

하천의 일TOC 시계열 자료의 비선형 동역학적 거동 분석

Analysis of Nonlinear Dynamical Behavior for the Daily TOC Time Series in a River

오창열*, 진영훈**, 박성천***, 정우철****

Chang Ryol Oh, Young Hoon Jin, Sung Chun Park, Woo Chul Jung

요 지

본 연구에서는 영산강 본류를 대표하는 나주지점을 대상으로 하여, 해당 지점에서 자동 측정되고 있는 수질 항목들 중에서 총유기탄소(TOC: Total Organic Carbon)의 시계열 자료에 대한 비선형 동역학적 거동을 파악하고자 하였다. 1994년 낙동강에서의 수질오염 사고 이후 4대강 유역에서 설치·운영되고 있는 수질자동 측정망의 TOC 자료를 일자료로 환산하여 사용하였으며, 시계열 자료에 비선형 동역학적(카오스적) 특성이 존재하는지를 알아보기에 앞서 자료의 전처리 과정으로써 3가지의 잡음제거 방법을 적용하였다. 잡음이 제거된 시계열 자료에 비선형 동역학적 거동의 파악을 위해 보편적으로 사용되고 있는 상관차원분석을 실시하였다. 또한 상관차원분석 결과 비선형 동역학적 거동을 나타내는 것으로 판별된 자료에 대하여 그 양상을 가지적으로 알아보기 위해 지체시간(τ)을 적용하여 3차원 위상공간에 도시하였다. 본 연구의 결과, 나주지점에서 측정되고 있는 총유기탄소에 대해 비선형 잡음제거 방법을 적용한 자료가 비선형 동역학적 거동을 내재하고 있는 것으로 나타났으나, 이를 위상공간에 재건하였을 경우 이상한 끌개(strange attractor)의 뚜렷한 구조가 보이지 않았다. 그러나 상관차원분석 결과 잡음이 제거된 자료가 카오스적 특성을 보이므로, 자료의 단기예측을 위한 방법에 기초적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 총유기탄소(TOC), 비선형 동역학적 거동, 잡음제거, 상관차원분석, 위상공간

1. 서론

현재까지 유기성 오염물질의 정도를 나타내기 위해 BOD나 COD를 주로 사용하고 있다. 그러나 BOD 또는 COD를 오염물질의 실시간적인 지표로 사용하기에는 측정에 소요되는 시간이 길다는 단점과 오염물질의 다양성 및 난분해성 문제, 또한 농도가 극히 낮은 경우 재현성에 어려움이 있다는 점이 지적되고 있다. 그에 대한 대안으로서 미량의 시료에 대해 고온 하에서 촉매를 이용하여 연소시켜 시료 중의 유기성탄소를 이산화탄소로 산화시킨 후 적외선 분석기에 의해 그 양을 측정할 수 있는 총유기탄소(Total Organic Carbon: TOC)가 제안되고 있다. TOC는 수중에 존재하는 산화 가능한 유기물질 전체의 양을 간접적으로 나타내므로(이삼노 등, 2004), 수질오염의 정도를 보다 직접적으로 표현할 수 있다는 점에서 BOD나 COD를 대체할 수 있는 지표로서 사용될 수 있다.

또한 4대강 유역에서 설치·운영되고 있는 수질자동측정망 자료에 포함되어 있는 TOC 시계열자료의 예측이 가능할 경우 수질오염의 정도를 파악할 수 있는 지표로 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 수질오염 사고에 대한 긴급한 대처에도 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 영산강 본류를 대표하는 나주지점의 TOC를 이용하여 대상자료가 비선형 동역학적 거동을 나타내는지를 조사하고자 하였으며, 이에 따른 대상자료의 보다 정확한 단기예측을 담보할 수 있는 기초적인 정보를 제공하고자 한다.

