

웨이브렛을 이용한 해양음향 토모그래피 음파 도달시간 분석

Wavelet-based Time Delay Estimation in Tomographic Signals

오 선 택*, 조 환 래*, 나 정 열*, 김 대 경**
(Sun-Taek Oh*, Hwan-Rae Cho*, Jungyul Na*, Dai-Gyoung Kim**)

* 한양대학교 지구해양과학, ** 한양대학교 응용수학

(접수일자: 2002년 5월 20일; 수정일자: 2003년 1월 14일; 채택일자: 2003년 2월 4일)

본 논문에서는 음파가 다중 경로를 통하여 수신되는 경우 음파의 도달시간을 보다 정확하게 파악하기 위한 방법으로 웨이브렛 패킷을 기반으로 한 신호 처리 기법을 제안하였다. 그 식별 성능 분석을 위해 제안된 방법과 기존의 정합 필터 방법의 실험하였고, 또한 실측 신호에 대해 적용하여 비교 및 분석하였다. 그 결과 제안된 웨이브렛 패킷 기반의 신호처리 방법이 정합 필터 방법을 적용한 경우보다 많은 도달 시간을 식별하였고, 기존의 정합 필터 방법으로 식별하기 어려운 다중경로 환경에서의 도달시간을 보다 효율적으로 추정할 수 있는 가능성을 확인하게 되었다.

핵심용어: 해양음향 토모그래피, 정합 필터, 웨이브렛, M-계열

루고분야: 수중음향 분야 (5.5)

In this paper, we propose a wavelet-based detection method to identify efficiently the time-delay or multipath channel of ocean acoustic signals due to complex ocean medium and boundary layers. Our proposed method employs wavelet packet transform to analyze the received broadband acoustic signals and applies the matched filter to determine the time region of interest. Also, we present numerical testing that results on both the simulated and real data revealed the efficiency of this method in time-delay estimation and moreover its capability in estimating the time-delay of individual path in multipath channel, in which the arrival patterns are too close to be separated by the matched filter method.

Keywords: Ocean acoustic tomography, Matched filter, Wavelet, M-sequence

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.5)

1. 서론

음파를 이용하여 해양 매질의 특성을 파악하기 위해서 도입된 해양음향 토모그래피에서 우선적으로 수행되는 과정은 수신기에 도달된 음파를 식별하는 것이다. 수신된 음파를 보다 효율적으로 식별하기 위해서 음원 신호를 위상 변조 (phase shift keying, PSK)하여 송신하는 방법이 통상적으로 이용된다[1,2]. 여기서 위상 변조는 신호 대 잡음비가 높은 임펄스 형태의 신호로 음원 신호를 펄스압축 (pulse compression)하기 위한 것이다. 이

기술의 기본 개념은 음원에서 허용되는 주파수 밴드폭을 이용하여 시간영역에서 에너지를 분산시키는 개념이며, 많은 해양음향 토모그래피 실험을 통해서 PSK의 일종인 m-계열 (maximal-length sequence)신호가 효율적이라는 것이 입증되었다[3]. 한편 다중경로에 의한 음파 도달 시간을 추정하기 위해 정합 필터 (matched filter)에 의한 신호 처리가 많이 쓰이는데, 이는 음원의 밴드폭에 의한 제한으로 인해 음파 도달 시간의 지연차가 작은 음파를 식별하는데 있어 문제점을 갖고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 인접한 수신기에 수신된 신호를 웨이브렛을 이용하여 분해한 다음 수신신호의 각 웨이브렛 계수 간의 상관관계를 이용하여 도달 시간을 식별하는 방법이 제안되었다[4]. 그러나 이러한 방법은 하나의 수신기

책임저자: 오선택 (ost@hanyang.ac.kr)
경기도 안산시 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실
(전화: 031-400-4154; 팩스: 031-406-6458)

또는 선배열 소오나에서 각각의 수신기에 수신된 신호를 독립적으로 처리하는 경우 효과적이지 못하다. 즉, 각 수신기에서 산출된 웨이브렛 계수들간의 상관관계를 이용할 수 없다는 단점이 있기 때문이다.

본 논문에서는 선배열 소오나의 각 수신기에 수신된 음파의 도달시간을 보다 정확하게 파악하기 위하여 웨이브렛 패킷을 기반으로 한 정합필터 신호 처리방법을 제안하였다. 성능 비교를 위해 기존의 정합 필터 방법과 제안된 웨이브렛 패킷 기반의 방법을 각각 모의 수신신호 및 실제 수신신호에 적용하여 도달시간을 추정 및 분석하였다. 본 논문의 구성을 살펴보면 다음과 같다. 제 II장에서는 정합 필터 방법 및 웨이브렛 패킷 방법을 소개하며, 제 III장에서는 모의 신호 및 실제 신호에 대해 정합 필터 방법 및 제안된 웨이브렛 패킷 방법을 적용한 결과를 분석한다. 마지막으로 IV장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 정합 필터링과 웨이브렛 패킷 변환

수중에서 전파되어 수신기에 도달하는 음파는 매질의 비균질성 및 경계면과의 상호작용으로 인한 다중경로 효과를 포함하고 있다. 따라서 다중경로 효과가 존재하는 환경에서 수신기에 수신된 음파는 도달 시간 차이가 작아서 경로를 식별하기 어렵게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 음원으로 m-계열 신호를 이용하고, 이 경우 수신기에서 얻은 음파의 도달시간을 분석하기 위해 정합필터를 사용하는 방법이 알려져 있다 [1,3]. 본 장에서는 m-계열을 생성하는 방법과 수신기에서 음파의 도달시간 산출을 가능하게 하는 정합필터를 간단히 설명하고, 도달시간을 보다 정밀히 측정하기 위해 적용할 웨이브렛 패킷 변환을 소개한다.

