가역접근법을 이용한 일유출량 자료의 비선형 예측
Nonlinear Forecasting of Daily Runoff Using Inverse Approach Method

정동국*, 이배성**
Dong Kug Jeong, Bae Sung Lee

요 지

시계열 자료의 분석과 예측은 수문학분야에서 매우 중요하며, 최근 들어 특정한 수문시계열에서 카오스 특성이 발견되고 있다. 카오스 특성을 갖는 수문시계열의 예측에 있어, 기존의 거의 모든 연구는 시스템의 특성을 파악한 뒤 예측을 실시하는 표준접근법이 채택되어왔다. 그러나 Phoon 등은 시스템의 특성분석에 앞서 예측을 실시하고, 상태공 매개변수가 시스템의 특성분석단계가 아닌 예측단계에서 평가되는 가역접근법을 제안하였다. 본 연구에서는 Phoon 등이 제안한 가역접근법과 기존에 널리 적용되어온 표준접근법을 실제 일유출량 자료에 적용함으로써, 가역접근법의 적용성을 검토하고 카오스 시계열의 특성을 파악하였다. 본 연구에서 사용한 비선형 예측기법으로는 카오스이론이 적용된 부분근사화 기법을 이용하였다. 카오스 특성분석을 통해, Bear 강 일유출량 시계열 자료에서 카오스 특성이 나타남을 알 수 있었다. 표준접근법과 가역접근법을 이용하여 Bear 강의 일유출량 자료에 대하여 예측을 실시한 결과, 카오스 특성을 갖는 일유출량 시계열 자료의 단기 예측의 우수성을 알 수 있었으며, 가역접근법이 표준접근법에 비해 좋은 결과를 나타내었다. 특히, 가역접근법은 예측단계에서 예측시간(T)에 대하여 예측매개변수를 최적화시킴으로써 보다 정밀한 예측을 할 수 있었으며, 시스템에 대한 정보손실이 발생하였을 경우 예측에 대한 상태공간 매개변수를 다시 추정해야 하는 표준접근법에 비해 실제적 적용성이 매우 우수하였다.

핵심용어 : 시계열 분석, 표준접근법, 가역접근법, 카오스

1. 서 론

시계열 분석과 예측은 수문학분야에서 홍수, 가뭄 및 저수지 운영, 수자원 계획 등을 위하여 매우 중요하다. 그러나 기존의 시계열 분석방법들은 대부분 실제 시계열이 추계학적이라고 보고, 확률분포를 이용한 선형적 예측에 치중하였다. 그런데, 최근 들어 특정한 수문시계열에서 카오스 특성이 발견되고 있다. 또한, 카오스 이론을 적용한 수문시계열 자료의 예측에 있어, 기존의 거의 모든 연구는 시스템의 특성을 파악한 뒤 예측을 실시하는 표준접근법이 채택되어왔다. 국내에서는 김형수 등(1998)과 박대규 등(2002)이 카오스 특성을 갖는 일유출량 시계열자료를 표준접근법을 이용하여 예측을 실시하였다. 그러나 Phoon 등(2002)은 시스템의 특성분석에 앞서 예측을 실시하고, 상태공간 매개변수가 시스템의 특성분석단계가 아닌 예측단계에서 평가되는 가역접근법을 제

* 정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail : dkjeong@hannam.ac.kr
** 정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 공학석사 · E-mail : baesung@hannam.ac.kr

안하였다.

본 연구에서는 Phoon 등이 제안한 가역접근법과 기존에 널리 적용되어온 표준접근법을 실제 일유출량 자료에 적용함으로써, 가역접근법의 적용성을 검토하고 카오스 시계열의 특성을 파악하였다. 카오스이론이 적용된 비선형 예측기법으로는 부분근사화 기법을 이용하였다.

2. 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 특성분석단계보다 예측단계에서 평가되는 가역접근법으로 구분할 수 있다.

