

이산 웨이브릿 변환을 이용한 소나 자료처리에 관한 연구

김진후* · 김현도**

*동아대학교 토목해양공학부

**동아대학교 대학원 해양공학과

A Study on the Sonar Data Processing by Using a Discrete Wavelet Transform

JIN-HOO KIM* AND HYUN-DO KIM**

*Division of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

**Ocean Engineering Department, Graduate School, Dong-A University, Busan, Korea

KEY WORDS: Discrete Wavelet Transform 이산 웨이브릿 변환, Sonar 소나, Data Processing 자료처리, Noise 잡음.

ABSTRACT: Spectral analysis is an important signal processing tool for time series data. The transformation of a time series into the frequency domain is the basis for a significant number of processing algorithms and interpretive methods. Recently developed transforms based on the new mathematical field of wavelet analysis bypass the resolution limitation and offer superior spectral decomposition. The discrete wavelet transform of Sonar data provides spectral localization of noises, hence noises can be filtered out successfully.

1. 서 론

웨이브릿은 유한 범위 내에서 정의되는 파형으로 정의되며 1909년 Haar에 의해 처음 언급되기 시작했다. Mallat(1989)는 피라미드 알고리즘과 직교 웨이브릿 베이스를 발견함으로써 웨이브릿을 디지털 신호분석 적용할 수 있음을 제시하였고, Daubechies(1990)는 Mallat(1989)의 연구에 기초하여 일련의 직교 웨이브릿 베이스 함수를 만들었는데, 이는 오늘날 웨이브릿 응용의 초석이 되었다.

웨이브릿이 지구물리 탐사자료의 질을 높일 수 있는 흥미로운 도구로 인식됨에 따라 지난 10년간 육상 및 해양 탐사자료 처리에 많이 응용되었다. Foufoula-Georgiou와 Kumar(1994)는 지구물리 탐사자료 처리와 관련하여 웨이브릿의 여러 응용 사례를 발표하였는데, 이것이 웨이브릿의 지구물리학적 응용의 시발점이 되었다. 이후 Chakraborty와 Okaya(1995)는 탄성과 탐사자료에 이를 적용하였으며, 김과 이(2001)는 탄성과 주시를 결정하는데 이를 활용하였다.

시계열 자료를 푸리에 변환을 통하여 주파수 영역으로 표현함으로써 시계열 영역에서 관찰하기 힘든 여러 특성들을 나타낼 수 있다. 탄성과 자료의 진폭 스펙트럼과 위상 스펙트럼이 대표적인 예로서 이는 전체 정상(stationary) 시계열 자료의 평균적인 주파수 특성을 나타낸다. 이러한 표준화된 푸리에 변환에 근거한 자료처리 방법은 탐사자료의 해석, 주파수 영역 필터링, 콘볼루션 및 디콘볼루션 등 다양한 디지털 자료처리 도구로 사용되고 있다.

시계열 자료가 비정상(nonstationary)이어서 시간에 따라 주파

수 스펙트럼의 특성이 심하게 바뀌는 경우에는 시계열 자료를 분석할 수 있는 다른 방법이 필요하게 되는데, 이 경우 1차원 시간변화(time-variant) 대역필터링이나 단시간 푸리에 변환(short time Fourier Transform; STFT) 등이 사용될 수 있다. 그러나 STFT는 시간-주파수 분해능, 특히 시간 대역의 분해능이 떨어져 시간 변화에 따른 주파수 특성을 해석하는데 어려움이 따른다.

웨이브릿 변환은 시계열 자료의 시간에 따른 주파수 특성을 파악하는데 유용하게 사용될 수 있다. STFT가 고정 크기의 시간 윈도우를 사용하는 것이 비해 웨이브릿 변환은 가변 윈도우 크기를 사용하고 있다.

본 연구에서는 소나 자료에 잡음으로 인식되는 불필요한 신호를 제거하기 위하여 웨이브릿 변환을 시도하였으며, 저주파로 나타나는 잡음을 제거하기 위하여 대역제거 필터(band reject filter)와 이산 웨이브릿 변환을 이용한 잡음제거 결과를 비교하였다.