m-계열은 선형귀환 쉬프트 레지스터 mod-2 연산을 수행하는 XOR (exclusive OR) 게이트를 통하여 생성된다 [3]. 선형 쉬프트 레지스터는 일반적으로 식 (1)과 같이 차수가 r>0인 다항식으로 표현된다.

$$g(D) = g_r D^r + g_{r-1} D^{r-1} + \dots + g_1 D^1 + g_0 \quad (1)$$

여기서 r은 쉬프트 레지스터의 단 수를 나타내며 $g_i (i = 0, 1, \dots, r)$ 는 쉬프트 레지스터 각 단의 연결상태를 나타낸다. 특히 이진 시퀀스에 대해서 g_i 는 1 또는 0 값을 가지며, 항상 $g_0 = g_r = 1$ 이다. 이때 D^i 는 지연 단위가 된다. 이와 같이 생성된 m-계열의 g_i 의 값을 1

또는 -1로 변환하여 반송파를 위상 변조할 수 있으며 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$s(t) = \cos(2\pi f_c t + m(t)\theta_0) \quad (2)$$

여기서 f_c 과 $m(t)$ 는 각각 반송파 주파수와 m-계열을 나타낸다. θ_0 는 m-계열 주기에 의해 결정되는 초기 위상각으로, 이를 이용하여 신호의 시간 분해도를 향상시킬 수 있으며, 복조와 펄스 압축 후에 최대의 신호 대 잡음비를 얻을 수 있다. 이 경우 θ_0 는 다음과 같이 표시할 수 있다[2].

$$\theta_0 = \tan^{-1}(\sqrt{N_m}), \quad N_m: \text{digit 개수} \quad (3)$$

2.1. 정합 필터링

수신된 m-계열 신호는 송신신호와의 위상정보를 이용하여 경로별 도달시간을 산출하게 된다. 만약 잡음의 영향을 무시하면 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \cos(2\pi f_c t + m(t)\theta_0 + \phi) \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 지연 시간으로 인한 위상 변이를 나타낸다. 이러한 수신 신호로부터 기저 대역 신호의 크기를 얻기 위해서는 수신신호의 동위상 성분 (in-phase component, $I_L(t)$)과 직교 성분 (quadrature component, $Q_L(t)$)을 모두 알아야 한다. 동위상 성분과 직교 성분을 얻기 위해서는 먼저 수신 신호에 각각 $\cos(2\pi f_c t)$ 와 $\sin(2\pi f_c t)$ 을 곱한 후 저대역 통과필터를 작용시킨다. 이때 산출된 동위상 성분 및 직교성분은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_L(t) &= \frac{1}{2} \cos(a_i \theta + \phi) \\ Q_L(t) &= -\frac{1}{2} \sin(a_i \theta + \phi) \end{aligned} \quad (5)$$

그림 1에서 위의 과정을 도식적으로 나타내었다.

특히 신호 대 잡음비를 향상시키기 위해 정합필터를 적용하며, 이때 복조된 신호와 송신신호와의 상관관계함수로부터 도달시간을 추출한다. 상관관계함수를 살펴보면 다음과 같다.

$$R_{xx}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{r}(n)m(n-t) \quad (6)$$

여기서 $\tilde{r}(t)$ 은 복조된 수신신호이며 $m(n-t)$ 는 송신시의 m-계열을 나타낸다. 실제로 위의 상관관계계를 보다 빨리 계산하기 위해 두 신호를 푸리에 변환하여 주파수

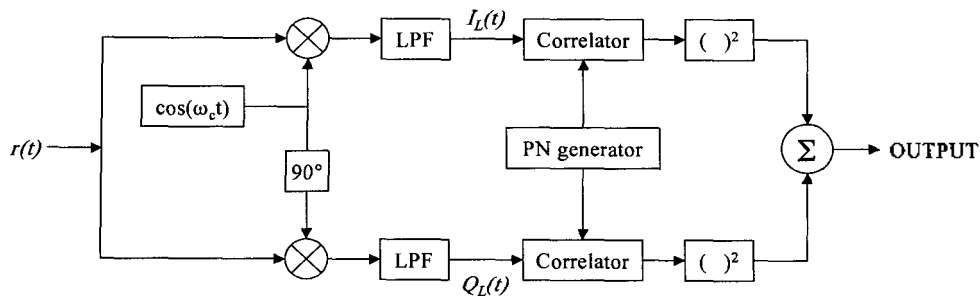


그림 1. 복조 상관기 구조
Fig. 1. Routine of quadrature amplitude demodulation.

영역에서 상관관계함수를 구한다.

2.2. 웨이브렛 패킷 (Wavelet Packet)

푸리에 변환 또는 FFT와 다르게 웨이브렛 변환은 다양한 기저 (웨이브렛 기저)로 신호를 재구성할 수 있으며, 또한 기존의 (국소)푸리에 변환 (WFT, windowed Fourier transform)과 크게 다른 점은 신호를 시간주파수 영역 (time-frequency domain)에서 효율적으로 분석할 수 있다는 것이다[5]. 예를 들어 웨이브렛 변환을 통하여 비정규 (non-stationary)신호 또는 천이 (transient)신호에 대한 보다 세밀한 시간척도 분석 (time-scale analysis)이 가능하게 된다.