2.1 비선형 예측기법

비선형예측기법에는 전역근사화기법(global approximation method)과 부분근사화기법(local approximation method)이 있다. 본 연구에서는 비선형예측기법으로 Kantz 등(1997)이 제안한 간단한 부분근사화기법을 이용하였으며 식 (1)과 같다.

$$x_{n+\Delta n} = \frac{1}{|\Im_r(X_n)|} \sum_{X_{n'} \in \Im_r(X_n)} x_{n'+\Delta n} \tag{1}$$

식 (1)은 시간지체법으로 재구성된 시계열의 좌표값에 대해, 예측값 $x_{n+\Delta n}$을 구하기 위해 좌표 X_n 주위의 반경 r안의 이웃좌표들 $X_{n'}$을 찾은 후, 이 이웃좌표들의 Δn시간후의 좌표들 $X_{n'+\Delta n}$에 대하여 좌표성분 $x_{n'+\Delta n}$들의 합을 이웃좌표들의 개수로 나누어 구한다. $\Im_r(X_n)$는 X_n주위의 이웃좌표들의 집합을 의미하며 결국, $|\Im_r(X_n)|$는 이웃좌표의 수 k이다.

2.2 표준접근법(Standard Approach Method)

표준접근법은 시스템의 특성분석에서, 어떤 수문시계열 자료가 카오스적 특성을 갖는 것으로 판단되면, 다음 단계로 예측을 실시한다. 시스템의 특성분석은 상관차원법을 이용하여 결정하며, 이때 매립차원 m(embedding dimension for characterization)과 지체시간 τ(delay time for characterization)가 특성분석에 대한 상태공간의 매개변수로 이용된다. 일반적으로 표준접근법에서는 예측에 대한 상태공간 매개변수 m'(embedding dimension for forecasting), τ'(delay time for forecasting)을 시스템의 특성분석에서 결정한 상태공간 매개변수 m, τ와 같은 것으로 가정한다. 표준접근법에서 상태공간 매개변수 τ는 자기상관함수(ACF)나 상호정보이론(mutual information theory)를 이용하여 추정하며, m은 Takens(1981)이 제안한 $m = 2D_2+1$식으로, k는 Farmer와 Sidorowich(1987)이 제안한 $k = m+1$식을 이용한다. 여기서, D_2는 상관차원이다.

2.3 가역접근법(Inverse Approach Method)

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, k를 동시에 선정하며, 목적함수로 RMSE를 이용한다.
2. 최적의 예측매개변수 m', τ' 그리고, k가 최적화 과정에서 사용된 자료의 선택에 의존하지 않는 불변량인 것으로 간주될 수 있는지 검증한다.
3. 최적의 예측매개변수들 m', τ' 그리고, k가 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 예측시간(T)에 대한 예측매개변수를 최적화 시키고, 안정성을 검토하여 예측을 실시하는 방법이다. 가역접근법에서 3개의 구성요소 중 상태공간재건요소는 보정요소에 속한 자료를 예측하는데 이용되며, 두 요소의 모든 자료는 생산요소를 예측하는데 이용된다.

3. 예측모형의 적용성 및 예측 결과

본 연구에서 사용한 일유출량 자료는 Idaho의 Bear Lake County에 있는 Bear 강의 일유출량 자료이며, Bear 강의 일유출량은 1937년 10월 1일부터 1971년 10월 15일까지 12,433개의 자료로 그림 1과 같다.