* 정회원·동신대학교 대학원 토목공학과 박사과정 ·E-mail : new2020@dsu.ac.kr
** 정회원·동신대학교 토목공학과 연구원 ·E-mail : yhj@dsu.ac.kr
*** 정회원·동신대학교 토목공학과 교수 ·E-mail : psc@dsu.ac.kr
**** 정회원·동신대학교 대학원 토목공학과 석사과정 ·E-mail : jwc7086@hanmail.net

본 연구에 대한 상기의 주목적을 위해 3가지의 잡음제거 방법(이동평균법, Low-Pass Filtering, 비선형 잡음제거 방법)을 적용하며, 이러한 전처리 과정을 통해 잡음이 저감된 자료에 대해 상관차원분석을 수행한다. 각각의 잡음제거 방법들에 사용되는 매개변수들을 변화시키면서 생성된 자료들에 대한 상관차원분석 결과를 바탕으로 비선형 동역학적 거동이 대상자료 내에 존재하는지를 판별한다. 마지막으로 비선형 동역학적 거동을 나타내는 자료를 3차원 위상공간에 도시하여 그 양상을 파악한다.

2. 대상지점 및 자료

본 연구에서는 비선형 동역학적 거동을 파악하기 위하여 영산강 수계의 본류부를 대표하는 나주지점을 대상으로 하였다. 대상자료는 나주지점의 수질자동측정망에서 관측중인 TOC 자료 중 2003년 1월 1일부터 2004년 12월 31일까지의 총 731개의 일평균 TOC 수질농도 자료를 이용하였으며 대상자료에 대한 시계열 및 박스플롯은 그림 1과 같다. TOC에 대한 기술통계 결과 최대·최소·평균값은 6.83, 1.77, 3.55로 나타났으며 표준편차는 0.93을 보였다.

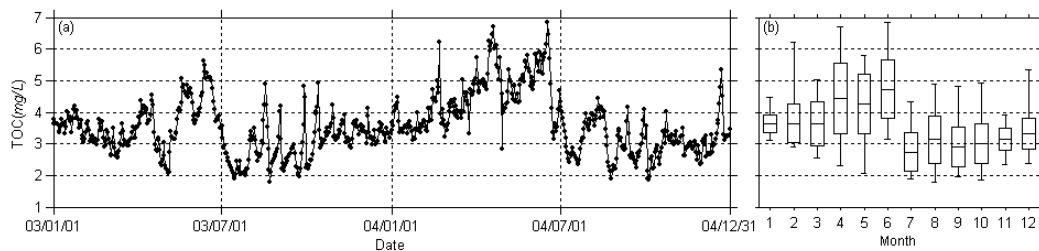


그림. 1 TOC 수질농도 자료에 대한 (a)시계열 및 (b)박스플롯

3. 적용방법 및 결과

3.1 잡음제거 방법

본 연구에서 자료의 전처리 과정으로써 3가지의 잡음제거 방법을 적용하였다. 첫번째로는 원자료에 대한 장기변동을 나타내기 위하여 보편적으로 이용되는 이동평균법을 적용하였으며 그림 2에 30일간의 자료를 평균하여 해당 자료 구간의 마지막 위치에 평균값을 도시하는 이동평균법을 적용한 결과이다. 본 연구에서 적용한 이동평균법은 10일부터 90일까지 10일 간격으로 평균대상 범위를 확장해 가며 잡음 저감의 정도를 증가시켰다. 각각의 평균범위에 해당하는 이동평균 자료에 대해 상관차원 분석을 실시하였다.

두번째로는 원자료의 고주파수 성분을 잡음으로 간주하는 잡음저감 기법인 Low-Pass Filter 방법을 적용하였으며 그 수학적 표현은 다음의 식(1)과 같다.

$$y(t) = (1 - \alpha)x(t) + \alpha y(t-1) \quad (1)$$

여기서, x 는 원자료, y 는 변환된 자료, α 는 잡음저감 계수이며 0부터 1사이의 값을 갖는다. 본 연구에서는 Low-Pass Filter의 잡음저감계수인 α 값을 0.91부터 0.99까지 순차적으로 0.01씩 증가시켜 적용하였으며, 그림 3에 α 값 0.96를 적용한 결과를 그 예로 도시하였다.

