

Note

시계열 신호의 혼돈분석 기법 소개: 해양 수중소음 신호를 중심으로

최복경* · 김봉채 · 신창웅

한국해양연구원 해양환경연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호Introduction to Chaos Analysis Method of Time Series Signal:
With Priority Given to Oceanic Underwater Ambient Noise Signal

Bok Kyoung Choi*, Bong-Chae Kim, and Chang-Woong Shin

*Marine Environment Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : Ambient noise as a background noise in the ocean has been well known for its the various and irregular signal characteristics. Generally, these signals are treated as noise and they are analyzed through stochastic level if they don't include definite sinusoidal signals. This study is to see how ocean ambient noise can be analyzed by the chaotic analysis technique. The chaotic analysis is carried out with underwater ambient noise obtained in areas near the Korean Peninsula. The calculated physical parameters of time series signal are as follows: histogram, self-correlation coefficient, delay time, frequency spectrum, sonogram, return map, embedding dimension, correlation dimension, Lyapunov exponent, etc. We investigate the chaotic pattern of noises from these parameters. From the embedding dimensions of underwater noises, the assesment of underwater noise by chaotic analysis shows similar results if they don't include a definite sinusoidal signal. However, the values of Lyapunov exponent (divergence exponent) are smaller than that of random noise signal. As a result, we confirm the possibility of classification of underwater noise using Lyapunov analysis.

Key words : chaotic analysis, underwater noise, ambient noise, embedding dimension, Lyapunov exponent

1. 서 론

우리 주위에서 복잡하다고 여겨지는 현상들 속에는 단순한 규칙이나 법칙에 의해 기술될 수 있는 경우가 많이 있다. 겉보기에는 일정한 규칙없이 아무렇게나 보이는 자연 현상들도 밑바닥에는 어떤 결정론적인 법칙에 따라 행동한다. 예를 들어, 유체의 난류(turbulence), 지구자기의 바뀔, 액체 헬륨의 대류현상, 천체 운동, 소혹성 띠의 간격, 날씨 변화, 자연 생태계에서 곤충이나 동물의 증감, 수도꼭지에서 떨어지는 물방울, 화학 반응, 심장 박동, 뇌신

경, 주식가격, 환율 등 다양한 현상들이 알려져 왔다 (Kantz and Schreiber 1997; 이 2001). 이런 현상들 속에는 어떤 자연의 숨겨진 법칙이 있다. 따라서 이런 계에 의해 나타나는 시계열 신호를 분석하고 예측하는 것은 아주 중요한 일이 될 것이다. 시계열(time series)은 보통 일정한 시간 간격으로 어떤 계에 대해 하나 또는 그 이상의 변수 값을 시간에 따라 측정된 값들의 집합이다. 충분한 시간에 걸쳐 많은 수의 측정이 이루어지면 그 계의 중요한 정보나 상태가 시계열에 포함되어 있다. 이 때 측정량의 시간에 따른 모습이 주기적이지 않고, 불규칙적이거나 혼돈적인 경우 계에 대한 이해가 문제가 된다. 시계열에서 이런 양상은 과거에는 잡음과 같이 취급해 왔으나, 최근 발전하

*Corresponding author. E-mail : bkchoi@kordi.re.kr

고 있는 비선형 신호처리 이론에 의해 분석이 가능함이 알려지고 있다(Kantz and Schreiber 1997; Schreiber, Schmitz 2000; 이 2001).

해양에서 측정된 수중소음을 혼돈이론으로 분석을 시도한 연구는 Frison에 의해 처음으로 시도되었다(Frison et al. 1996). 최근에는 이러한 분석기법을 이용하여 해수중 수중배경소음을 분석한 논문이 보고되었다(최 등 2001). Frison et al.의 논문(1996)에서는 분석된 매립차원의 값이 9로 나타났으며, 최 등의 논문(2001)에서는 매립차원의 값이 6으로 계산되었다. 매립차원은 신호의 자유도를 말하는 것으로서 대략 3 이상이면 불규칙 신호(noise)로 판단되는 것으로써, 9와 6의 차이는 큰 차이가 아니라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 해양내 수중소음의 다양한 신호들을 환경별로 분류하여, 그 조건에 따른 매립차원과 리아프노프 지수를 산출하여 보다 자세한 혼돈분석을 시행하였다. 본 연구에서 사용한 혼돈기법은 Tisean 코드로 알려진 방법으로써 학계에서 공인되어 널리 사용되고 있는 기법이다(Hegger et al. 1999).

