

가역접근법을 이용한 일유출량 자료의 비선형 예측

Nonlinear Forecasting of Daily Runoff Using Inverse Approach Method

이 배 성* / 정 동 국** / 정 태 성*** / 이 상 진****

Lee, Bae Sung / Jeong, Dong Kug / Jung, Tae Sung / Lee, Sang Jin

Abstract

In almost all previous hydrological studies, the standard approach adopted for nonlinear time series analysis is to perform system characterization first followed by forecasting. However, a practical inverse approach for forecasting nonlinear hydrological time series was proposed recently. To investigate the applicability standard approach method and inverse approach, this study used a theoretical time series (Mackey-Glass time series) and daily streamflows of the Bear River in Idaho. To predict a theoretical time series and daily streamflow, this study used local approximation method. From chaos analysis, chaotic characteristics are found in daily streamflow of the Bear River in Idaho. Resulting from 1, 3 and 5-day prediction, inverse approach method is shown to be better than the standard approach for a theoretical chaotic time series and daily streamflow.

keywords : standard approach method, inverse approach method, chaos, daily streamflows

요 지

기존의 거의 모든 수문학적 연구에 있어서, 시스템의 특성을 파악한 뒤 예측을 실시하는 표준접근법이 채택되어왔다. 그러나 최근 들어 시스템의 특성분석에 앞서 예측을 실시하고, 상태공간 매개변수가 시스템의 특성분석단계가 아닌 예측단계에서 평가되는 가역접근법이 제안되었다. 본 연구에서는 최근에 제안된 가역접근법과 기존에 널리 적용되어온 표준접근법을 이론적 카오스 시계열과 Idaho주 Bear 강의 일유출량 자료에 적용함으로써, 가역접근법의 적용성을 검토하고 카오스 시계열의 특성을 알아보았으며, 카오스이론이 적용된 비선형 예측기법으로는 부분근사화 기법을 이용하였다. 카오스 특성 분석을 통해, 이론적 카오스 시계열과 Idaho 주 Bear 강의 일유출량 시계열 자료 모두에서 카오스 특성이 나타남을 알 수 있었다. 200일에 대한 1, 3, 5일 예측 결과, 가역접근법이 표준접근법에 비해 우수함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 표준접근법, 가역접근법, 카오스, 일유출량

* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 위촉연구원
Researcher., Korea Institute of Water and Environment., Daejeon 305-730, Korea
(e-mail: baesung@hannam.ac.kr)

** 정회원 · 한남대학교 공과대학 토목환경공학과 교수
Professor., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hannam Univ., Daejeon 306-791, Korea
(e-mail: dkjeong@hannam.ac.kr)

*** 정회원 · 한남대학교 공과대학 토목환경공학과 교수
Professor., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hannam Univ., Daejeon 306-791, Korea
(e-mail: jungts@hannam.ac.kr)

**** 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원
Senior Researcher., Korea Institute of Water and Environment., Daejeon 305-730, Korea
(e-mail: sjlee@kowaco.or.kr)

1. 서론

시계열 분석과 예측은 수문분야에서 홍수, 가뭄 및 저수지 운영, 수자원 계획 등을 위해 매우 중요하다. 그러나 기존의 시계열 분석방법들은 대부분 실제 시계열이 추계학적이라고 보고, 확률분포를 이용한 선형적 예측에 치중했다. 그런데, 최근 들어 특정한 수문시계열에서 카오스 특성이 나타나고 있으며, 어떤 수문시계열이 카오스 특성을 보인다면, 이 시계열은 결정론적 시스템으로부터 근거한다고 판단할 수 있으며, 단기예측에 있어 보다 정확한 예측을 가능하게 하는 반면, 장기예측은 불가능해짐을 의미한다.