마지막으로 결정론적 동역학의 연구를 위해 Schreiber(1993)가 제안한 비선형 잡음제거 방법을 적용하였다. 비선형 잡음 제거 방법의 기본적인 개념은 위상공간에서 근접한 값들에 대한 평균값을 시계열의 각 좌표 값에 대체시키는 것이다.

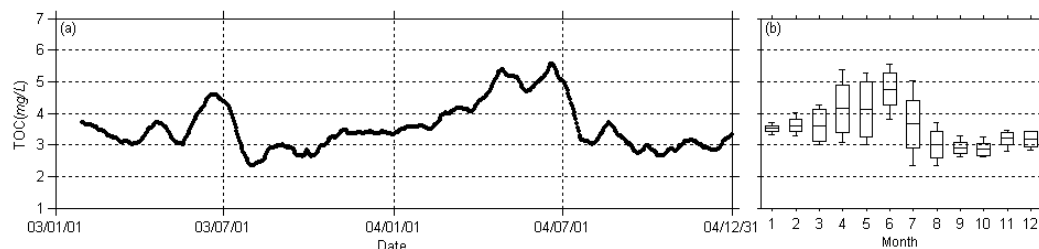


그림. 2 TOC 수질자료에 대한 (a)이동평균법($t=30$) 적용결과 및 (b)박스플롯

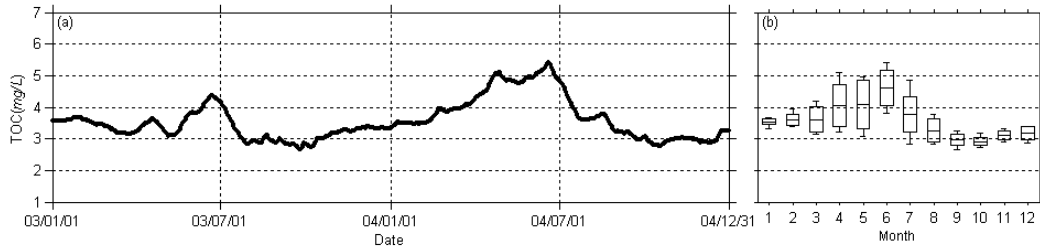


그림. 3 TOC 수질자료에 대한 (a)low-pass filter($\alpha=0.96$) 적용결과 및 (b)박스플롯

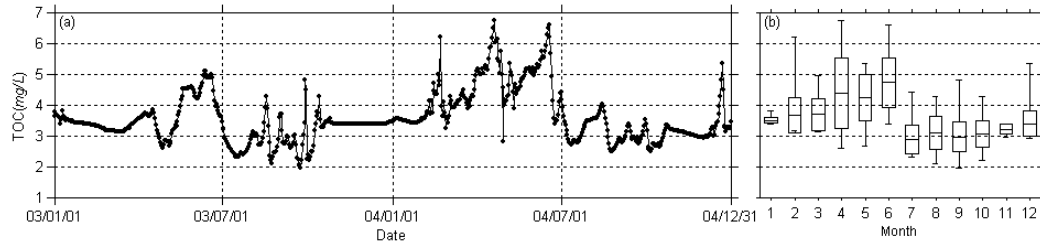


그림. 4 TOC 수질자료에 대한 (a)비선형잡음제거방법($\epsilon_0=1.10$) 적용결과 및 (b)박스플롯

본 연구에서는 비선형 잡음제거 방법의 초기반경 값(ϵ_0)은 0.70부터 1.50까지 0.10씩 증가시켜 적용하였으며, 그림 4는 초기반경 값 1.10를 적용한 결과를 도시하였다.

