

음선 역전파 기반의 선박 위치 추정

Ray backpropagation-based ship localization

조성일,¹ 변기훈,² 변성훈,³ 김재수[†]

(Seong-il Cho,¹ Gihoon Byun,² Sung-Hoon Byun,³ and J. S. Kim[†])

¹한국해양대학교 해양공학과, ²Scripps Institution of Oceanography, ³한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소
(Received May 2, 2018; revised June 12, 2018; accepted July 27, 2018)

초 록: 본 논문은 선박소음 데이터에 음선 역전파 기법을 적용하여 수동 선박 위치 추정 알고리즘을 제시한다. 기존의 방법[S. H. Abadi, D. Rouseff and D. R. Dowling, J. Acoust. Soc. Am. 131, 2599-2610 (2012)]은 음선 기반 블라인드 디컨벌루션 및 음선 역전파 기법을 활용하여 배열의 기울기가 없는 근거리 환경에서 음원의 위치를 추정하였다. 하지만 위 방법은 배열의 기울기에 따른 위치 추정 오차가 크게 발생한다는 단점이 존재한다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 음선 기반 블라인드 디컨벌루션 및 음선 역전파 기법을 사용하되, 배열의 기울기를 보정하여 음원의 위치를 추정할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘의 성능은 SAVEX15(Shallow-water Acoustic Variability Experiment in 2015) 해상 실험의 선박소음 데이터를 이용하여 검증하였다.

핵심용어: 음선 역전파, 음선 기반 블라인드 디컨벌루션, 채널 임펄스 응답, 음원 위치 추정

ABSTRACT: This paper presents an algorithm for passive localization of a ship by applying the ray back-propagation technique to the ship radiation noise data. The previous method [S. H. Abadi, D. Rouseff and D. R. Dowling, J. Acoust. Soc. Am. 131, 2599-2610 (2012)] estimates the position of a sound source in the near-field environment with no array tilt by using the RBD (Ray-based Blind Deconvolution) and ray back-propagation techniques. However, when there exists an array tilt, the above method leads to a large position estimation error. In order to overcome the problem, this study proposes an algorithm that estimates the position of a sound source by correcting the array tilt using the RBD and ray back-propagation techniques. The proposed algorithm was verified by using the ship noise of SAVEX15 (Shallow-water Acoustic Variability Experiment in 2015) experimental data.

Keywords: Ray-backpropagation, Ray-based blind deconvolution, Channel impulse response, Source localization

PACS numbers: 43. 60. Jn , 43. 30. Wi

1. 서 론

1970년대에 수동 소나 시스템에서 음원의 거리 및 깊이를 추정할 수 있는 방법인 정합장 처리(Matched Field Processing, MFP)가 Bucker^[1]에 의해 처음으로 제안되었다. MFP는 음파 전달 모델을 통해 생성된 복제 음장과 수신 배열 센서를 통해 수신된 데이터 간의 정합을 통해 음원의 위치를 추정할 수 있는 기법

이다.^[2] 하지만 MFP는 음원이 존재할 수 있는 영역에 대한 모든 복제 음장을 계산해야 하며, 이는 상당한 연산량이 요구된다. 또한 복제 음장을 생성하기 위해 사전에 정확한 해양 환경 정보(음속 구조, 지음향적 특성, 해양 도파관의 깊이 등)가 필요하며, 이러한 정보들의 부재는 오정합을 야기한다.^[3] 또한 일반적으로 1 kHz 미만에 해당하는 주파수 대역에서 정합필터를 통한 효율적인 음원의 위치 추정이 가능함을 알 수 있으며, 이를 해결하기 위해 최근 적응 정합필터에 대한 연구가 진행되어졌다.^[4]

최근 국외에서 활발하게 연구되어지는 배열 불변성(Array Invariant, AI)^[5-13]은 이상적인 해양 환경에서 광

[†]Corresponding author: J. S. Kim (jskim@kmou.ac.kr)
Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Youngdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea
(Tel: 82-51-410-4325, Fax: 82-51-403-4320)

“이 논문은 2017년 한국음향학회 수중음향학 학술발표회에서 발표하였던 논문임”

대역 신호의 분산 특성을 이용하여 음원의 거리를 추정할 수 있는 방법이다. 정확한 해양환경 및 상당한 연산량을 요구하는 정합장 처리와는 달리 AI는 수신 신호의 평면파 빔형성만을 이용하여 빔시간 영역에서의 배열 불변성 파라미터를 추정하여 대략 10% ~ 15% 이내의 오차 범위에서 음원의 거리를 효율적으로 추정할 수 있는 방법이다. AI는 최소한의 정보만을 이용하여 효율적으로 음원의 거리를 추정할 수 있지만, 음원의 깊이를 추정할 수 없다는 제약조건을 가진다.

최근 음선 기반 블라인드 디컨벌루션(Ray-based Blind Deconvolution, RBD) 및 음선 역전파 기법을 이용하여 음원의 위치를 추정할 수 있는 연구를 Abadi *et al.*^[14]가 진행하였으며, 위 연구를 통해 근거리 및 배열의 기울기가 없는 환경에서 효율적으로 음원의 거리 및 깊이를 추정할 수 있음을 확인하였다. 하지만 위 방법은 배열의 기울기에 따른 위치 추정 오차가 크게 발생하며, 이를 보완하기 위해 배열 기울기 보정이 필요하였다.

