

낮은 계수 근사법을 이용한 표준 잔향음 신호 획득 및 제거 기법

Reverberation Characterization and Suppression by Means of Low Rank Approximation

윤 관 섭*, 최 지 웅*, 나 정 열*
(Kwan-Seob Yoon*, Jee Woong Choi*, Jungyul Na*)

*한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실
(접수일자: 2001년 12월 20일; 채택일자: 2002년 5월 16일)

본 연구는 실측 잔향음 자료에서 나타나는 단주기적 시변동성 신호 간섭 (interference)을 억제하기 위해 Ecart-Young 이론을 토대로 자료 행렬로부터 낮은 계수를 추출하여 근사화하는 낮은 계수 근사법 (LRA: Low Rank Approximation) 기법을 제안하였다. 이 기법을 실측 자료에 적용한 결과, 잔향음 신호와 시변동성 신호가 분리되었으며 이때 적절한 낮은 계수를 추출키 위해서 특이치 분해법 (SVD: Singular Value Decomposition)이 사용되었다. 잔향음 신호의 억제는 LRA를 통해 얻어진 근사치와 실측치 사이의 잔차를 계산함으로써 수행하였으며 결과적으로 LRA를 이용하여 시간적으로 안정적인 잔향음 신호를 획득함으로써 능동 소오나 시스템 운용 및 잔향음 모델링시 적용 가능성을 제시하였다.

핵심용어: 잔향음, 낮은 계수 근사법, 특이치 분해, 최적 계수, 잔차

투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

In this paper, the Low Rank Approximation (LRA) method to suppress the interference of signals from temporal fluctuations is applied. The reverberation signals and temporally fluctuating signals are separated from the measured data using the LRA. The Singular value decomposition (SVD) method is applied to extract the low rank and the temporally stable reverberation was extracted using the LRA. The reverberation suppression is performed on the LRA residual value obtained by removing the approximate reverberation signals. In overall, the method can be applied to the suppression of reverberation in active sonar system as well as to the modeling of reverberation.

Keywords: Reverberation, Low Rank Approximation, Singular value decomposition, Effective rank, Residual value

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.2)

I. 서 론

능동 소오나 운용시 탐지 거리를 제한하는 환경으로는 주변 소음 제한 환경과 잔향음 제한 환경으로 나뉘어진다. 천해의 경우 음향 채널이 해수면과 해저면에 의해 형성되는 잔향음 제한 환경으로 해수면과 해저면에 의한

산란은 잔향음장의 오랜 지속시간으로 인해 수중 표적 탐지와 수중 통신 시스템 운용에 제한요소로 작용한다. 특히 고주파 신호를 사용할 경우 전파 경로에 따라 잔향음에 의한 송신 신호에 대한 수신신호의 특성-시간, 주파수 위상 및 형태가 왜곡되어 표적 반향음의 정확한 식별이 어렵게 된다. 이러한 신호의 왜곡과 더불어 해양환경에 의한 추가적인 잡음신호, 표적의 탐지가 더욱 어렵게 된다[1,2].

*임여자: 윤관섭 (ksyoon@ihanyang.ac.kr)
25-791 경기도 안산시 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실
전화: 031-400-4233; 팩스: 031-502-6068

1.1. 잔향음의 시공간적 변동성

잔향음은 운송 해역의 환경 변화에 따라 시공간적인 변동성을 갖게 된다. 경계면 잔향음에 비해 체적 잔향음은 매우 복잡한 양상을 보이며 경계면 잔향음 중에서도 상대적으로 해수면 잔향음의 변동성이 해저면 잔향음의 변동성에 비해 크게 나타난다[3].

해수면 잔향음은 파고 또는 해상풍의 속도로서 특성화되어지는 해수면 거칠기에 의한 산란과 해수면 근처에서 공기방울층에 의해 전 방향으로 산란되어지는 체적 산란으로 구성되어진다. 즉, 거친 해수면에 의한 산란과 공진 운동을 하는 공기방울 (resonant bubble)들에 의한 산란, 그리고 공기방울 군집 (bubble plume)에 의한 산란이다. 일반적으로 해상풍의 속도가 약할 경우는 해수면 자체에 의한 산란이 해수면 산란의 주된 요인이 된다. 그러나 해상풍의 속도가 강해질수록 쇄파에 의해서 공기 방울이 생성되게 되고 해수면 산란에는 이런 공기 방울에 의한 산란 영향이 포함되게 된다. 따라서 해상 상태에 크게 의존적이며 일반적으로 지향각과 주파수에 의존적인 것으로 알려져 있다[4].

해저면의 경우에 잔향음 신호의 그 변동성의 요인을 크게 공간적 변동성과 시간적 변동성으로 나눌 수 있다. 공간적 변동성의 경우 퇴적물의 구성 물질 종류와 구성 비율 (공극률과 함수율: Jackson, et al., 1986; Stanic, et al., 1988), 그리고 퇴적물 하부의 비균질성과 가스층 존재 유무[5,6], 해저면과 내부 경계면의 거칠기[7] 등이 변수로 작용한다. 공간적인 변동성의 경우 이들을 변수화하여 모델링화[8,9]하고 이를 토대로 경계면 상태를 역 추정하는 연구[10]가 활발히 진행되고 있다. 그러나 실제로 모델링을 위한 입력 변수의 획득이 용이치 않으며, 모델링 변수에 비해 훨씬 많은 환경 변수가 복잡한 기작 (mechanism)을 가지고 실제 해양에 존재함으로써 실측 자료와의 비교 분석을 어렵게 한다. 시간적 변동성의 경우에는 상대적으로 적은 영향이 주는 것으로 알려져 있지만 해저면이 자체가 유체의 성질을 가지고 있는 경우와 해저면과 수층 (water layer) 사이의 경계면에서 발생하는 난류에 의한 해저면 구성 물질들의 부유 (suspension) 운동 등으로 인한 시간적 변동성 등이 존재할 수 있다.