2. 시계열 자료의 Chaos 분석기법

복잡한 현상에서 얻은 불규칙하며 잡음처럼 보이는 실험데이터로부터 기이한 끌개를 재구성하여 복잡한 현상 내부의 구조를 이해할 수 있는 기법을 혼돈분석은 제공한다. 혼돈 이론은 간단한 모형계들을 사용하여 이들이 혼돈 운동을 할 수 있음을 보이고, 또한 이들 혼돈 운동에 대해 리아프노프(Lyapunov) 발산 지수, 프랙탈 차원 등의 정량적 척도를 계산해 준다. 하지만 대부분의 실험적 측정에서 운동의 형태는 흔히 단일 변수의 시계열(time series)로 얻어진다. 어떤 시계열이 매우 불규칙하고 복잡하여 비예측적인 양태를 보인다고 할 때, 우리는 혼돈분석기법을 사용하여 그것이 결정론적인 혼돈 운동인지 아니면 임의적 운동인지 구별할 수 있다. 또한, 혼돈 운동으로 판별된다면, 즉 그 신호가 배후에 숨어 있는 기이한 끌개(strange attractor)로부터 나오는 것이라면, 그 시계열 정보로부터 발산 지수와 프랙탈 차원 등을 계산하여 끌개를 정량적으로 특성화할 수 있다. 즉 부분적인 것으로 보이는 데이터로부터 전체 운동의 대부분에 대한 정보를 얻을 수 있는 것이다. 이는 궁극적으로 혼돈 운동이 결정론적 법칙에 기인한 질서 구조를 갖고 있기에 가능하다.

선형 분석 기법

히스토그램(histogram)

히스토그램은 주어진 데이터가 어떤 특정영역의 값을 가지는가에 대한 확률분포를 나타낸다. 히스토그램에서

데이터가 분포할 수 있는 전체 영역이 bin이라고 하는 특정영역으로 나뉘어져, 각각 bin에 들어가는 데이터 값들을 계산한다. 각각의 데이터는 여러 bin들 중 하나에 할당되고, 모든 데이터 점들에 대한 한 bin에서의 데이터 점의 비율은 그 bin이 차지하는 영역으로 한 데이터 점이 bin에 들어갈 실험적인 확률이다. 만약, i -번째 bin에 들어갈 실제 확률을 p_i 라고 하면, 그 때 i -번째 bin의 실험적 확률의 표준오차는 다음 식과 같이 주어진다. 여기서 N 은 전체 데이터의 개수이다.

$$\sqrt{\frac{p_i(1-p_i)}{N}}$$

자기 상관함수(autocorrelation function : ACF)

시계열의 평균, 표준편차, 히스토그램은 데이터의 통계적인 특징만을 말해주지만 시간에 대한 정보는 알 수 없다. 자기 상관함수는 시간 경과에 따른 시계열의 선형 상관성을 정량화한 것으로 다음 식과 같이 정의된다.

$$R_k = \frac{\sum z_i z_{i+k}}{\sqrt{\sum z_i^2 \sum z_{i+k}^2}}$$

여기서 시간 t 에서 시계열을 z_t , k 단위 시간 후의 $t+k$ 에서의 시계열을 z_{t+k} 라하고, R_k 을 자기 상관함수라고 한다. 그리고 경과 시간 k 를 지연시간(lag 또는 delay)라고 부른다.

주파수 스펙트럼 분석(FFT)

주파수 분석은 그 계에 내·외부적으로 관여하는 여러 가지 에너지 성분들에 대한 정보를 준다. 주파수 분석을 위한 방법으로서 푸리에 변환(Fourier transformation)을 사용하며, 이는 시간 영역에서의 시계열을 주파수 영역에서의 함수로 변환한다.