본 논문에서는 Abadi *et al.*^[14]가 제안한 기법의 한계점을 보완하여 배열의 기울기가 존재하는 상황에서 음선 역전파 기법을 적용하여 음원의 위치를 추정할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 그리고 제안하는 알고리즘은 SAVEX15(Shallow-water Acoustic Variability EXperiment in 2015) 선박 소음 데이터에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

선박 소음 데이터에 음선 역전파 기법을 적용하기 위해 첫째, 선박 소음의 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response, CIR)을 추정하였다. 선박 소음은 송신 신호에 대한 정보를 알 수 없고, 연속적인 신호이기 때문에 CIR 추정이 어려워 RBD를 통하여 선박 소음의 CIR을 추정하였다.^[15] 둘째, 추정된 CIR을 이용하여 수직 수신 배열 센서의 기울기 보정하였다. 해상 실험에서 해양환경의 영향을 받아 수직 배열 센서에 기울기가 나타나게 되고, 이는 음원 위치 추정 성능을 저하시키는 요인으로 작용된다. 마지막으로 추정된 CIR을 통하여 음선 역전파 기법의 위치 추정 모호성을 최소화하였다. 음선 역전파 기법은 음선의 집속되는 지점으로 위치를 추정하는 알고리즘이기 때문에 위치 추정의 모호성에 나타날 가능성이 높다. 따라서 모호성을 최소화하기 위해 추정된 CIR

에서 음선의 상대적 도달 시간의 차이를 계산하여 위치 추정의 모호성을 최소화시켰다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 RBD 기법 개념을 설명하고, 3장에서는 음선 역전파를 통한 음원 위치 추정 알고리즘에 대하여 설명한다. 4장에서는 해상실험에 대한 배경과 분석을 통해 선박 위치 추정 결과를 분석하고, 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 음선 기반 블라인드 디컨벌루션

수동 소나 시스템에서 CIR을 추정할 수 있는 RBD 기법을 Sabra *et al.*이 제안하였다.^[16,17] 위 기법은 수신 신호만을 이용하여 채널 임펄스 응답과 송신신호를 추정할 수 있고, 본 논문에서는 두 정보 중 채널 임펄스 응답만을 사용하였다. 시간 영역에서 수신신호, 임펄스함수, 송신신호와의 관계는 Eq. (1)과 같으며, 주파수 영역에서는 Eq. (2)과 같다.

$$r_j(t) = h_j(t) * s(t), \quad (1)$$

$$R_j(\omega) = G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega) S(\omega). \quad (2)$$

Eq. (1)에서 $r_j(t)$ 는 j 번째에 해당하는 수신기에 수신된 신호이며, $h_j(t)$ 는 채널 임펄스 응답, $s(t)$ 는 송신 신호를 뜻하며, Eq. (2)에서 $S(\omega)$, $R_j(\omega)$ 는 각각 $s(t)$, $r_j(t)$ 의 스펙트럼을 나타낸다. \vec{r}_s , \vec{r}_j 는 각각 송신기와 j 번째 수신기의 위치벡터를 나타내며, $G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)$ 는 송신기와 j 번째 수신기 사이의 전달함수를 나타낸다.

Eq. (2)의 송신 신호의 스펙트럼 $S(\omega)$ 는 Eq. (3)과 같이 세기를 나타내는 $|S(\omega)|$ 와 위상을 나타내는 $e^{i\theta_s(\omega)}$ 로 분리할 수 있다.

$$R_j(\omega) = G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega) |S(\omega)| e^{i\theta_s(\omega)}. \quad (3)$$

Eq. (3)에서 송신신호 스펙트럼의 크기를 소거하기 위해 수신신호 정규화가 필요하며, 이를 위해 각 센서에 수신되는 신호의 파워가 일정하다는 가정 하에

Eq. (4)와 같이 표현할 수 있다. $\tilde{R}_j(\omega)$ 는 수신신호의 정규화된 스펙트럼을 의미한다.

$$\begin{aligned}\tilde{R}_j(\omega) &= \frac{R_j(\omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |R_j(\omega)|^2}} \\ &= \frac{G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega) |S(\omega)| e^{i\theta_s(\omega)}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega) |S(\omega)| e^{i\theta_s(\omega)}|^2}}.\end{aligned}\quad (4)$$

Eq. (4)의 분모에서 $e^{i\theta_s(\omega)}$ 의 크기는 1이며, $|S(\omega)|$ 는 상수로써 약분된다. 즉, Eq. (5)와 같이 전달함수와 송신신호의 위상 부분만 남게 된다. 따라서 위상 보정 인자를 통하여 송신신호의 위상 부분을 보정하면 전달함수를 추정할 수 있다.

$$\tilde{R}_j(\omega) = \frac{G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)|^2}} e^{i\theta_s(\omega)}.\quad (5)$$

위상 보정을 위해서 Eq. (6)을 도입하며, 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}e^{-i\alpha(\omega)} &= e^{-i\arg\left[\sum_{j=1}^N W_j \tilde{R}_j(\omega)\right]} \\ &= e^{-i\left[\arg\left[\sum_{j=1}^N W_j G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)\right] + \theta_s(\omega)\right]}.\end{aligned}\quad (6)$$