특히, 이산 웨이브렛 변환 (discrete wavelet transform, DWT)은 신호에 대한 다중해상도분석 (multiresolution analysis, MRA)을 제공하며, 이는 신호처리 관점에서 보면 필터뱅크를 기반으로 한 대역별 신호의 재구성과 아주 밀접한 관계가 있다. 그 기본 개념은 주어진 이산 신호 $s(n)$ 을 저대역 (low-band)필터 $h(n)$ 과 고대역 (high-band)필터 $g(n)$ 으로 통과 (convolution)시켜 각각 두 개의 이산 신호 $c(n)$, $d(n)$ 을 얻는 것이다. 즉,

$$\begin{aligned} c(n) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(t-2n) s(t) \\ d(n) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(t-2n) s(t) \end{aligned} \quad (7)$$

위의 두 이산신호는 주어진 신호 $s(n)$ 을 서브샘플링 (sub-sampling)한 것으로 볼 수 있는데, $c(n)$ 은 $s(n)$ 의 해상도보다 한 단계 낮은 수준의 저해상도를 갖는 $s(n)$ 의 근사신호이며, $d(n)$ 은 $s(n)$ 과 $c(n)$ 의 차이에 해당하는 세부신호가 된다. 이러한 기본 과정을 근사신호 $c(n)$ 에 다시 반복하여 적용하면, 주어진 신호 $s(n)$ 에 대한 여러 해상도별 근사신호와 세부신호를 얻게 된다. 이러한 분해를 다중해상도분석이라고 한다 [5,6]. 이러한 해상도별 근사신호와 세부신호를 구하는 과정은 다음 식

과 같은데 이를 Mallat의 알고리즘이라 한다[6].

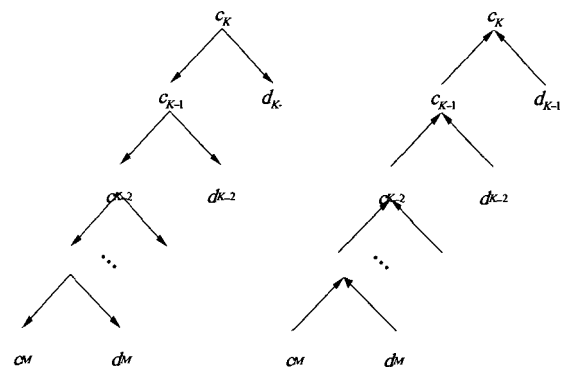
$$\begin{aligned} c_{k-1}(n) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(t-2n) c_k(t) \\ d_{k-1}(n) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(t-2n) c_k(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 k 는 해상도 수준을 구분하는 매개변수이며, 주어진 원 신호의 해상도를 최고 해상도 수준으로 간주하고 이를 K 라 할 때 $c_K(n) = s(n)$ 라 놓는다.

위의 각 해상도 수준별 세부신호는 응용에 따라 분석되어 신호의 정보를 얻거나, 적절히 변형된 후 원하는 신호를 복원하는데 쓰인다. 세부신호와 최하위의 근사신호로부터 신호를 복원하는 과정은 위의 분해 과정의 역 과정이라 할 수 있다. 다음은 해상도 수준 $k-1$ 의 근사신호와 세부신호로부터 그 다음 해상도 수준 k 의 근사신호를 구하는 식이다.

$$c_k(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} h(t-2n) c_{k-1}(n) + \sum_{n \in \mathbb{Z}} g(t-2n) d_{k-1}(n) \quad (9)$$

위의 저대역 필터 $h(n)$ 과 고대역 필터 $g(n)$ 는 웨이브렛 이론에서 각각 척도 함수 $\phi(t)$ 와 웨이브렛 함수 $\psi(t)$ 와



(a) Wavelet decomposition (b) Wavelet reconstruction

그림 2. 웨이브렛 분해 및 복원 과정

Fig. 2. Wavelet decomposition and reconstruction process.

밀접한 관계가 있는데, 이는 팽창방정식 (dilation equation) 으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} h(n) \phi(2t-n) \\ \psi(t) &= \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} g(n) \psi(2t-n) \end{aligned} \quad (10)$$

웨이브렛 필터의 선정은 대상 신호의 형태에 따라 달라 지는데 본 논문에서는 모의 실험을 통해 다양한 웨이브렛 필터를 적용하여 PSK 신호로부터 정확한 도달신호를 분해 할 수 있는 $h(n)$, $g(n)$ 의 계수 개수가 4개인 Daubechies 의 웨이브렛 필터를 이용하였다. Daubechies의 웨이브렛 필터는 영상 처리 및 신호 처리 분야 등에서 주로 쓰이며 유한 길이를 갖는 비대칭형의 특성을 갖고 있다[5].

일반적인 신호 또는 영상의 잡음제거나 압축 등의 응용 에서는 주로 다중해상도 분석이 효과적이지만, 음성 신 호나 해양음향 신호 등과 같이 저주파와 고주파 성분 모 두에 중요한 정보를 포함하고 있는 신호에는 위와 같은 단순한 분해가 효율적이지 못하다. 이를 극복하기 위하 여 시간주파수 영역에서 고주파 성분의 분해능을 높일 필요가 있는데, 이러한 개념을 수행하는 것이 웨이브렛 패킷이다[6-8]. 이산 웨이브렛 변환은 주어진 신호에서 출발하여 그의 근사 신호들만을 저대역 필터와 고대역 필터를 이용하여 다음 단계의 저해상도수준의 근사신호 와 세부신호를 각각 구한다. 그러나 이산 웨이브렛 패킷 은 근사 신호뿐만 아니라 세부신호에도 동시에 같은 저대 역 필터 $h(n)$ 과 고대역 필터 $g(n)$ 을 적용한다. 따라서 이는 각 해상도별로 근사신호와 세부신호로 분류하여 주 어진 신호의 해상도 내의 모든 세부정보를 분석할 수 있 게 한다. 웨이브렛 패킷 분해에 관한 Mallat 알고리즘은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} c_{k-1}^{2m}(n) &= \sum_{t \in \mathbb{Z}} h(t-2n) c_k^m(t) \\ c_{k-1}^{2m+1}(n) &= \sum_{t \in \mathbb{Z}} g(t-2n) c_k^m(t) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $m=0, 1, \dots, 2^k-1$ 이고 c_{k-1}^{2m} 과 c_{k-1}^{2m+1} 는 각각 해상도 수준 $k-1$ 에서 c_k^m 의 근사신호와 세부 신호를 나타낸다.