비선형 혼돈 분석 기법

리턴 맵(return map)

연속적인 측정값들 사이의 관계를 나타내는 2차원 그래프로, 비선형계에서 얻어지는 데이터를 분석하는 기본적인 방법이다. 시간 t 에서의 데이터와 $(t+\tau)$ 에서의 데이터로 구성되는 임의의 쌍을 $(x_t, x_{t+\tau})$ 라고 하면 이것을 하나의 좌표로 해서 이차원 평면에 하나의 점으로 표현할 수 있다. 여기서 τ 는 시간 t 를 기준으로 정해지는 지연시간으로 정의된다. 시계열의 시간적 연관성에 따라 τ 가 결정되며, return map을 그릴 때 시계열의 τ 보다 작게 지연시간을 잡으면 대각선상에 분포하는 2차원 끌개가 그려지고 τ 보다 크게 지연시간을 정하면 2차원 평면에 퍼지거나 겹치는 끌개가 그려진다. 선형 시계열 분석에서 τ 를 결정하는 기준은 자기상관함수(ACF)가 최초로 0을 지날 때이다.

지연시간(delay time)

위상공간 재구성에 있어서 적절한 지연시간을 결정하는 것이 중요하고, 지연시간 τ 의 선택이 위상공간에서 재구성된 궤적의 분포에 영향을 준다. 여기서는 흔히 사용하는 방법인 자기상관함수(autocorrelation function, ACF)가 첫 번째로 최소가 되는 시간으로 지연시간을 결정하였다.

매립차원(embedding dimension)

위상공간에 끌개를 재구성하기 위해서 적절한 좌표 수를 결정할 필요가 있다. 매립차원은 그 계를 이루는 동력학의 국소적 차원과는 다르다. 우리는 임의의 계로부터 측정된 측정값들의 동력학적 특성을 이해하기 위해서 그 동력학적 정보를 반영하는 끌개를 구성해야 하고, 그 끌개를 담고 있는 매립차원을 정확히 구할 필요가 있다. Mane와 Takens의 매립이론에 의하면 매립차원을 m 이라 하고, 매립공간 내에 만들어지는 끌개의 차원을 m_A 라 하면 $m \geq 2m_A$ 을 만족시켜야 한다(충분조건). 매립차원을 결정하는 방법에는 FNN(false nearest neighbor) 방법이 있으며, 이는 매립차원을 결정하는 대표적인 방법으로 데이터의 크기와 잡음에 민감하지 않아서 많이 사용되는 알고리즘이다.

상관차원(correlation dimension)

상관차원은 위상공간 상에 있는 끌개의 프랙탈 차원으로 끌개의 전역적인 기하학적 구조 및 국소적 분포를 정량화 하는 양이다. 일반적으로 상태공간의 차원은 그 계의 미분방정식의 수와 관계 있고, 반면 끌개차원은 데이터 점들 또는 궤적들에 의해 점유되는 상태공간의 영역으로 정의된다. 따라서 상관차원이 큰 계일수록 복잡한 구조를 가진다.

최대 리아프노프지수(primary Lyapunov exponent : PLE)

어떤 계의 상태는 위상공간에 있는 점들이 시간이 지남에 따라 특정한 궤적을 형성하고, 그 궤적은 초기값에 따라 매우 민감하게 의존하면서 변한다. 따라서 초기 위치에서의 작은 거리 차이가 시간이 경과함에 따라 얼마나 지수 함수적으로 멀어지면서 발산하는지를 정량화하는 양을 최대 리아프노프 지수(PLE)라고 한다. PLE 값이 양이면 그 계가 초기조건에 민감하게 변화함을 나타내므로 카오스계이다.