체적 잔향음의 경우 경계면 잔향음에 비해 큰 시공간적 변동성을 가지고 있어 변동성을 함수화 하기에는 어려움이 있으나 정확한 잔향음 모델을 위해서는 중요한 연구 분야이다. 일반적으로 저주파 대역에서 체적 산란강도에 가장 큰 영향을 주는 요소는 부레를 가진 어군이며[11], 고주파 대역에서는 동물 플랑크톤 및 부유물질 등이다

[12]. 저주파 대역의 산란 특성은 음파 전달 손실에 큰 영향을 미치므로 폭발성 수증음원 (SUS) 및 저주파 음원을 이용한 여러 실험이 있었으나[13] 고주파 대역의 산란 특성은 주로 플랑크톤 군집 조사에 한정되어 있었다[14]. 수온이나 염분의 변화에 의한 미세 밀도장의 변화나 극전선과 외동유 (Eddy), 해류 및 조석 등의 영향도 체적 잔향음의 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 이에 대한 연구는 미비한 상태이며, 최근 들어서는 저주파의 경우 내부파에 의한 음파 전달 손실의 연구가 진행되고 있다[15].

1.2. 잔향음의 단주기적 시변동성 제거 기법

1.2.1. 알고리즘

잔향음 신호 획득의 궁극적인 목적은 잔향음 신호 제거에 있으며, 이를 위해서는 잔향음 신호의 정확한 이해가 선결 과제이다. 능동 소나나 운송해역의 환경 특성이 시공간적으로 불변일 경우에는, 잔향음 특성을 파악한 후 간단하게 노치 필터를 사용하여 잔향음의 영향을 배제할 수 있다. 그러나 시변동성이 존재하는 일반 해양에서는 노치 필터와 같은 기법은 한계가 있기 때문에 최근 들어 적응 필터 등과 같은 기법 등이 이용되고 있다[16]. 적응 필터 기법은 실측 신호와 표준 입력 신호 사이의 상관 관계를 이용하여 잔향음 신호를 제거하는 기법으로써 우선적으로 정확한 표준 입력 자료가 확보되어야 하며 입력 자료의 정확도가 성능을 좌우한다. 결과적으로 능동 소나나 시스템의 운용에 있어서 잔향음 신호의 정확한 이해와 예측이 무엇보다 중요하며 따라서 표준화된 잔향음 신호의 획득이 필수적이다. 표준화된 잔향음 신호 획득의 대표적인 방법으로 수치 모델링을 통한 잔향음 신호 모의와 실측 자료를 이용한 표준화 방법이 있다. 모델링에 의한 잔향음 신호 모의의 경우, 입력 환경 변수와 그에 따른 산란 모델의 정확도가 그 성능을 좌우하는 한계를 가지고 있으며 실측된 잔향음 신호를 표준화하는 방법의 경우에는 실제로 많은 시간과 노력이 요구되기 때문에 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 최근의 연구들은 실측 자료를 이용하여 모델을 개선하는 방향으로 진행되고 있다[3]. 그러나 이러한 방법의 경우 서로의 단점이 보완되는 것은 하지만 이 또한 적지 않은 노력이 요구된다. 본 연구는 이러한 문제점들을 보완하고자 극히 제한된 실측 자료만으로도 표준화된 잔향음 신호의 획득이 가능한 기법을 제안하고자 한다. 이 기법은 잔향음 제한 환경인 천해역에서 상대적으로 우세하게 나타나는 잔향음 성분만을 효과적으로 분리하기 위한 방법으로써 짧은 시간동안 제한적으로 획득된 자료행렬을 확률적 기여도에 의해 분

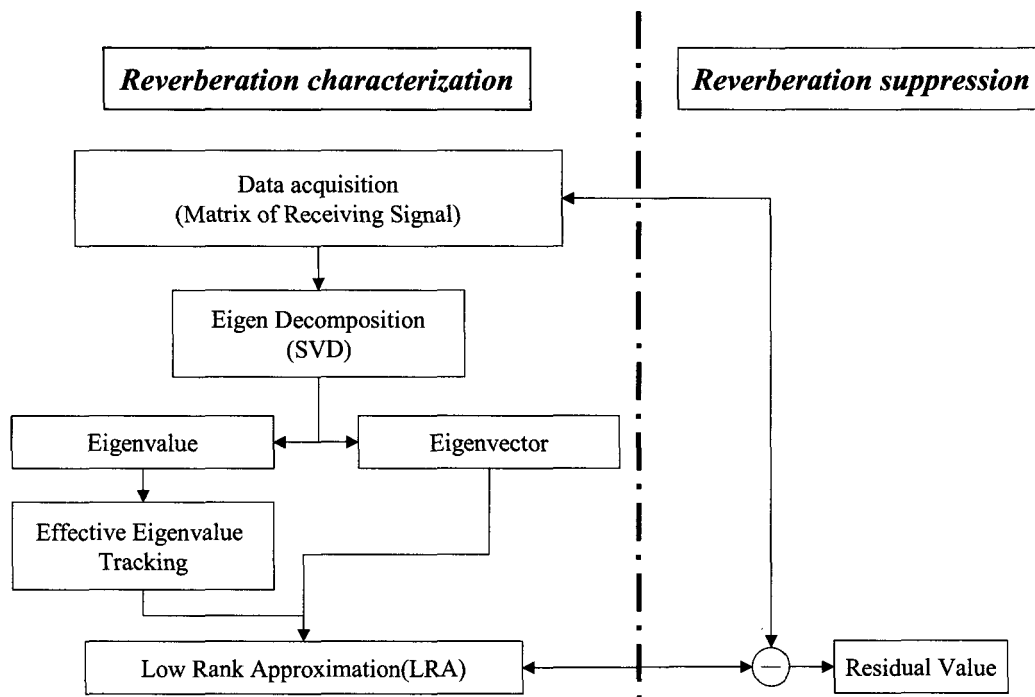


그림 1. 낮은 계수 근사법 알고리즘
Fig. 1. Low rank approximation algorithm.