웨이브렛 패킷 분해는 위와 같이 웨이브렛 분해 보다 많은 트리 구조를 갖는데, 최종단계의 분기(branch)들은 주어진 신호의 세부정보를 표시하는 주파수 대역에 대응 된다. 예를 들어 패킷 분해의 최종단계에서 8개의 분기가 있다면 주어진 신호의 주파수 대역폭을 균등하게 8등분 하는데, 패킷 트리 구조의 첫번째 분기는 등분된 주파수 대역 중 최저 주파수 대역에 해당되는 신호 정보를, 마지막 여덟번째 분기는 최고 주파수 대역에 해당되는 신호 정보를 포함하고 있다. 따라서 해양음향 토모그래피에서 와 같이 수신기에 수신되는 음파의 도달시간을 보다 정확 히 분석하기 위해서는 웨이브렛 패킷 분석이 효과적이며, 특히 짧은 시간 차를 두고 수신되는 음파의 도달시간을 분석하는데는 기존의 국소 푸리에 변환이나 웨이브렛 변 환보다 우수하다고 할 수 있다.

III. 신호처리 방법 적용 및 분석

3.1. 모의 실험

해양음향 토모그래피 수행시 가장 중요한 요소로 작용 하는 도달시간에 대한 정보의 양이 많을수록 해양매질을 역추정하는데 있어 정확성이 향상된다고 할 수 있다. 수 신기에 도달된 음파는 다중경로에 의해 경로에 따른 도달

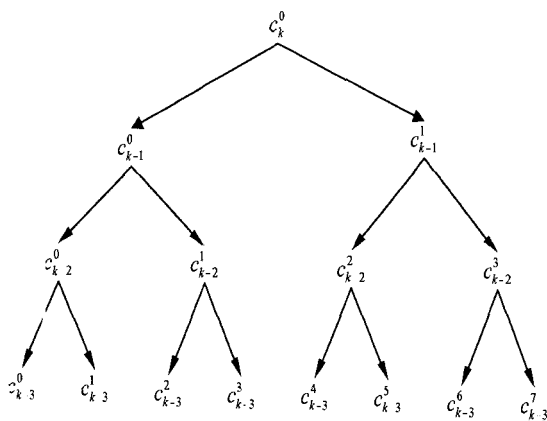


그림 3. 웨이브렛 패킷 분해 과정
Fig. 3. Wavelet packet decomposition process.

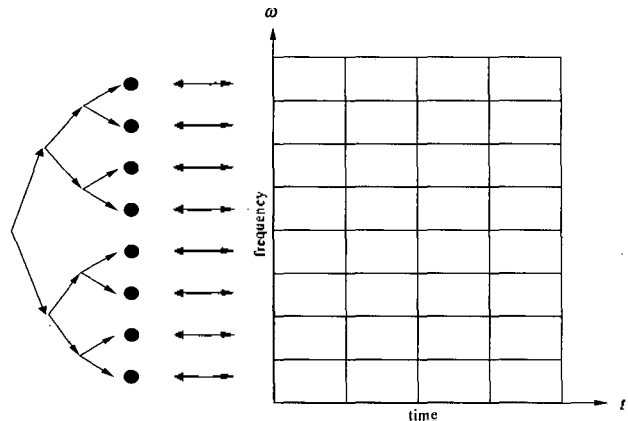


그림 4. 웨이브렛 패킷 트리구조와 시간주파수 영역의 관계
Fig. 4. The relationship between tree structure and time-frequency domain of wavelet packet analysis.

시간차를 갖게 되며, 이를 식별하여 해양음향 토모그래피 방법을 통하여 송신기와 수신기 사이의 물리적 매질 특성을 추정할 수 있다. 따라서 수신된 신호의 각 도달시간을 정밀하게 분석할 필요가 있다. 여기서 도달 신호의 분해도란 경로에 따라 시간차를 갖고 수신기에 도착한 신호를 구별해 낼 수 있는지의 여부를 말한다. 즉, 신호의 분해도가 좋을수록 시간 지연의 차가 작은 고유음선(eigenray)을 찾아낼 수 있는 것이다. 정합 필터 방법에 의한 신호의 분해도는 송신된 신호의 주파수 대역폭에 의해 결정된다.

정합 필터의 성능을 검증하기 위해 채널에 대한 임펄스 응답을 모의하였다. 이때 정확한 도달시간 식별 성능 검증에 위해 잡음은 포함시키지 않았다. 모의 시험에 사용한 신호는 m-계열 신호로서 송신 주파수는 366 Hz이고, 신호의 주파수 대역폭은 45.75 Hz이며, 이때 신호 분해도는 주파수 대역폭의 역수인 약 21.86 ms이다. 모의 시험에서는 실제 동해 해양환경 자료를 이용하여 다중경로를 통한 음파가 수신되도록 하였다 (그림 5). 이때 모의한 수신신호의 상대적인 도달시간은 각각 0.000초, 0.017초, 0.022초와 0.039초였다 (그림 6). 그림 6의 (a)에서 표시된 b와 c의 시간차는 21.86 ms 미만에 해당된다.