3. 측정자료의 혼돈 분석

알려진 시계열 신호의 분석

정현파(10 Hz sinewave)를 인위적으로 발생시킨 후 Tisean code를 이용하여 계산한 결과를 Fig. 1에 나타내었

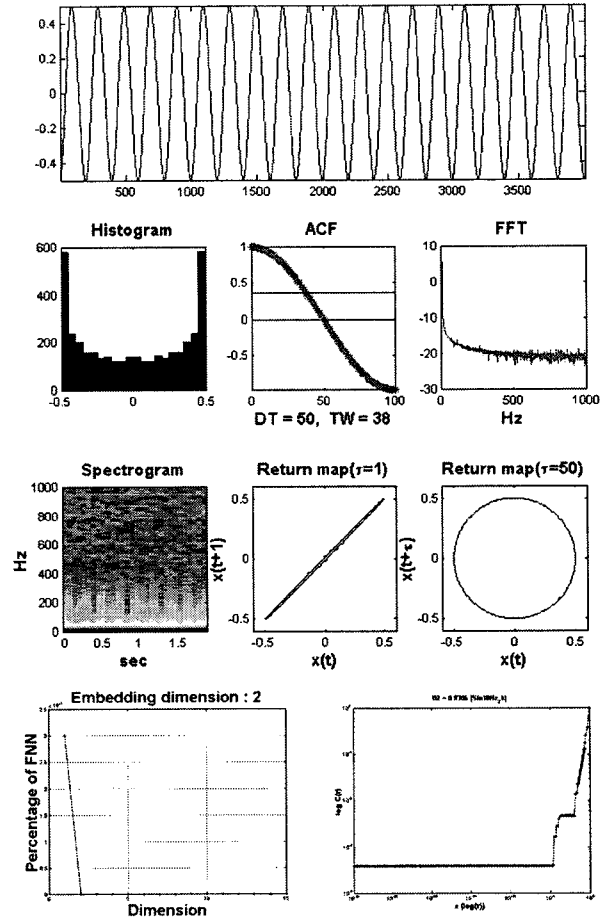


Fig. 1. Result of chaos analysis for sinusoidal waveform (embedding dimension: 2, Lyapunov exponent: -0.003).

다. 그림에서 위로부터 아래 순으로 시계열 신호, 히스토그램(histogram), 자기상관함수(ACF), 주파수스펙트럼(FFT), 소노그램(sonogram), 리턴맵(return map), 매립차원(embedding dimension), 리아프노프 지수(Lyapunov exponent)를 나타내고 있다.

자기상관함수로 계산한 지연시간은 50(50/2000=25 ms)이었으며, 매립차원은 2, 리아프노프 발산지수는 -0.003의 값을 나타내었다. 매립차원은 그 계의 자유도(degree of freedom)를 나타내는 것으로서 매립차원의 수가 크면 chaos 상태(비주기적인 신호)에 가깝고, 작으면 결정론적인 상태(주기적인 신호)에 가깝다고 해석하므로, 본 정현파의 경우 매립차원이 2로서 작게 나온 것은 당연한 결과라고 할 수 있다. 또한, 리아프노프 지수는 음수값이나 0에 가까운 값일 때는 결정론적인 상태를 0보다 큰 값을 가질 때는 혼돈상태에 가까움을 나타내는 지수이며, 본 정현파의 경우 음의 값을 나타낸 것도 타당한 결과이다.

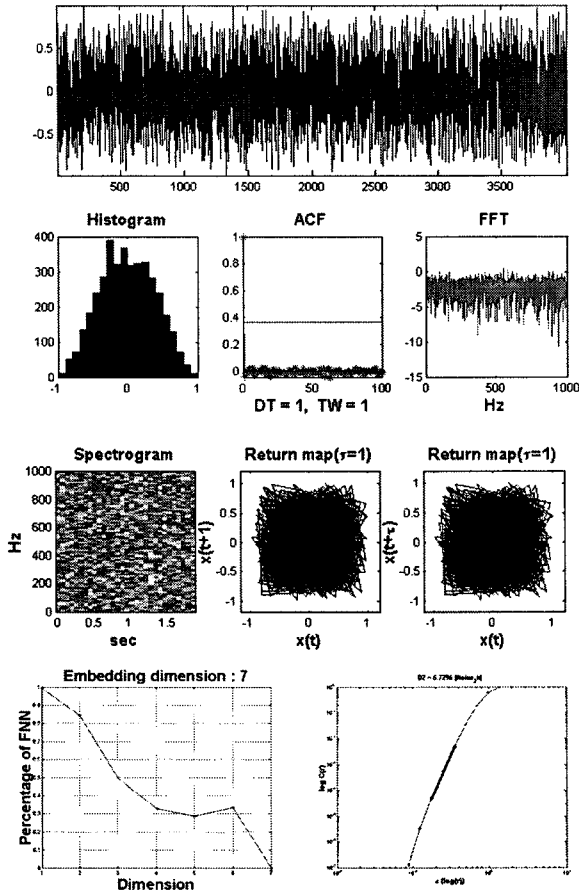


Fig. 2. Result of chaos analysis for random noise (embedding dimension: 7, Lyapunov exponent: 0.453).