해 (decomposition)하여 최적의 고유치 (effective rank) 값을 추출한 후 이를 재구성하는 행렬의 근사화 (Matrix approximation) 기법이다 (그림 1).

이 기법은 우세한 고유치 (low rank)를 가지는 행렬들만으로 임의의 행렬을 근사화할 수 있다는 Eckart-Young theorem[17]에 기반을 두고 있다 (LRA: Low Rank Approximation). 실측신호 행렬이 표적 신호와 배경 소음에 의해 잔향음에 의한 영향이 강하게 나타나는 잔향음 제한 환경의 경우 고유치를 제한함으로써 자료 행렬은 잔향음 신호만으로 근사화할 수 있다. 우선 자료 행렬의 최적 계수 (rank)를 특이치 분해 기법 (SVD: Singular Value Decomposition)을 통해 결정하고[18], 결정된 고유치를 이용하여 잔향음 신호와 표적 신호를 포함한 잡음 신호로의 분리가 가능하다. 만약 모든 계수의 고유치를 사용하여 행렬을 재구성할 경우에는 표적의 신호는 물론 잔향음, 배경 소음의 신호까지 모두 포함되는 실측 신호로의 재구성이 된다. 이 근사법을 사용하면 한정된 실측 자료만으로 신속하고 효과적으로 잔향음 신호를 분리할 수 있으며 결과적으로 시변동성을 포함하는 신호에서 시변동성의 요인을 분리하고 존재하는 시변동성 요인을 해석할 수도 있다 따라서 환경 변수가 전혀 고려되지 않은 기법임에도 불구하고 결과적으로 환경 변수의 물리적인 특성을 파악하여 이해할 수 있게 된다. 나아가 시변동성을 갖는

신호들의 특성을 이해하여 시변동성을 예측하고 모델링할 수 있다. 최근에는 강한 잔향음 신호에 묻혀 버린 미약한 신호의 탐지 기법으로 활용하기도 한다[18-20].

1.2.2. 특이치 분해 (SVD: Singular Value Decomposition)

능동 소오나에 있어서 수신 신호는 식 (1)과 같이 송신 신호와 운용해역의 환경 인자들 사이의 컨볼루션으로 표현할 수 있다.

$$y[n] = x[n] * h[n] \tag{1}$$

여기서 $y[n]$ 은 $x[n]$ 은 $h[n]$ 은 매질에 의한 임펄스 응답이다. 이 때 선형 독립적인 환경 인자들이 송신 신호와 컨볼루션 되어 수신된다고 가정하면 수신 신호 자료 행렬은 선형적으로 독립인 신호들로 분해할 수 있다. 우선 선형적으로 독립인 신호들의 합으로 재구성하기 위해 특이치 분해법을 이용하여 자료 행렬에서 고유치와 고유벡터를 추출한다. 특이치 분해법은 고유치 분해 기법 (Eigenvalue Decomposition) 중 하나로서 다른 고유치 분해 기법과는 달리 자료 행렬이 미결정 (underdetermined) 이나 과결정 (overdetermined)인 경우 모두에 대하여 수치적으로 해를 얻을 수 있어 최소 자승법 (Least-squared problem)과 행렬의 근사화 (Matrix approximation)에 널

리 이용되는 기법이다[20]. 특이치 분해법의 수행을 통해 수신 신호는 각기 다른 고유치 (eigenvalue)와 고유벡터 (eigenvector)를 갖는 신호들로 분해되며 이때의 고유치는 선형 독립인 신호들의 가중치이며 고유벡터는 시공간적 변동량이다. 결국 자료 행렬 송신신호이며 수신신호, Y 에 대해 특이치 분해를 수행하면 식 (2)와 같이 세 개의 각기 다른 행렬의 곱으로 표현된다.

$$Y = U \Sigma V^T \quad (2)$$

여기서 Y 는 수신신호 행렬, U 와 V 는 고유벡터이며 Σ 는 양의 실수로 이루어진 대각 행렬 (diagonal matrix)이며 일반적으로 지수적 감소 경향을 보이는 특이치 (singular value)들로 구성된다.

1.2.3. 낮은 계수 근사법 (LRA: Low rank approximation)

특이치 분해법을 이용하여 얻어진 고유치 중 상대적으로 우세한 고유치 (Low Rank)를 이용하여 행렬을 재구성하여 임의의 자료 행렬을 식 (3)과 같이 근사화할 수 있는데 이러한 근사법을 낮은 계수 근사법이라 한다[17].

$$\begin{aligned} Y &= Y_s + Y_0 \\ Y_s &= U_s \Sigma_s V_s^T \\ Y &\approx Y_s : LRA \\ [Eckart-Young Theorem] \\ Y_0 &= U_0 \Sigma_0 V_0^T \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 Y 는 실측 자료, Y_s 는 LRA를 이용한 근사치이며 Y_0 는 잔차분 (residual value)이다. 이 식을 다시 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다 (식 (4)).

$$\bar{Y}_{(m \times n)} = [\bar{U}_s | \bar{U}_0]_{(m \times n)} \begin{pmatrix} \bar{\Sigma}_s & 0 \\ 0 & \bar{\Sigma}_0 \end{pmatrix}_{(m \times n)} [\bar{V}_s | \bar{V}_0]_{(m \times n)}^H \quad (4)$$

이때 $[\bar{U}_s | \bar{U}_0]$, $[\bar{V}_s | \bar{V}_0]$ 은 각각 직교 행렬 (Unitary matrix), $\bar{\Sigma}_s = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, $\bar{\Sigma}_0 = \text{diag}(\sigma_{r+1}, \sigma_{r+2}, \dots, \sigma_{\min(m, n)})$ 는 고유치 (singular value)이며 크기는 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots, \sigma_{\min(m, n)}$ 순으로 나타나며 일반적으로 지수적으로 감소하는 경향을 보인다.

