

논문 2013-50-9-18

해저지층 탐사를 위한 Schur 알고리즘

(Schur Algorithm for Sub-bottom Profiling)

배진호*, 이종현*, 김회용**, 조정홍**

(Jinho Bae, Chong Hyun Lee[Ⓢ], Hoeyong Kim, and Jung-Hong Cho)

요약

본 논문은 송신신호와 다층의 해수층 및 해저지층으로 구성된 매질의 퇴적물의 배치 및 형태에 의해 반사된 수신 신호를 이용하여 매질 각층의 특성을 계산할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 이종의 다층 매질로 구성되어 있는 해수층 및 해저지층의 구조 특성을 추정하는 것으로, 일반적으로 Schur 알고리즘이라 부른다. 제안된 알고리즘은 주어진 역산란(inverse scattering) 문제를 matrix factorization을 수행하여 효율적으로 매질의 반사계수(reflection coefficient)를 추정한다. 본 논문에서는 제안된 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 해수층 및 해저지층의 이종 다층 매질 구조를 고려한 lattice 필터 모델을 구성하였고, 이 필터 모델로부터 얻어진 송신 및 반사 신호를 이용하여 다양한 컴퓨터 모의실험을 수행한 결과, 제안된 알고리즘이 효율적으로 매질을 추정함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose an algorithm for estimating media characteristics of sea water and subbottom multi-layers. The proposed algorithm for estimating reflection coefficients, uses a transmitted signal and reflected signal obtained from multiple layers of various shape and structure, and the algorithm is called Schur algorithm. The algorithm is efficient in estimating the reflection coefficients since it finds solution by converting the given inverse scattering problem into matrix factorization. To verify the proposed algorithm, we generate a transmit signal and reflected signal obtained from lattice filter model for sea water and subbottom of multi-level non-homogeneous layers, and then find that the proposed algorithm can estimate reflection coefficients efficiently.

Keywords: Schur 알고리즘, 역산란, 반사계수, 해저지층

I. 서론

해저지층탐사는 송신된 음파 신호와 해수층과 해저지층의 퇴적물의 배치 형태에 따라 반사되어 수신된 음파 신호를 이용하여 해저지층의 특징을 가시화 하는 기술이다^[1]. 해저지층탐사를 위해 일반적으로 송신 신호는

burst, ricker pulse, 그리고 chirp 신호등이 사용된다. 이중 고해상도의 신호를 얻기 위한 chirp sonar는 LeBlanc과 Mayer 연구진에 의해 chirp sonar 시스템이 개발된 후 해저 지형의 표층 및 매질물 탐지, 퇴적물의 특성 분석 등 다양한 분야에서 응용 연구되고 있다^[2]. 해저면은 다양한 형태의 퇴적물과 암반 등 각기 다른 물성(밀도, 속도, 감쇠 계수, 반사 계수 등)을 갖는 구성물로 이루어져 있다. 그리고 퇴적층에 따른 물성차이는 해저지층탐사장비에 각기 다른 산란 신호로 측정된다. 따라서 수신된 산란 신호로부터 퇴적물의 물성에 따른 임피던스, 감쇠 계수, 그리고 반사 계수 등을 추정할 수 있다. 이러한 지질음향 역산란기법은 음향학, 지질음향학 그리고 지구물리 탐사 분야에서 확률적 접근, 최적화, 패턴인식, 특이값 분해 (SVD), layer peeling 등 다

* 정회원, 제주대학교 해양시스템공학과
(Dept. of Ocean System Engineering, Jeju Nat'l University)

** 정회원, 한화(주)
(Hanwha Corp., Gumi)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: chonglee@jejunu.ac.kr)

※ 이 논문은 2013년 (주)한화의 지원으로 수행한 “파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 기술 연구”의 결과임.

접수일자: 2013년5월8일, 수정완료일: 2013년8월23일

양한 연구방법으로 연구되고 있다^[1~4]. 특히 일반적인 지층의 분석은 공진 주파수로 변조된 수신소나 신호에 포락선 검파를 하여 반사된 신호의 위치를 구분하기 때문에 소나의 펄스폭에 따른 거리 해상도의 한계가 존재한다^[1~2]. 이러한 거리해상도를 극복하기 위해 본 논문은 layer peeling 방법인 Schur 알고리즘을 사용하여 샘플링 시간의 해상도로 지층은 변화 특성을 계산할 수 있는 방법을 제시 한다^[5~6]. 또한 해수층과 해저지층의 이론적인 모델을 통해 반사계수를 분석한다.