Eq. (6)을 통해 계산된 위상 보정 인자를 Eq. (5)에 곱하게 되면 추정된 전달함수 $G_e(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)$ 는 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}G_e(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega) &= \tilde{R}_j(\omega) e^{-i\alpha(\omega)} \\ &= \frac{G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)|^2}} e^{-i\arg\left[\sum_{j=1}^N W_j G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)\right]}.\end{aligned}\quad (7)$$

마지막으로 적절한 가중치 벡터 W_j 를 계산하여 대입하면 전달함수를 구할 수 있게 된다. 가중치 벡터를 계산하는 방법에는 모드 또는 음선 경로 정보

를 이용하는 방법이 있으며^[16,17], 본 논문은 Eq. (8)과 같이 음선 경로 정보를 이용하는 방법을 사용하였다.

$$W_j \propto e^{-i\omega(j-1)\left(\frac{d\sin\theta_m}{c}\right)}.\quad (8)$$

Eq. (8)에서 d 는 배열센서에서 수신기 간 간격을 의미하며, \bar{c} 는 배열센서가 위치한 부분의 평균 음속, θ_m 은 m 번째 경로에 해당하는 음선의 입사 각도를 나타낸다. θ_m 은 Eqs. (9)와 (10)을 통해 해당 주파수 대역($f_1 \sim f_2$)에 대한 빔 형성을 수행한 후의 높은 에너지에 해당하는 빔 출력 각도이다.

$$b(\theta, \omega) = \sum_{j=1}^N \tilde{R}_j(\omega) e^{-i\omega(j-1)\left(\frac{d\sin\theta}{c}\right)},\quad (9)$$

$$B(\theta) = \int_{2\pi f_1}^{2\pi f_2} |b(\theta, \omega)|^2 d\omega.\quad (10)$$

Eq. (8)을 통하여 계산한 가중치 벡터를 Eq. (7)에 대입을 하게 되면 임의의 위상편이에 대한 항이 Eq. (11)과 같이 주파수에 대한 선형 종속인 값으로 바뀌어 나타낼 수 있다.

$$\arg\left[\sum_{j=1}^N W_j G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)\right] = a + b\omega.\quad (11)$$

최종적으로 추정된 전달함수는 Eq. (12)와 같이 표현할 수 있으며, 임의의 시간 지연이 적용된 형식으로 표현된다.

본 논문에서는 채널 임펄스 응답을 통해 각 수신기에 음선이 도달하는 상대적인 시간 차이를 추정하는 것이 목적이므로 Eq. (12)의 $e^{-i\omega\tau}$ 에 해당하는 임의의 시간 지연은 무시할 수 있다. 그리고 Eq. (12)를 역 푸리에 변환을 통하여 계산하면 임의의 시간 지연이 적용된 시간 영역 임펄스 응답으로 표현할 수 있다.

$$\frac{G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)|^2}} e^{-i\omega\tau}.\quad (12)$$

III. 음원 위치 추정 알고리즘

음선 역전파 기법은 수신기로부터 음선의 입사각을 추정하고, 추정된 각도로 음선을 역전파하여 집중되는 지점을 통해 음원의 위치를 추정하는 기법이다.

이상적인 환경에서 수신되는 신호의 각도로 음선을 역전파하게 되면 Fig. 3(a)와 같이 음원의 위치로 집중된다. 하지만 Fig. 3(b)의 상황과 같이 해양 환경에 영향을 받아 수직 배열 센서에 기울기가 있는 경우, 수신되는 신호의 각도는 $\Delta\theta$ 만큼의 차이가 생기며, 이러한 상황에서 기존의 음선 역전파 기법을 사용하여 음원의 위치를 추정하게 되면 큰 위치추정 오차가 발생하게 된다. 따라서 음선 역전파 기법을 해상 데이터에 적용하기 위해선 배열 센서의 기울기 보정이 필요하며, 과정은 다음과 같다.

첫째, 수신되는 신호의 각도에서 $\Delta\theta$ 만큼의 각도 보상을 적용한다(e.g., $|\Delta\theta| < 5^\circ$).

$$\tilde{\theta}_k = \theta_k - \Delta\theta \quad (1 \leq k \leq K), \quad (13)$$

여기서 k 는 역전파되는 음선의 인덱스이며, 총 K 개의 음선이 역전파된다.

둘째, 보상된 신호의 각도 $\tilde{\theta}$ 로 BELLHOP 모델^[18]을 이용하여 수신 배열 센서의 중심인 z_c 에서 음선을 역전파시킨다.

셋째, 음선이 집중되는 정도를 수치로 나타내기 위해 다음의 수식을 계산한다.