LRA를 통해 자료 행렬을 근사화하기 위해서는 결국 r 번째까지의 최적의 계수를 결정 (low rank tracking)하여 $\bar{\Sigma}_s$ 를 구성하여야 한다. 이를 이용하여 시계열 자료 행렬을 재구성하게 되면 고유치의 우선 순위를 통해 시간적인 주성분 (Principal Component) 신호를 획득할 수 있

으며 결과적으로 자료 행렬을 고유치의 기여도에 따라 제한하여 근사화할 수 있게 된다. 본 연구는 이러한 기법을 잔향음 제한 환경인 천해에 응용하여 운용해역에서의 표준 잔향음 신호를 획득하였다. 또한 실측치와 근사치 사이의 잔차분 (residual value, $Y_0 = Y - Y_s$)을 이용하여 시공간적 변동성을 가지고 있는 신호들의 선형 조합을 획득하여 운용 해역의 시변동성을 알아 보았다.

II. 표준 잔향음 신호 획득 기법

본 논문에서는 실측자료로부터 잔향음 성분과 그 외 잡음 성분을 구분하기 위한 LRA 기법을 제안하였다. LRA 기법의 적용을 위해 우선, 잔향음 제한 환경인 천해에서는 잔향음 신호는 일정 기간 동안은 비교적 안정적으로 수신되는 신호 성분이며 수신된 신호들은 서로 다른 환경들에 의해 지배를 받고 있는 운동들의 선형 조합이라 가정된 후 특이치 분해법을 수행하여 획득된 신호들의 고유치와 고유벡터를 추출하였다. 이때 계산된 고유치는 각각의 운동들에 대한 가중치로서 양의 실수 값만으로 이루어진 대각행렬이며 고유 벡터는 그들의 운동 방향과 시간의 함수이다. 다시 말해 특이치 분해법을 수행함으로써 n 회의 걸쳐 얻어진 수신 신호 행렬로부터 n 개의 계수로 구성된 선형적인 신호를 얻을 수 있는데 이때의 각각의 고유치는 계수에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보인다. 획득된 고유의 가중치 (singular value)에 따라 수신 신호 행렬을 분해하여 상대적으로 높은 고유치를 갖는 계수의 신호만으로 재구성할 수 있는데, 이렇게 재구성된 신호는 실측 신호들 속에 존재하는 주성분 (principal component) 신호이다. 만약 획득된 신호들이 잔향음 제한 환경에서의 신호라면 큰 고유치를 갖는 신호만으로 근사화된 신호는 잔향음 신호를 대표하는 값이라 할 수 있다. 이렇게 근사화 기법을 수행하기 위해서는 우선 적절한 고유치를 결정 (eigenvalue tracking)하여야 한다. 이때 결정된 고유치를 낮은 계수라 하며 이를 이용한 근사화 기법을 낮은 계수 근사법 (LRA: Low Rank Approximation) 이라고 한다.

2.1. 표준 잔향음 신호 획득

2000년 11월에 동해에서 획득된 실측 잔향음 자료를 통해 LRA의 성능을 검증하였다. 이때 사용된 음원과 해양 환경 변수들은 표 1과 같다.

표 1. 환경변수와 신호 획득 변수
Table 1. Environmental and system parameters.

Wind speed	1-2 m/sec
Bottom property	Muddy sand
Water depth	20 m
Tilt angle	5°
Frequency	60 kHz
TVR	174.68 dB re 1 μ Pa/V at 1 m
RVS	-181.66 dB re 1V/ μ Pa
Beam width	8°
Pulse length	0.1 ms
Sampling rate	500 kHz/s
Sampling bit	12 bit
Pulse interval	1.5 s
Pulse repetition	30

해상의 상태는 1~2 m/s의 풍속으로써 비교적 안정된 상태였다. 그럼에도 불구하고 획득된 잔향음 신호에는 시변동성이 존재하였으며 이러한 시변동성의 정확한 요인은 환경변수에 대한 정확한 정보없이 이해가 불가능하다(그림 2). 따라서 특이치 분해법을 수행하여 고유치를 획득하고 이를 이용하여 LRA를 통한 근사화를 시도하여 시변동성을 제거하였다. 이때, 특이치 분해법을 통해 획득된 고유치는 2번째 계수까지 상대적으로 우세한 값을 보이며, 이때의 상대 누적 기여도는 79.4%이다(그림 2).

따라서 2번째 계수까지의 고유치를 이용하여 자료의 행렬을 재구성하였으며 그 결과, 그림 3과 같이 시변동성이 제거되어진 안정된 신호가 획득되었다. 이때 LRA를 이용하여 획득된 근사치와 실측치 사이의 상관계수는 0.99 이