Schur 알고리즘은 1917년 I. Schur에 의해 power series가 unit circle이내의 범위로 제한되는지에 대한 특성을 조사하는 알고리즘으로 제시되었다^[6]. 이렇게 제시된 알고리즘은 공학 분야의 multirate 신호처리^[7~8], 역 산란 문제^[5], 음성 신호처리^[9], 광 산란 필터^[10], 지층 profiling^[9], 그리고 해수의 음향속도 profiling^[4]과 같은 다양한 문제들에 적용되었다. 특히 Schur 알고리즘은 해수층과 해저지층의 다층 매질을 모델화 할 수 있는 lattice 필터 구조의 반사계수를 빠르고 쉽게 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. lattice 필터 구조는 다양한 신호처리 및 역산란 매질의 모델링의 적용에 적당한 구조를 가졌으며, 고정된 wordlength의 수행에서 낮은 roundoff 잡음 특성과 양자화 잡음에 민감하지 않다는 특성을 갖는 장점이 있다^[11].

본 논문에서는 lattice 필터 구조로 해수층과 해저지층의 모델화 하여 송수신 신호를 합성하는 방법을 제시 하며, 합성된 데이터로 부터 Schur 알고리즘을 이용하여 해수층과 해저지층의 매질 특성인 반사계수의 변화를 찾는 알고리즘을 제시한다. 그리고 II장에는 lattice 필터 구조로 해수층과 해저지층을 모델링하여 송수신 신호를 합성하는 방법을 제시하며, III장에는 합성된 데이터로 부터 해수층과 해저지층의 매질 특성인 반사계수의 변화를 추정하는 Schur 알고리즘을 설명한다. IV장에는 해수층과 해저지층의 전달특성을 이론적으로 모델링하여 송수신 데이터를 합성하여 Schur 알고리즘을 검증하고 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 해수 및 해저지층을 위한 Lattice 필터 모델

역산란 현상은 그림 1(a)과 같이 손실이 없는 서로 다른 매질의 특성을 갖는 두층을 고려할 때, "1"을 수직으로 입사하였을 때 반사계수에 따라 일부에너지는 $R = r_1$ 만큼 반사되고 나머지는 $T = \sqrt{1-r_1^2}$

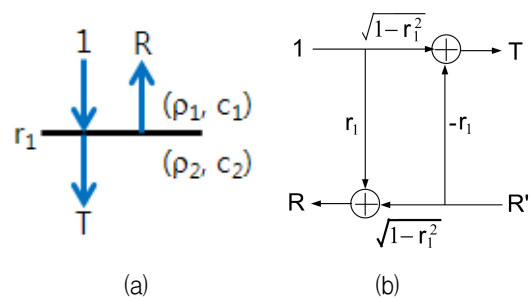


그림 1. (a) 두 개의 서로 다른 층간의 반사 및 투과 현상(b) 등가 lattice 필터 모델
Fig. 1 (a) Reflection and transmission in two layered media (b) Equivalent lattice filter model.

만큼 투과 되는 현상을 말한다^[5]. 이러한 현상은 그림 1(b)와 같이 lattice 필터 구조로 모델링 된다^[12]. 여기서 ρ 는 매질의 밀도를 나타내고, c 는 매질의 음파속도를 말하며, 이를 이용하여 아래 식 (1)과 같이 반사계수를 계산할 수 있다.

$$r_1 = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (1)$$

그림 1과 같은 산란현상의 수학적 모델은 아래 식 (2)와 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다^[12]. 여기서 $t_1 = \sqrt{1-r_1^2}$ 은 투과계수라고 하고, 이는 에너지 보존의 법칙을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1} \begin{bmatrix} 1 & r_1 \\ r_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ R' \end{bmatrix} \quad (2)$$

만약 매질이 그림 2(a)와 같이 일정한 시간지연을 가진 $N+1$ 층으로 변한다고 가정하면, 각 매질은 그림 2(b)와 같이 lattice 구조로 모델링을 할 수 있다. 그리고 식 (2)을 이용해 식 (3)과 같은 행렬식으로 확장할 수 있다^[13~15].

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\prod_{i=0}^N t_i} \begin{bmatrix} 1 & r_0 \\ r_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z^{1/2} & 0 \\ 0 & z^{-1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & r_1 \\ r_1 & 1 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} z^{1/2} & 0 \\ 0 & z^{-1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & r_N \\ r_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{N+1} \\ V_{N+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $z^{1/2} = \exp(j\omega \frac{\tau}{2})$ 는 디지털신호처리의 개념으로 시간지연 τ 와 각주파수 ω 에 의해 계산되는 단위 시간지연(unit delay)이다^[6, 10, 13].

식 (3)에서 U_i 와 V_i 는 i 층에서의 송신 및 수신된 시계열 신호이며, 각 층에서의 송신 및 수신 신호의 시간지연

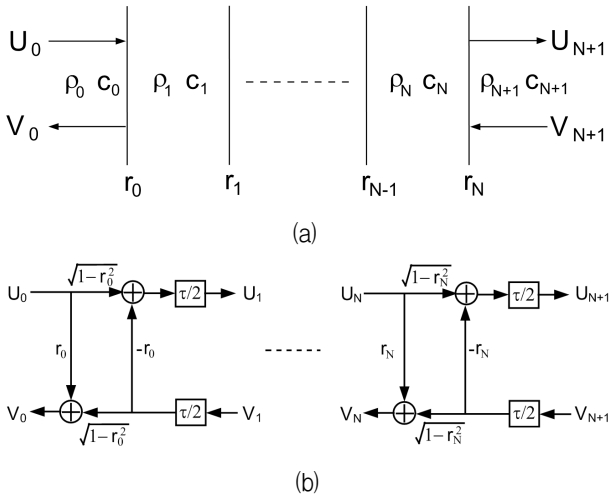


그림 2. (a) N+1개의 다층매질 (b) 등가 lattice 필터 모델
Fig. 2. (a) (N+1) Multi-layered media
(b) Equivalent Lattice model.