그러나, 수문학분야에서 카오스 이론 적용은 아직 다른 분야에서의 카오스 적용에 비해 초보적인 단계를 벗어나지 못하고 있다. 또한, 기존의 거의 모든 수문학적 연구에 있어서 시스템의 특성을 파악한 뒤 예측을 실시하는 비선형 수문시계열에 대한 표준접근법(standard approach method)이 채택되어왔다. 국내에서는 김형수 등(1998)과 박대규와 조원철(2002)이 카오스 특성을 갖는 일유출량 시계열자료를 표준접근법을 이용하여, 예측을 실시하였다. 한편, Phoon et al.(2002)은 시스템의 특성분석에 앞서 예측을 실시하고, 상태공간 매개변수(state space parameter)가 시스템의 특성분석단계보다 예측단계에서 평가되는 가역접근법(inverse approach method)을 제안하였다.

본 연구에서는 가역접근법과 기존에 널리 적용되어 온 표준접근법을 이론적 카오스 시계열과 실제 일유출량 자료에 적용함으로써, Phoon et al.(2002)이 제안한 가역접근법의 적용성을 검토하고 카오스 시계열의 특성을 알아보는데 그 목적이 있다.

2. 시계열 자료의 카오스 특성분석

시계열 자료에 카오스가 존재하는가 여부를 판단하기 위해서 사용되는 방법으로는 상관차원법(correlation dimension method), Lyapunov 지수법, Kolmogorov 엔트로피 방법, 그리고 비선형예측법 등이 있으며, 본 연구에서는 시계열자료의 카오스 특성분석기법으로 널리 이용되고 있는 상관차원법을 적용한다.

2.1 상태공간 재건

상태공간이란 실공간을 포함한 모든 종류의 공간으로, 동력학계의 운동을 표현하기 위해서 시간축이 없는 공간을 의미하며, 상태공간의 차원은 시스템을 표현하는데 필요한 변수의 수이다. 어떤 시계열자료의 카오스

적 특성 존재여부를 판별하기 위해서는 분석대상 시계열자료를 상태공간상에 표현하여야 하며, 이를 상태공간 재건이라 한다. 스칼라의 시계열 자료를 상태공간에 재구성하는 방법은 Packard et al.(1980)에 의해 제안되었고, Takens(1981)에 의해 증명된 시간지체법(time delay embedding method)이 있으며, 이 방법은 하나의 시간에 종속되는 시계열 $x(n)$ 을 m 차원의 상태공간에서 다음 Eq. (1)과 같은 상태벡터로 표현하는 방법이다.

$$X_n = [x(n), x(n+\tau), x(n+2\tau), \dots, x(n+(m-1)\tau)] \quad (1)$$

여기서 m 은 매립차원(embedding dimension)이고, τ 는 지체시간(delay time)으로 지체시간 결정은 상태공간 재건에 있어서 매우 중요하며, 지체시간이 작으면 불필요한 정보가 많이 생기고, 크면 실제 시스템에 대한 정보가 손상된다. 지체시간을 결정하는 방법으로는 자기상관함수(autocorrelation function)나 상호정보(mutual information) 이론 등이 있는데, 본 연구에서는 자기상관함수를 이용하여 추정하였다.

2.2 상관차원

상관차원법은 m 차원 상태공간에 재구성된 시계열이 초기조건의 민감도로 인해 동력학적으로 상관성이 없지만, 모든 점들이 끌개(attractor) 안에 있기 때문에 공간적인 상관성을 가지는 원리를 이용하여 시계열 자료의 카오스 특성을 판별하는 방법이다. m 차원의 상태공간에 대한, 상관적분 $C(r)$ 은 Eq. (2)와 같다.

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (2)$$

여기서, H 는 $\xi \geq 0$ 이면, $H(\xi) = 1$, $\xi < 0$ 이면 $H(\xi) = 0$ 인 Heaviside 계단함수, r 은 상태벡터(X_i)가 중점인 구의 반경, N 은 상태공간상의 모든 점들의 개수, 그리고 X_i 는 상태벡터를 나타낸다. 또한, r 의 값이 작을 경우 Eq. (3)과 같은 지수법칙이 성립하고, 상관차원 D_2 는 Eq. (4)와 같이 구할 수 있다.

$$C(r) \propto \alpha r^{D_2} \quad (3)$$

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r} \quad (4)$$

어떤 수문시계열이 추계학적 특성을 가질 경우, 매립

차원 m 이 증가함에 따라, 상관차원 D_2 는 이에 비례하여 증가하지만, 카오스특성을 가진다면 상관차원 D_2 는 매립차원이 증가하여도 더 이상 비례하여 증가하지 않고 포화된다.