무작위 잡음(whitenoise)를 인위적으로 발생시킨 후 Tisean code를 이용하여 계산한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 자기상관함수로 계산한 지연시간은 $1(1/2000=0.5 \text{ ms})$ 이었으며, 매립차원은 7이었다. 매립차원이 크게 나타났으므로 이 계의 자유도가 아주 크다는 것을 뜻한다. 리아프노프 발산지수도 0.453으로 큰 값을 나타내었으며, 정현파에 비해 예측이 어려운 복잡한 상태를 보인다는 것을 알 수 있다. 또한 순음의 경우(Fig. 1)는 리턴맵이 주기적인 상태를 나타내는 원꼴개(circle attractor)의 형태를 보이나, 무작위 잡음(Fig. 2)의 경우는 주기가 혼돈적인 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

이번에는 정현파(10 Hz sinewave)와 무작위 잡음(whitenoise)를 합성시켜 합성신호를 만든 다음, 이 합성신호를 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기에 사용된 신호대 잡음비는 1:1로써 동일한 신호와 잡음의 진폭이 동일한 경우이다. 자기상관함수로 계산한 지연시간은 $50(50/2000=25 \text{ ms})$ 이었으며, 매립차원은 6, 리아프노프

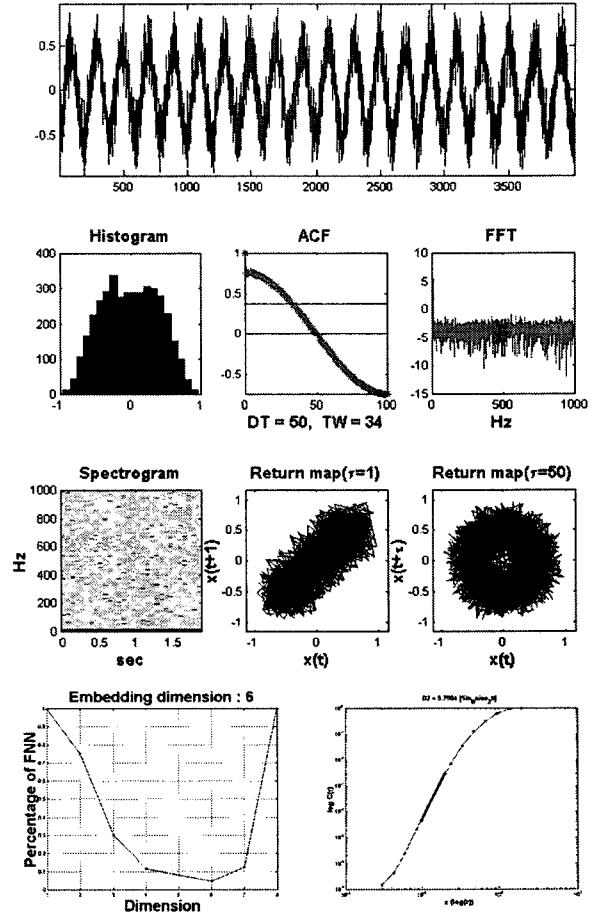


Fig. 3. Result of chaos analysis for combination of random noise and pure tone (embedding dimension: 6, Lyapunov exponent: 0.003).

발산지수는 0.003의 값을 나타내었다. 정현파의 경우에 비해 매립차원은 4만큼 커졌고, 발산지수는 양의 값을 가지고 있다. 즉, 혼돈상태로 전이한 결과를 나타낸다. 반면, 순수한 무작위 잡음의 경우에 비해서는 매립차원이 1만큼 감소되고, 발산지수는 1만큼 작아졌다. 즉, 무작위 잡음 안에 결정론적인 신호가 혼재하므로 발산지수가 작아진 것임을 알 수 있다. 참고로, 신호대 잡음비를 바꾸면서 계산한 결과, 신호의 진폭을 1로 기준할 때, 잡음의 진폭을 0에서 1로 증가시킬 때, 매립차원의 값은 지수함수적으로 증가하는 현상을 보였다. 그러므로, 작은 양이라도 잡음이 존재하면 그 계의 자유도는 쉽게 증가한다는 것을 알 수 있다.