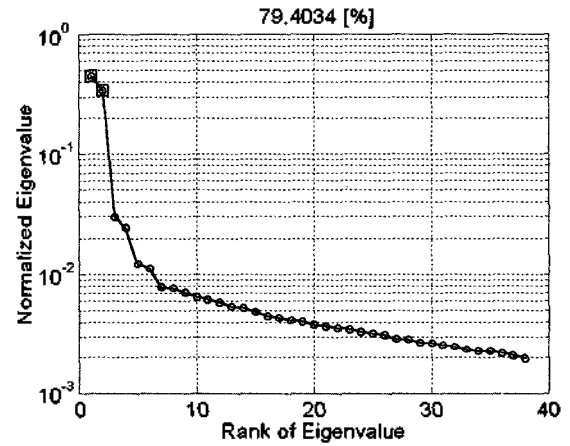
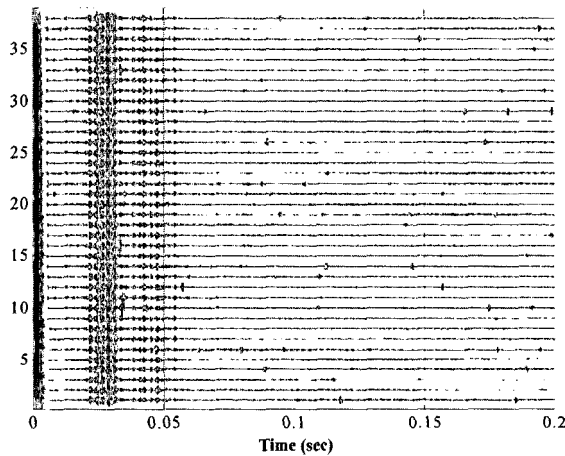


그림 2. 관측된 잔향음 시계열자료와 고유치: 시각 상자 (낮은 계수)
Fig. 2. Measured reverberation time series signals and normalized eigenvalue: square box (low rank).

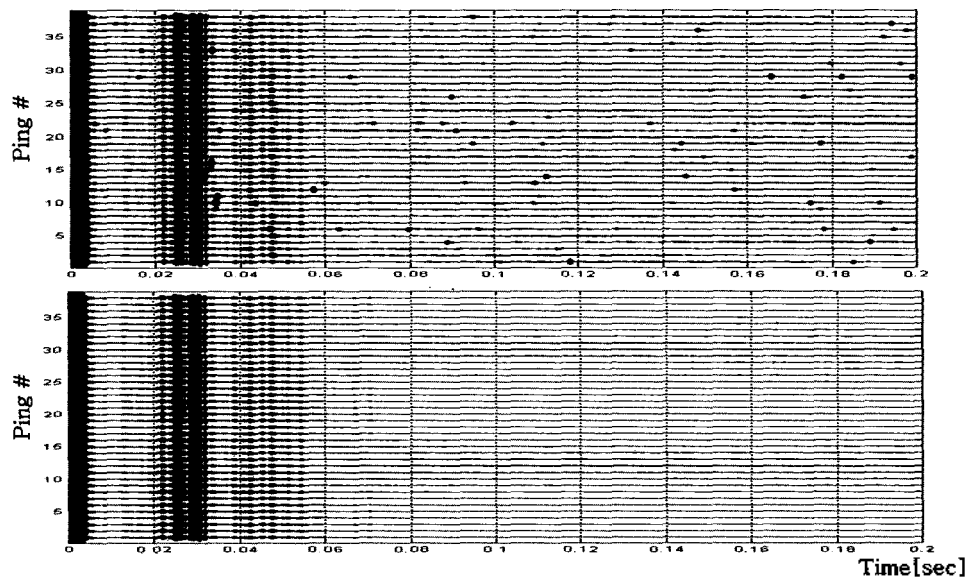


그림 3. 실측치와 근사치
Fig. 3. Original and approximate signal data matrix.

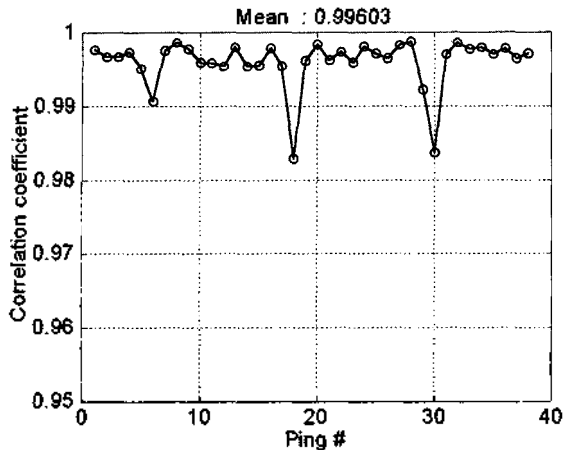


그림 4. 실측치와 근사치 사이의 상관 계수
Fig. 4. Cross-correlation coefficient between original and approximate value.

상의 값을 가지며, 이 값은 실제 사용한 계수의 상대누적 기여도 (79.4034%)에 높은 값을 가진다 (그림 4).

근사치와 잔차 사이에는 매우 낮은 상관 관계를 보이는데 이는 선형적으로 독립인 신호들이 분리되었기 때문이다 (그림 5). 결과적으로 잔향음 제한 환경인 천해 (수심 20 m)에서의 실측 자료를 이용하여 LRA를 수행한 결과, 우세한 신호인 잔향음 신호와 그렇지 못한 시변동성 신호를 분리할 수 있었다. 따라서 천해 잔향음 신호의 표준화를 위해 수신 신호 행렬을 고유치의 제약을 통해 필터링하여 잔향음 신호 이외의 잡음 성분의 억제 및 제거가 가능함을 확인하였다. 아울러 잔향음 자체의 시변동성을 제거하여 표준화된 잔향음 신호를 획득할 수 있었다.

2.2. 시변동성 신호 모의 및 제거

앞 절에서 LRA를 이용한 주성분 신호의 근사화 가능성을 확인하였다. 그러나 앞 절의 경우 시변동성 신호의 진폭이 잔향음 신호 성분에 비해 매우 작은 값을 가지고 있으며 그 시변동성 또한 미비하였다. 따라서 2절에서는 잔향음 신호와 유사한 진폭을 갖으며 시변동성 또한 우세한 신호를 모의하여 LRA 기법의 성능을 재검증하였다. 이때 시변동성 신호는 수중 다이버의 기동으로 모의되었으며 다이버는 센서를 향해 접근하다가 다시 멀어지도록 모의 되었으며, 이때 사용된 음원의 특성 및 환경 변수는 표 2와 같다.