2. 웨이브릿 변환

웨이브릿 분석은 비정상 시계열 자료를 특정 주파수 대역을 갖는(band limited) 유한 길이의 웨이브릿을 이용하여 분석하는 방법을 일컫는다. 웨이브릿 분석은 푸리에 분석과 마찬가지로 웨이브릿 시리즈 전개, 연속 웨이브릿 변환, 이산 웨이브릿 변환 등의 변환이 가능하며, 역변환도 가능하여 필터링에 적용할 수 있다. 만일 웨이브릿으로 정의되는 윈도우 함수가 시간영역에서 폭이 큰 경우, 고찰하고자 하는 신호의 전체적인 특성을 볼 수 있다. 이와 반대로 스케일을 달리하여 분석 윈도우가 좁은 경우

에는 신호의 세부 특성이 강조된다. 연속 웨이브릿 변환은 1980년대 초 소개되었으나 1980년대 말 이산 웨이브릿 변환이 이산 신호처리 사용되기 시작하면서 주목을 받기 시작했다. 연속 웨이브릿 변환과 이산 웨이브릿 변환을 간략히 소개하면 다음과 같다.

2.1 연속 웨이브릿 변환

연속 웨이브릿 변환(continuous wavelet transform; CWT)에서 이동하는 대역 필터의 대역 폭은 필터의 중심 주파수가 증가함에 따라 넓어진다. 실수 신호함수 $f(t)$ 의 분석 웨이브릿 $\psi(t)$ 에 대한 연속 웨이브릿 변환은 다음과 같은 콘볼루션으로 정의된다.

$$W_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) f(t) dt. \quad (1)$$

여기서 윈도우 함수 $\psi(t)$ 는 커널 웨이브릿이라 하며, 인수 a 와 b 는 각각 스케일(scale)과 이행(translation)이라 한다. 각 스케일에서 커널 웨이브릿은 $1/a$ 의 비율로 축소되고 b 만큼 이동되어 $W_{(a,b)}$ 값을 구한다. 실제 적용에 있어서 a 는 2^l 으로 치환되며, 이 때 l 를 스케일 지수라 한다. Fig. 2는 Fig. 1.에 도시한 인공 합성파형을 연속 웨이브릿 변환하여 그 계수를 스케일-이행의 2차원 평면에 도시한 것이다 (Chakraborty and Okaya, 1995).

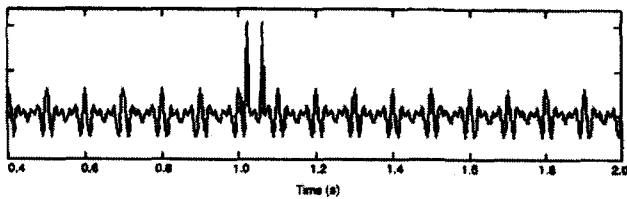


Fig. 1 The time-domain representation of a synthetic signal.

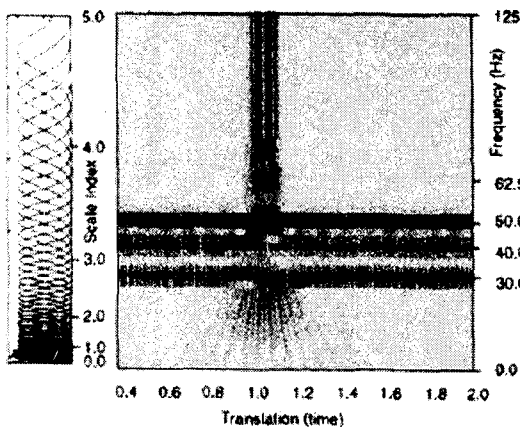


Fig. 2 The continuous wavelet transform of the synthetic signal illustrated in Figure 1. Scale index is a measure of the octave or harmonic behavior of the center frequency of the frequency-domain filter relative to an original low-band kernel wavelet function.