환경별로 측정된 수중 배경 소음의 분석

이번에 본 논문의 주제인 수중 배경소음의 분석결과를 알아보자. 자기상관함수로 계산한 지연시간은 $7(7/2000=$

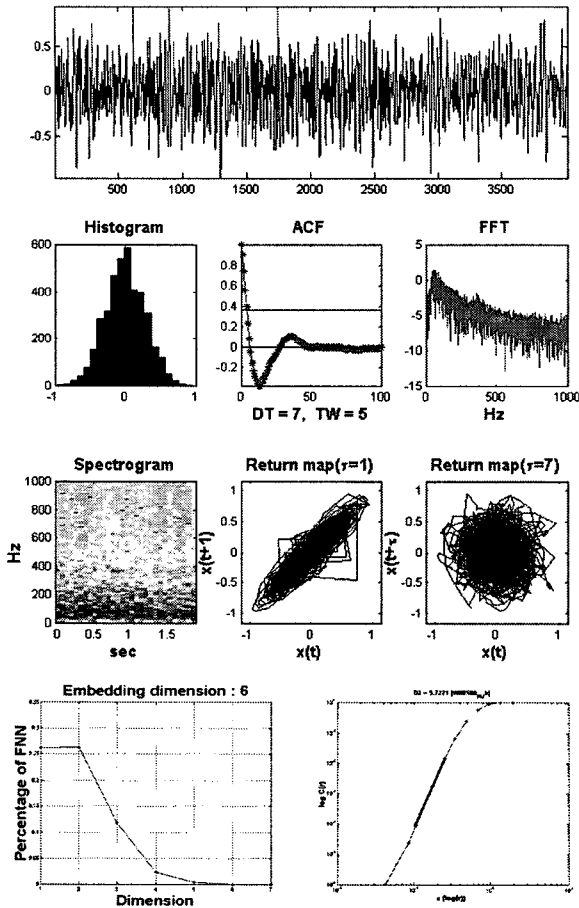


Fig. 4. Result of chaos analysis in case of low wind speed (<1 knot) and no shipping within 9 nmile radius (embedding dimension: 6, Lyapunov exponent: 0.055).

3.5 ms)이었으며, 매립차원은 6, 리아프노프 발산지수는 0.055의 값을 나타내었다. 매립차원은 무작위 잡음의 경우와 유사하지만, 발산지수는 아주 작은 값을 보이므로, 수중배경소음은 혼돈상태에 가까운 신호지만 무작위 잡음과는 거리가 있다고 볼 수 있다.

Fig. 5는 풍속이 26노트인 경우의 수중 배경소음의 분석그림이다. 지연시간은 $7(7/2000=3.5 \text{ ms})$ 이었으며, 매립차원은 8, 리아프노프 발산지수는 0.056로 계산되었다. 풍속의 거의 없는 경우(1노트 이하)와 거의 유사한 결과를 얻었으므로 풍속의 변화는 혼돈기법의 결과에 별 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 6과 7에 다른 조건이 같은 상황에서 항행선박이 없을 경우와 다수 있을 경우의 수중소음의 혼돈분석 결과이다. 매립차원은 동일하게 계산되었으며, 발산지수는 반경 9마일 내에 항행선박이 존재하는 경우가 0.059로서 선박이 없을 때의 0.037보다 다소 큰 값을 보였다. 그러나 발

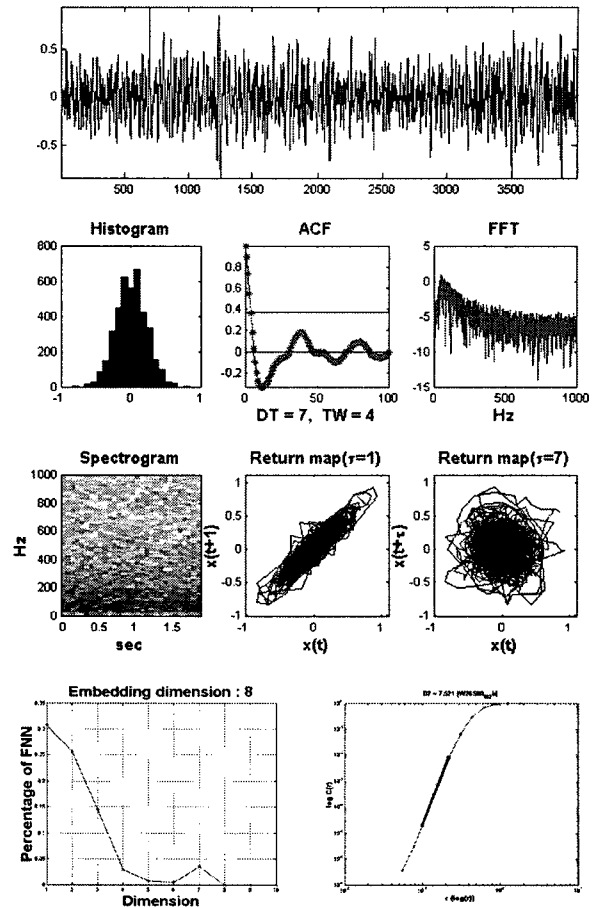


Fig. 5. Result of chaos analysis in case of high wind speed (26 knot) and no shipping within 9 nmile radius (embedding dimension: 8, Lyapunov exponent: 0.056).