3.2 상관차원분석

상기에 기술한 바와 같이 자료의 전처리 과정으로써 3가지의 잡음제거 방법을 적용 결과에 대하여 비선형 동역학적 거동 여부를 판단하기 위하여 상관차원분석을 수행하였다. 상관차원은 일반적으로 이상한 끌개(strange attractor)를 나타낼 수 있는 프랙탈 차원의 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 이용하였으며, 그 기본 개념은 시계열 내에 카오스적 특성이 존재한다면 상태공간상의 자료에 대한 충분히 가까운 궤적은 이상한 끌개로 알려진 특정한 영역으로 이끌린다는 것이다(Jeong 등, 1996). 상관차원의 산정을 위해 사용되는 상관적분은 다음의 식 (2)와 같다.

$$C(N,r,m) = \frac{2}{N(N-1)} \Theta(r - |X_i - X_j|) \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

여기서, Θ 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 경사값으로 주어진다.

전 절에서 적용된 3가지의 잡음제거 방법에 의한 결과값을 비선형 동역학적 거동을 특성을 분석을 위한 상관차원법을 적용하였다. 그 결과 이동평균법 및 Low-Pass Filter에 의한 방법에서는 비선형 동역학적 특성을 나타내지 않았으나 비선형 잡음제거 방법에 의한 초기반경 값(ϵ_0)을 1.10을 적용한 결과 다음의 그림 5와 6과 같이 비선형 동역학적 특성을 보였다.

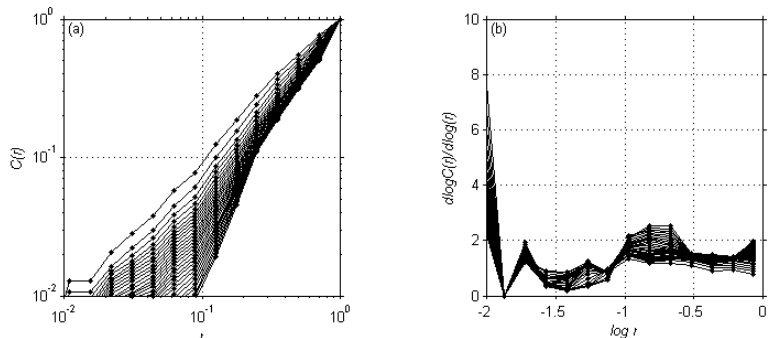


그림 5. (a) 반경에 따른 상관적분, (b) 반경에 따른 상관차원

3.3 상대공간분석

상대공간의 재구성을 위해 일반적으로 Parkard 등(1980)과 Takens(1981)에 의해 제안된 시간지체법을 적용하였다. 이는 시계열 $x(t)$ 에 대하여 m 차원의 상대공간을 재구성할 경우 좌표 $X_t = x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)$ 를 갖는 궤적 (trajectory)으로 표현하는 방법이다. 여기서, τ 는 지체시간(delay time)이며, m 은 매립차원 (embedding dimension)을 나타낸다. 시간지체법을 이용하여 단일 변량의 시계열로부터 다차원 좌표계의 어트랙터를 얻기 위해서는 지체시간 τ 를 추정하여야 한다. 이러한 지체시간 τ 를 추정하는 방법으로는 ACF(Auto-Correlation Function) 값이 첫번째 0이 되는 점에서 τ 값을 취하거나, ACF가 0을 지나기 전에 갖는 첫번째 최소점을 τ 값으로 결정한다. 또한, ACF가 지수적으로 감소할 때는 $1/e$ ($e \approx 2.71828$)의 값에 상응하는 점에서 지체시간을 결정하는데 본 연구에서는 이 방법을 적용하여 지체시간을 산정한 결과 20일로 나타났다.

