

수문기상자료의 웨이블릿 변환에 의한 비선형 동역학적 성분의 추출

Extraction of Nonlinear Dynamical Component by Wavelet Transform in Hydro-meteorological Data

진영훈* · 박성천**

Jin, Young-Hoon · Park, Sung-Chun

Abstract

In the present study, we applied wavelet transform to decompose the hydro-meteorological data such as precipitation and temperature into the components with different return periods with a primary objective for extraction of nonlinear dynamical component. For the transform, we used the Daubechies wavelet of order 9 ('db9') as a basis function. Also, we applied the correlation dimension analysis to determine whether or not the detail and approximation components at the respective decomposition stage with the increasing of scale in the wavelet transform reveal the nonlinear dynamical characteristics. In other words, we proposed the combined use of the wavelet transform and the correlation dimension analysis as methodology to extract the nonlinear dynamical component from the hydro-meteorological data. The derived result has shown the method proposed in the present study is suitable for the segregation and extraction of the nonlinear dynamical component which is, in general, difficult to reveal by using the raw data.

Keywords: precipitation, temperature, hydro-meteorological data, nonlinear dynamics, wavelet transform

요 지

본 연구에서는 강수량 및 기온과 같은 수문기상자료의 비선형 동역학적 성분을 추출하기 위해 웨이블릿 변환을 적용하여 대상자료를 재현기간별 성분으로 분리하였다. 변환을 위한 기저함수로는 Daubechies의 9번 ('db9') 웨이블릿 함수를 사용하였다. 또한 웨이블릿 변환의 스케일의 증가에 따른 각 분리단계에서 추출된 상세성분과 근사성분이 비선형 동역학적 특성을 지니는지를 판단하기 위하여 상관차원분석을 이용하였다. 즉 수문기상자료내에 비선형 동역학적 성질을 지니는 성분을 추출하기 위한 방법론으로써 웨이블릿 변환과 상관차원분석의 결합을 제안하였으며, 도출된 결과는 일반적으로 원자료를 이용할 경우에는 파악하기 어려운 대상자료의 시간에 따른 비선형적 변화를 분리·추출하기 위해 본 연구에서 제안한 방법이 적합함을 보이고 있다.

핵심용어: 강수량, 기온, 수문기상자료, 비선형 동역학, 웨이블릿 변환

1. 서 론

물순환 과정의 기본 요소인 강우현상에 의한 강수량 및 그에 상호영향을 주고받는 기온의 특성을 파악하는 것은 미래의 수자원 확보를 위해 필수적이며, 각 현상을 측정하여 기록한 시계열 자료에 대한 이해의 정도를 향상시키는 것은 급격하게 변동하는 물수요에 대응하여 안정적이며 지속적인 수자원의 공급을 향한 첫 걸음이라 할 수 있다. 이러한 중요성을 바탕으로 강수량 및 기온과 같은 수문기상 시계열에 대한 깊은 이해를 위해 적용되는 방법들 역시 그 종류와 응용의 다양함을 보이고 있으며, 각 방법들의 결과들은 그 응용대상과 목적에 부합하여 각기 다른 시각의 관점들을 제시

하고 있다.

일반적으로 수문기상 시계열자료들은 시간에 따라 현격한 변화를 보이는 강한 비선형성을 나타내고 있을뿐만 아니라 각 지역별로 다른 특성을 지니고 있어 공간적 분산의 범위가 매우 넓다. 이는 주기성이 강한 기온에서보다는 강수량 시계열에서 그 현상이 두드러지게 나타난다. 이러한 시·공간적으로 현저한 변동성을 그 특징으로 하는 수문기상 시계열자료의 특성을 파악하기 위해서는 기술통계 및 자료의 통계특성값들을 나타내는 도시적 방법, 또는 이동평균법과 같은 단순한 방법들의 적용만으로 해결되기 어렵다. 이는 수문기상 시계열자료의 비선형성뿐만 아니라 측정과정에서 축적될 수 있는 오차에 의한 단순잡음 및 다른 자연현상들과의

*정희원 · 교신저자 · 동신대학교 토목공학과 연구원(E-mail : yhj@dsu.ac.kr)
**정희원 · 동신대학교 토목공학과 정교수(E-mail : psc@dsu.ac.kr)

상호간섭에 의한 동역학적 잡음이 대상자료의 본질적인 거동을 생산해내는 각 변수에 대한 “계(system)”의 파악을 방해할 수 있기 때문이다.

수문기상 자료들을 포함한 자연현상을 나타내는 각 변수들의 드러나지 않은 본질적 거동을 찾아내기 위해 지난 십 수년간 활발한 연구가 진행되었으며, 이의 근간을 이루는 분야가 비선형 동역학이라 하겠다. 특히 이 분야는 카오스 이론(chaos theory)으로 소개되면서 다양한 연구 분야에 더욱 널리 알려졌으며, 그 응용은 수문학 및 기상학을 비롯한 폭넓은 범위로 확대되었다. 본 연구와 유사한 수문기상 자료들에 대한 적용 역시 그 대상자료의 종류가 다양하여 강우(Sivakumar, 1999), 수위(Lima 등, 2003), 유출(김형수 등, 1996; Pasternack, 1999; Sivakumar 등, 2002a; 박대규 등, 2003; Khan 등, 2005), 유사이송(Sivakumar 등, 2002b), 대기압 자료(Kawamura 등, 1998) 등을 포함한다(Sivakumar, 2004).