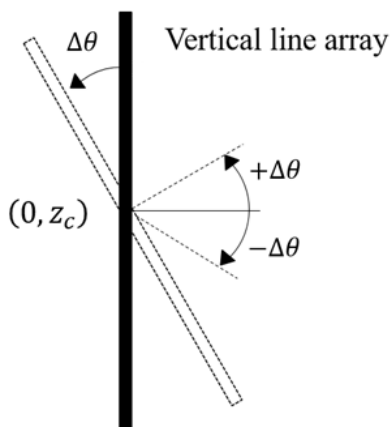


Fig. 1. Coordinates system of array tilt.

$$\sigma(r, \Delta\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{z(r)_i - \bar{z}(r)\}^2}{N}}, \quad (14)$$

여기서 r 은 음선이 X 축 방향으로 이동한 거리를 의미하고, $\Delta\theta$ 는 적용된 임의의 배열 기울기, $z(r)_i$ 는 Fig. 2와 같이 수심을 일정 간격의 격자로 나뉘었을 때, r 만큼의 거리에서 음선이 지나는 i 번째 격자 깊이를 의미한다. 또한 $\bar{z}(r)$ 은 r 만큼의 거리에서 음선이 지나는 총 N 개의 격자 깊이 평균을 뜻한다. 따라서 $\sigma(r)$ 은 Y 축 방향(깊이)으로 음선들이 얼마나 집중되어 있는지 수치적으로 나타내는 표준편차이다.

넷째, $r_e(\Delta\theta) = \min \sigma(r)$, $z_e(\Delta\theta) = \bar{z}(r_e)$ 위치에 도달하는 음선의 도달 시간을 BELLHOP 모델을 이용하여 계산한다.

다섯째, BELLHOP을 통해 계산한 음선의 도달 시간차이와 RBD를 통해 계산한 CIR의 음선의 도달 시간 차이를 Eq. (15)을 통해 계산한다.

$$J(\Delta\theta) = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (t_m - t_{m+1}) - (\hat{t}_m - \hat{t}_{m+1})^2, \quad (15)$$

M 은 역전파하는 음선의 총 개수를 의미하며, t_m 은 BELLHOP을 통해 계산한 음선의 도달시간, \hat{t}_m 은 RBD를 통해 계산한 CIR의 음선의 도달시간 차이를 나타낸다.

여섯째, 위의 과정을 바탕으로 계산된 수직 배열 센서의 기울기 $\Delta\hat{\theta} = \min J(\Delta\theta)$ 를 보정하여 음선을 역전파하여 $r_e = \min \sigma(r)$ 과 그때의 $z_e = \bar{z}(r_e)$

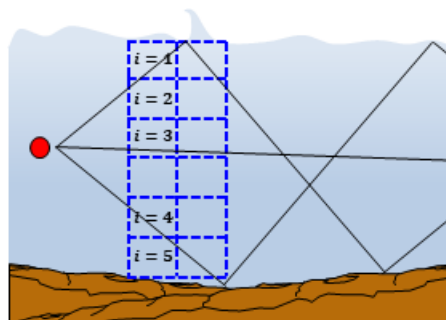


Fig. 2. Example of third procedure.

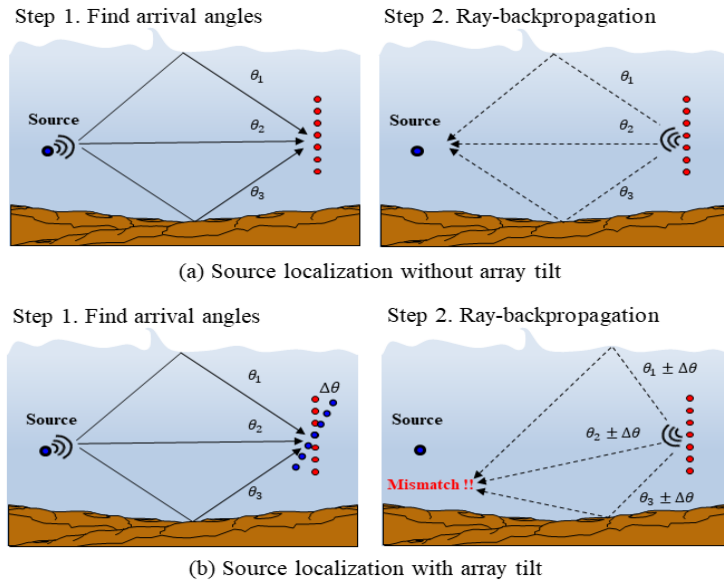


Fig. 3. The array tilt will be confined to a two-dimensional plane containing the source and receiver, (a) Source localization without array tilt, (b) Source localization with array tilt.

를 계산하여 음원의 위치 (r_e, z_e) 를 추정한다.

본 논문의 알고리즘은 음원과 수직 배열 센서를 2차원 단면으로 투영하여 음원의 위치를 추정한다. 따라서 수직 배열 센서가 음파전달방향의 단면 뿐 아니라 좌우 수평방향으로 수직 배열 센서가 틀어지는 것은 2차원 단면상으로 보았을 때, 배열 개구면이 줄어드는 효과로 나타난다. 배열 개구면에 대한 문제는 본 논문의 알고리즘 적용에 있어 그 영향이 작기 때문에 수평 방향으로의 수직 배열 센서의 기울기는 무시한다.

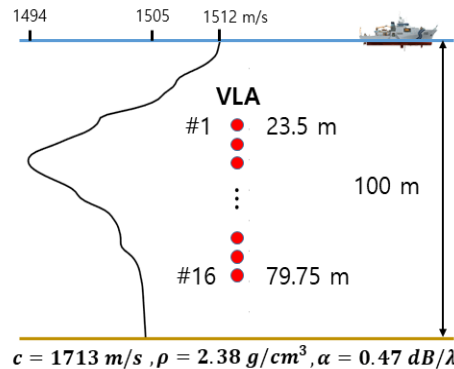


Fig. 4. Configuration of SAVEX15 experiment.