그림 7은 지체시간 τ 를 결정하기 위한 지체시간에 따른 자기상관함수 그림이며, 그림 8은 결정된 지체시간을 적용하여 위상공간에 재건한 결과 이상한 끝개의 뚜렷한 구조가 보이지 않았다. 그러나 상관차원분석 결과 잡음이 제거된 자료가 카오스적 특성을 보이므로, 자료의 단기예측을 위한 방법에 기초적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

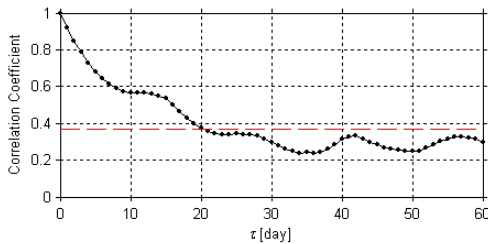


그림 7. 지체시간 τ 에 따른 자기상관함수

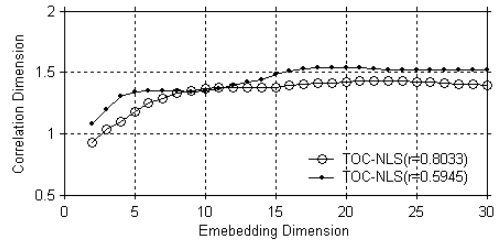


그림 6. 각 자료의 성분 별 매립차원의 증가에 따른 상관차원의 변화

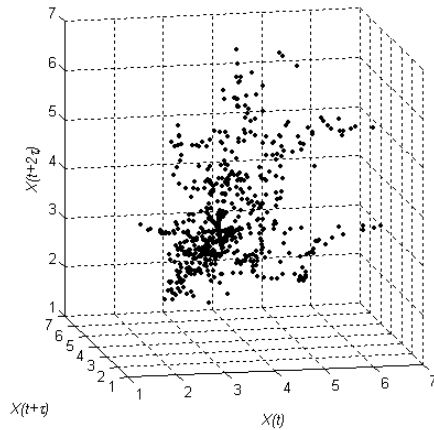


그림 8. 위상공간 재건

4. 결론

본 연구에서는 영산강 분류를 대표하는 나주지점을 대상으로 하여, 해당 지점에서 자동 측정되고 있는 수질 항목들 중에서 총유기탄소의 시계열 자료에 대한 비선형 동역학적 거동을 파악하고자 하였다. 자료의 전처리 과정으로써 3가지의 잡음제거 방법을 적용하였으며 잡음이 제거된 시계열 자료에 비선형 동역학적 거동의 파악을 위해 보편적으로 사용되고 있는 상관차원분석을 실시하였다. 또한 상관차원분석 결과 비선형 동역학적 거동을 나타내는 것으로 판별된 자료에 대하여 그 양상을 가시적으로 알아보기 위해 지체시간(τ)을 적용하여 3차원 위상공간에 도시하였다.

본 연구의 결과, 총유기탄소에 대해 비선형 잡음제거 방법을 적용한 결과에서 비선형 동역학적 특성을 보였다. 또한 위상공간 재건을 위하여 지체시간 산정한 결과 20일로 나타났으며 이상한 끝개의 뚜렷한 구조가 보이지 않았다. 그러나 상관차원분석 결과 잡음이 제거된 자료가 카오스적 특성을 보이므로, 향후 심화연구를 통해 해당 자료에 대한 보다 정확한 단기예측이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 이삼노, 이경훈, 박성천, 문병석(2004), 상하수도 공학, 구미서관, pp. 404
2. 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.
3. Grassberger, P. and Procaccia, I. (1983) Measuring the strangeness of strange attractors, Physica 9D, pp. 189-208.
4. Grassberger, P. (1990) An optimized box-assisted algorithm for fractal dimensions, Physics Letters A, Vol. 148, No. 1-2, pp. 63-68.
5. Parkard, N.H., Crutchfield, J.P., Parmar, J.D. and Shaw, R.S. (1980) Geometry from a time series, Physical Review Letters, Vol. 45, No. 9, pp. 712-716.
6. Schreiber, T. (1993) Extremely simple nonlinear noise-reduction method, Physical Review E, Vol. 47, No. 4, pp. 2041-2044.
7. 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.