은 $\tau/2$ 이다. 이 시간지연 $\tau/2$ 은 수신 시계열 신호의 샘플링 시간의 반이며, 이것은 신호가 송신되고 반사되는 시간을 모두 포함하는 의미이다. 또한 샘플링 시계열 신호의 개수가 N일 때 매질의 층은 N+1로 가정하여 lattice 구조로 구성된다. 결과적으로, 다층 모델의 송수신 신호는 그림 2의 모델에 따라 식 (3)을 이용하여 다층 매질에 입력 시계열 신호 $U_0 = \{u_0, u_1, \dots\}^T$ 가 입사 할 때 반사 시계열 신호 $V_0 = \{v_0, v_1, \dots\}^T$ 를 얻어 구한다.

그림 2에서 보인 다층 구조의 해수층 및 해저지층에 따른 매질의 변화는 수신 데이터 취득의 샘플링에 따라 변화한다. 우선, 그림 3과 같이 두 개의 서로 다른 층이 결합된 매질을 고려하고 두 개의 층의 속도가 c 로 같고, 반사계수가 r 이고, 송신센서 (Tx)를 통해 임펄스 신호 “1”이 전송되며, 수신센서 (Rx)에서 샘플링 시간 t_s , 송신 및 수신 센서와 경계면 사이의 거리는 $d = ct$ 라고 가정하면, 만약 샘플링 시간이 $t = Nt_s$ 일 때 N개의 가상층 (virtual layer)이 부가된 다층 모델로 변화된다. 즉, 만약 샘플링 시간이 $t_s = t$ 이고 3개의 데이터를 취득할 때 송신신호와 수신신호는 $U_0 = \{1, 0, 0\}^T$ 와 $V_0 = \{0, r, 0\}^T$ 를 얻는다. 그리고 $t_s = t/2$ 일 때는 $U_0 = \{1, 0, 0, 0, 0\}^T$ 와 $V_0 = \{0, 0, r, 0, 0\}^T$ 를 얻는다. 이러한 과정에 의해 매질이 정해진 해수층 및 해저지층 lattice 필터 모델의 경우에 음속은 이미 정해져 있기 때문에, 가상층의 수는 샘플링 시간에 따라서 결정되게 된다.

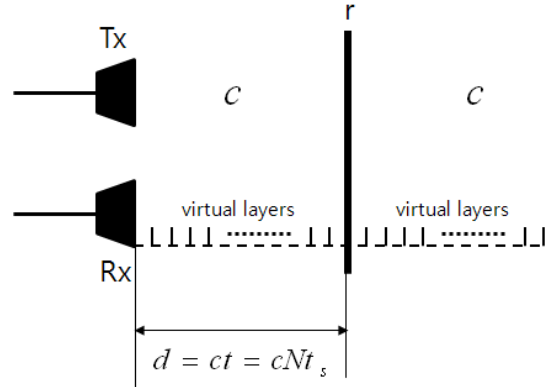


그림 3. 송수신 데이터 측정에 따른 매질의 가상 층 변화

Fig. 3 Variation of virtual layers according to the measured transmission and reflection data.

III. 제안된 Schur 알고리즘

그림 2에서 얻은 송신과 수신 시계열 신호로부터 에너지 보존의 법칙을 만족하는 autocorrelation 행렬을 식 (4)와 같이 구성하여 원하는 행렬 T_A 를 계산한다. T_A 행렬은 Toeplitz 행렬로 positive definite를 만족해야한다^[6].

$$T_A = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & \dots & 0 \\ u_1 & u_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & u_1 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 & u_0 & \dots & \dots \\ 0 & u_0 & u_1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & u_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$- \begin{bmatrix} v_0 & 0 & \dots & 0 \\ v_1 & v_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & v_1 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 & v_0 & \dots & \dots \\ 0 & v_0 & v_1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & v_0 \end{bmatrix}$$

Schur 알고리즘은 일반적으로 주어진 식 (4)의 T_A 행렬을 고속으로 Cholesky 분해하여 $T_A = LL^T$ 로 계산하는 알고리즘이다. 여기서 L 은 하부삼각행렬(lower triangular matrix)이고, T 는 행렬의 전치(transpose)라고 한다. 행렬 T_A 는 Toeplitz 행렬의 형태로 아래의 식 (5)와 같이 생성 행렬인 $G_0 = [U_0 \ V_0]$ 로 나타낼 수 있다.