그림 6의 (b)는 모의된 수신신호에 대한 정합 필터 적용

결과이다. 여기서 신호 분해도인 밴드폭 이상으로 도달시간이 차이가 나는 수신신호 (그림 6의 (a)에 표시된 a와 e)인 경우 잘 분리되어 도달시간이 명확히 식별되었으나, 수신신호의 도달시간 차이가 밴드폭 미만 (그림 6의 (a)에 표시된 b, c, d)인 경우, 즉 21.86 ms보다 작은 시간차이를 갖는 수신신호는 하나의 수신신호로 나타났다. 따라서 기존의 정합 필터 방법은 밴드폭 이내에 도달되는 수신신호 식별에 제한이 있음을 알 수 있다.

한편, 위에서 언급한 웨이브렛 패킷을 이용하여 수신신호를 처리할 경우 분해된 세부신호들의 정보를 이용하게 되는데, 이 세부신호들은 다중경로를 통하여 수신된 각각의 고유 음선들의 도달 시간의 차이로 인한 위상 변화에 대한 정보를 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 먼저 정합필터를 이용하여 원하는 정보가 있다고 판단되는 시간영역을 결정하고, 이 영역의 계수를 창문함수(window function)를 이용하여 증폭시키고 (그림 8 참조) 나머지 부분의 계수 값들은 "0"으로 하는 방법을 제안하였다. 이는 세부계수 정보를 이용하여 수신신호의 도달 시간차가 적은 부분에 대한 미세한 변화를 보다 명확히 볼 수 있도록 한 것이다. 다음 단계로 선택된 계수들을 이용하여 원 신호로 복원시킨 다음 정합 필터 방법을 적용하였다. 제안한 웨이브렛 패킷 기반의 신호처리 방법으로 모의

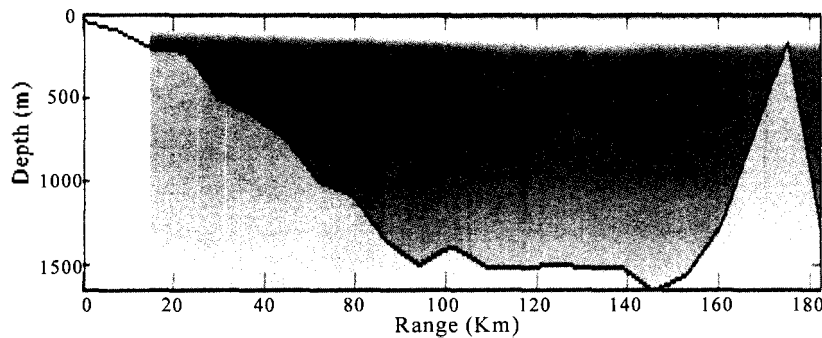


그림 5. 다중경로를 통한 음선 전달
Fig. 5. Ray propagation through the multipath.

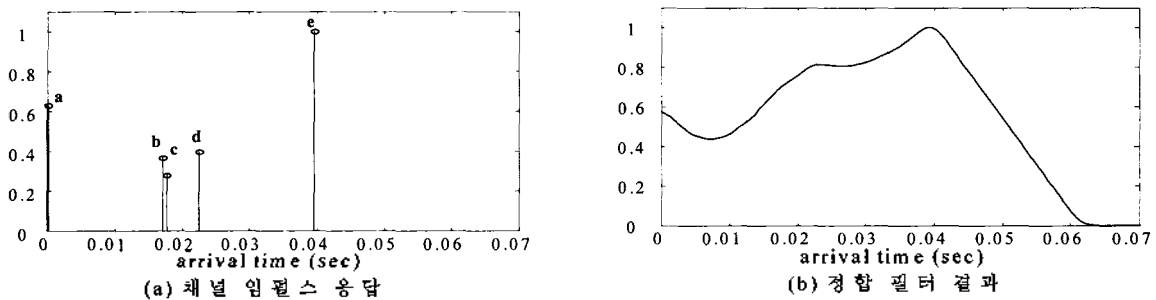


그림 6. 채널 임펄스 응답 모의 및 정합 필터에 의한 식별 결과
Fig. 6. Simulation of channel impulse responses and identification results using matched filter.

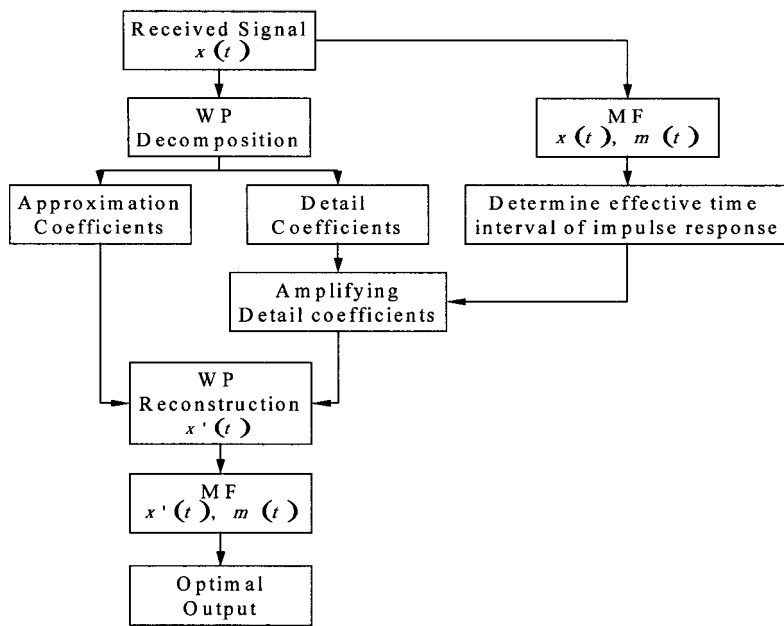


그림 7. 웨이브렛 패킷을 이용한 신호처리 흐름도
 Fig. 7. Schematic view of signal processing by wavelet packet.