윈도우 함수의 주파수 응답은 Fig. 2의 왼쪽에 나타난다. 스케일 지수가 낮은 경우, 윈도우 함수의 대역 폭은 좁게 나타나며, 따라서 3개의 사인 함수로 잘 분해됨을 보여준다. 그러나 Fig. 1.에서 보는 2개의 spike는 저주파수 영역에서는 분간하기가 매우 어렵다. 스케일 지수가 증가함에 따라 윈도우 함수의 주파수 대역 폭은 증가하며, 따라서 시간영역에서의 대역 폭은 점점 좁아진다. 따라서 2개의 spike는 고주파 영역에서는 잘 분해됨을 보여준다. 1차원 함수의 푸리에 변환이 주파수 영역의 1차원 스펙트럼을 나타내는 것과는 대조적으로 CWT는 시간-주파수 영역의 2차원 스펙트럼을 보여줄 뿐 아니라 저주파수 영역에서는 높은 주파수 분해능을 고주파수 영역에서는 높은 시간 분해능을 보여주는 특징을 갖고 있다.

2.2 이산 웨이브릿 변환

연속 웨이브릿 변환은 원 신호를 자기 다른 대역 폭을 갖는 대역 필터링을 통하여 분해한다. 한편 이산 웨이브릿 변환(discrete wavelet transform; DWT)은 다른 방법으로 신호를 스케일-이행의 2차원 평면으로 변환한다. 연속 웨이브릿 변환이 커널 함수를 스케일링하고 콘볼루션을 수행하는 대신 이산 웨이브릿 변환은 quadrature mirror filter (QMF)를 이용한다. QMF는 2개의 필터 세트로 저주파 통과필터 $\{g_l\}$ 과 고주파 통과필터로 $\{h_l\}$ 구성되어 있다.

길이가 $N = 2^p$ 인 입력 신호 $A_p = (a_{p,1}, \dots, a_{p,N})^T$ 가 있을 때 변환은

$$Z = WA_p \quad (2)$$

로 정의된다. $m = p-1$ 부터 시작되는 매 단계에서 현재의 신호는 저주파 통과필터 $\{g_l\}$ 을 이용하여 필터링되어 다음 단계의 웨이브릿 계수를 산출한다 (Grubb and Walden, 1997)..

$$a_{m,k} = \sum_{l=0}^{L-1} g_l a_{m+1,l+2k-1}, \quad k = 1, \dots, 2^m \quad (3)$$

여기서 L 은 필터의 길이이다. 식(3)의 계산결과는 입력신호의 저주파 통과 또는 smoothing의 결과이며, 출력 신호의 개수는 $1/2$ 로 다운 샘플링 되어 입력 신호 개수의 $1/2$ 이다. 한편, 현 단계에서 신호는 고주파 통과필터 $\{h_l\}$ 을 이용하여 필터링되어 다음 단계의 웨이브릿 계수를 산출한다.

$$d_{m,k} = \sum_{l=0}^{L-1} h_l x_{m+1,l+2k-1}, \quad k = 1, \dots, 2^m \quad (4)$$

Fig. 3은 이산 웨이브릿 변환의 개념을 도식적으로 보여준다.

저주파 통과필터의 결과는 앞에서와 마찬가지로 다시 두 필터를 이용하여 신호 분해를 계속한다. 이와 같은 신호 분해는 원하는 레벨까지 계속된다. 따라서 각 단계에서 저주파 통과필터의 결과는 고주파 통과필터를 이용하여 다음 분해 단계로 넘어가게 된다. 이는 연속 웨이브릿 변환에서 커널 함수의 스케일 지수가 정수로 증가하는 것과 동일한 원리이다.

QMF 방법은 FFT와 마찬가지로 빠르고 효율적이며, 직교성을 갖는다. 사용하는 웨이브릿이 직교성을 보여 역변환도 가능하며 따라서 완벽한 신호의 분해와 재합성이 가능하다.