$$T_A - ST_A S^T = G_0 J G_0^T \quad (5)$$

식 (5)에서 S 와 J 는 아래와 같이 정의된 천이행렬과 J-unitary 행렬이다.

$$S = \begin{bmatrix} 00 & \cdots & 0 \\ 10 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

이렇게 만들어진 행렬 G_0 를 이용하여 아래와 같이 Schur 알고리즘을 이용하여 반사계수를 계산한다. 아래에 정리된 Schur 알고리즘은 식 (3)으로부터 바로 반사되는 신호로부터 반사계수를 찾아 하나씩 경계면을 제거하고, 다시 반사계수를 구하는 방식이다. 우선 r_0 는 첫 번째 송신신호와 첫 번째로 취득한 수신신호의 비로, 이것을 이용하여 역행렬을 구하여 다음 식 (7)과 같이 첫 번째 경계면을 제거한다. 그리고 시간지연에 따른 신호가 이동한 매질을 제거하고, 다음 경계면을 제거하는 방법으로 반사계수를 계산하는 방법이 아래에 정리된 Schur 알고리즘으로 샘플 시간에 의해 계산되는 거리 단위로 매질을 분석할 수 있다.

$$\frac{1}{t_0} \begin{bmatrix} 1 & -r_0 \\ -r_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\prod_{i=1}^N t_i} \begin{bmatrix} z^{1/2} & 0 \\ 0 & z^{-1/2} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} 1 & r_N \\ r_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{N+1} \\ V_{N+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Schur Algorithm^[6,13-15]

i) Generator matrix G_0 의 첫 번째 열로부터 반사계수 $r_0 = v_0/u_0$ 를 구한 후에 다음과 같이 hyperbolic rotation matrix를 계산한다.

$$\Gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1-r_0^2}} \begin{bmatrix} 1 & -r_0 \\ -r_0 & 1 \end{bmatrix}$$

ii) $G_0\Gamma_0$ 를 계산한다.

$$G_1 = G_0\Gamma_0 = \begin{bmatrix} \sqrt{1-r_0^2} & 0 \\ u_1' & v_1' \\ u_2' & v_2' \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

iii) 위 계산이 끝나면 시간 지연 성분인 τ 을 제거하는 방법으로 식 (3)을 볼 때 G_1 의 첫 번째 행은 반 열을 내리고, G_1 의 두 번째 행은 반 열을 올리는 방식이다. 그러나 본 논문에서는 G_1 의 첫 번째 행의 한 열을 밑으로 내리는 방법을 사용하여 시간지연을 동시에 제거한다. 그리고 아래와

같이 G_1 의 두 번째 열로부터 $r_1 = n_1'/\sqrt{1-r_0^2}$ 을 구한 후에 Γ_1 을 구한다.

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \sqrt{1-r_0^2} & v_1' \\ u_1' & v_2' \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_1 = \frac{1}{\sqrt{1-r_1^2}} \begin{bmatrix} 1 & -r_1 \\ -r_1 & 1 \end{bmatrix}$$

iv) (iii)의 계산이 끝나면 (ii)와 (iii)의 계산을 마지막 열까지 반복하여 시행 한다

위에 설명한 것과 같이 Schur 알고리즘을 이용하여 알고 있는 송신신호 U_0 와 수신신호 V_0 로부터 반사계수 $\{r_0, r_1, \dots\}$ 를 계산 할 수 있다. 그리고 각 $G_i, i = 0, 1, 2, \dots$ 의 첫 번째 열 (column) 벡터를 순차적으로 나열하여 행렬을 만들면 L 행렬이 만들어지며 이 행렬의 대각선 (diagonal) 성분은 $\sqrt{1-r_i^2}$ 이므로 허수가 나오면 Cholesky 분해가 수행이 안 되므로 송신 및 수신신호로 만들어진 행렬 T_d 가 positive definite 해야 하는 조건을 만족해야 한다.

IV. 해저지층 모델 및 분석

1. 해수층 및 해저지층 모델

본 절에서는 그림 4(a)과 같이 해수층과 해저지층을 고려하여 lattice 모델로 송신 및 수신 시계열 신호를 얻는다. 해수층은 그림 4(b)와 4(c)와 같이 온도 및 염분의 변화를 갖고 깊이는 120m라고 가정한다^[3]. 이러한 온도와 염분 변화로 해수층의 음파속도를 아래와 같은 식 (8)와 같이 계산 할 수 있다^[16].

$$c(Z_d) = 1449 + 4.6 T_p - 0.055 T_p^2 + 0.0003 T_p^3 + (1.39 - 0.012 T_p)(S - 35) + 0.017 Z_d \quad (8)$$

여기서 T_p 는 수온 (°C), S 는 염분 (PSU) 그리고 Z_d 는 깊이 (m)이다. 이렇게 계산된 해수층의 음파속도는 그림 5와 같다. 그리고 해수층의 밀도는 1000 kg/m³라고 가정한다.