IV. 해상 실험 및 결과 분석

4.1 SAVEX15 실험 환경

SAVEX15 실험은 수중음원 탐지, 수중음향 통신 성능 분석, 수중음향 채널측정 및 배경잡음 측정을 목적으로 시행되었다. 시험 일정은 2015년 5월 14일부터 2015년 5월 28일까지 총 15일간 진행되었으며, 제주도 남남서향 바다에서 시행되었다.^[19]

실험의 구성은 Fig. 4와 같으며, 실험에 사용된 수직 배열 센서는 총 16개의 수신기로 구성되어 있으며, 수신기 간 간격은 3.75m의 등간격이다.

SAVEX15 실험데이터 중 본 논문에서 사용된 데

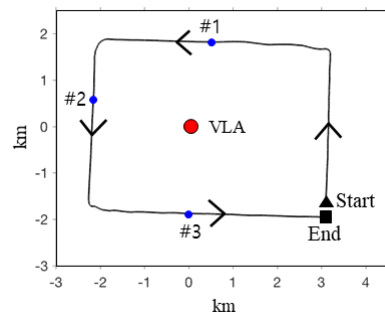


Fig. 5. The locations of each data.

이터는 세 가지 경우로 Fig. 5의 위치에서 측정된 데이터이다. 첫 번째는 수신 배열의 기울기가 0°에 가까운 경우, 두 번째는 양의 기울기를 갖는 경우와 세

번째는 음의 기울기를 갖는 경우이다. 단, 배열의 기울기는 선형성을 갖는다고 가정한다.

4.2 SAVEX15 데이터 결과 분석

SAVEX15 수직 배열 센서에 수신된 선박소음 데이터를 200Hz에서 900Hz까지의 주파수 대역을 이용하여 결과를 분석하였다. 위 주파수 대역으로 빔 형성을 수행 후 주파수에 대해 비상관 합산 처리를 하게 되면 선박 소음이 수신되는 각도를 계산할 수 있다.

Fig. 6의 첫 번째 그림은 수신 배열 센서의 기울기가 0°에 가까울 때, 선박 소음의 빔 출력이며, 두 번째 그림은 출력된 각도를 BELLHOP을 통하여 음선을 역전파하여 음원의 위치(자홍색 점)를 추정하는 것이다.

수직 배열 센서의 기울기를 보정하기 위하여 Fig. 7의 $J(\Delta\theta)$ 를 계산하였다. 계산된 $\min J(\Delta\theta)$ 은 +0.2°로 위 각도를 보정하여 음선을 역전파했을 때, 결과는 Fig. 9와 같고, 자홍색 점으로 음원의 위치가 추정된다. 자홍색 점에서의 음선의 도달 시간 차이는 Fig. 8과 같다.

수직 배열 센서의 기울기가 0°에 가깝기 때문에 RBD를 통해 도출해 낸 음선 도달 시간 차이(파란 실선)와 수직 배열 센서의 기울기를 보정 전(검은 실선), 후(빨간 실선)의 상대적 음선 도달 시간 차이가 유사하게 계산되었다.

수직 배열 센서가 양의 기울기를 갖는 경우 빔 형성 결과와 음선 역전파 결과는 Fig. 10과 같으며, $J(\Delta\theta)$ 를 계산하면 Fig. 11과 같이 도출된다. $\min J(\Delta\theta)$ 의 값이 -3°로 계산되며, 센서의 기울기를 -3°만큼 보정하여 역전파했을 때의 결과는 Fig. 13과 같고, 자홍색 점에서 음원의 위치가 추정됨을 계산하였다. 자홍색 점에서 계산한 음선의 도달 시간 차이는 Fig. 12와 같다. 배열 센서의 기울기를 보정하기 전(검은 실선)과 후(빨간 실선)의 음선 도달 시간의 차이가 크며, 보정 후 음선의 도달 시간 차이와 RBD를 통해 추정된 음선(파란 실선)의 도달 시간 차이가 유사함을 알 수 있다.

수직 배열 센서가 음의 기울기를 갖는 경우의 빔 형성 결과와 음선 역전파 결과는 Fig. 14와 같이 도출되며, Fig. 15는 $J(\Delta\theta)$ 를 계산한 결과로 $\min J(\Delta\theta)$

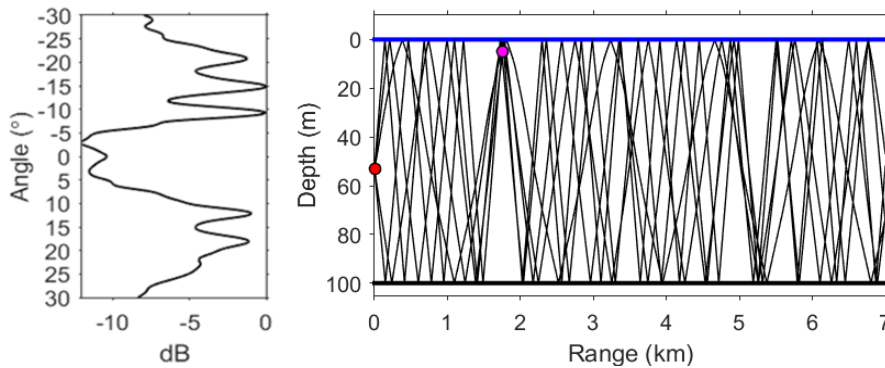


Fig. 6. Result of beamforming and ray-backpropagation in case of approximately 0°array tilt.