수문기상 자료에 카오스 이론을 적용하기 위해서는 잡음에 관한 전처리 과정이 필수적으로 선결되어야 하며, 이에 관한 연구 역시 활발히 진행되고 있다(Kawamura 등, 1998; Sivakumar 등, 1999; Elshorbagy 등, 2002; Jin 등, 2005). 잡음은 앞서 기술한 바와 같이 측정오차에 의한 것뿐만 아니라 각기 다른 자연현상들간의 상호간섭에 의해 발생하는 요인들까지도 포함한다. 이러한 점으로 미루어 단일현상의 측정자료에 대한 이동평균 및 low-pass filter와 같은 단순 잡음제거 방법은 그 적용의 한계를 내포하고 있다. 또한 결정론적 동역학 이론을 위해 개발된 비선형 잡음제거 방법(Schreiber, 1993) 역시 자료내에 포함된 잡음의 수준을 미리 알아야 한다는 단점 때문에 그 적용의 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 수문기상 시계열 자료에 내재되어 있는 비선형 동역학적 성분을 분리·추출하기, 위하여 최근 수문기상학적 자료를 비롯해 지구물리학 분야에 그 적용이 활발한 웨이블릿 변환의 적용을 제안한다. 웨이블릿 변환의 강우 및 유출에 대한 적용은 Kumar 등(1993a; 1993b), Smith 등(1998), Cahill(2002), Kim(2004)의 연구에서 나타나고 있으며, 해수면 및 대기압 (Torrence 등, 1998; Drago 등, 2002), 태양의 흑점(Oh 등, 2003; Polygiannakis 등, 2003), 지진파(Pazos 등, 2003)자료에 대해서도 그 활용을 찾아볼 수 있다.

본 연구에서의 웨이블릿 변환의 적용은 잡음이 포함되어 있지 않은 카오스적 거동을 보이는 성분만을 분리해내기 위해 최초로 제안하는 방법이며, 웨이블릿의 각 변환단계에서 추출되는 성분이 비선형 동역학적 특성을 나타내는지를 판단하기 위해 상관차원분석을 적용한다. 수문기상학적 시계열의 카오스적 특성을 파악하기 위해 다양한 잡음제거 방법과 상태공간분석, 최대 Lyapunov 지수, 상관차원분석을 적용한 연구들을 찾아볼 수 있으나, 본 연구에서 제안한 방법은 대상 시계열자료를 시간-주파수 영역에서 분리하여 카오스적 성분을 포함하고 있는지를 조사한다는 점에서 기존의 방법들과의 차이를 나타낸다.

수문기상자료의 시계열에 대한 비선형 동역학적 특성의 유무를 기능하는 것은 이 시계열이 결정론적 시스템으로부터

발생되는지를 판단하는 것이며, 보다 정확한 단기예측의 가능성을 나타내기 때문에 그 중요성이 높다. 이러한 관점에서 볼 때 수문기상자료로부터 비선형 동역학적 성분의 추출은 측정오차와 같은 단순잡음이나 동역학적 잡음을 포함한 잡음성분으로 인해 가시적으로는 나타나지 않으나, 결정론적 시스템으로부터 발생하는 해당 자료의 본질적인 거동을 파악하기 위한 목적을 포함한다.

본 연구에서는 월강수량과 월평균기온이라는 수문기상학적 자료의 카오스적 특성의 파악을 위하여 이산형 웨이블릿 변환과 상관차원분석의 결합을 그 방법론으로 제안하며, 대상 자료의 비선형 동역학적 거동을 파악한다. 결과적으로 본 연구의 주목적은 제안된 방법론을 적용하여 수문기상학적 시계열자료 내에 잠재되어 있을 수 있는 비선형 동역학적 특성을 나타내는 성분을 추출하여 대상 시계열자료의 본질적인 거동을 파악하는 것이다. 이는 잡음성분에 의해 가려워진 대상 시계열자료의 본질적인 거동의 보다 깊은 이해를 도울 수 있을뿐만 아니라, 그에 따른 보다 정확한 단기예측의 가능성을 기능할 수 있는 정보를 제공하기 위한 것이다. 이러한 일련의 과정의 대상으로는 비교적 장기간의 자료를 보유하고 있는 우리나라의 목포지점의 월강수량과 월평균기온 자료를 수집하여 본 연구에서 제안한 방법의 적용으로 사용하였다.

2. 적용방법

본 연구의 주목적인 수문기상 시계열자료에 내재된 비선형 동역학적 거동을 파악하기 위한 방법으로써 먼저 대상자료인 목포지점의 월강수량 및 월평균기온 자료에 대한 이산형 웨이블릿 변환을 수행하며, 각 변환 단계로부터 분리·추출된 성분들이 카오스적 거동을 보이는지의 판단을 위해 Grassberger 등(1983)에 의해 제안된 상관차원분석을 실시한다. 만약 추출된 성분들 중에서 카오스적 거동을 보이는 성

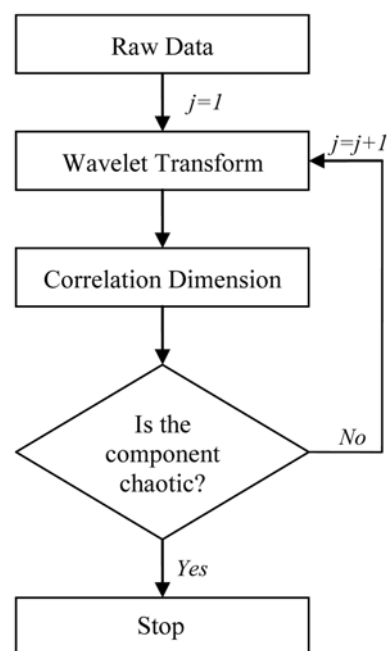


그림 1. 대상자료의 카오스적 성분의 검출을 위한 적용방법의 순서도

분이 존재한다면, 이는 해당 성분이 적은 수의 자유도를 갖는 비선형 결정론적 시스템으로부터 발생한다는 것을 의미하며, 단기예측에 있어 보다 정확한 예측을 가능하게 한다.

그림 1은 상기의 과정을 나타내는 순서도이며, 여기서 j 는 웨이블릿 변환에 적용되는 스케일을 의미한다. 즉 수문기상 시계열자료에 대한 웨이블릿 변환에 의해 분리되는 근사성분(approximation)에 대해 각 단계별로 상관자원분석을 실시하며, 임의의 단계에서 분리된 자료(근사성분)가 비선형 동역학적 거동을 나타내면 웨이블릿 변환과정이 종료된다. 또한 비선형 동역학적 특성을 나타내는 근사성분이 추출된 단계까지 분해된 상세성분에 대해서도 비선형 동역학적 특성이 존재하는지를 검토한다.

2.1 웨이블릿 변환

일반적으로 시계열내에 포함되어 있는 각 주파수별 성분들의 파악을 위해 푸리에 변환(Fourier transform)이 이용되어 왔으나, 이는 시간영역에서의 정보를 검출할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 단시간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform: STFT)이 개발되었으나, 이 방법을 위해 사용되는 시간영역에서의 고정된 창함수(window function)는 그림 2(a)에서 보여지듯이 시간-주파수의 전영역에서 동일한 분해능을 사용한다(Shin 등, 2000).