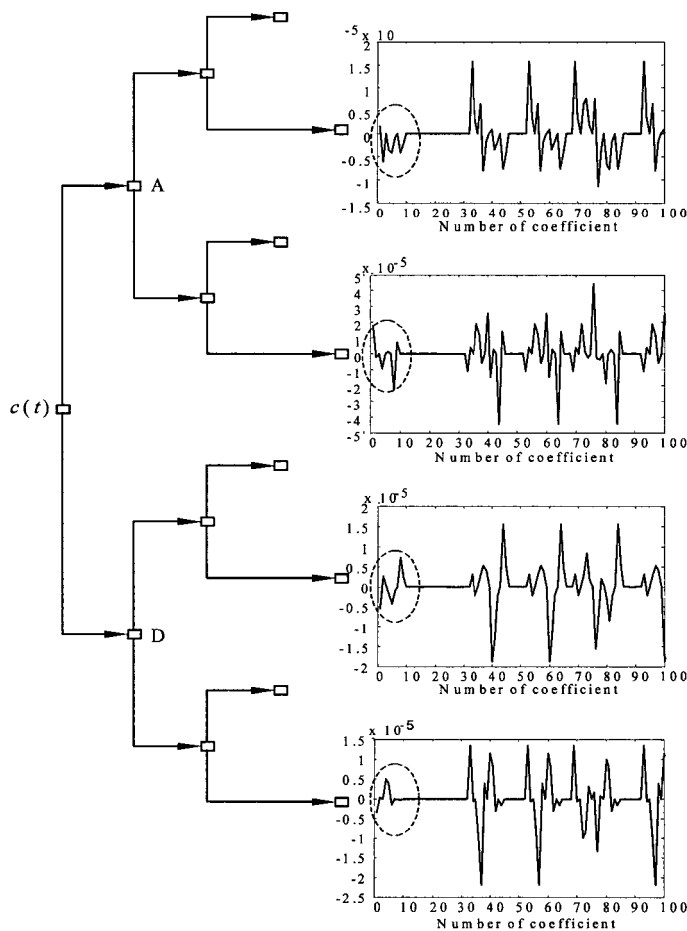
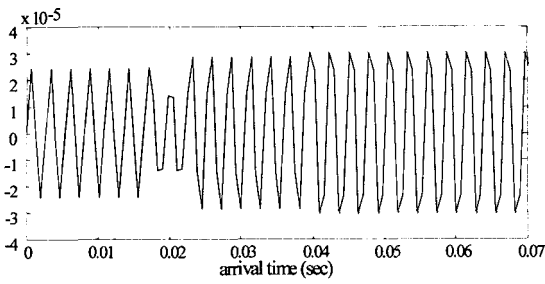
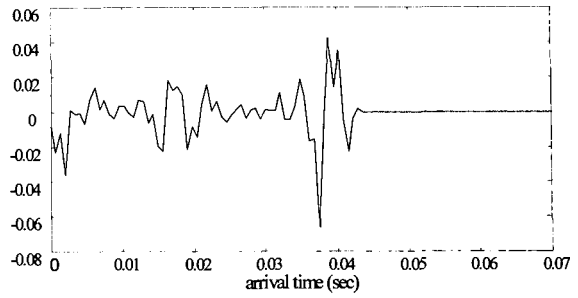


그림 8. 신호 분해 3 단계에서의 세부 계수
 Fig. 8. Detail coefficients on decomposition level 3.



(a) Original signal



(b) Wavelet packet output

그림 9. 원 신호와 웨이블릿 패킷 처리된 신호의 비교

Fig. 9. Comparison between original signal and wavelet packet output.

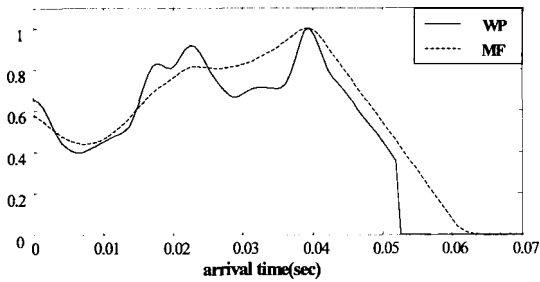


그림 10. 웨이블릿 패킷에 의한 식별 결과 예 1

Fig. 10. Example I: Identification result using wavelet packet.

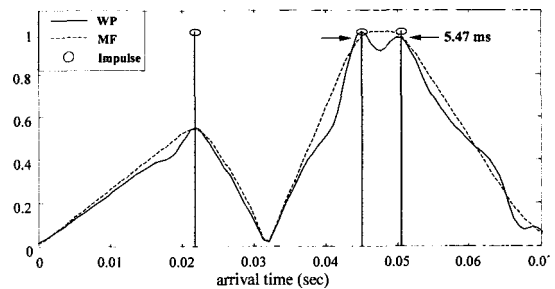


그림 11. 웨이블릿 패킷 최소 식별 간격

Fig. 11. Minimum identification interval with wavelet packet.

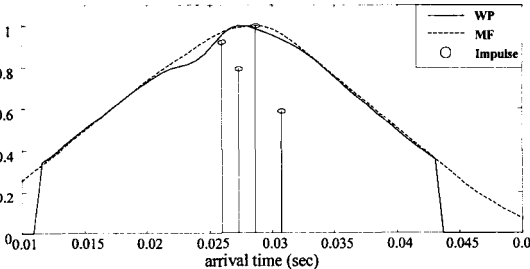


그림 12. 웨이블릿 패킷에 의한 식별 결과 예 2

Fig. 12. Example II: Identification result using wavelet packet.