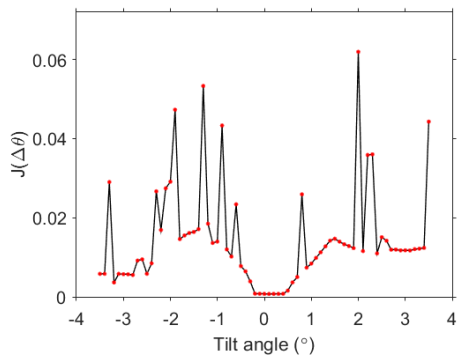


Fig. 7. $J(\Delta\theta)$ for compensating array tilt.

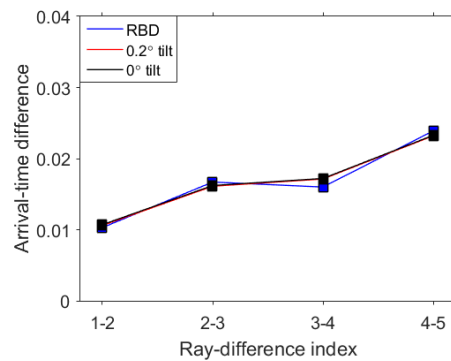


Fig. 8. Ray arrival time differences.

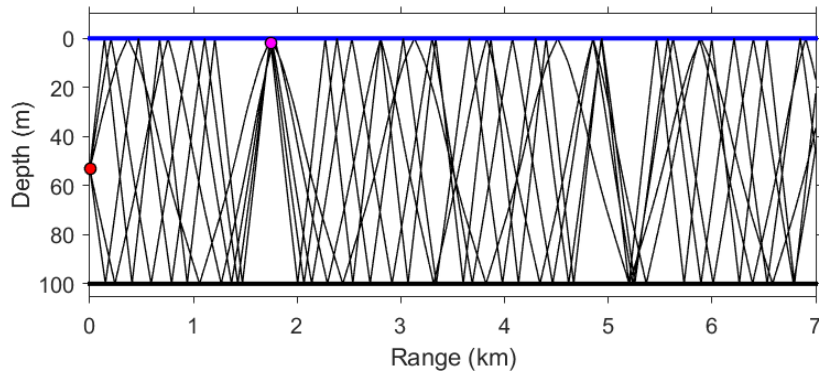


Fig. 9. Result of ray-backpropagation after compensating -0.2° array tilt.

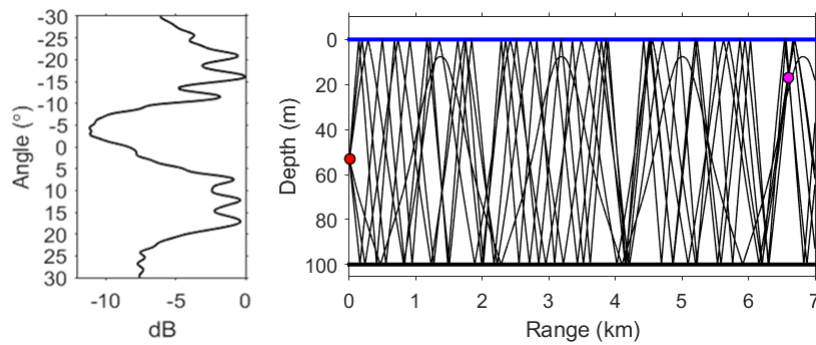


Fig. 10. Result of beamforming and ray-backpropagation in case of plus array tilt.

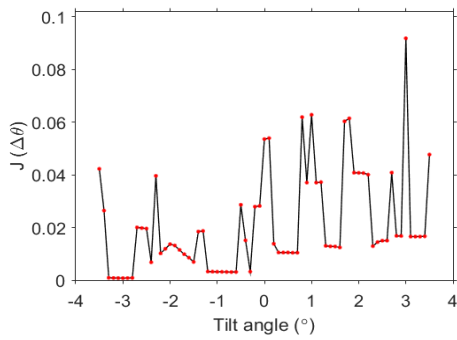


Fig. 11. $J(\Delta\theta)$ for compensating array tilt.

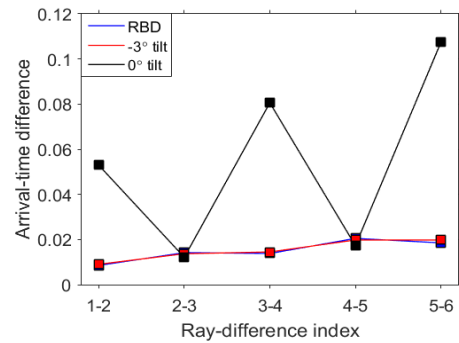


Fig. 12. Ray arrival time differences.