이러한 단시간 푸리에 변환의 경직된 분해능은 시계열자료를 시간-주파수 영역으로 변환할때 고정된 범위에 포함되지 않는 성분에 대해서는 해석이 곤란하다는 단점을 가지고 있다(Torrence 등, 1998). 또한 창 크기가 항상 일정하기 때문에 비정상 자료에 대해서도 그 적용이 곤란하다. 즉 모든 시간-주파수 영역에서의 동일한 분해능(resolution)은 급격한 변화를 보이는 자료에는 그 적용의 한계를 보인다.

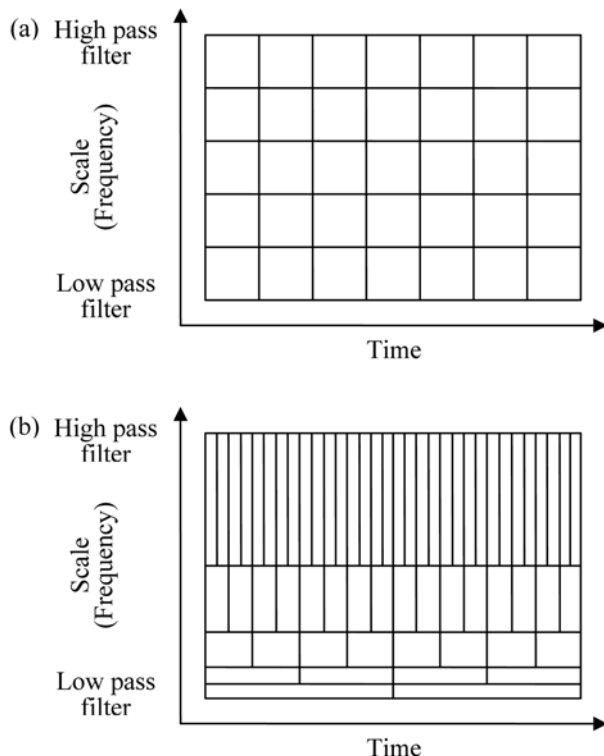


그림 2. 시간-주파수 영역의 해상도: (a) 단시간 푸리에 변환, (b) 이산형 웨이블릿 변환

반면에 단시간 푸리에 변환의 단점을 보완하고 적용의 한계를 뛰어넘기 위해 개발된 웨이블릿 변환은 대상자료의 시계열을 각기 다른 주파수 성분으로 분리하는 도구이며, 각 스케일(주파수)에 따른 유연한 분해능에 의해 자료에 포함되어 있는 다양한 성분들을 조사할 수 있는 도구로써 정의된다. 시간에 따라 급격한 변동성을 나타내는 자료에 대한 웨이블릿 변환은 스케일 및 시간에 따라 달라지며, 대상자료와 웨이블릿 함수 사이의 회선적분으로 정의된다. 이러한 과정을 위해 적용되는 웨이블릿 함수는 스케일과 전이항에 의해 그 크기와 위치가 변하여 그림 2(b)에 보여지듯이 시간-주파수 영역에서 그 분해능의 유연성을 나타낼 수 있다(Daubechies, 1992).

Heisenberg의 불확정성 원리에 의하면 대상자료의 시간-주파수영역으로의 변환에 있어 정보를 동시에 완벽하게 국소화시킬 수 있는 변환은 존재할 수 없으나(Mallat, 1998), 웨이블릿 변환은 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 저주파수영역에서는 주파수 분해능을 증가시키고 고주파수 영역에서는 시간영역의 분해능을 증가시키는 보완성을 지니고 있다(박형기 등, 2003). 따라서 웨이블릿 변환은 지금까지 개발된 시간-주파수영역에서의 변환방법들 중에서 가장 유연하며, 비정상성이나 급격한 변화를 보이는 자료에 적합하다.

웨이블릿 변환을 위해서는 가장 먼저 기저 웨이블릿(basis or mother wavelet) 함수를 선택해야 하며, 이는 일반적으로 대상자료의 특성을 고려하여 결정되고 있다. 선택된 기저 웨이블릿은 변환의 매단계에서 각기 다른 스케일과 전이항을 포함한 웨이블릿군(wavelet family)을 만들어내며, 그 수학적 표현은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t-k) \quad (1)$$

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t-k) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에 포함된 j 와 k 는 각각 스케일과 전이항을 나타내며, 선택된 기저 웨이블릿을 시간-주파수영역에서 다른 분해능과 위치를 갖도록 변형시키는 역할을 한다. 즉 스케일항은 웨이블릿의 크기를, 전이항은 시간축을 따라 이동하는 웨이블릿의 위치를 나타낸다(Oh 등, 2003). 기저 웨이블릿 함수는 앞서 말한바와 같이 변환의 각 단계에서 적용되는 웨이블릿군을 생성하는 기본 함수이며, 시간영역에서 그 평균이 영이고 허용성(admissibility: $\int_{-\infty}^{\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty$)을 만족시키는 어떠한 함수도 그 사용이 가능하다. 허용성에 관한 식의 $\hat{\psi}(\omega)$ 는 웨이블릿 함수($\psi(t)$)의 푸리에 변환을 나타낸다.

여기서 각 단계의 스케일과 전이항에 의해 표현되는 $\psi_{j,k}(t)$ 는 기저 웨이블릿 함수로부터 도출되며, 그 특징으로는 대상자료에 대해 조밀한 스케일 즉 고주파 성분을 추출하는데 사용된다. 그러나 저주파 및 넓은 시간영역의 스케일을 추출하기 위해서는 상대적인 역할을 할 수 있는 함수가 필요하며, 이를 스케일링 함수($\phi_{j,k}(t)$)라 한다(식 (2)).