3. 시계열 자료의 비선형 예측

카오스 이론을 적용한 비선형 예측기법은 일반적으로 시스템의 특성을 파악한 뒤 예측을 실시하는 표준접근법과 시스템의 특성분석에 앞서 예측을 실시하고, 상태공간 매개변수가 시스템의 특성분석단계에서보다 예측단계에서 평가되는 가역접근법으로 구분할 수 있다.

3.1 비선형 예측기법

비선형예측기법에는 전역근사기법(global approximation method)과 부분근사기법(local approximation method)이 있다. 전역근사화기법은 예측시간(Δn) 후의 값을 예측하고자 할 때 전체의 끌개에 관한 함수를 구한 후 예측하는 방법으로, 일반적으로 이 방법에는 인공신경망기법을 많이 이용한다. 부분근사화기법은 상태공간상에서의 현재 좌표와 예측하고자 하는 점의 좌표가 있을 때, 현재좌표 주위의 이웃점 좌표와 이 좌표들의 예측시간 후의 좌표들과 관계를 이용하여 예측값을 찾아내는 방법이다. 본 연구에서는 비선형예측기법으로 Kantz and Schreiber(1997)이 제안한 간단한 부분근사화기법을 이용하였으며 Eq. (5)와 같다.

$$x_{n+\Delta n} = \frac{1}{|\mathcal{J}_r(X_n)|} \sum_{X_{n'} \in \mathcal{J}_r(X_n)} x_{n'+\Delta n} \quad (5)$$

Eq. (5)는 시간지체법으로 재구성된 시계열의 좌표값에 대해, 예측값 $x_{n+\Delta n}$ 을 구하기 위해 좌표 X_n 주위의 반경 r 안의 이웃좌표들 $X_{n'}$ 을 찾은 후, 이 이웃좌표들의 Δn 시간후의 좌표들 $X_{n'+\Delta n}$ 에 대하여 좌표성분 $x_{n'+\Delta n}$ 들의 합을 이웃좌표들의 개수로 나누어 구한다. $\mathcal{J}_r(X_n)$ 는 X_n 주위의 이웃좌표들의 집합을 의미하며 결국, $|\mathcal{J}_r(X_n)|$ 는 이웃좌표의 수이다.

3.2 표준접근법(standard approach method)

앞에서 언급한 바와 같이 표준접근법은 시스템의 특성분석에서, 어떤 수문시계열 자료가 카오스적 특성을 갖는 것으로 판단되면, 다음 단계로 예측을 실시한다. 일반적으로, 표준접근법에서는 예측에 대한 상태공간 매개변수 m' , τ' 을 시스템의 특성분석에 대한 상태공간

매개변수 m , τ 와 같은 것으로 가정하고, 단지, 이웃좌표 k 만이 예측단계에서 추정된다. 이때, 지체시간 τ 는 자기상관함수나 상호정보이론을 이용하여 추정한다. Takens(1981)은 매립차원을 m 이라 하고, 매립공간 내에 만들어지는 끌개의 차원을 D_2 라 할 때, 매립차원은 $m \geq 2D_2 + 1$ 과 같은 조건을 만족시켜야 한다고 제안했다. Farmer and Sidorowich(1987)는 적당한 매립차원 m 을 결정하기 위한 제약조건으로 $m \geq D_2$ 을 제시하였고, 이웃좌표의 수 k 는 $k = m + 1$ 식으로부터 광범위하게 채택 될 수 있음을 입증하였다. 본 연구에서 표준접근법에 대한 상태공간 매개변수 m 은 Takens이 제안한 $m = 2D_2 + 1$ 식을 이용하여 추정하고, k 는 Farmer and Sidorowich(1987)이 제안한 $k = m + 1$ 식을 이용하여 추정한다. 표준접근법에서 동일한 예측매개변수로 여러 예측시간(T)에 대하여 예측을 실시하면, 카오스 시계열의 예측시간에 대한 특성을 파악할 수 있다.