모의된 시변동성 신호는 5~20번째 사이에 수신되었으며 6~25 ms에 상대적으로 큰 진폭을 갖는다. 또한 5 ms까지 획득된 잔향음 신호에 비해 큰 시공간적 변동성이 보인다. 획득된 신호에서 특이치 분해법을 통해 고유

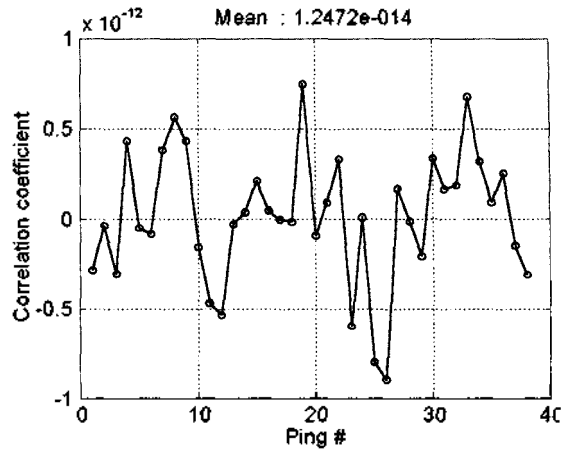


그림 5. 근사치와 잔차 사이의 상관 관계
Fig. 5. Cross-correlation coefficient between approximate and residual value.

치를 획득한 결과 이 신호 또한, 고유치는 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보이며 상대적으로 우세한 고유치들이 존재함을 확인할 수 있다 (그림 6).

획득 자료로부터 시변동성 신호 (표적 신호)를 분리하기 위해 2번째 계수까지만을 사용하여 근사화를 시도하였으며 이때의 사용된 계수들의 상대 누적 기여도는 89.5225%였다. 근사화를 수행한 결과, 그림 7과 같이 시변동성을 갖는 표적의 신호는 제거되어지고 잔향음 신호만으로 근사화되었다. 또한 실측치와 근사치 사이의 잔차를 계산한 결과, 그림 8과 같이 시변동성 신호만이 남게 되었다. 결과적으로 LRA를 이용하여 고유치를 이용한 필터링을 수행할 경우 신호를 그 기여도에 따라 분리할 수 있으며 이 때 기여도는 시변동성에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

표 2. 환경변수와 신호 획득 변수
Table 2. Environmental and system parameters.

Wind speed	1-2 m/s
Bottom property	Sand
Water depth	10 m
Grazing angle (Sensor height)	0° (2 m)
Frequency	126 kHz
TVR	159 dB re 1 μPa/V at 1 m
RVS	-167 dB re 1V/μPa
Beam width	10°
Pulse length	0.4 ms
Sampling rate	500 kHz/s
Sampling bit	12 bit
Pulse interval	1.5 s
Pulse repetition	50

또한 잔차를 이용하여 주성분 (principal component) 뿐 아니라 변동성 신호만으로도 분리가 가능함을 확인하였다. 이 때 획득된 근사치와 실측치 사이의 상관관계는 표적이 존재하는 5~10번째 신호에서 상대적으로 낮

은 값을 갖게 되지만, 사용된 계수들의 상대 누적 기여도에 비해 높은 값을 보였다. 이는 상대적으로 낮은 상관관계를 갖는 신호들 속에는 시변동성이 존재한다는 것을 의미하며, 결국 상관 계수를 이용하여 시변동성이 존재

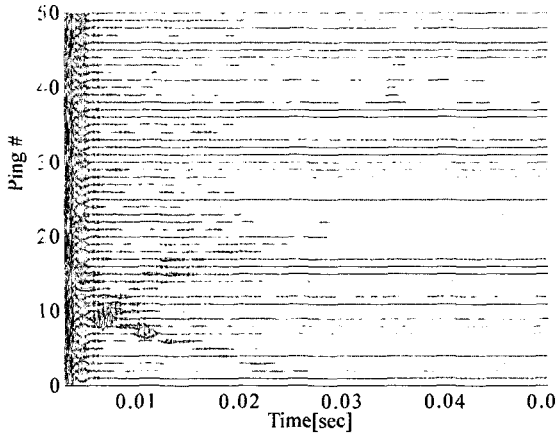


그림 6. 잔향음 신호의 시계열 자료와 고유치: 사각 상자 (낮은 계수)
Fig. 6. Received reverberation time series signals and normalized eigenvalue: square (low rank).

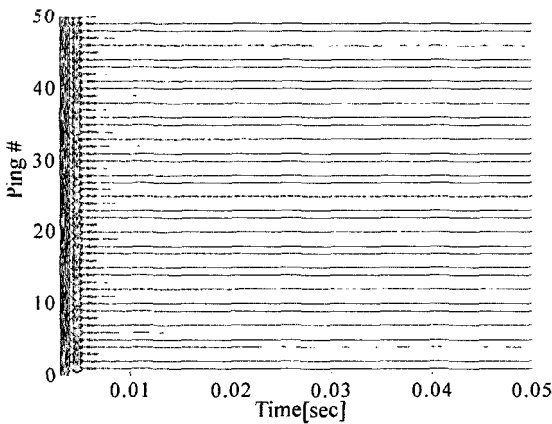
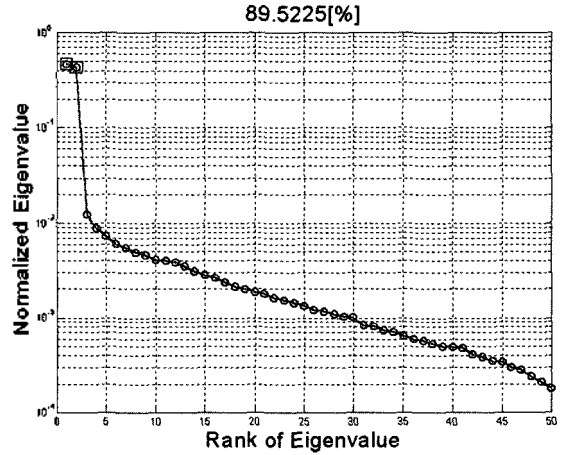


그림 7. 근사치의 시계열 신호
Fig. 7. Approximate time series signals.