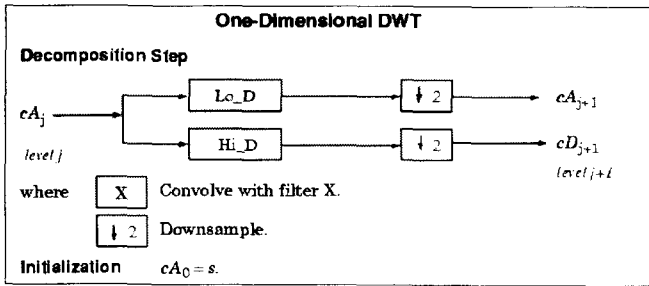


Fig. 3 A schematic diagram of the discrete wavelet transform. Where, c represents wavelet coefficient and level j is defined as $p - m$. Lo_D and Hi_D indicate low- and high-pass filters, respectively.

결국 이산 웨이브릿 변환은 주파수 영역으로 표현된 원 신호에 대하여 연속적인 옥타브 대역에서 정보를 얻어내는 일련의 필터링 작업이라 볼 수 있으며, 각 레벨마다 구한 웨이브릿 계수를 이용하여 원 신호를 재합성할 수 있음은 물론 원치 않는 정보를 제거하고 합성함으로써 다양한 신호처리가 가능하다.

3. 소나 자료처리

이산 웨이브릿 변환은 입력 신호를 웨이브릿 계수로 분해한다. 이 웨이브릿 계수는 각기 다른 스케일 또는 주파수에 대한 신호 특성을 갖고 있기 때문에 각 레벨에 따른 신호 특성을 분석할 수 있으며, 잡음이 내포되어 있는 경우 잡음의 종류와 본질을 파악하여 이를 제거할 수 있는 방법을 제공한다.

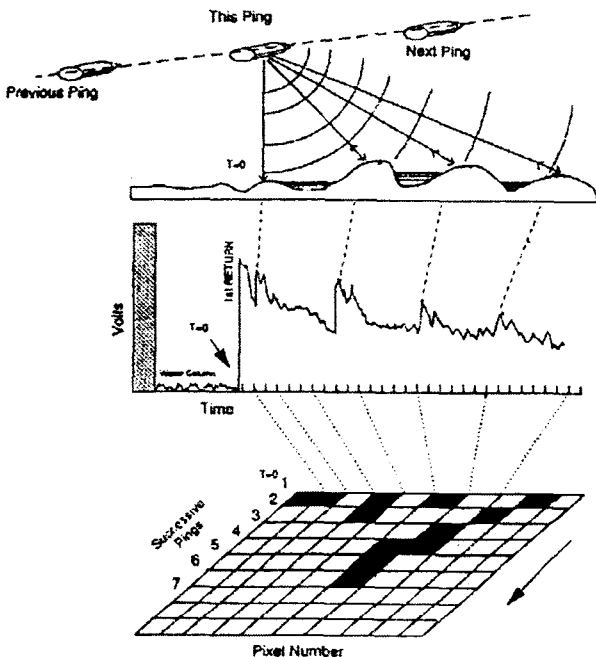


Fig. 4 Principles of sonar data acquisition and presentation.

단거리 소나라고 불리기도 하는 측면주사 음파탐지기(Side Scan SONAR)는 고주파의 초음파를 사용한다. 분해력을 높이기 위해 음향센서 배열이 해저면을 좁은폭의 빔으로 조사할 수 있게 구성되어 있다. 측면주사 음파탐지기의 운동궤적에 따라 연속적으로 반사파를 탐지하여 강한 반사파가 탐지될 경우 검은점으로, 반사파가 없는 경우 흰점으로 표시한다. 그러므로 방해물은 검은점의 집단으로 보여지고 빈 공간은 흰점으로 나타나므로 해저면의 음화(negative photography)와 비슷한 화상을 제공한다. 이 화상을 SONAR 화상이라 부르며 이 화상은 해저 지형의 비교적 미세한 특성탐사 및 장애물 위치파악, 침선 등의 탐사에 이용된다. 사용자에게 따라서는 음화 대신에 양화로 표현하기도 한다.