산지수의 값은 풍속과 항행선박의 다소유무에 관계없이 0.037~0.059로써 그 차이가 크지 않으므로 항행선박의 유무를 판단하기 위한 기준으로 이용하기에는 부족한 것으로 판단된다.

4. 수중소음 신호들의 혼돈분석 결과 요약

카오스이론을 이용한 수중소음 측정자료의 혼돈 분석 결과를 다음의 Table 1에 요약하였다.

정현파와 무작위 잡음신호의 분석은 매립차원과 발산지수의 변화가 명확하게 나타났다. 그러나 수중소음 측정자료의 환경별 분석은 매립차원의 범위가 6~8가지로 큰 차이가 나타나지 않았으며, 상관차원과 발산지수도 별다른 차이가 나타나지 않았다. 이는 수중소음이 잡음의 수준으로서 선박이나 해표면 상태에 관계없이 유사한 혼돈특성을 가진다는 것을 뜻한다. 그러나, 혼돈계의 초기값의 민

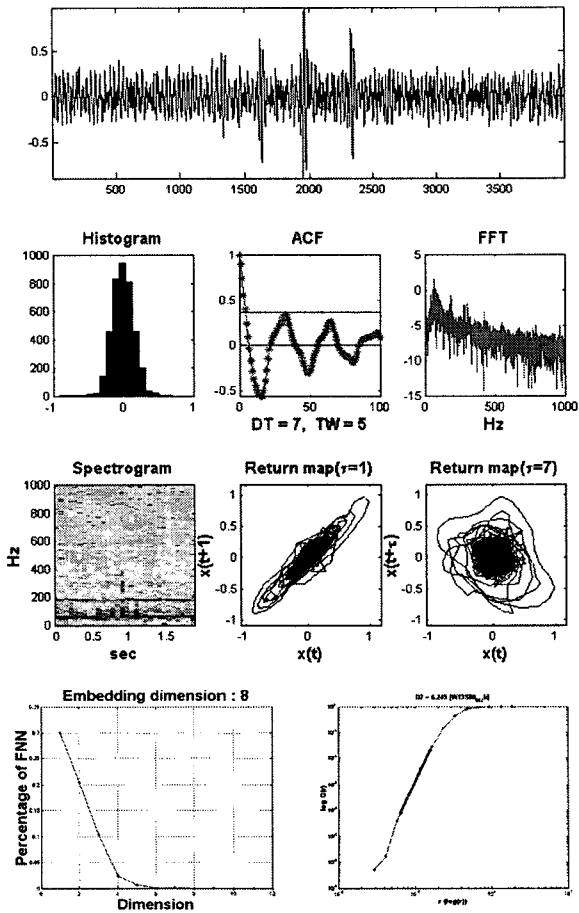


Fig. 6. Result of chaos analysis in case of no shipping within 9 nmile radius at constant wind speed (embedding dimension: 8, Lyapunov exponent: 0.038).