그림 4에서 해저 지층의 음파속도와 밀도는 여러 층으로 변화한다고 가정한다. 우선 [가]층은 120m부터 123.7m까지 음파속도는 1600m/s라고 가정하고, 밀도는

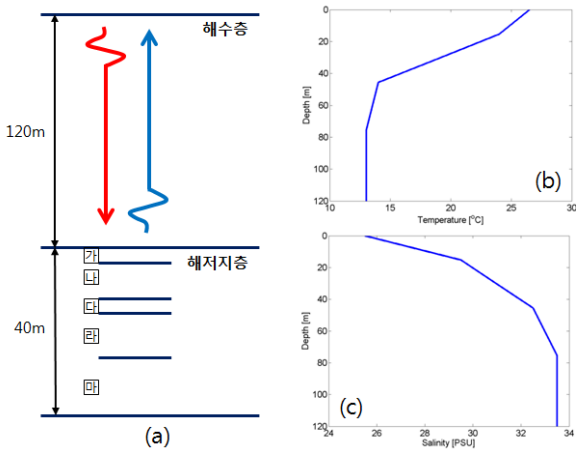


그림 4. (a) 해수층과 해저지층 (b) 해수층의 온도분포 (c) 해수층의 염분분포
 Fig. 4. (a) Sea water and subbottom layer (b) Temperature profile of sea water (c) Salinity profile of sea water.

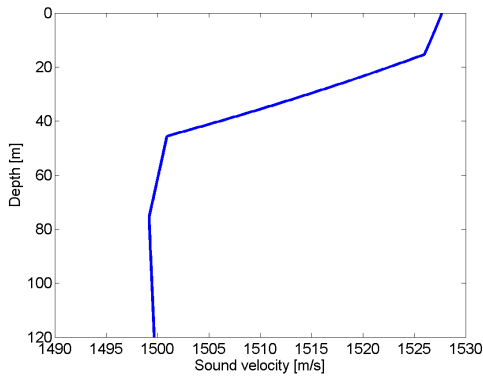


그림 5. 해수층의 음파속도
 Fig. 5. Sound velocity profile of sea water.

1000 kg/m³부터 1300 kg/m³까지 선형으로 변화한다고 가정한다. [나]층은 123.7m부터 128.5m까지 음파속도는 1600m/s라고 가정하고, 밀도는 1300 kg/m³라고 가정한다. [다]층은 128.5m부터 132m까지 음파속도는 1725m/s라고 가정하고, 밀도는 1300 kg/m³부터 1800 kg/m³까지 선형으로 변화한다고 가정한다. [라]층은 132m부터 135.4m까지 음파속도는 1725m/s라고 가정하고, 밀도는 1800 kg/m³라고 가정한다. 마지막 층인 [마]층은 135.4m부터 159.6m까지 음파속도는 2200m/s라고 가정하고, 밀도는 2000 kg/m³이라고 가정한다.

식 (1)에 그림 6의 음파속도와 밀도를 넣어 계산하면 그림 7과 같이 반사계수를 구할 수 있다. 여기서 얻은 반사계수는 깊이 방향으로 0.1ms 단위로 나누어 계산하였으며 총 반사계수의 개수는 1000개이다. 또한 그림 7의 계산된 매우 작은 반사계수를 보면 해수층은 매질이

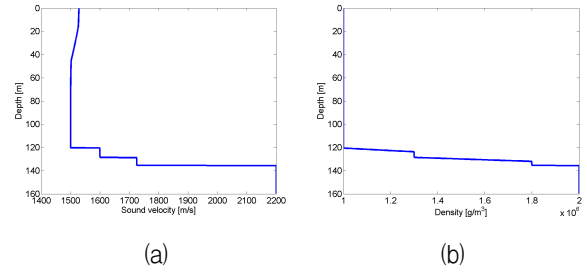


그림 6. 해수층과 해저지층의 (a) 음파속도 (b) 밀도 분포
 Fig. 6. (a) Sound velocity profile and (b) density profile of sea water and subbottom layer.

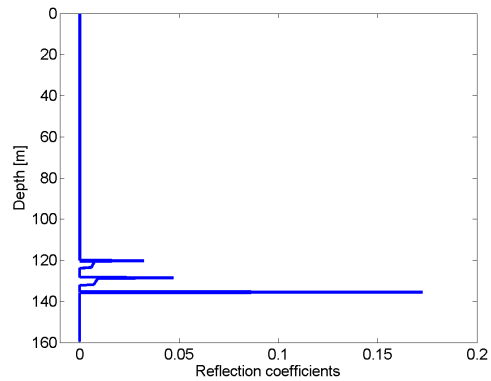


그림 7. 반사계수
 Fig. 7. Reflection coefficients.