사이드스캔 소나는 음압 영상을 제공하기 때문에, 기존의 다양한 영상처리 기법을 통하여 흑백사진과 흡사한 해저면 영상을 얻을 수 있다. 그러나, 단일 주파수의 초음파를 이용하므로 색 정보를 갖고 있는 광학적인 영상보다는 소량의 정보량을 갖고 있으며, 그 분해능도 훨씬 나쁘다 (권광석 외, 2000).

Fig. 4는 사이드스캔 소나의 원리를 설명하고 있다. 음파 송수신부에서 특정 주파수의 음파를 발사한 후, 반사되어 되돌아오는 최초 시간이 분석의 기준점이 된다. 이 시간은 수신기의 직하단의 지면이 수평일 것으로 가정한 다음, 바로 반사되어 오는데 걸리는 시간으로 잡는다. 이 시간으로부터 지면과의 거리를 계산한 후, 그 이후의 신호를 일정 시간 간격으로 나누어 산란체의 위치를 결정한다. 수신 신호의 크기로부터 산란체의 모양을 분석한다. 수신된 신호는 다시, 각 신호의 위치에 따라 영상으로 전환된다.

수신기로 되돌아온 해저면 산란 신호에는 잡음이 포함될 수 있다. 산란된 신호의 크기는 산란체의 위치, 모양과 음파에 대한 반사계수 등에 의해 결정되며, 잡음은 매질의 종류나 상태 그리고 사이드스캔 소나의 움직임과 반사경로 등에 따라 크게 좌우된다.

되돌아온 음파 신호는, 이론적 가정을 벗어난 여러 가지 자연효과가 중첩된 형태로 들어온다. 이를 고려하여 각종 자료처리 과정을 거쳐야 정확한 음압 영상을 해석할 수 있다. 자료처리 과정에는 해저면의 경사를 감안한 경사면 보정, 시간에 따른 신호기록을 지형적 선후로 재배열하는 경사보정, 음파의 입사각에 따른 기하보정과 선속보정 및 음압감쇄보정 등이 포함된다.

자료처리 과정을 거친 소나영상 자료는 화상의 단위인 픽셀 값과 픽셀 위치로 변화되어 표시된다. 정확한 픽셀 위치를 결정하기 위해서는 DGPS 위치해와 수중예인체의 선수 정보가 필요하며, 이를 이용하여 기존 지도좌표 체계로 맵핑하여 원하는 축척에 따른 해저면 영상을 구현하게 된다.

본 연구에서는 Imagenex사의 Model 881 디지털 소나를 이용하여 자료를 획득하였다. 송신 주파수는 675kHz이며, 기존의 사이드스캔 소나와는 달리 선체 부착식으로 한 쪽 측면에 대한 소나 영상의 수신만 가능하다. 선체 부착식이라 우리 나라 연안환경과 같이 수중 장애물이 많은 극천해나 천해에서 사용하기에 편리한 장점은 있으나 선체의 움직임에 민감하게 반응하기 때문에 예기치 않은 잡음이 수신될 수 있는 단점도 있다.

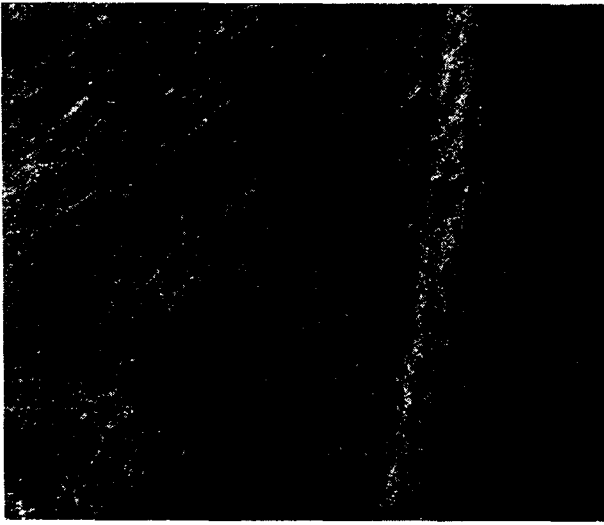


Fig. 5 A sonar image before data processing.