수신호를 처리한 결과 a, c, d, e 등 4개의 임펄스 응답을 식별하였다(그림 10). 특히 e와 같은 경우는 정합 필터링의 방법을 적용한 결과보다 더 명확하게 식별함을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법의 분해능을 정량적으로 확인하기 위해 수신 신호의 임펄스 응답을 식별하는 모의 실험을 수행하였다. 보다 정량적인 식별시간 간격을 확인하기 위하여 다양한 간격으로 임펄스 응답을 모의하였고, 그 결과 약 5.47 ms 이상의 간격을 가지는 두 임펄스를 식별함을 알 수 있었다(그림 11). 이는 기존의 정합 필터링만을 적용한 결과의 분해능 21.86 ms에 비하면 본 논문에서 제안한 방법이 매우 우수한 분해능을 가짐을 말해준다.

한편 그림 12에서와 같이 임펄스간의 간격이 아주 조밀

한 경우 수신된 신호의 도달시간을 식별하는데 제한이 있음을 알 수 있었다. 이 모의 실험결과가 본 논문의 방법의 분해능의 한계를 보여준다고 할 수 있지만, 이는 수신된 신호의 해상도 또는 샘플링 정도(sampling rate)와도 관련이 있다. 따라서 웨이블릿 패킷을 기반으로 하는 신호처리 방법의 분해능에 대한 이론적인 연구가 필요하다.

3.2. 실측 자료 분석

본 논문에서 사용한 실측 신호는 1999년 10월 20일부터 10월 21일까지 동해 울릉도 부근에서 수신된 신호로서 음원은 동해 북부의 블라디보스톡 부근 해역에 설치하였고, 수신기는 울릉도에서 수 km 위치의 부근 해역에 수직 선배열로 설치하였다. 송신 주파수는 366 Hz를 사용하였으며 신호 대 잡음비를 향상시키기 위하여 $x^9 + x^1 + 1$ 인 특성 다항식과 511 digit인 m-계열을 사용하였다[9]. 신호분석에 사용한 신호는 1999년 10월 20일 울릉도-블라디보스톡간 560 km 구간에서 실시한 해양 음향 토모그래피 신호로서 해수면과 해저면에서의 반사 및 굴절, 위상의 변화 등 다중 경로의 특성을 가진 신호이다(그림 13).

실측 신호에 대하여 정합 필터링과 웨이블릿 패킷의 방법을 적용하여 다중경로 효과를 포함한 도달 형태를 식별하였다. 그 결과 그림 14에서 볼 수 있듯이 정합 필터링 방법을 적용하여 식별한 것에 비해 본 논문에서 제안된

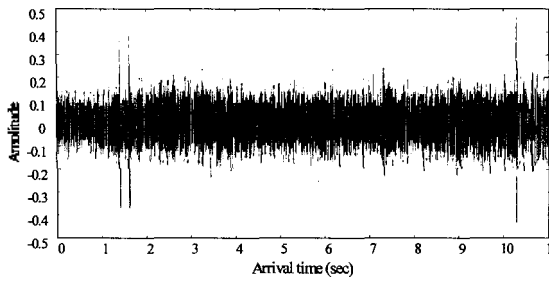
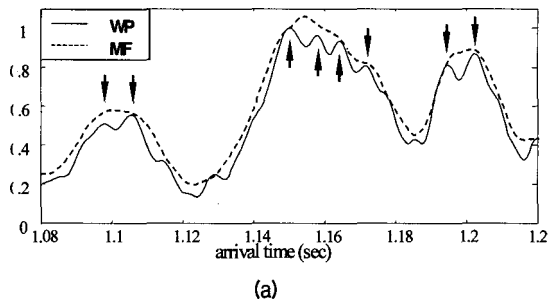
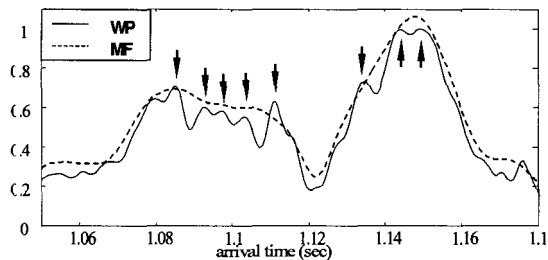


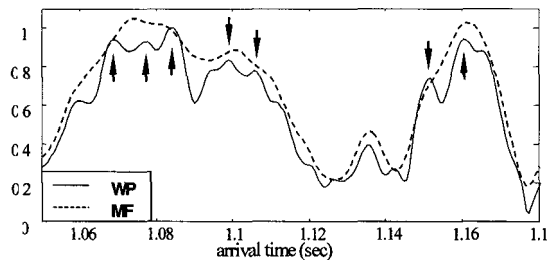
그림 13. 실측 신호 (366 Hz)
Fig. 13. Observed signal (366 Hz).



(a)



(b)



(c)

그림 14. 정합 필터와 웨이브렛 패킷 비교
Fig. 14. Comparison between matched filter and wavelet packet.

웨이브렛 패킷 방법에 의해 처리한 경우가 상대적으로 많은 도달 신호를 식별하였다. 그림 14의 (a), (b), (c)는 동일한 수신기에 서로 다른 시간에 수신된 신호를 처리하여 나타낸 것이다. 그림 14에서 상대적인 상관강도가 0.5 이상인 부분을 식별할 수 있는 신호라 가정하여 화살표로 표시하였다. 그림 14의 (a)에서 정합 필터 방법을 사용한 경우 1.10초 부근에서 1개, 1.15 ~ 1.17초 사이에 약 1개, 1.20초 부근에서 1개 등 총 3개의 도달 시간을 식별하였으

나 웨이브렛 패킷 방법은 각각 2개, 4개, 2개 등 총 8개의 도달 시간을 식별하였다.