3.3 가역접근법(inverse approach)

가역접근법은 예측에 대한 상태공간 매개변수를 시스템의 특성분석단계가 아닌 예측단계에서 평가되는 방법으로, 가역접근법에서 시계열은 상태공간재건요소(state space reconstruction set), 보정요소(calibration set), 그리고 생산요소(production set)로 구분되며, 다음의 3단계 과정을 거친다.

- (1) 예측단계에서 예측의 정확성이 최적이 되는 모든 예측매개변수 m' , τ' 그리고, k 를 동시에 선정한다.
- (2) 최적의 예측매개변수 m' , τ' 그리고, k 가 최적화 과정에서 사용된 자료의 선택에 의존하지 않는 불변량인 것으로 간주될 수 있는지 검증한다.
- (3) 최적의 예측매개변수들 m' , τ' 그리고, k 가 시스템의 특성분석기법에 이용될 때, 카오스적 특성이 나타나는지 여부를 검증한다.

첫째 단계는 예측의 정확성을 이루기 위한 것이고, 둘째 단계는 최적의 예측매개변수들이 보정영역 밖에서도 적용성을 갖는지 여부를 검증하는 것이며, 셋째 단계는 자기일관성을 검증하는 것이다. 결국, 가역접근법은 예측시간에 대한 예측매개변수를 최적화 시키고, 안정성을 검토하여 예측을 실시하는 방법이다. 가역접근법에서 3개의 요소로 구분된 시계열 요소 중 상태공간재건요소는 보정요소에 속한 자료를 예측하는데 이용되며, 두 요소의 모든 자료는 생산요소를 예측하는데 이용된다.

4. 예측모형의 적용성 및 예측 결과

4.1 이론적 카오스 시계열

이론적 카오스 시계열의 적용은 일유출량 시계열에 대한 가역접근법의 적용에 앞서, 적용성을 검토하기 위해 실시하였으며, 이용된 시계열은 카오스 시계열로 널리 알려진 Mackey-Glass 시계열이다. Mackey-Glass 시계열에 대한 차분식은 Eq. (6)과 같고, 초기조건 $x(t=0) = 1.2$ 및 $x(t-\Delta) = 0.0$ (for $0 \leq t < \Delta$), 입력조건 time step=0.01 그리고, shift parameter (Δ)=30의 경우에 대하여 fourth-order Runge-Kutta 방법에 의한 수치해석을 실시하여 Fig. 1과 같은 시계열을 생성하였다. 생성된 자료에서 초기진동의 영향을 배제하기 위해 처음 2,000개의 자료는 무시하고, 총 11,000개의 자료를 생성시켰다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = -0.1x(t) + \frac{0.2x(t-\Delta)}{1+x^{10}(t-\Delta)} \quad (6)$$

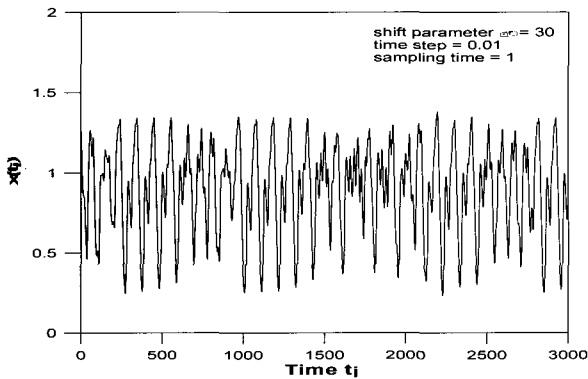
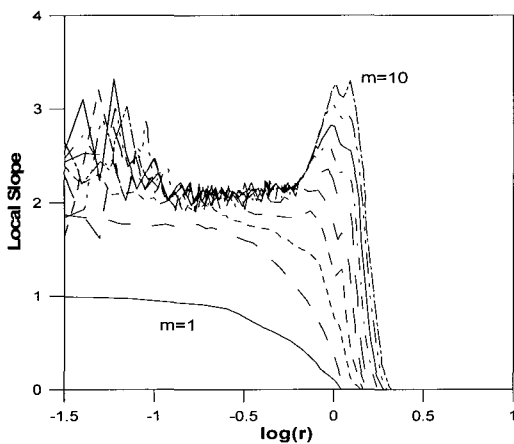
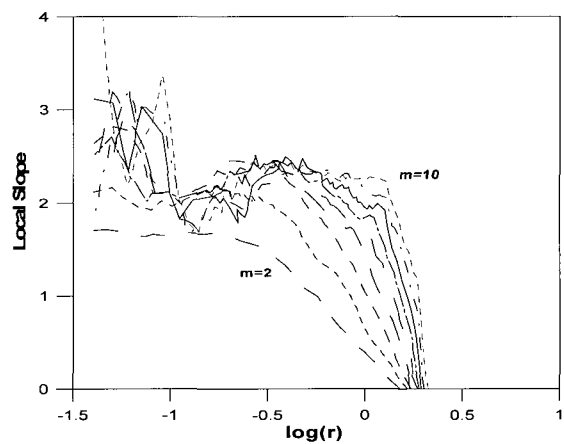