Fig. 5는 현장에서 얻은 소나 영상의 원시자료이다. 그림에서 보는바와 같이 소나 영상에 선체의 히브(heave) 운동에 의한 잡음으로 판단되는 지그재그 형태의 줄무늬가 나타나고 있다. 이러한 잡음을 제거하기 위하여 이산 웨이브릿 변환을 이용한 필터링을 시도하였다.

이산 웨이브릿 변환을 이용한 필터링 과정은 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 취득한 자료는 디지털 자료처리를 위해 이미지 픽셀 정보만을 모아 저장하는 소팅과 포매팅이 우선 수행된다.

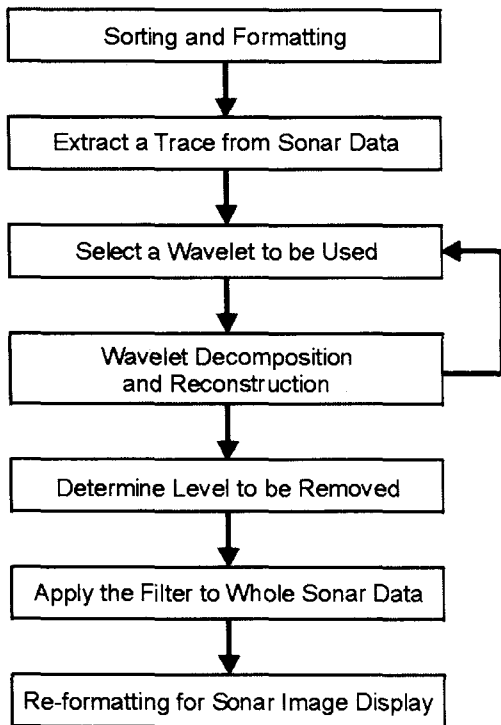


Fig. 6 A flowchart for Sonar data processing for removing noises.

웨이브릿 분석을 위해서는 전체 데이터 중에서 한 개의 트 레이스 자료가 필요하며 여기서 결정된 매개변수를 이용하여 전체 데이터에 필터링을 적용한다. 매개변수로는 사용하고자 하는 웨이브릿 함수와 최대 분해 레벨의 결정 등이 포함되며, 이들은 시행착오 방법에 의해 결정될 수 있다. 이 과정을 통하여 잡음을 나타내는 웨이브릿 계수의 레벨이 결정되면 이를 전체 소나 데이터에 적용하여 필터링을 수행한다. 필터링 된 소나 데이터는 다시 소나 이미지 표현을 위해 재 포매팅 한다.

4. 자료처리 결과 및 고찰

디지털 소나 영상자료를 처리하기 위하여 'db5' 웨이브릿 함수를 사용하였다. Fig. 7은 한 개 트리에스에 대한 원시 신호(그림 좌상단)와 각 레벨별 저주파 통과 필터링 결과(그림 좌측, a5부터 a9) 및 고주파 통과 필터링 결과(그림 우측, d5부터 d9)를 보여준다. 그림의 가로 축은 시간 인덱스를, 세로 축은 신호 강도를 각각 나타낸다. 그림 우상단에는 각 레벨별 웨이브릿 계수를 이용하여 합성한 신호를 나타내는데 이는 좌상단의 원시 신호와 같음을 알 수 있다.

원시 자료에서 보듯이 소나 데이터는 저주파의 다소 불규칙한 신호에 모달레이트 되어 있음을 알 수 있으며, 이 저주파의 파형이 Fig. 5에서 보는 바와 같은 지그재그형의 잡음을 야기시키는 것으로 보인다. 이 저주파의 파형과 가장 근사한 고주파 통과 필터링 결과는 레벨 7, 즉 d7인 것으로 판단되어 d7을 제거토록 하였다.