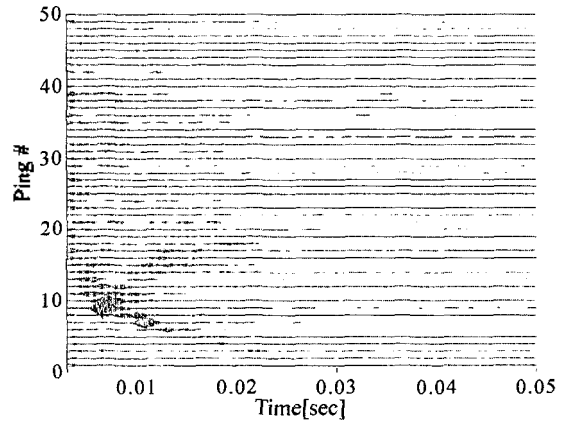


그림 8. 잔차의 시계열 자료
Fig. 8. Residual time series signals.

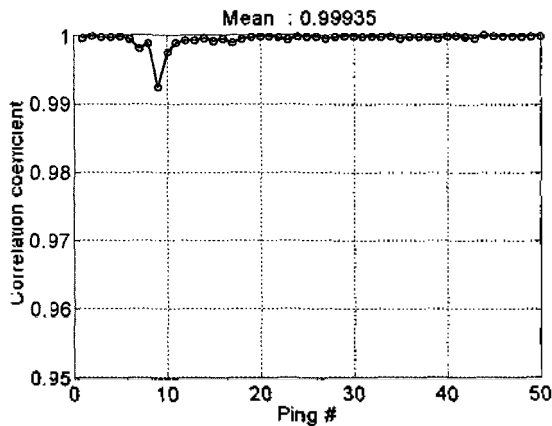


그림 9. 실측치와 근사치 사이의 상관 계수
Fig. 9. Cross-correlation coefficient between original and approximate value.

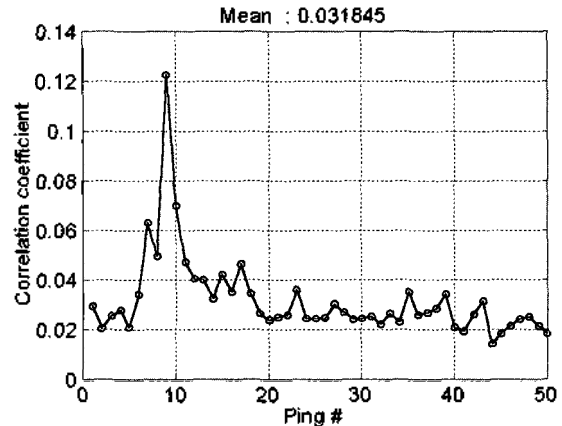


그림 10. 실측치와 잔차 사이의 상관 계수
Fig. 10. Cross-correlation coefficient between original and residual value.

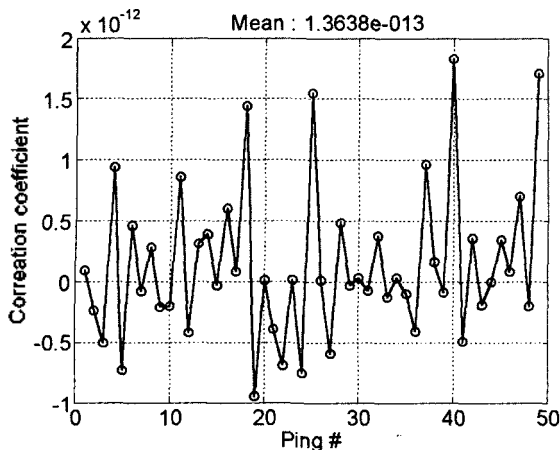


그림 11. 근사치와 잔차 사이의 상관계수
 Fig. 11. Cross-correlation coefficient between approximate and residual value.

하는 신호와 그 신호가 존재하는 시간을 알아낼 수 있는 가능성을 보여준다 (그림 9).

마찬가지로 근사치와 잔차와의 상관관계, 실측치와 잔차와의 상관관계를 계산한 결과 시변동성이 존재하는 경우 실측치와 잔차 사이에는 높은 상관관계를 보였으며 근사치와 잔차 사이에는 매우 낮은 상관관계를 보였다 (그림 10, 11).

III. 결론 및 토의

음파를 이용하여 해양 탐사를 하기 위해서는 잔향음 신호에 대한 이해가 우선 되어야 한다. 지금까지 이를 위해 잔향음 신호의 예측과 모의를 위한 많은 노력들이 이루어져 왔다. 그러나 잔향음 신호는 실제로 많은 시변동성을 포함하고 있기 때문에 시변동성의 정확한 이해 없이는 정확한 잔향음을 정의할 수 없다. LRA는 실측 자료 행렬이 선형적으로 서로 독립인 신호 성분들의 선형적인 합이라고 가정한 후 그 기여도 높은 신호들만으로 근사화 하는 기법이며, 우선 특이치 분해법을 수행하여 고유치와 고유벡터를 획득한 후 고유치를 제한적으로 사용하여 근사화 함으로써 시변동성이 존재하는 신호를 제거 하는 기법이다. 이 기법을 이용하여 실측 잔향음 자료에서 단주기적 시변동성에 독립적이고 표준적인 잔향음 신호를 획득할 수 있다. 또한 실제해역에서 표적의 기동을 통해 시변동성을 모의하여 이러한 근사화 기법을 적용한 결과, 시변동성 신호인 표적의 신호가 억제되었다. 이때 고유치는 시계열 영역에서의 진폭의 크기보다는 시변동

성의 유무에 의해 좌우되고 있음을 확인하였으며 그 잔차를 이용하여 시변동성 신호만의 신호를 획득하였다.