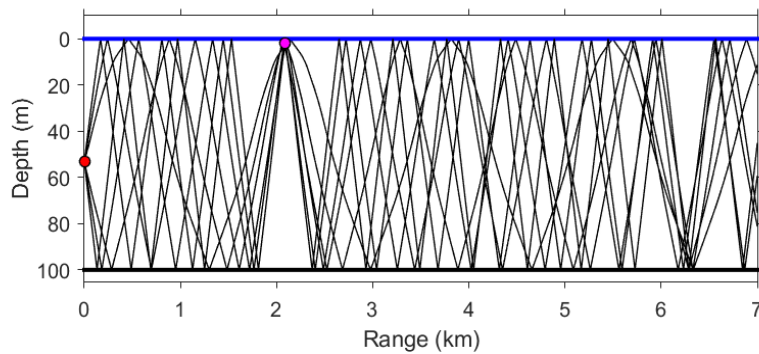


Fig. 13. Result of ray-backpropagation after compensating 3° array tilt.

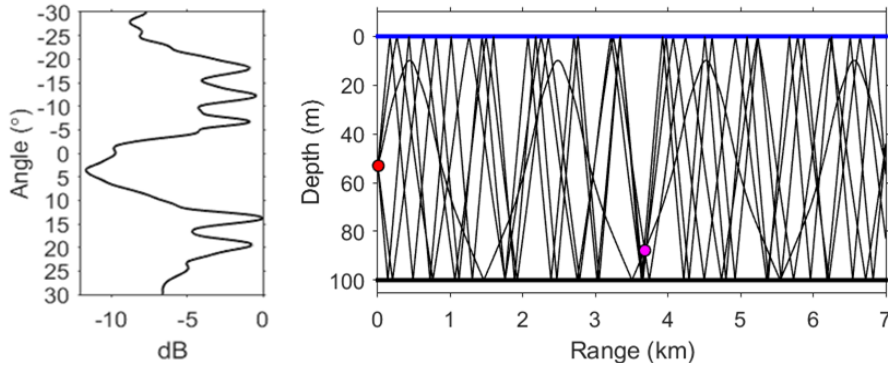


Fig. 14. Result of beamforming and ray-backpropagation in case of minus array tilt.

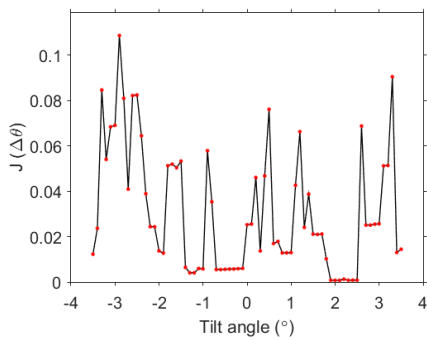


Fig. 15. $J(\Delta\theta)$ for compensating array tilt.

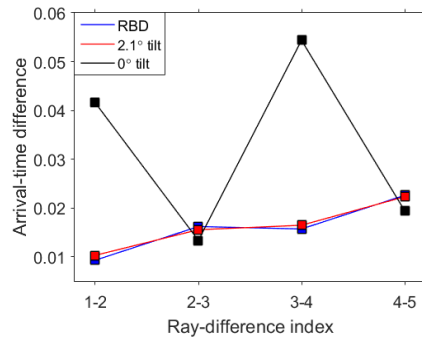


Fig. 16. Ray arrival time differences.

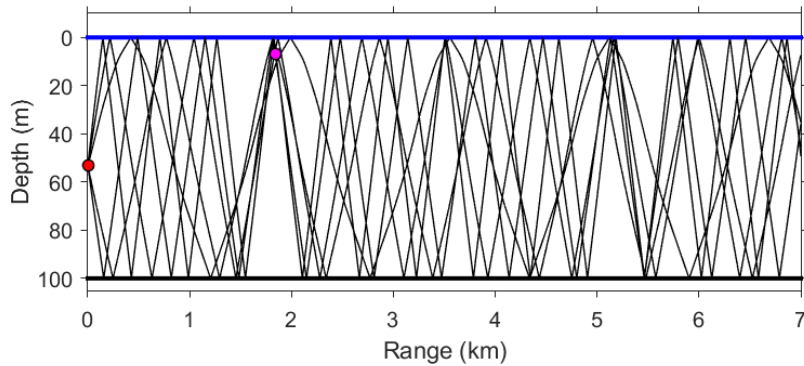


Fig. 17. Result of ray-backpropagation after compensating -2.1° array tilt.

는 2.1° 로 계산된다. 기울기를 보정 후 음선을 재전파한 결과는 Fig. 17이며, 기울기 보정 전(검은 실선)과 보정 후(빨간 실선)의 음선 도달 시간 차이를 비교한 결과는 Fig. 16과 같다. 기울기 보정 후의 음선 도달 시간의 차이가 RBD를 통해 계산된 음선 도달 시간 차이와 유사하기 때문에 음선의 집속 지점(자홍색 점)이 음원의 위치임을 추정할 수 있다.

음원 위치 추정 알고리즘의 정확도를 검증하기 위해 실험 선박에서 수집한 GPS 데이터와 알고리즘을 통해 추정된 거리를 비교하였으며, 결과는 Tables 1,

2와 같다. Table 1은 수직 배열 센서의 기울기를 보정하기 전 추정 선박 위치와 GPS 데이터를 비교한 결과이며, 센서의 기울기가 크면 위치 추정 오차도 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 Table 2는 수직 배열 센서의 기울기를 보정한 후의 추정 선박 위치와 GPS 데이터를 비교한 결과이며, 기울기를 보정 후엔 위치 추정의 오차가 10% 이내로 작아지는 결과가 도출된다.