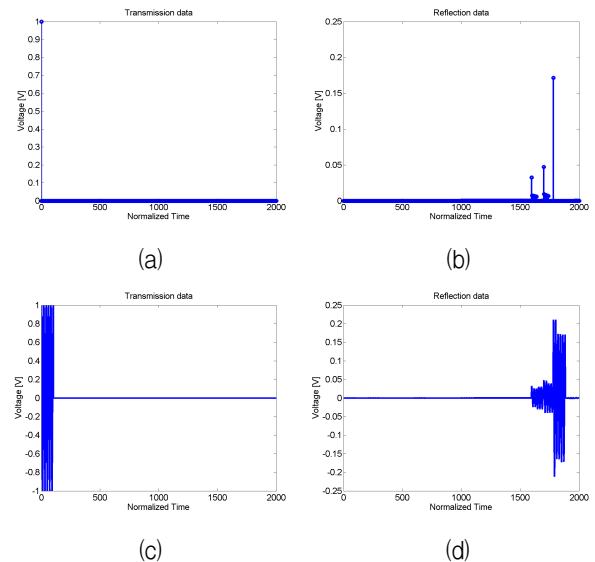


그림 8. (a) 송신 임펄스 신호 (b) 수신 임펄스 신호 (c) 송신 정현파 신호 (d) 수신 정현파 신호
 Fig. 8. (a) Transmitted impulse signal (b) Reflected impulse signal (c) Transmitted sinusoidal signal (d) Reflected sinusoidal signal.

매우 천천히 변화함을 알 수 있고 해저지층의 변화에 비해 무시할만한 반사계수를 갖는다고 가정할 수 있다.

이렇게 계산된 반사계수를 이용하여 그림 2의 lattice 모델에 그림 8(a)와 8(c)와 같은 송신 신호를 입사 시키면 그림 8(b)와 8(d)와 같이 수신 신호를 얻을 수 있다. 여기서 샘플링 시간 (ΔT)라고 0.1ms 놓으면 반사되어 돌아오는 시간까지 고려하여 계산된 송신과 수신 시계열 신호의 샘플 개수는 2000개가 된다.

2. 해수층 및 해저지층 분석

그림 8(b)와 8(d)를 보면 해수층에서 반사된 신호는 무시할 정도로 매우 작다. 그래서 일반적인 해수의 속도를 표현할 수 있는 Munk 음파속도 모델을 이용하여 5000 미터 깊이까지 해수층의 반사계수의 변화를 계산하였다. 우선 Munk 음파속도 모델 식은 아래 식 (9)과 같다^[17].

$$C(Z_d) = 1500 [1 + 0.00737(\tilde{z} - 1 + e^{-\tilde{z}})] \quad (9)$$

여기서 \tilde{z} 는 아래의 식 (10)과 같다.

$$\tilde{z} = \frac{2(Z_d - 1300)}{1300} \quad (10)$$

식 (9)을 이용하여 0.1m 단위로 계산된 5000m까지 해수층의 음파속도는 그림 9와 같다. 그리고 해수층의 밀도는 1000 kg/m³라고 가정할 때 계산된 반사계수는 그림 10와 같다. 그림 10(a)는 반사계수의 최대 및 최소 변화량인 ± 1 구간에서 보였으며 그림 10(b)는 반사계수의 변화를 상세히 보기 위해 반사계수 축에서 확대해 보인 그림이다. 이 그림으로 볼 때 해수층의 매질변화^[8~19]에 따른 반사계수는 10^{-6} 의 변화로 해저지층의 변화에 비해 매우 작은 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 8(a)의 송신신호는 임펄스를 사용했을 경우 그

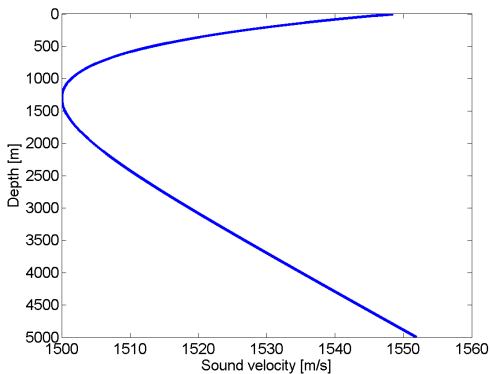


그림 9. Munk 모델로 계산된 음파속도
Fig. 9. Sound velocity by Munk model.

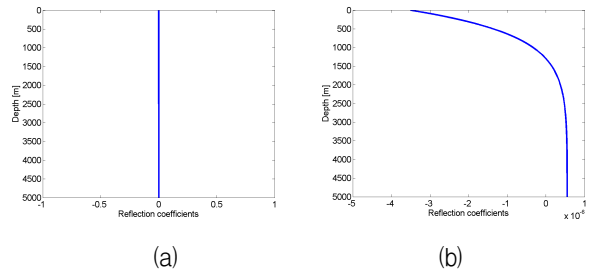


그림 10. (a) 반사계수 (b) 확대된 반사계수
Fig. 10. (a) Reflection coefficients (b) Zoomed reflection coefficients.