한편, Fig. 7의 a9은 소나 데이터의 전체적인 경향을 보여준다. 그림에서 보듯이 시간이 경과함에 따라 신호 강도가 서서히 증가하고 있는데, 이는 자료 취득 당시 TVG(time varying gain)를 과도하게 준 결과로 생각된다.

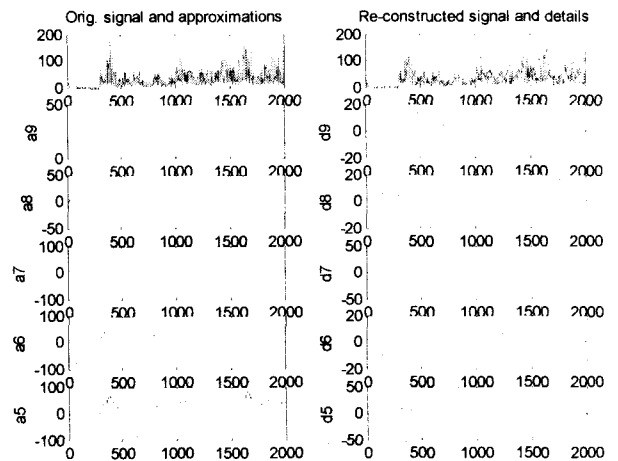


Fig. 7 Comparison between original signal and reconstructed signal. Approximations (a5 to a9) are displayed on the left column and details (d5 to d9) are displayed on the right column.

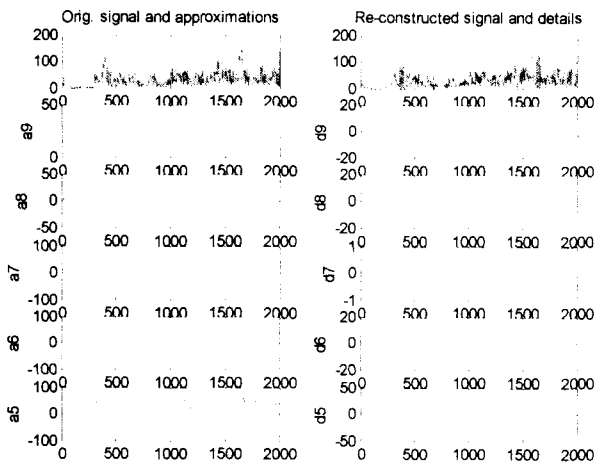


Fig. 8 Comparison between original signal and reconstructed signal after removing of d7. Approximations (a5 to a9) are displayed on the left column and details (d5 to d9) are displayed on the right column.

Fig. 8은 레벨 7의 고주파 통과 필터링 신호, d7을 제거 한 후 재합성한 신호와 원시 신호의 비교를 나타낸다. 그림에서 d7 신호 강도는 모든 시간 영역에서 0임을 볼 수 있으며, 따라서 저주파 통과 필터링 신호 a6과 a7의 신호 강도는 같게 나타난다.

Fig. 8의 우상단에 d7을 제거한 후 재합성한 신호를 보여주는 데 원시 신호와 비교하여 잡음으로 판단되는 저주파 신호가 일부 제거되었음을 알 수 있다.

이산 웨이블릿 분석을 통하여 잡음제거를 위한 웨이블릿 함수와 레벨이 결정되면 이를 모든 소나 데이터에 적용한다. Fig. 9는 'db5' 웨이블릿 함수를 적용하여 소나 데이터를 분해한 후, d7 신호를 제거하고 재합성한 결과를 보여주고 있다.