Fig. 1. Mackey-Glass time series



(a) Standard Approach



(b) Inverse Approach

Fig. 2. Local slope for Mackey-Glass time series

시계열 자료의 카오스 특성분석은 분석 대상자료를 시간축이 없는 상태 공간상에 표현해야 하는데, 이에 앞서 지체시간 산정이 필요하다. 본 연구에서는 자기상관함수를 이용하여 자기상관함수가 특정값인 0.1 (Tsonis and Elsner, 1988)인 지점을 선택하여 지체시간 τ 가 17로 추정되었다.

상관차원법을 이용한 카오스 특성을 분석하기 위해 Eq. (1)의 상관적분법을 이용하였다. Fig. 2(a)를 토대로 반경 r 이 0.15에서 1인 부분을 scaling region으로 한 후, 상관차원을 구하였다. 상관차원은 2.3의 값에서 포화되었고, 표준접근법에서 적당한 예측 매개변수는 $m = 6$, $k = 7$ 로 추정되었다.

가역접근법의 적용을 위해 총 11,000개의 시계열 자료 중 1~9,000개의 자료는 상태공간재건요소, 9,001~10,000의 자료는 보정요소, 10,001~11,000의 자료는 생산요소로 구분하였다. 상태공간재건요소를 이용하여, 예측시간(T) 50에 대한 보정요소를 예측한 결과, 최적의 예측매개변수 $m' = 4$, $\tau' = 8$, 그리고 $k = 6$ 이 추정되었으며, 이를 이용하여 생산요소에 대한 예측을 실시하였다. 최적의 예측매개변수는 RMSE가 최소가 되는 것을 목적함수로 하여 추정하였으며, 각각의 예측매개변수에 대한 경우의 수는 다음과 같다. 매립차원 m' 은 2~10, 지체시간 τ' 은 1~18까지는 1씩 증가시키고, 20~30까지는 2씩 증가시켰으며, 이웃좌표의 수 k 는 1~10까지는 1씩, 15~50까지는 5씩 증가시켰다. 따라서, 최적의 예측 매개변수를 추정하는데 이용된 조합은 총 3,888($9 \times 24 \times 18$)개의 경우의 수를 갖는다. Fig 2(a) and 2(b)에서 보는 바와 같이, 표준접근법과 가역접근법 모두 동일한 scaling region을 갖으며, 상관차원은 2.3의 값에서 포화되었다.

다음으로 생산요소의 처음 250개 자료(10,001~10,250)에 대하여 예측을 실시한 결과, Fig. 3에서 보는 바와 같이 카오스적 특성을 갖는 시계열의 예측에 있어서, 가역접근법이 기존의 많은 연구에서 수행되어온 표준접근법보다 우수한 것을 알 수 있었다.

4.2 일유출량 시계열

본 연구에서 사용한 일유출량 자료는 Idaho의 Bear Lake 카운티에 있는 Bear 강의 일유출량 자료로서 Bear강의 유역면적은 2,480mi²이고, 유출량 관측소는 위도 42°12' 40", 경도 111°03' 11"에 위치해 있다. 본 연구에서 사용한 Bear 강의 일유출량 자료는 1937년 10월 1일부터 1971년 10월 15일까지 12,433개의 자료로 Fig. 4와 같다.