웨이블릿 변환의 일반적인 특징으로, 스케일 j 가 작은 값일수록 웨이블릿 함수가 나타내는 스케일의 크기는 조밀해지며, 고주파수 즉 고빈도 성분을 나타낸다. 역으로 j 가 큰 값을 가질수록 스케일의 크기 역시 커지게 되며, 저주파수에 해당하는 성분을 추출한다(그림 2(b) 참조). 저주파수에 대한

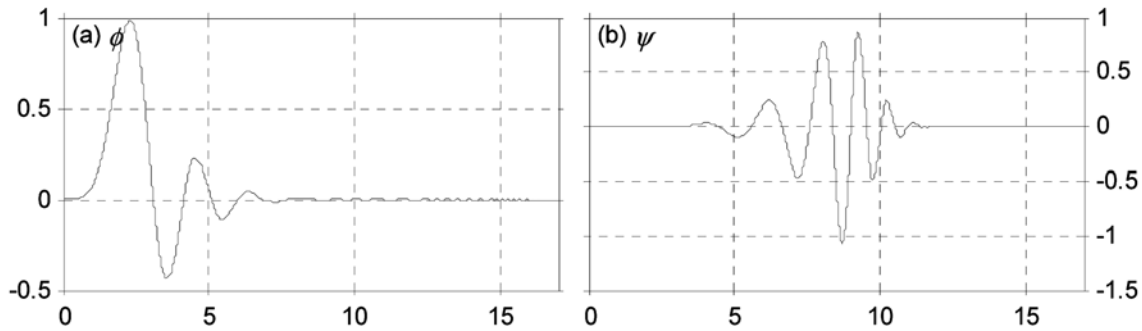


그림 3. Daubechies의 9번 웨이블렛의 (a) 스케일링 함수 및 (b) 웨이블렛 함수

성분은 근사성분(approximation), 고주파수 성분은 상세성분(detail)이라 부른다.

웨이블렛 변환은 크게 스케일과 전이항의 값들의 적용형태에 따라 연속형 웨이블렛 변환(Continuous Wavelet Transform: CWT)과 이산형 웨이블렛 변환(Discrete Wavelet Transform: DWT)으로 구분된다. CWT는 각각의 스케일과 전이항의 값들이 연속적으로 적용되는 경우이며, 반면에 이산적으로 적용되는 경우를 DWT라 한다. 일반적으로 분석 대상 자료의 에너지가 유한할 경우, 변환 후 신호의 재구성을 위해 CWT를 적용하여 분해된 모든 값들이 필요한 것은 아니며, 그 정보의 양이 오히려 과잉될 수 있다. 그러나 DWT의 경우 계산량을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 정확한 원자료의 재구성을 위해서도 충분하다(진영훈 등, 2005). 따라서 본 연구에서는 대상 시계열자료에 대하여 DWT를 적용하였다. 결과적으로 대상자료의 DWT는 각각의 스케일과 전이항에 의해 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{Jk} \phi_{J,k} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{jk} \psi_{j,k}(t) \quad (3)$$

여기서 J 는 최대 분해단계를 나타내며 일반적으로 자료의 수에 따라 그 값이 결정된다. 이는 분해의 최종 단계에서 적어도 하나 이상의 웨이블렛 계수가 유효해야 한다는 규칙을 따른다. 그러나 본 연구에서는 각 단계에서 분리된 근사성분에 대해 카오스적 거동을 나타내는지를 판단하기 위해 상관차원분석을 실시하여 최대 분해단계를 결정한다. 최대 분해단계에 의해 도출된 계수인 a_{Jk} 는 가장 낮은 주파수 성분 즉 가장 넓은 스케일 영역을 나타내며 대상자료($f(t)$)와 스케일링 함수($\phi_{J,k}(t)$)의 내적에 의해 산정된다: $a_{Jk} = \langle f(t), \phi_{J,k}(t) \rangle$. 반면에 각각의 이산형 스케일 j 와 전이항 k 에 의해 산정되는 d_{jk} 는 최대 분해단계 이전의 각 단계에서의 주파수 성분들에 대한 계수들이며, 원자료($f(t)$)와 웨이블렛 함수($\psi_{j,k}(t)$)의 내적 값이다: $d_{jk} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle$

본 연구에서는 Daubechies의 9번 웨이블렛을 기저 웨이블렛 함수로 사용하였으며, 그림 3에 스케일링 함수(ψ : 그림 3(a))와 웨이블렛 함수(ϕ : 그림 3(b))를 도시하였다. 상기의 식에 나타난 바와 같이 웨이블렛 변환은 웨이블렛 함수와 대상자료간의 내적에 의한 연산을 수행하여 해당자료와 웨이블렛에 관한 정보를 웨이블렛 계수로 나타내므로 웨이블렛 변환의 적용시 적절한 웨이블렛 함수의 선택은 매우 중요하다(Farge, 1992). 그러나 시계열자료의 해석을 위한 웨이블렛 함수의 선택에 관한 정량적인 기준은 아직까지 명확

하지 않다. 다만, Torrence 등(1998)이 급격한 변화나 계단형 자료에 Daubechies의 1번 웨이블렛 함수인 Haar 함수를 사용할 수 있으며, 부드러운 변화를 나타내는 자료에는 감쇠하는 cosine 함수가 적용가능하다는 정성적인 기준을 언급하고 있을 뿐이다.

DWT의 각 단계에서 적용되는 스케일은 2의 거듭제곱 형태(2^j)로 그 크기가 증가하며, 그림 3의 스케일링 및 웨이블렛 함수의 적용범위가 달라진다. 또한 스케일의 증가는 시간영역에서 낮은 분해능으로 귀결되며 결국 점점 낮은 주파수의 성분을 추출하게 되고, 각 단계에서 분리된 상세 및 근사성분은 다음에 기술할 상관차원분석을 통해 카오스적 거동을 포함하는지가 판단된다.

2.2 상관차원분석

상기의 DWT를 이용하여 분리·추출한 근사성분에 대하여 비선형 동역학적 거동을 보이는지를 알아보기 위해 상관차원분석을 실시한다. 상관차원은 일반적으로 이상한 끌개(strange attractor)를 나타낼 수 있는 프랙탈차원의 계산을 위해 가장 널리 이용되고 있는 방법이며(Grassberger와 Procaccia, 1983), 기본적으로 Grassberger(1990)가 제안한 방법에 의해 계산된다. 본 연구 역시 Grassberger(1990)에 의해 제안된 방법을 이용하며, 그 기본개념은 시계열 내에 카오스적 특성이 존재한다면 상태공간상의 자료에 대한 충분히 가까운 궤적은 이상한 끌개로 알려진 특정한 영역으로 이끌린다는 것이다(Jeong 등, 1996). 상태공간의 재구성을 위해 일반적으로 Parkard 등(1980)과 Takens(1981)에 의해 제안된 시간지체법을 사용한다. 이는 시계열 $x(t)$ 에 대하여 m 차원의 상태공간을 재구성할 경우 좌표 $X_r = \{x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)\}$ 를 갖는 궤적(trajjectory)으로 표현하는 방법이다. 여기서, τ 는 지체시간(delay time)이며, m 은 매립차원(embedding dimension)을 나타낸다.