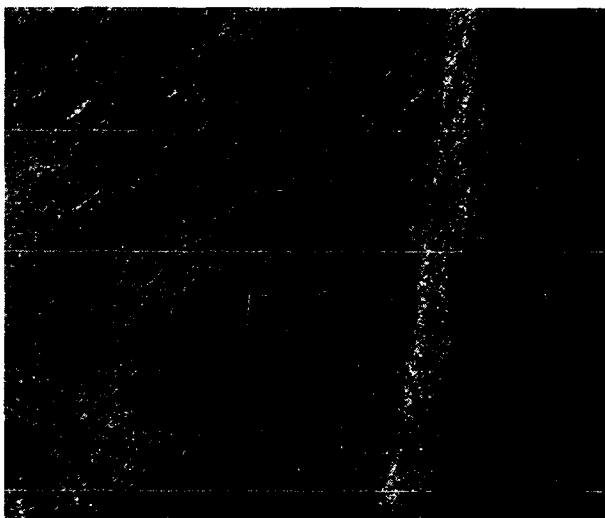


Fig. 9 A sonar image after data processing.

그림에서 보는 바와 같이 소나 영상에 선체의 히브운동에 의한 잡음으로 판단되는 지그재그 형태의 줄무늬가 상당부분 제거되었음을 알 수 있다. 결과적으로 수중체의 윤곽에 나타나는 왜곡도 상당부분 개선되었다. 그러나 소나 영상 일부에는 아직도 잡음이 남아 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 아직 제거되지 않은 잡음은 다른 웨이블릿 함수를 사용하는 웨이블릿 변환을 통하여 재차 필터링 함으로써 제거가 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

아날로그 소나를 이용한 해저면 영상탐사가 디지털 소나를 이용한 탐사로 바뀌면서 다양한 자료처리가 가능하게 되었다. 소나 탐사는 일반적으로 예인체를 이용하나 극천해에서는 수중 장애물 등으로 인해 운용상 어려운 점이 많았다. 소나 탐사에 예인체를 사용하지 않고 선체에 부착하여 운용하는 경우에는 선체의 움직임에 민감하게 반응함으로써 선체 움직임에 따른 잡음이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환을 이용한 소나 데이터의 잡음제거에 관한 새로운 시도를 제시하였다.

이산 웨이블릿 변환을 통하여 신호의 시간 변화에 따른 주파수 변화 특성을 알 수 있으며, 잡음에 해당하는 신호 특성을 분석할 수 있다. 여러 고주파 통과 필터링 신호에서 잡음에 해당하는 신호만을 골라 제거함으로써 필터링을 보다 효율적으로 수행할 수 있었다.

비록 본 연구에서는 각 트레이스별로 필터링을 수행하는 1차원 필터링을 시도하였으나, 2차원 웨이블릿 변환을 이용하면 소나영상 자체를 2차원 평면에서 필터링 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 웨이블릿 함수 선택에 있어서 객관적인 판단 기준도 확립되어야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- 권광석, 장인수, 박요섭, 김학일 (2000). "해저면 탐사를 위한 디지털 사이드스캔 소나의 운영기술", 제2회 전국 환경관 지역협력연구센터 Workshop, pp 165-174.
- 김진후, 이상화 (2001). "이산 웨이블릿 변환을 이용한 탄성파 주시결정", 지구물리, Vol 4, No. 2, pp 113-120.
- Chakraborty, A. and Okaya, D. (1995). "Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods", Geophysics, Vol. 60, No. 6, pp 1906-1916.
- Daubechies, I. (1990). "The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis", IEEE Trans. On Information Theory, Vol. 36, No. 5, pp 961-1005.
- Foufoula-Georgiou, E. and Kumar, P. (1994). "Wavelets in Geophysics", Academic Press, San Diego.
- Grubb, H. J. and Walden, A. T. (1994). "Characterizing seismic

time series using the discrete wavelet transform",
Geophysical Prospecting, Vol. 45, pp 183-205.

Mallat, S. (1989). "A Theory for Multi-resolution Signal
Decomposition: The Wavelet Representation", IEEE Trans.
Pattern Anal. and Machine Intelligence, Vol. 31, No. 7, pp
674-693.