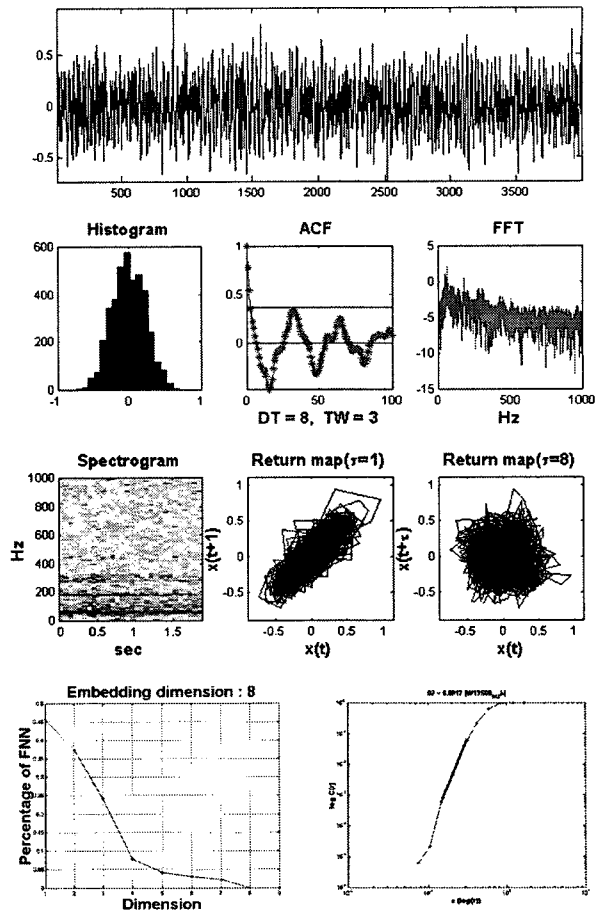


Fig. 7. Result of chaos analysis in case of heavy shipping within 9 nmile radius at constant wind speed (embedding dimension: 8, Lyapunov exponent: 0.059).

Table 1. Embedding dimension and Lyapunov exponent of analyzed signals.

	Acoustic signals	Embedding dimension	Correlation dimension	Lyapunov exponent
Artificial signals	Sine wave	2	0.9	-0.003
	Random noise	7	6.7	0.453
	Sine wave + random noise	6	5.8	0.003
Ambient noise data	Wind (X), ship (X)	6	5.7	0.055
	Wind (O), ship (X)	8	7.5	0.056
	Ship (X) at constant wind speed	8	6.2	0.038
	Ship (O) at constant wind speed	8	6.1	0.059

감도를 나타내는 최대 Lyapunov 지수 즉, 발산지수는 혼돈계를 나타내는 양의 지수 +0.038~+0.059의 값을 보이지만, 무작위 잡음의 발산지수인 +0.453에 비해 상대적으로 작은 값을 보임으로써 일반적 잡음과는 다른 혼돈계의 특성을 보이고 있다고 할 수 있다.

5. 결 론

최근에 활발하게 응용분야를 키우고 있는 Chaos 분석 기술을 이용하여 해수 중에서 측정된 수중소음 시계열 신호를 Tisean 코드를 이용하여 분석하였다. 수중소음의 혼

돈분석결과, 자유도를 나타내는 매립차원에 대한 혼돈분석으로는 환경별 차이를 발견할 수 없었다. 그러나, 혼돈계의 초기값의 민감도를 나타내는 발산지수의 분석으로부터는 일반적인 잠음수준의 큰 발산지수와는 다르게 작은 발산지수 값을 보였으므로 이러한 차이로부터 수중소음 혼돈신호계의 특성을 규정할 수 있는 가능성을 보였다고 할 수 있다.

사 사

본 연구에 이용된 소프트웨어 패키지는 Tisean으로 알려진 프로그램이며, 특히 인제대학교 물리학과 의 이상훈 교수님의 공개 Matlab 코드(이 2001)를 사용하였음을 밝혀 둡니다.

참고문헌

이상훈. 2001. 학부 및 대학원 강의노트 및 Matlab codes. 인제대학교 물리학과, 카오스 및 비선형 생체동역학 연구실. (Home page: chaos.inje.ac.kr).

최복경, 김봉채, 김병남. 2001. 해양 배경소음 신호의 해석을 위한 Chaos 분석기술의 소개. *한국음향학회 제16회 수중음향학 학술발표회 논문집*, 1-8.

Frison, T.W., H.D.I. Abarbanel, J. Cembrola, and B. Neales. 1996. Chaos in ocean ambient "noise". *J. Acoust. Soc. Am.*, 99(3), 1527-1539.

Frison, T.W., H.D.I. Abarbanel, J. Cembrola, and R. Katz. 1996. Nonlinear analysis of environmental distortions of continuous wave signals in the ocean. *J. Acoust. Soc. Am.*, 99(1), 139-146.

Hegger, R., H. Kantz, and T. Schreiber. 1999. Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package. *CHAOS* 9, 413.

Kantz, H. and T. Schreiber. 1997. *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 304 p.

Schreiber, T. and A. Schmitz. 2000. Surrogate time series. *Physica D*, 142-346.

Received Aug. 28, 2006

Accepted Nov. 30, 2006