모형의 적용가능성 및 타당성 여부를 알아보기 위하여 표 1의 자료를 모형등정에 이용된 1983년-1989년까지의 API5별 자료와 모형등정에 이용되지 않은 1990년 자료로 나누고, API5<T인 자료에는 TF(2, 1, 3) 및 API5<T TF(2, 4, 3)모형을, API5>T인 자료에는 TF(2, 1, 3) 및 API5>T TF(1, 3, 3)모형을 적용하여 통계학적으로 검정한 결과이다. 여기서의 모든 검정은 강우량이 실시간으로 입력된다는 가정하에서 순환 모의 발생시킨 유출량을 근거로 하였으며, 그림 6-8은

표 2. 분석된 각 TF(r, s, b)모형의 최적 차수 및 매개변수 추정치

모 형	δ_1	δ_2	ω_0	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
TF(2, 1, 3)	1.089	-0.128	2.630	-4.526	-	-	-
API5<T TF(2, 4, 3)	0.556	0.338	0.870	-2.160	-1.187	-1.265	-1.658
API5>T TF(1, 3, 3)	0.910	-	5.422	-4.561	-2.219	-6.152	-

표 3. 각 TF(r, s, b)모형의 검정결과

모 형	Fitting			Testing			비 고 (Testing에 적용된 호우사상)
	$\bar{\eta}$	RMSE	R ²	$\bar{\eta}$	RMSE	R ²	
TF(2, 1, 3)	-42.4	115.1	0.708	38.3	51.9	0.624	15
API5<T TF(2, 4, 3)	63.5	91.7	0.550	79.7	83.2	0.533	15
TF(2, 1, 3)	-14.6	198.3	0.771	8.9	153.4	0.711	16
				-7.7	405.8	0.708	19
API5>T TF(1, 3, 3)	-30.8	134.2	0.783	-16.4	110.8	0.820	16
				-33.0	324.9	0.896	19

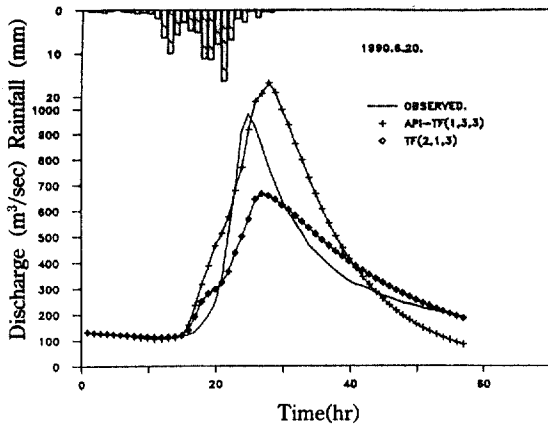


그림 7. 각 TF모형으로부터 모의된 유출량의 비교도 (API5≥T, 1990. 6. 20)

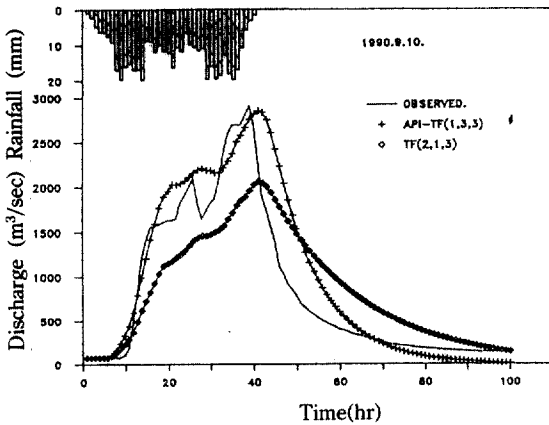


그림 8. 각 TF모형으로부터 모의된 유출량의 비교도 (API5≥T, 1990. 9. 10)

모형등정에 이용되지 않은 자료중 표 1의 15, 16, 19번 호우사상에 대한 모의 유출량을 관측 유출량과 함께 도시한 것이다.

3.3 결과고찰

본 연구의 분석결과 실시간 유출예측에 이용하고자 하는 TF모형은 표 2와 같이 비교적 낮은 차수들로 구성됨을 알 수 있었다. 또한 이러한 모형들을 표 3과 같이 검정하여 본 결과 API5<T인 경우에는 API5를 고려한 TF모형이 다른 모형에 비하여 비교적 정도가 떨어지고 있으나, API5≥T인 경우에는 API5를 고려한 TF모형이 API5를 고려치 않은 모형보다 정도가 우수하며 그림 7과 8에서와 같이