상관차원의 산정을 위해 사용되는 상관적분은 다음의 식 (4)와 같이 계산된다.

$$C(N, r, m) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N \Theta(r - |X_i - X_j|) \quad (4)$$

여기서, $\Theta(s)$ 는 Heaviside 함수이며, $s < 0$ 일때 $\Theta(s) = 0$, $s > 0$ 일때 $\Theta(s) = 1$ 로 정의된다. 또한, $N \rightarrow \infty$ 일때, $C(N, r, m) \rightarrow C(r, m)$ 로 된다(Ding 등, 1993). 반경 r 의 값이 작을 경우, 상관적분($C(r, m)$)에 대해 지수법칙이 성립하며($C(r) \sim r^{-d}$), 여기서 d 는 끌개의 상관차원값을 나타낸다. 즉 끌개의 차원값인 d 는

$\log C(r)$ 와 $\log r$ 의 관계식인 $\log C(r) = d|\log r|$ 에 의해 $\log r$ 에 대한 $\log C(r)$ 의 경사의 값으로 주어진다.

시계열이 추계학적 특성을 갖는다면, 매립차원이 증가할수록 상관차원 역시 이와 비례하여 증가하지만, 카오스적 특성을 나타낼 경우 매립차원이 증가하더라도 상관차원은 증가하지 않고 특정한 값에 수렴한다(박대규 등, 2003). 상관차원값인 k 는 대상자료의 시간에 따른 변동을 나타내기 위해 필요한 최소의 변수의 개수를 의미한다. 그러나 상관차원값의 산정을 위한 상기의 과정은 자료의 길이와 잡음의 정도 및 자료내에 포함되어 있는 영의 값들에 따라 상당한 영향을 받는다(Khan 등, 2005). 잡음의 영향이 현저하고 무강우 값과 같이 영의 값을 포함한 수문기상 시계열자료에 대해 상관차원분석을 수행할 경우 자료에 대한 전처리 과정에 대한 중요성은 더욱 증가된다.

따라서 본 연구에서 제안한 DWT와 상관차원분석의 결합은 자료 자체의 잡음성분의 제거와 동시에 대상자료 내에 비선형 동역학적 특성이 존재하는지를 파악하기 위해 체계적인 접근을 위한 방법이라 할 수 있다. 웨이블릿 변환으로부터 각 단계별로 생성되는 근사성분은 상기의 상관차원 계산을 위해 이용되며, 비선형 동역학적 거동을 나타내는 단계까지 분리·추출된 상세성분에 대해서도 비선형 동역학적 특성의 유무를 검토한다. 즉 앞서 말한 바와 같이 매 단계에서의 근사성분에 대한 상관차원분석이 이루어지며, 이에 의해 카오스적 거동이 파악된 단계에서 DWT의 과정이 종료된다.

3. 결 과

목포지점 월강수량 및 월평균기온 자료에 대해 DWT를 적용하였으며, 각 단계별로 분리된 상세성분과 근사성분에 대해 상세성분을 자세히 보이기 위해 1951년부터 2000년까

지의 50년간의 자료를 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다. 각 단계에서 분해된 근사성분에 대해 상관차원분석을 실시하여 비선형 동역학적 특성을 가지고 있는지를 검토하였다. 각 그림에서 보이는 바와 같이 두 시계열 자료 모두에 대해 6단계까지 웨이블릿 변환이 이루어졌으며, 이는 월강수량과 월평균기온의 두 시계열자료 모두에 대하여 웨이블릿 변환 6단계에서 분리·추출된 근사성분에 대한 상관차원분석의 결과가 매립차원이 증가함에 따라 상관차원값이 수렴하는 양상을 보이는 비선형 동역학적 거동을 나타내어 해당단계인 제 6단계에서 웨이블릿 변환을 종료하였다(그림 6 참조).

먼저 각 자료에 대한 상세성분을 살펴보면, 제1단계부터 제3단계까지의 성분들은 각각 0.353, 0.177, 0.088의 유사주파수(pseudo-frequency)에 해당하는 주기인 약 3개월, 6개월, 그리고 12개월의 재현기간을 나타낸다. 특히 그림 4(c)와 그림 5(c)에서 보여지듯이 연주기성을 나타내는 상세성분의 주기적 성향이 다른 상세성분들에 비해 확연하게 나타나고 있다. 즉 제 1단계부터 제 3단계까지 분리된 상세성분들은 계절성 및 연주기성을 나타내는 성분으로 해석될 수 있으며, 제 3단계까지의 웨이블릿 변환을 통해 해당 성분들이 제거됨을 알 수 있다. 또한 표 1에 나타내었듯이 제 4단계부터 제 6단계까지의 상세성분들은 각각 0.044, 0.022, 0.011의 유사주파수에 해당하는 재현기간인 약 2년(23개월), 4년(45개월), 8년(91개월)을 나타내며, 각 시계열 자료 내에서 계절성 및 연주기성에 비해 보다 장기적인 성분들에 해당한다.