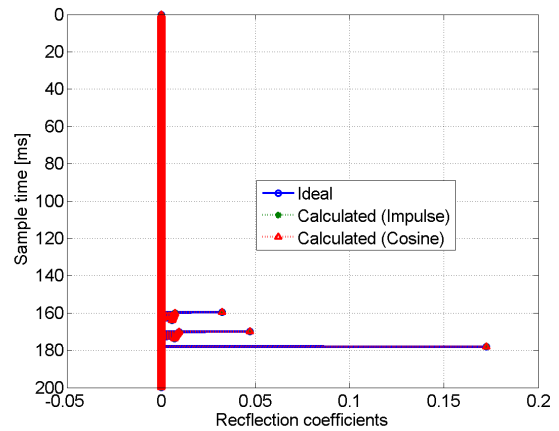


그림 11. 추정된 반사계수
Fig. 11. The estimated reflection coefficients.

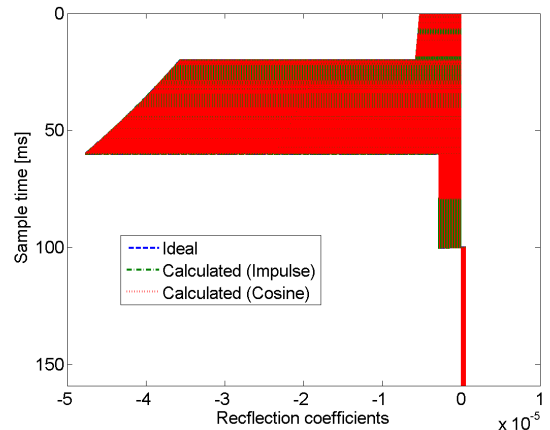


그림 12. 추정된 해수층의 반사계수
Fig. 12. The estimated reflection coefficients in sea water layer.

그림 8(b)와 같이 수신신호는 각 층을 구분할 수 있다. 그러나 그림 8(c)와 같이 일반적인 지층탐사 장비와 같이 공진 주파수가 500Hz인 코사인함수 5주기를 갖는 송신 신호로 가정할 때 수신신호를 포락선 검파하여 반사된 위치를 구분하는 방식을 이용한 거리 해상도만을 고려하는 경우에는 그림 8(d)와 같이 지층의 변화를 구분

하기 매우 어렵다. 이렇게 구분하기 힘든 수신신호에서 정확하게 매질의 변화를 계산할 수 있는 방법이 Schur 알고리즘이고 이를 이용하여 반사계수를 계산하면 그림 11과 같이 정확하게 매질의 특성을 파악할 수 있다. 만약 모든 신호가 손실이 없다고 가정 하면, 계산된 반사계수는 그림 8(a)와 8(b) 또는 그림 8(c)와 8(d)의 어느 송수신 시계열 신호를 사용하여도 같은 결과를 얻는다. 그림 12는 해수층의 반사계수만 확대해 그린 것으로 해저지층에 비해 추정 오차가 10^{-5} 정도이기 때문에 무시할 만큼 작음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 해수층 및 해저지층의 다층으로 구성된 매질의 특성인 반사계수에 lattice 모델을 이용하여 송수신 시계열 신호를 생성하였으며, 생성된 송수신 신호를 이용하여 매질의 특성을 파악할 수 있는 알고리즘으로 Schur 알고리즘을 제안하였다. 그리고 제안된 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 이중 매질로 구성된 해수층 및 해저지층을 위한 다층 구조를 고려한 lattice 필터 모델로부터 송신과 반사 신호를 계산하는 다양한 컴퓨터 모의실험을 수행한 결과 제안된 알고리즘이 효율적으로 매질을 추정함을 확인하였다. 그 결과 해수층은 해저지층에 비해 매우 천천히 변화하는 매질로 반사계수는 매우 작은 값을 가지며 상대적으로 반사계수 추정 모델에서 무시할 수 있음을 확인하였다. 또한 제안된 알고리즘은 일반적으로 반사 위치를 추정하기 위해 사용되는 포락선 검파를 이용하여 구한 소나의 거리 해상도만 고려한 경우 구분이 안 되는 매질도 정확하게 샘플 데이터 단위로 반사계수를 찾을 수 있음을 검증하였다. 그러나 본 논문에서 제안된 알고리즘은 송신과 수신신호로 만든 행렬 T_A 가 positive definite 이어야 한다는 조건을 가지고 있으며, 향후 실제 측정된 데이터로 만든 행렬 T_A 의 경우에도 항상 positive definite 조건을 유지할 수 있는 알고리즘 개발이 향후 연구과제이다.