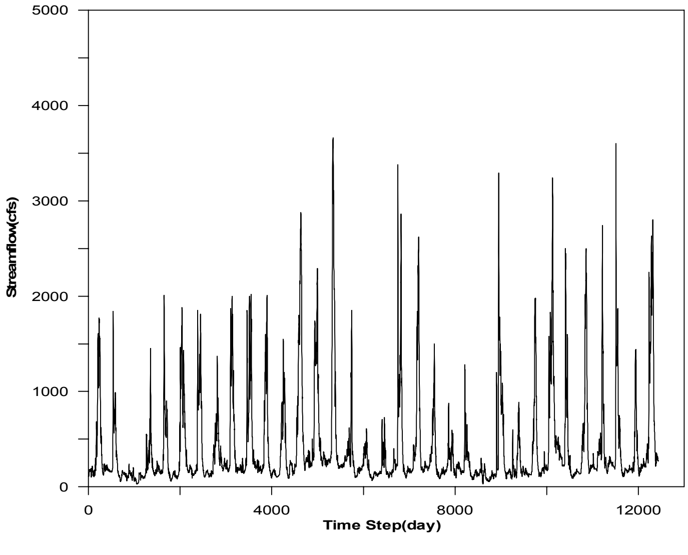


그림 1. Bear 강의 일유출량 시계열

3.1 일유출량 시계열의 카오스 특성분석

Bear 강의 일유출량 시계열 자료에 대한 표준접근법의 적용을 위해 자기상관함수를 이용하여 지체시간 $\tau = 35$를 추정하였고, Bear 강의 상관차원을 구하기 위해 그림 2에서 기울기가 일정한

부분(반경 25~50)을 scaling region으로 하여 상관차원을 구하였다. Bear강의 매립차원에 따른 상관차원은 그림 3과 같고, 상관차원이 저차원 근처에서 포화될 가능성을 보이고 있다.