각 단계에서 추출된 상세성분 및 근사성분이 원자료에 대해 갖는 에너지 비율을 표 1에 나타내어 각 성분이 갖는 상대적 크기를 파악하도록 하였다. 이는 각 분해단계에서 추출된 성분들이 원자료를 어느 정도 설명할 수 있는지를 나타내며, 분해된 성분들의 선형적 결합에 의해 원자료를 재구성할 수 있듯이 모든 성분들의 에너지의 합은 원자료가 갖

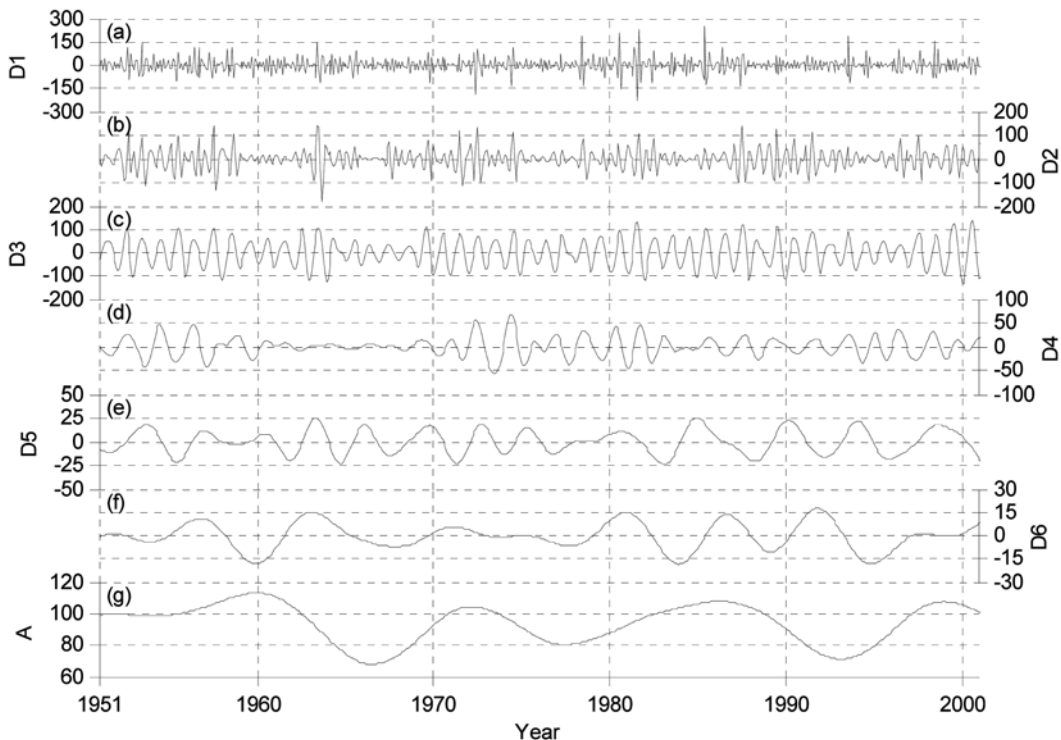


그림 4. 이산형 웨이블릿 변환에 의한 월강수량 자료의 상세성분 및 근사성분

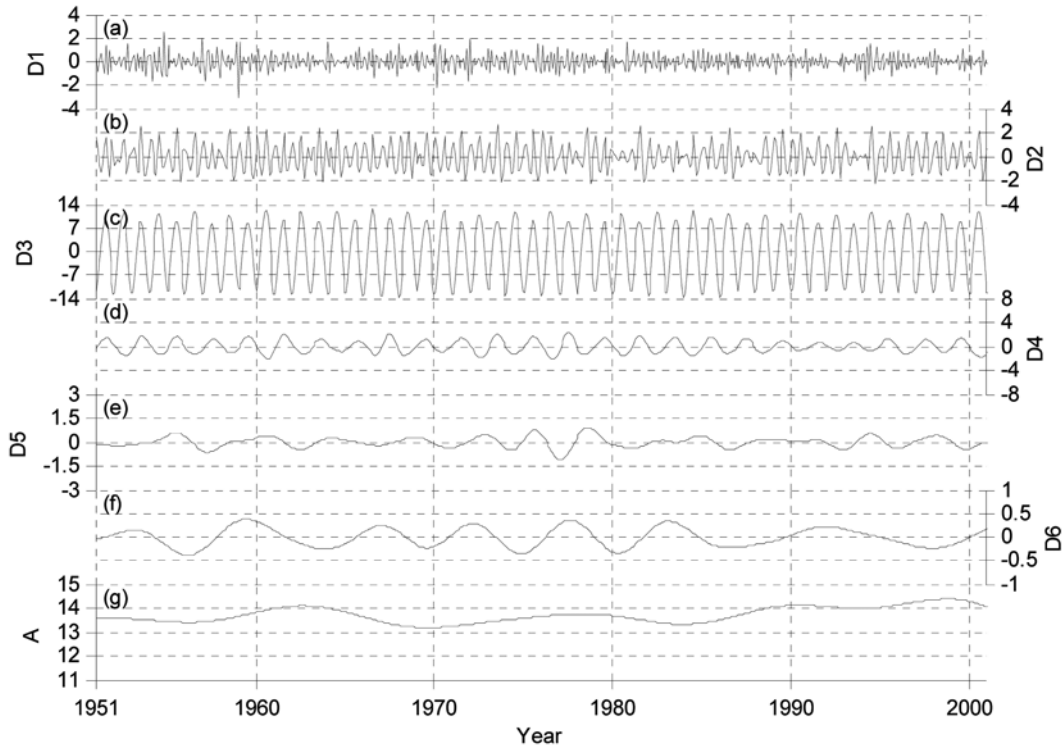


그림 5. 이산형 웨이블릿 변환에 의한 월평균기온 자료의 상세성분 및 근사성분

표 1. 웨이블릿 변환의 각 단계별 스케일, 주파수, 재현기간 및 월강우량과 월평균기온의 상세성분과 근사성분의 에너지 비율

Level (j)	Scale ($a=2^j$)	Frequency (month^{-1})	Period (month)	Precipitation		Temperature	
				Energy of Details (%)	Energy of Approximation (%)	Energy of Details (%)	Energy of Approximation (%)
1	2	0.3529	2.8333	10.5769		0.1154	
2	4	0.1765	5.6667	7.1235		0.3592	
3	8	0.0882	11.3333	16.3363		19.9746	
4	16	0.0441	22.6667	3.1801		1.1432	
5	32	0.0221	45.3333	1.1864		0.1146	
6	64	0.0110	90.6667	1.3388	60.2580	0.0500	78.2429