Bear 강의 일유출량 시계열 자료에 대한 표준접근법의 적용을 위해, 자기상관함수를 이용하여 지체시간 $\tau = 35$ 를 추정하였고, Bear 강의 상관차원을 구하기 위해 Fig. 5에서 기울기가 일정한 부분(반경 25~50)을 scaling region으로 하여 상관차원을 구하였다. Bear강의 매립차원에 따른 상관차원은 Fig. 6과 같고, 상관차

원이 저차원 근처에서 포화될 가능성을 보이고 있으며, 상관차원(D_2)은 1.57이다.

Bear 강의 일유출량 자료에 대해 표준접근법과 가역접근법을 이용하여 예측시간(T) 1, 3, 5일에 대한 예측을 실시하였다. Bear 강의 일유출량 자료(총 12,433개) 중 1~9,000일 자료는 상태공간 재건 요소, 9,001~10,000일 자료는 보정요소, 10,001~10,200일 자료는 생산요소로 구분하였다.

예측시간(T) 1, 3, 5일에 대한 예측 매개변수는 표준접근법에서는 $m' = 4$, $\tau' = 1$ 그리고 $k = 5$ 로 추정되었다. Bear 강에 대한 표준접근법의 적용에 있어서, 상태공간 매개변수와 예측매개변수를 동일시하지 않은 이유는 지체시간이 너무 크게 추정되어, 실제 시스템에 대한 정보손실이 발생하였으므로, 매립차원 m' 과 이웃좌표의 수 k 를 제외한 예측매개변수 τ' 를 예측시간(T)에 대해 다시 추정하였다. 이와 같이 표준접근법은 시스템에 대한 정보손실이 발생하였을 경우, 예측에 대한 상태공간 매개변수(m', τ', k)를 다시 추정해야 하는 번거로움이 있다.