앞으로 LRA기법을 활용하면 제한된 환경변수만을 알고 있는 실제 해역의 음향 자료로부터 표준적인 신호를 획득이 가능할 것으로 보이며, 결과적으로 해양의 시변동성 및 환경의 변동성을 모니터링하는 기법으로의 활용이 가능할 것으로 보인다. 앞으로 이러한 기법을 이용하여 잔향음 제한 환경에서의 표준적인 잔향음 신호를 획득하고 향후 궁극적으로 환경의 변동성을 역산하는 기법으로의 연구가 지속적으로 요구된다. 또한 LRA를 이용한 표준 잔향음 신호의 획득시 근사화에 사용될 최적의 계수를 결정하는 효과적인 기법의 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터 및 한양대학교 과학기술 장학금의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

1. M. B. Porter, "Acoustic models and sonar systems," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 18, 425-437, Oct. 1993.
2. D. D. Ellis, "A shallow water normal-mode reverberation model," *J. Acoust. Soc. Am.*, 2804-2814, May. 1995.
3. 최지웅, 이정열, 나영남, "양상태 해수면 음파산란 측정," *한국음향학회지*, 20 (4), 81-86, 2001.
4. P. D. Etter, *Underwater Acoustic Modeling: Principles, Techniques and Applications*, 2nd ed., E & FN Spon, London, 1996.
5. D. Tang, "Modeling high-frequency acoustic backscattering from gas voids buried in sediments," *Geo-Marine Lett.*, 16, 261-265, 1996.
6. D. Chu, K. L. Williams, D. Tang, and D. R. Jackson, "High-frequency bistatic scattering by sub-bottom gas bubbles," *J. Acoust. Soc. Am.* 102, 806-814, 1999.
7. J. -W. Choi, J. -Y. Na and W. -J. Seong, "240-kHz bistatic bottom scattering measurements in shallow water," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 26 (1), 54-62, Jan. 2001.
8. D. R. Jackson, D. P. Winebrenner, and A. Ichimaru, "Application of the composite roughness model to higher-frequency bottom backscattering," *J. Acoust. Soc. Am.* 79, 1410-1422, 1986.
9. P. D. Mourad and D. R. Jackson, "High-frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss," in *Proc. OCEAN 89*, New York, 1168-1175, 1989.
10. J. A. Goff and T. H. Jordan, "Stochastic modeling for morphology: Inversion of sea beam data for second-order statistics," *J. Geophys. Res.* 93, 13, 589-13, 608, 1988.
11. D. Feuillade, R. W. Nero and R. H. Love, "A low-frequency acoustic scattering model for small shoals of fish," *J. Acoust.*

Soc. Am. **99** (1), 196-208, 1996.

12. D. V. Holiday and R. E. Pieper, "Volume scattering strength and zooplankton distributions at acoustic frequencies between 0.5 and 3MHz," *J. Acoust. Soc. Am.* **67** (1), 135-146, 1980.
13. P. M. Ogden, and E. T. Erskine, "Surface and volume scattering measurements using broadband explosive charges in the Critical Sea Test 7 experiment," *J. Acoust. Soc. Am.*, **96** (5), 2908-2919, 1994.
14. D. E. McGehee, C. F. Greenlao, D. V. Holiday, and R. E. Pieper, "Multifrequency acoustical volume backscattering pattern in the Arabian Sea - 265kHz to 3 MHz," *J. Acoust. Soc. Am.*, **107** (1), 193-200, 2000.
15. 박종민, "천해에서의 내부파에 의한 잔향음 특성," 이학석사논문, 한양대학교, 지구해양과학과, 1998.
16. 박경주, 나정열, 유경렬, 윤관섭, 나영남, "능동소오나에서 적응 필터를 이용한 신호 탐지 및 잔향음 제거," 제16회 수중음향학 학술발표회 논문집, 61-64, 2001.
17. J. Eckart and G. Young, "The approximation of one matrix by another of lower Rank," *Psychometrika*, **1**, 211-218, 1936.
18. P. Kirsteinsand D. W. Tufts, "Adaptive detection using low Rank approximation to a data matrix," *J. Geophys. Res. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **30** (1), 55-67, Jan, 1994.
19. D. W. Tufts, D. H. Kil and R. R. Slater, "Reverberation

Suppression and Modeling," *Ocean Reverberation* (D. D. Ellis, J. R. Preston, and H. G. Urban Eds.), Kluwer Academic Publishers, 1993.

20. T. A. Palka and D. W. Tufts, "Reverberation characterization and suppression by means of principal components," *OCEANS '98 Conference Proceedings*, **3**, 1501-1506, 1998.

저자 약력

● 윤 관 섭 (Kwan-Seob Yoon)

1993년 3월~2000년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학사)
 2000년 3월~2002년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학석사)
 2002년 3월~현재: 한양대학교 지구해양과학과 (박사과정)
 * 주관심분야: 수중음향 산란, 수중음향 모델링, 수중음향 신호처리

● 최 지 용 (Jee Woong Choi)

한국음향학회지 제19권 제2호 참조

● 나 정 열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제8권 제6호 참조