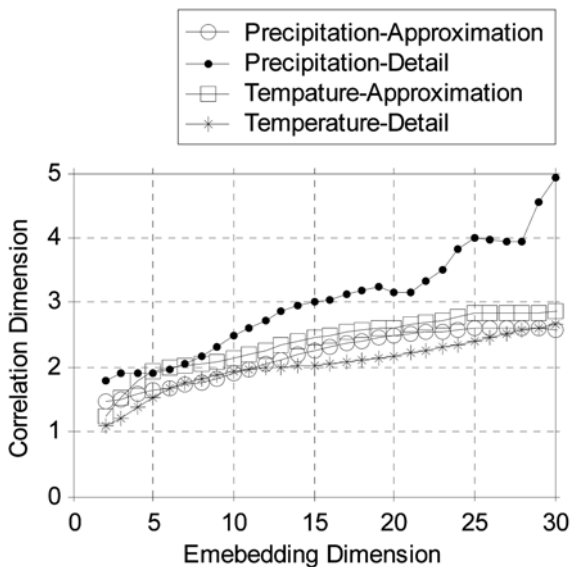


그림 6. 각 자료의 성분 별 매립차원의 증가에 따른 상관차원의 변화

는 에너지와 같음을 의미한다. 표에서 알 수 있듯이 월강수량과 월평균기온 시계열자료에 대해 근사성분이 갖는 에너지 비율이 가장 크며, 그 다음으로 연주기성을 갖는 3단계의 상세성분이 높은 비율을 차지하고 있다.

이상에서와 같이 매 단계에서 각각의 주파수에 해당하는 상세성분 및 근사성분에 대해 상관차원값을 계산하였으며, 비선형 동역학적 거동을 보이는 제 6단계에서의 근사성분에 대해 매립차원의 증가에 따른 상관차원값의 변화를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 목포지점의 월강수량에 대한 상세성분의 경우 전반적으로 매립차원이 증가함에 따라 상관차원값이 동시에 증가하는 양상을 보이고 있으며, 특히 매립차원 20이상에서 발산하는 경향을 보이고 있어 비선형 동역학적 특성을 지니지 않은 것으로 판단된다. 반면에 월강수량의 근사성분에 대해서는 매립차원 증가의 초기단계(1~20차원)에서 상관차원값의 증가를 나타낸 이후 매립차원 20이상부터 상관차원값이 수렴해 가는 경향을 보이고 있으며, 매립차원 25이상부터는 수렴하는 것으로 나타났다.

또한 월평균기온 자료의 상세성분에 대해서도 매립차원의

증가와 더불어 상관차원값이 증가하는 양상을 보이고 있으나, 근사성분에 대해서는 매립차원 25이상부터 수렴하는 결과를 보이고 있다. 따라서 월강수량 자료에 대한 제 6단계에서의 근사성분이 월평균기온 자료의 같은 단계에서의 근사성분보다 결정론적인 성격이 보다 명확한 것으로 판단된다.

웨이블렛 변환 제 6단계에서 월강수량의 근사성분의 경우 매립차원 25이상에서 상관차원값의 범위가 2.58과 2.60 사이로 수렴하고 있으며, 월평균기온의 경우 매립차원 25이상에서 상관차원이 2.82와 2.87 사이의 값으로 수렴되는 양상을 보이고 있다. 따라서 월강수량 및 월평균기온 자료의 근사성분에 대한 비선형 동역학적 거동을 나타내기 위해서는 최소 3개의 변수가 필요한 것으로 나타났다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 비교적 장기간의 자료를 보유하고 있는 목포지점의 월강수량 및 월평균기온 자료를 이용하여 각 자료 내에 포함되어 있는 비선형 동역학적 거동의 파악을 위하여 이산형 웨이블렛 변환과 상관차원분석의 접목을 그 방법론으로 제안하였다. 특히 월강수량 자료와 같이 시간에 따라 현격한 변동성을 보이는 자료에 대해 지금까지 이용되어 온 푸리에 변환의 한계를 극복하기 위하여 웨이블렛 변환을 적용하였다.

각 자료에 대한 이산형 웨이블렛 변환을 적용하여 매 단계에서 분리·추출된 상·하성분 및 근사성분에 대해 상관차원분석을 실시하였으며, 그 결과 제 6단계까지 웨이블렛 변환이 이루어졌다. 두 자료 모두에 대해 제 3단계에서의 상·하성분은 뚜렷한 연주기성을 나타내었으며, 약 8년 이상의 주기성을 갖는 마지막 단계에서의 근사성분이 원자료에 대해 가장 높은 에너지 비율을 나타내었으며, 또한 비선형 동역학적 특성을 보였다.

상관차원본 결과를 살펴보면, 심한 변동성을 보이는 월강수량의 근사성분에 대한 경우, 매립차원의 증가 초기에는 상관차원값 역시 증가하는 양상을 보였으나 매립차원 20이상부터 수렴하는 경향을 보였으며, 매립차원 25이상부터는 상관차원값이 2.58과 2.60사이로 수렴하는 결과를 보여주어 해당자료의 비선형 동역학적 거동을 나타내기 위해서는 최소 3개의 변수가 필요함을 알 수 있었다. 또한 월평균기온에 대한 6단계에서의 근사성분의 경우는 매립차원 25이상에서 수렴의 양상을 나타내었으며, 상관차원값이 2.82와 2.87 사이의 값으로 수렴하여 해당 성분의 시간에 따른 변화를 나타내기 위해서는 역시 최소 3개의 변수가 필요함을 알 수 있었다.

이상과 같은 결론을 바탕으로, 본 연구에서 제안한 이산형 웨이블렛 변환과 상관차원분석의 접목으로부터 다양한 주·과수 성분 즉 재현기간 성분의 조합으로 구성된 시계열 자료로부터 비선형 동역학적 거동의 유무를 판단하는 것이 가능하였다. 이는 기존의 연구들로부터 제기된 잡음처리에 관한 어려움을 극복할 수 있을 뿐만 아니라 해당 시계열 자료를 구성하는 성분들 중 비선형 동역학적 거동을 나타내는 특정 주·과수 성분을 분리·추출해 낼 수 있다는 점에서 수문기상학적 시계열 자료의 시간에 따른 변화 양상을 파악하는 데

유용함을 나타내고 있다고 판단된다.

심화연구를 위하여 상기의 방법론과 그로부터의 결과들을 응용한 예측기법의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-037-D00023).