또한 그림 14의 (b), (c)와 같은 경우에도 정합 필터 방법을 사용한 경우보다 웨이브렛 패킷 방법을 적용하였을 경우, 보다 많은 도달 시간을 식별할 뿐만 아니라 기존의 식별시간을 시각적으로 보다 명확히 알 수 있도록 하였다. 이러한 차이는 정합 필터 방법에 의한 밴드폭 제한으로 인해, 21.86 ms 이내의 도달 시간차를 가진 여러 개의 도달신호를 식별하는데 있어 제한이 있음을 나타내는 것이다. 물론 이와 같은 실제상황의 실험에서는 다중경로를 거쳐 수신기에 수신된 정확한 도달신호의 수를 알 수는 없기 때문에 분석된 실측 신호 식별 결과로부터 본 논문의 웨이브렛 패킷 방법의 효율성에 대해 정량적으로 판단할 수는 없다. 그러나 모의 신호와 실측 자료에 대하여 웨이브렛 패킷 방법을 적용한 결과를 고려할 때 신호의 전반적인 분해능을 향상시켰다고 판단된다.

IV. 결론 및 토의

해양음향 토모그래피를 수행함에 있어 다중경로에 의한 효과를 포함하고 있는 수신 신호의 도달 시간을 식별하기 위해 정합 필터링과 웨이브렛 패킷 방법을 이용하여 그 식별 성능을 비교 및 분석하였다. 웨이브렛 패킷을 적용함에 있어 수신신호에 대해 정합필터를 이용하여 도달 시간 영역을 설정하며 이 영역의 신호를 웨이브렛 패킷에 의해 분해된 결과로부터 증폭시켜 신호를 재구성하여 도달 시간을 파악하는 방법을 제안하였다. 이를 위한 모의 실험을 통하여 신호의 밴드폭 내에 도달된 2개의 임펄스 응답 식별 능력을 기존의 정합 필터 방법과 본 논문의 웨이브렛 패킷 기반의 신호처리 방법을 적용하여 비교하였다. 또한 실제 실험을 위해서도 동해에서 측정된 토모그래피 수신 신호에 대해 위 두 가지 방법을 적용하여 신호의 해상도 향상 능력을 비교 분석하였다. 위의 두 실험 결과 기존의 정합 필터만을 이용한 방법보다 웨이브렛 패킷을 기반으로 한 방법이 식별 성능이 매우 뛰어난 것을 알 수 있었다. 실제 실험에 있어서 수신된 신호의 정확한 도달 형태를 알 수 없으므로 웨이브렛 패킷을 이용하여 식별한 도달 시간의 정확성에 대해서는 모의 실험의 결과를 통해 정량화할 수 밖에 없으나, 본 논문에서 제안한 웨이브렛 패킷 방법을 이용할 경우 서로 다른 경로로부터 도달된 신호를 보다 정확하게 분리할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 더욱이 해양음향 토모그래피의 음향 모델에

의해 산출된 도달시간과 본 논문의 웨이브렛 패킷 방법을 적용하여 식별된 도달시간과의 비교를 통해 매질을 역추정하는 경우 향상된 결과를 얻을 수 있을 것이라고 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2000년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구 되었음.

참고 문헌

1. T. G. Birdsall and K. Metzger, "Factor inverse matched filtering," *J. Acoust. Soc. Am.*, **79**, 91-99, 1986.
2. R. L. Peterson, R. E. Ziemer, and D. E. Borth, *Introduction to Spread-spectrum Communications*, Chap. 3, 89-148, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
3. W. Munk, P. Worcester, and C. Wunsch, *Ocean Acoustic Tomography*, Chap. 5, 173-221, Cambridge University Press, London, 1995.
4. Andre Quinquis and David Boulinguez, "Multipath Channel Identification with Wavelet Packets," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, **22**, 342-346, 1997.
5. 강현배, 김대경, 서진근, *Wavelet Theory and Its Applications*, **4**, 67-115, 대우학술총서509, 아카넷, 2001.
6. S. G. Mallet, "A theory for multiresolution signal decomposi-

tion: The wavelet presentation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **11**, 674-693, 1989.

7. R. Coifman, Y. Meyer, and M. Wickerhauser, *Wavelet Analysis and Signal Processing*, In *Wavelet and their Applications*, B. Ruskai et al. eds., Jones and Barlett Pub., Boston, 153-178, 1992.
8. M. V. Wickerhauser, *Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software*, A K Peters Wellesley, Massachusetts, 237-272, 1994.
9. 오선택, 나정열, 오택환, 박정수, 나영남, 김영규, "한국 동해에서 토모그래피용 신호를 이용한 음파 도달시간의 시변동성," *한국음향학회지*, **20** (5), 92-99, 2001.

저자 약력

● 오 선 택 (Sun-Taek Oh)
한국음향학회지 제20권 제5호 참조

● 조 환 래 (Hwan-Rae Cho)
1995년 3월: 해군사관학교 해양학과(이학사)
2003년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 대학원(이학석사)
* 주관심분야: 수중음향 신호처리, 해양음향 토모그래피

● 나 정 열 (Jungyul Na)
한국음향학회지 제21권 제8호 참조

● 김 대 경 (Dai-Gyoung Kim)
1983년 2월: 한양대 이학사
1986년 2월: 한양대 이학석사
1994년: 미국 Purdue 대학교 이학박사
현재: 한양대학교 과학기술대학 응용수학과 교수
* 주관심분야: 응용수학, 수치해석학, 웨이브렛 이론 및 응용