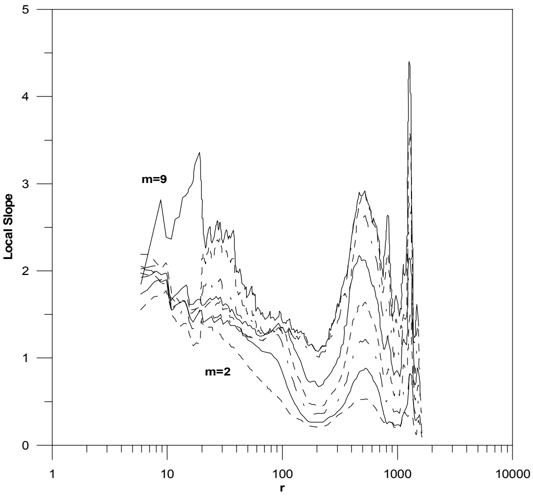


그림 2. Bear 강 일유출량의 반경 r에 따른 local slope

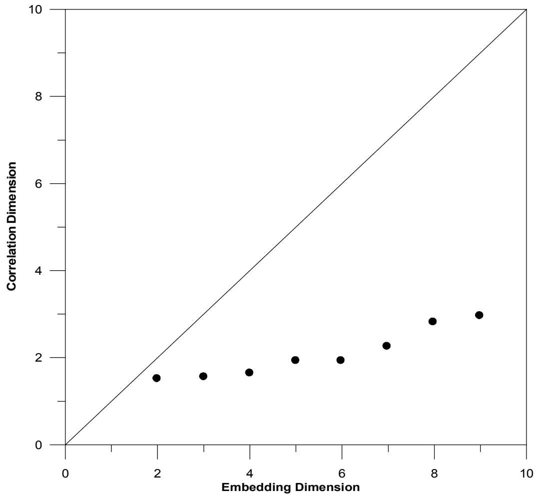


그림 3. Bear 강의 일유출량의 매립-상관 차원

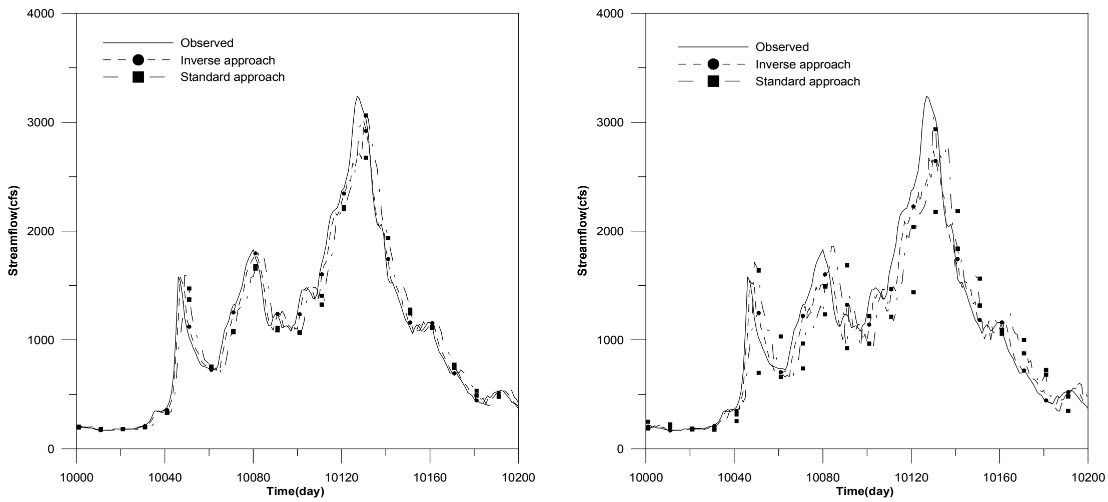
3.2 일유출량 시계열의 비선형 예측

Bear 강의 일유출량 자료에 대해 표준접근법과 가역접근법을 이용하여 예측시간(T) 1일과 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) 1일과 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 k를 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.

가역접근법에서 상태공간 재건 요소에 대한 보정요소의 예측시간(T) 1일과 5일에 대한 최적의 예측매개변수는 $m'=2$, $\tau'=1$ 그리고, $k=40$으로 추정되었으며, 이는 생산요소에 대한 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 k는 1~7까지는 2씩, 10~100까지는 10씩, 120~200까지는 20씩 증가시켰다. 따라서, 최적의 예측 매개변수를 추정하는데 이용된 combination은 총 5,040(8×35×18)개의 경우의 수를 갖는다.

그림 4는 Bear 강의 10,001에서 10,200일까지의 일유출량 자료에 대한 예측시간(T) 1일과 5일 예측에 대한 관측치와 예측치를 표시한 것이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 카오스 특성을 갖는 일유출량 시계열 자료의 비선형 예측에 있어, 가역접근법이 표준접근법보다 좋은 결과를 나타내었다. 또한, 예측시간(T)이 1일에서 5일로 증가함에 따라 오차가 크게 발생하였으며, 이를 통해 카오스 시계열 자료의 단기 예측의 우수성을 알 수 있었다.



(a) 예측시간(T) 1일　　　　(b) 예측시간(T) 5일

그림 4. Bear강의 10,001～10,200일 예측

4. 결　론

카오스 특성 분석을 통해, Bear 강 일유출량 시계열 자료에서 카오스 특성이 나타남을 알 수 있었다. Bear 강의 일유출량 자료에 대한 1일과 5일 예측 결과, 카오스 특성을 갖는 일유출량 시계열 자료의 단기 예측의 우수성을 알 수 있었으며, 가역접근법이 표준접근법에 비해 좋은 결과를 나타내었다. 특히, 가역접근법은 예측단계에서 예측시간(T)에 대하여 예측매개변수를 최적화시킴으로써 보다 정밀한 예측을 할 수 있었으며, 시스템에 대한 정보손실이 발생하였을 경우 예측에 대한 상태공간 매개변수(m', τ', k)를 다시 추정해야 하는 표준접근법에 비해 실제 적용하기에 용이하다.

참 고 문 헌

1. 김형수, 최시중, 김중훈(1998). DVS 알고리즘을 이용한 일 유량자료의 예측, 대한토목학회 논문집, 제18권, 제Ⅱ-6호, pp. 563-570.
2. 박대규, 조원철(2002). 카오스 이론을 적용한 일유출량 자료의 비선형 예측, 2002 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 179-182.
3. Farmer, J.D., and Sidorowich, J.J.(1987). Predicting Chaotic Time Series, Physical Review Letter, Vol. 59, No. 8, pp. 845-848.
4. Kantz, H., and Schreiber, T.(1997). Nonlinear Time Series Analysis, Cambridge University Press, Cambidge
5. 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.
6. Takens, F.(1981). Detecting Strange Attractors in Turbulence. Dynamical Systems and Surbulence, Lecture notes in mathematics(898), D.A. Rand and L.S. Young eds., Springer, Berlin, pp. 336-381.