참고문헌

- 김형수, 윤용남 (1996) 카오스의 위상학적 견지: (I) 일유출 자료 계열 해석에의 응용, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제16권 제II-5호, pp. 445-452.
- 박대규, 조원철 (2003) 카오스 특성을 갖는 일유출량 자료의 비선형 예측, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권 제6B호, pp. 479-487.
- 박형기, 박종열 (2003) 웨이블렛변환을 이용한 구조물의 동적 파라미터 추정, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권 제4A호, pp. 733-742.
- 진영훈, 박성천, 이연길 (2005) 수문시계열의 장·단기 성분 추출을 위한 웨이블렛 변환의 적용, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권 제6B호, pp. 493-499.
- Cahill, A.T. (2002) Determination of changes in streamflow variance by means of a wavelet-based test, *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 1-1-1-14.
- Daubechies, I. (1992) *Ten lectures on wavelets*, SIAM, Philadelphia, PA.
- Ding, M., Grebogi, C., Ott, E., Sauer, T., and Yorke, J.A. (1993) Plateau onset for correlation dimension: when does it occur? *Physical Review Letters*, Vol. 70, No. 25, pp. 3872-3875.
- Drago, A.F. and Boxall, S.R. (2002) Use of the wavelet transform on hydro-meteorological data, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, pp. 1387-1399.
- Elshorbagy, A., Simonovic, S.P., and Panu, U.S. (2002) Noise reduction in chaotic hydrologic time series: facts and doubts, *Journal of Hydrology*, Vol. 256, pp. 147-165.
- Farge, M. (1992) Wavelet transforms and their applications to turbulence, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 24, pp. 395-457.
- Grassberger, P. and Procaccia, I. (1983) Measuring the strangeness of strange attractors, *Physica 9D*, pp. 189-208.
- Grassberger, P. (1990) An optimized box-assisted algorithm for fractal dimensions, *Physics Letters A*, Vol. 148, No. 1-2, pp. 63-68.
- Jeong, G.D. and Rao, A.R. (1996) Chaos characteristics of tree ring series, *Journal of Hydrology*, Vol. 182, pp. 239-257.
- Jin, Y.-H., Kawamura, A., Jinno, K., and Berndtsson, R. (2005) Nonlinear multivariable analysis of SOI and local precipitation and temperature, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 12, pp. 67-74.
- Kawamura, A., McKerchar, A.I., Spiegel, R.H., and Jinno, K. (1998) Chaotic characteristics of the Southern Oscillation Index time series, *Journal of Hydrology*, Vol. 204, pp. 168-181.
- Khan, S., Ganguly, A.R., and Saigal, S. (2005) Detection and predictive modeling of chaos in finite hydrological time series, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 12, pp. 41-53.
- Kim, S. (2004) Wavelet analysis of precipitation variability in Northern California, U.S.A., *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 471-477.
- Kumar, P. and Foufoula-Georgiou, E. (1993a) A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields 1. Segregation of large-

- and small-scale features using wavelet transform, *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 2515-2532.
- Kumar, P. and Foufoula-Georgiou, E. (1993b) A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields 2. Self-similarity in fluctuations, *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 2533-2544.
- Lima, I.B.T., Rosa, R.R., Ramos, F.M., and Novo, E.M.L.M. (2003) Water level dynamics in the Amazon floodplain, *Advances in Water Resources*, Vol. 26, pp. 725-732.
- Mallat, S. (1998) *A wavelet tour of signal processing*, Academic, San Diego.
- Oh, H.-S., Ammann, C.M., Naveau, P., Nychka, D., and Otto-Bliesner, B.L. (2003) Multi-resolution time series analysis applied to solar irradiance and climate reconstructions, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 65, pp. 191-201.
- Parkard, N.H., Crutchfield, J.P., Parmer, J.D., and Shaw, R.S. (1980) Geometry from a time series, *Physical Review Letters*, Vol. 45, No. 9, pp. 712-716.
- Pasternack, G.B. (1999) Does the river run wild? Assessing chaos in hydrological systems, *Advances in Water Resources*, Vol. 23, pp. 253-260.
- Pazos, A., González, M.J., and Alguacil, G. (2003) Non-linear filter, using the wavelet transform, applied to seismological records, *Journal of Seismology*, Vol. 7, pp. 413-429.
- Polygiannakis, J., Preka-Papadema, P., and Moussas, X. (2003) On signal-noise decomposition of time-series using the continuous wavelet transform: application to sunspot index, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 343, pp. 725-734.
- Schreiber, T. (1992) Extremely simple nonlinear noise-reduction method, *Physical Review E*, Vol. 47, No. 4, pp. 2041-2044.
- Shin, T. and Han, I. (2000) Optimal signal multi-resolution by genetic algorithm to support artificial neural networks for exchange-rate forecasting, *Expert Systems with Applications*, Vol. 18, pp. 257-269.
- Sivakumar, B. (1999) Rainfall dynamics at different temporal scales: A chaotic perspective, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 5, No. 4, pp. 645-651.
- Sivakumar, B., Phoon, K.-K., Liang, S.-Y., and Liaw, C.-Y. (1999) A system approach to noise reduction in chaotic hydrological time series, *Journal of Hydrology*, Vol. 219, pp. 103-135.
- Sivakumar, B., Persson, M., Berndtsson, R., and Uvo, C.B. (2002a) Is correlation dimension a reliable indicator of low-dimensional chaos in short hydrological time series? *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 2, pp. 3-1-8.
- Sivakumar, B., and Jayawardena, A.W. (2002b) An investigation of the presence of low-dimensional chaotic behavior in the sediment transport phenomenon, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 47, No. 3, pp. 405-416.
- Sivakumar, B. (2004) Chaos theory in geophysics: past, present and future, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 19, pp. 441-462.
- Smith, L.C., Turcotte, D.L., and Isacks, B.L. (1998) Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform, *Hydrological Processes*, Vol. 12, pp. 233-249.
- Takens, F. (1981) Detecting strange attractors in turbulence, In Dynamical systems and turbulence, D.A. Rand and L.S. Young, eds., *Lecture Notes in Mathematics*, Vol. 898, pp. 336-381.
- Torrence, C. and Compo G.P. (1998) A practical guide to wavelet analysis, *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 1, pp. 61-78.

(접수일: 2005.9.9/심사일: 2005.11.25/심사완료일: 2006.5.8)