관측수문곡선의 상승부에도 상당히 접근하고 있다. 이것은 실시간 유출예측을 위한 TF모형의 유도에 있어서 유역의 선행강우지수를 threshold 개념으로 분리하여 TF모형을 API별로 유도할 필요성이 있음을 나타내는 것이라고 생각되며, API5<T인 경우에 API5를 고려한 TF모형의 정도가 떨어지는 이유로는 분석자료에 포함된 복합 호우의 영향이 크게 작용했기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 표 3에서 RMSE 및 R²은 각각 오차의 편차 정도와 모형의 유의성을 나타내는 통계적 수치라 하겠는데, R²은 비교적 양호한 반면에 RMSE는 전반적으로 크게 나타났다. 이것은 본 유역에서 이용 가능한 대표적인 TF모형을 유도하고자 여러 개의 호우사상을 하나의 계열로 만들어 분석한 결과 교차상관함수의 하강부가 그림 3-5에서와 같이 요철을 보이나, 유도된 모형에 이를 전부 반영치 못한 결과라 생각된다. 이러한 결과는 그림 6-8에서도 알 수 있듯이 모의유출수문곡선의 상승부 및 전체적인 양상은 관측유출수문곡선에 유사하나 하강부에서는 비교적 큰 오차를 보이고 있다. 그러나 이러한 오차는 실시간 강우량 자료 뿐만 아니라 유출량 자료를 함께 이용할 수 있는 적응 filtering기법이나 noise 모형을 이용한다면 크게 개선되리라 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 실시간 유출예측의 정도를 보다 높일 수 있는 TF모형을 유도하고자 유역의 선행 강우지수를 도입시킬 수 있는 방법을 연구하고, 이를 고려한 TF모형을 분석 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유출예측시에 유역의 초기토양습윤조건을 고려하기 위한 API의 도입 가능성을 보였다.
- 2) API를 threshold 개념으로 분리하기 위한 방법으로써 집락분석이 이용될 수 있음을 알 수 있으며, 더 좋은 분석을 위해서는 API와 관련된 여러가지 다른 변수와 더 많은 호우사상에 대한 분석이 필요하다.
- 3) 분석된 각 TF모형의 차수나 매개변수의 크기를 볼 때 API가 큰 경우에는 강우가 단기간 내에 유출에 큰 영향을 줌을 알 수 있으며, 따라서 실시간

유출예측을 위한 강우-유출과정의 모형화에 있어서 API별로 TF모형을 분리할 필요성이 있다고 생각된다.

4) 이상과 같은 분석의 결과는 유역의 출력치인 관측유량계열을 이용할 수 있는 실시간 적응(adaptive) filtering기법이나 noise모형의 고려시에 매우 유용하리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. Box, G.E.P. and G.M. Jenkins, *Time Series Analysis Forecasting and Control*, Holden day, 1970.
2. Gray, D.M., *Handbook of the Principles of Hydrology*, Water Information Center, 1970.
3. Grindley, T., "The Estimation of Soil Moisture Deficits", *The Meteorological Magazin*, No.96, 1967, pp.97-108.
4. Hipel, K.W. et al., "*Casual and Dynamic Relationships between Natural Phenomena*", in Time Series Analysis, Elsevier Science Publishers, 1985, pp.13-34.
5. Jazwinski, A.H., "*Stochastic Process and Filtering Theory*", Academic Press, 1970.
6. Linsley, R.K. et al., *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill, 1982.
7. Moore, R.J. and P.E.O'Connel, "*Real-time Forecasting of Flood Events Using TFN Models*", Institute of Hydrology, U.K., 1978.
8. Natale, L. and E. Todini, "*A Constrained Parameter Estimation Technique for Linear Model in Hydrology*", in Mathematical Models for Surface Water Hydrology, John Wiley & Sons, 1977, pp.109-148.
9. Nemeč, J., *Hydrological Forecasting*, D. Reidel Publishing Company, 1986, pp.72-93.
10. O'Connel, P.E. and R.T. Clark, "*Adaptive Hydrological Forecasting-a Review*", *J. of Hydrological Science*, Vol.26, No.2, 1981, pp.179-205.
11. Rajendran, R.N. and R.G. Mein, "Determination of Rainfall Excess on Spacially Variable Catchments", *J. of Hydrology*, Vol.83, 1986, pp.67-89.
12. Salas, J.D. et al., *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, W.R.P., 1980.
13. Shumway, R.H., *Applied Statistical Time Series Analysis*, Prentice Hall, 1988.
14. Todini, E., "Mutually Interactive State-Parameter (MISP) Estimation", *Proc. AGU Chapman Conference*, Univ. of Pittsburgh, 1978, pp.135-151.
15. Todini, E. and J.E. Wallis, "*Using CLS for Daily or Longer Period Rainfall-Runoff Modelling*", in Mathematical models for surface water hydrology, John Wiley & Sons, 1977, pp.149-168.
16. Walter, T.S. et al., "Continuous Hydrograph Synthesis with an API-type Hydrologic Model", *W.R.R.*, Vol.5, No.5, 1969, pp.1007-1022.
17. William, P.D. and G. Matthew, *Multivariate Analysis Methods & Applications*, John Wiley & Sons, 1984, pp.157-208.
18. Wood, E.F. and A. Szollosi-Nagy, "An Adaptive Algorithm for Analyzing Short-Term Structural and Parameter Changes in Hydrologic Prediction Models", *W.R.R.*, Vol.14, No.4, 1978, pp.577-581.
19. Wood, E.F. and P.E.O'Connel, "*Real-time Forecasting*", in Hydrological Forecasting, John Wiley & Sons, 1985, pp.129-180.
20. Young, P.C., "Recursive Approaches to Time Series Analysis", *Bull. Inst. of Mathematics and its Application*, Vol.10, 1974, pp.209-224.
21. Young, P.C., "*Time-series Methods and Recursive Estimation in Hydrological System Analysis*", in River flow modelling and forecasting, D. Reidel Publishing Company, 1986, pp.129-180.
22. Young, P.C. and P. Whitehead, "A Recursive Approach to Time Series Analysis for Multivariable Systems", *International Jour. of Control*, Vol.25, No.3, 1977, pp.457-482.
23. 건설부, 국제수문개발계획(IHP) 대표유역연구조사보고서, 1983-1990.
24. 윤용남, 공업수문학, 청문각, 1986.
25. 서병하, 윤용남, 강관원, "상태벡터 모형에 의한 하천유출의 실시간 예측에 관한 연구", 대한토목학회논문집, Vol.2, No.3, 1982, pp.43-56.
26. 서병하, 강관원, "홍수예경보를 위한 하천유출의 수문학적 예측", 한국수문학회지, Vol.18, No.2, 1985, pp.153-161.

(接受 : 1991. 11. 15)