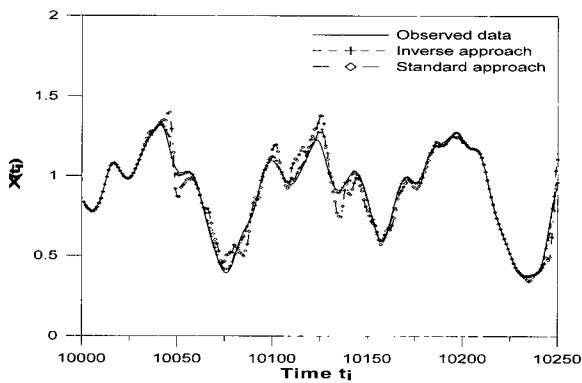


Fig. 3. Verification of Mackey-Glass time series for lead time(T) 50

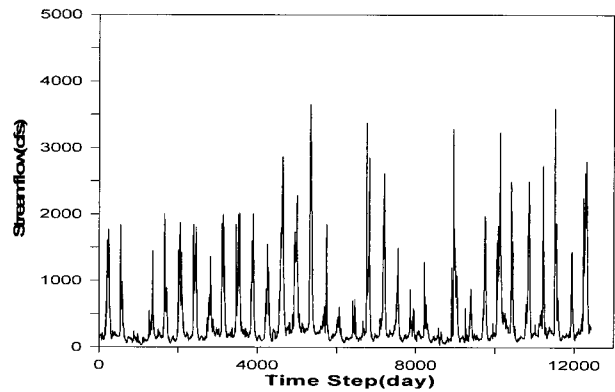


Fig. 4. Daily runoff time series at the Bear River

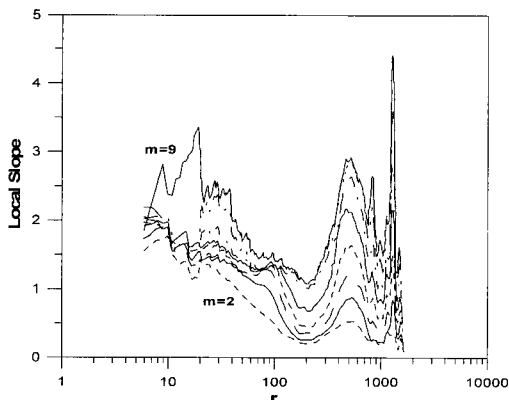


Fig. 5. Local slope for daily runoff time series at the Bear River

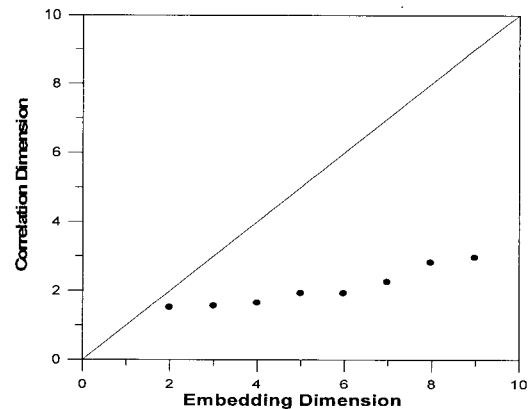


Fig. 6. Correlation dimension for daily runoff time series at the Bear River

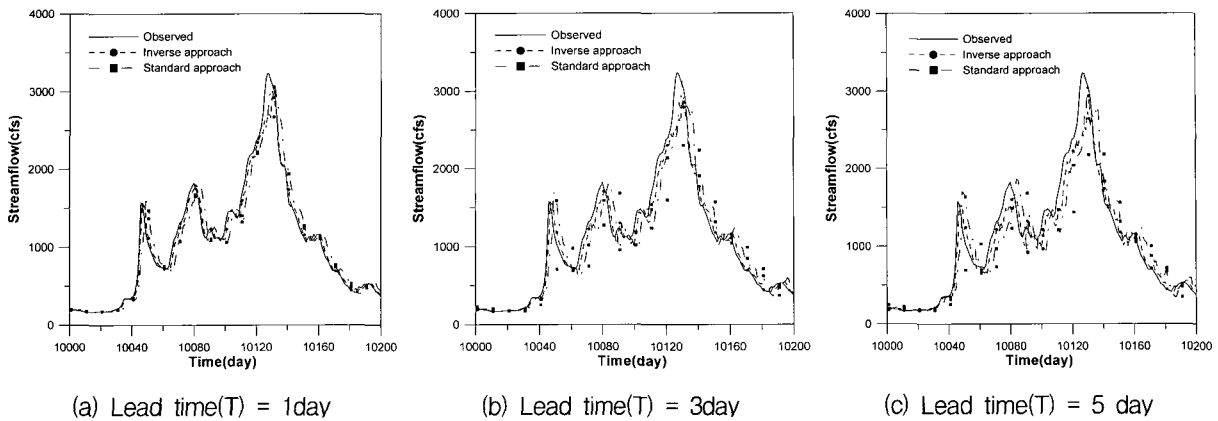


Fig. 7. Forecasting of daily runoff at the Bear River during 10,001~10,200

Table 1. RMSE of nonlinear forecasting method by lead time(T)

| Nonlinear Forecasting Method | Lead time(T) | | |
|------------------------------|--------------|-------|-------|
| | 1 | 3 | 5 |
| Inverse Approach | 0.145 | 0.190 | 0.237 |
| Standard Approach | 0.28 | 0.353 | 0.403 |

가역접근법에서 상태공간 재건 요소에 대한 보정 요소의 예측시간(T) 1, 3, 5일에 대한 최적의 예측매개변수는 $m' = 2$, $\tau' = 1$ 그리고 $k = 40$ 으로 추정되었으며, 이는 생산요소대한 1일 예측매개변수로 이용된다. Bear 강에 대한 가역접근법의 적용에 있어서, 최적의 예측매개변수의 추정하기위해, 매립차원 m' 은 2~9까지, 지체시간 τ' 은 1~35까지 1씩 증가 시켰다. 이웃좌표의 수 k 는 1~7까지는 2씩, 10~100까지는 10씩, 120~200까지는 20씩 증가시켰다. 따라서, 최적의 예측 매개변수를 추정하는데 이용된 조합은 총 5,040($8 \times 35 \times 18$)개의 경우의 수를 갖는다.