REFERENCES

[1] X. Lurton, An Introduction to Underwater Acoustics Principles and Applications, Springer, Chichester, 2002.
 [2] M. Tolsma, Model-based, Acoustic Subbottom

Classification, M. Tolsma, 2004.
 [3] S. Rakotonarivo, M. Legris, R. Desmare, J. Sessarego, and J. Bourillet, "Forward Modeling for Marine Sediment Characterization Using Chirp Sonars," *Geophysics*, Vol. 76, no. 4, pp. T91-T99, 2011.
 [4] H. Schwetlick, "Inverse methods in the reconstruction of acoustical impedance profiles," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 73, no. 4, pp. 754-760, 1983.
 [5] A. M. Bruckstein and T. Kailath, "Inverse scattering for discrete transmission-line models," *SIAM Review*, Vol. 29, no. 3, pp. 359-389, 1987.
 [6] T. Kailath, "Signal processing applications of some moment problems," in *Proc. Symp. Appl. Math.*, Vol. 37, pp. 71-109, 1987.
 [7] M. Vetterli, "A theory of multirate filter banks," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-35, no. 3, pp. 356-372, 1987.
 [8] P. P. Vaidyanathan, *Multirate Systems and Filter Banks*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
 [9] J. D. Markel and A. H. Gray, Jr., *Linear Prediction of Speech*, Springer-Verlag, New York, 1976.
 [10] E. M. Dowling and D. L. MacFarlane, "Lightwave lattice filters for optically multiplexed communication systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 471-486, 1994.
 [11] S. T. Alexander, *Adaptive Signal Processing Theory and Applications*, Springer-Verlag, New York, 1986.
 [12] S. J. Orfanidis, *Optimum Signal Processing: An Introduction*, McGraw-Hill, New York, 1988.
 [13] J. Bae, J. Chun, and T. Kailath, "The Schur Algorithm applied to the Design of Optical Multi-Mirror Structures," *Numer. Linear Algebra Appl.*, Vol. 12, pp. 283-292, 2005.
 [14] J. Bae, "The block Schur algorithm for designing optical multi-layered structures," *Opt. Commun.*, vol. 272, pp. 40-43, 2007.
 [15] Y. Choi, J. Chun, and J. Bae, "Numerically extrapolated discrete layer-peeling algorithm for synthesis of nonuniform fiber Bragg gratings," *Optics Express*, Vol. 19, no. 9, pp. 8254-8266, 2011.
 [16] M. Kalmbach, Estimation of the Ocean Sound Velocity Profile, <http://ebookbrowse.com/estimation-of-the-ocean-sound-velocity-profile-pdf-d88393698>, 2011.
 [17] R. Soheilifar, A. M. Arasteh, J. Rasekhi, and A.

G. Urimi, "A Computer Simulation of Underwater Sound Propagation Based on the Method of Parabolic Equations," Applied Computing Conference (ACC '08), pp. 91-97, Istanbul, Turkey, May 2008.

- [18] 복태훈, 김주호, 이종현, 배진호, 팽동국, 방익찬, 이종길 "제주도 서부 해역의 저염수층을 고려한 수중통신 성능," 전자공학회논문지-TC, 제48권, TC편 제1호, 16-24쪽, 2011년
- [19] 김주호, 복태훈, 배진호, 팽동국, 이종현, 김성일, "서해상에서의 계절에 따른 통신 성능분석," 전자공학회논문지-TC, 제48권, TC편 제1호, 9-15쪽, 2011년

— 저 자 소 개 —



배진호(정회원)
1993년 아주대학교 전자공학과 학사 졸업.
1996년 KAIST 정보통신공학과 석사 졸업.
2001년 KAIST 전자전산학과 박사 졸업.

1993년~2002년 대양전기공업(주) 기술연구소 실장
2002년~2002년 KAIST BK21 초빙 교수
2006년~2007년 Texas A&M 방문 교수
2002년~현재 제주대학교 해양시스템공학과 부교수
<주관심분야 : 광신호처리 및 통신, 레이더 및 소나 신호처리, 항해 시스템>



이종현(정회원)-교신저자
1985년 한양대학교 전자공학과 학사 졸업.
1987년 Michigan Technological University 석사 졸업.
2002년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사 졸업.

1990년~1995년 한국전자통신연구원 선임연구원
2000년~2002년 (주) KM Telecom 연구소장
2003년~2006년 서경대학교 전자공학과 전임강사
2006년~현재 제주대학교 해양시스템공학과 부교수
<주관심분야 : 통계학적 신호처리, 적응 배열 시스템, 수중 및 이동 통신, UWB 무선전송기술>



김희용(정회원)
2005년 영남대학교 기계공학부 학사 졸업.
2007년 경북대학교 기계공학과 석사 졸업.
2012년 경북대학교 기계공학과 박사 졸업.

2013년~현재 (주)한화 선임연구원
<주관심분야 : 음향/초음파 트랜스듀서, 수중음향>



조정흥(정회원)
2005년 한국해양대학교 해양건설공학과 학사 졸업.
2007년 한국해양대학교 해양공학과 석사 졸업.
2011년 한국해양대학교 해양공학과 박사 졸업.

2011년~2013년 한국해양대학교 수중운동체 특화 연구센터 전임연구원
2013년~현재 (주)한화 선임연구원
<주관심분야 : 수중음향, 소나성능분석, 수중음향 신호처리>