Fig. 7은 Bear 강의 10,001에서 10,200일까지의 일유출량 자료에 대한 예측시간(T) 1, 3, 5일 예측에 대한 관측치와 예측치를 표시한 것이다. 가역접근법을 이용한 예측이 표준접근법에 의한 예측보다 우수한 것을 알 수 있으며, 두 방법 모두 일유출량이 급격히 변하지 않고, 일정한 증가나 감소의 경향성을 보일 때는 더 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 문제가 되는 부분은 첨두값에서의 예측인데, Fig. 7에서 보는 바와 같이 표준접근법은 과소 산정하고, 가역접근법은 조금 과다 산정하고 있음을 알 수 있다. 실제 시계열 자료의 첨두치를 정확히 모의하기란 쉽지 않으며, 이런 문제는 추계학적 방법에서도 마찬가지이다. 첨두치에 대한 과다 산정은 예측에 사용된 예측기법인 간단한 부분근사화기법이 예측시간에 대한 예측좌표 주위의 이웃좌표의 거동을 근거로 하여 예측을 실시하는 특성을 반영함과 더불어 증가

및 감소의 경향성 및 잡음의 영향 때문에 발생하게 되는 것이다.

Table 1은 Fig. 7의 예측값과 실측값을 근거로 RMSE값을 구한 것이다. Table 1에 보는 바와 같이, 예측시간이 10,000~10,200일인 예측구간에서 가역접근법이 표준접근법에 비해 매우 우수하고, 가역 접근법은 표준접근법에 비해 예측시간(T)에 대한 영향을 비교적 덜 받는 것으로 나왔다.

5. 결론

본 연구에는 이론적 카오스 시계열인 Mackey-Glass 시계열과 Bear 강의 일유출량 시계열 자료에 대해 카오스 특성을 분석하고, 카오스 이론이 적용된 비선형 예측기법들을 이용하여 예측을 실시한 후, 실측치와 비교하여 예측기법들의 적합성을 알아보았다. 본 연구의 결과로 도출된 결론은 다음과 같다. 이론적 카오스시계열과 카오스 특성을 갖는 일유출량 시계열 자료에 대해, Phoon et al. (2002)이 제안한 가역접근법과 기존 연구에 널리 이용된 표준접근법으로 비선형 예측을 실시한 결과, 가역접근법이 표준접근법보다 우수함을 알 수 있었다. 특히, 가역접근법은 예측단계에서 예측시간(T)에 대하여 예측매개변수를 최적화시킴으로써 보다 정밀한 예측을 할 수 있었으며, 시스템에 대한 정보 손실이 발생하였을 경우 예측에 대한 상태공간 매개변수(m', τ', k)를 다시 추정해야 하는 표준접근법에 비해 실제적 적용성이 우수하였다.

국내 일유출량 시계열자료의 카오스 특성분석 및 비선형 예측에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서, 앞으로 국내 일유출량 시계열자료에 대하여, 비선형 예측기법들을 이용한 예측 및 분석에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

김형수, 최시중, 김중훈 (1998). "DVS 알고리즘을 이용한 일 유출자료의 예측." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제18권, 제II-6호, pp. 563-570.

박대규, 조원철 (2002). "카오스 이론을 적용한 일유출량 자료의 비선형 예측." **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 179-182.

Farmer, J.D. and Sidorowich, J.J. (1987). "Predicting chaotic time series." *Physical Review Letters*, Vol. 59, No. 8, pp. 845-848.

Kantz, H. and Schreiber, T. (1997). *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge

Packard, N.H., Crutchfield, J.P., Farmer, J.D., and Shaw, R.S. (1980). "Geometry from a time series." *Physical Review Letters*, Vol. 45, No. 9, pp. 712-716.

Phoon, K.K., Islam, M.N., Liaw, C.Y., and Liong, S.Y. (2002). "Practical inverse approach for forecasting nonlinear hydrological time series." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 116-128.

Takens, F. (1981). "Detecting strange attractors in turbulence." *Dynamical systems and turbulence, Lecture notes in mathematics(898)*, D.A. Rand and L.S. Young eds., Springer, Berlin, pp. 336-381.

Tsonis, A.A. and Elsner, J.B. (1988). "The weather attractor over very short timescales." *Nature*, Vol. 333, pp. 545-547.

(논문번호:05-28/접수:2005.02.07/심사완료:2006.01.27)