선박 데이터를 분석하였기 때문에 음원의 깊이는 해수면 부근으로 선박 위치 추정이 되는지 확인이 필요하며, 기울기 보정 후의 추정 선박 위치를 확인

Table 1. Calculating error between estimated range and GPS data before compensating array tilt.

Data	Estimated position	GPS data (VLA to ship)	Error (%)
#1 : -0.2° array tilt	(1749, 5) m	1887 m	7.3 %
#2 : +3.0° array tilt	(6607, 17) m	2213 m	198.6 %
#3 : -2.1° array tilt	(3681, 88) m	1879 m	95.9 %

Table 2. Calculating error between estimated range and GPS data after compensating array tilt.

Data	Estimated position	GPS data (VLA to ship)	Error (%)
#1 : -0.2° array tilt	(1746, 2) m	1887 m	7.4 %
#2 : +3.0° array tilt	(2087, 7) m	2213 m	5.7 %
#3 : -2.1° array tilt	(1846, 2) m	1879 m	1.7 %

해 보았을 때, 세 가지 경우 모두 해수면 근처로 음선이 집중되었다.

본 논문의 알고리즘을 더 정확히 검증하기 위해 초음파 해류계(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)를 통해 실험시간대의 해류방향 및 유속크기에 따른 수직 배열 센서의 기울기를 확인해 볼 필요가 있다. 하지만 안타깝게도 당시 ADCP의 전원이 꺼진 상태로 실험이 진행되어 해류방향 및 유속크기와 같은 데이터를 획득할 수 없었다. 그래서 검증을 위해 SAVEX15 실험 관련 논문 중 동일 시간대의 데이터를 사용한 Byun *et al.*^[13]의 논문을 참고하여 수직 배열 센서 기울기에 대한 타당성을 검증하였다. Byun *et al.*의 논문은 Nam *et al.*^[19]의 논문의 결과를 통해 당시 실험 시간대의 VLA 기울기 방향과 조류의 방향이 일치한다는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 SAVEX15 실험 데이터를 이용하여 선박 위치 추정을 수행하였다. 빔 형성을 통해 음선의 입사각을 추정하고, 수직 배열 센서의 기울기를 보정시킨 후 음선을 역전파하여 집중된 위치가 GPS 위치와 부합하는지 확인하였다. 수직 배열 센서의 기울기 보정을 위해 RBD 기법을 이용하여 CIR를 추정하였고, 이를 통해 음선의 상대적 도달시간의 격차를 계산하였다. 기울기 보정과 위치 추정에 대한 타당성을 검증하기 위해 CIR로 추정된 음선의 도달시간 격차와 BELLHOP을 이용해 계산한 음선 도달시간의 격차를 비교하였다. 또한 선박 위치 추정의

결과를 GPS 데이터와 비교했을 때, 거리 추정의 오차는 10% 이내로 계산되었다.

감사의 글

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “중주파수 대역의 배열 센서를 이용하는 장거리 수중음향 원격 탐사 핵심 기술 개발”에 의해 수행되었음(PES9410).

References

1. H. P. Bucker, “Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound sources in shallow water,” *J. Acoust. Soc. Am.* **59**, 368-373 (1976).
2. A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and P. N. Mikhalevsky, “An overview of matched field methods in ocean acoustics,” *IEEE J. Ocean. Eng.* **18**, 401-424 (1993).
3. D. R. Del Balzo, C. Feuillade, and M. M. Rowe, “Effects of water-depth mismatch on matched-field localization in shallow water,” *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 2180-2185 (1988).
4. B. M. Worthmann, H. C. Song, and D. R. Dowling, “High frequency source localization in a shallow ocean sound channel using frequency-difference matched field processing,” *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, 3549-3562 (2015).
5. S. Lee and N. C. Makris, “The array invariant,” *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 336-351 (2006).
6. H. C. Song and C. Cho, “The relation between the waveguide invariant and array invariant,” *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, 899-903 (2015).

7. C. Cho, H. C. Song, and W. S. Hodgkiss, "Robust source-range estimation using the array/waveguide invariant and a vertical array," J. Acoust. Soc. Am. **139**, 63-69 (2016).
8. H. C. Song and C. Cho, "Array invariant-based source localization in shallow water using a sparse vertical array," J. Acoust. Soc. Am. **141**, 183-188 (2017).
9. C. Cho and H. C. Song, "Impact of array tilt on source-range estimation in shallow water using the array invariant," J. Acoust. Soc. Am. **141**, 2849-2856 (2017).
10. H. C. Song, C. Cho, G. Byun, and J. S. Kim, "Cascade of blind deconvolution and array invariant for robust source-range estimation," J. Acoust. Soc. Am. **141**, 3270-3273 (2017).
11. C. Cho, H. C. Song, P. Hursky, and S. M. Jesus, "Iterative range estimation in a sloping-bottom shallow-water waveguide using the generalized array invariant," J. Acoust. Soc. Am. **142**, 55-60 (2017).
12. G. Byun, J. S. Kim, C. Cho, H. C. Song, and S. -H. Byun, "Array invariant-based ranging of a source of opportunity," J. Acoust. Soc. Am. **142**, EL286-EL291 (2017).
13. G. Byun, C. Cho, H. C. Song, J. S. Kim, and S. Byun, "Array invariant-based calibration of array tilt using a source of opportunity," J. Acoust. Soc. Am. **143**, 1318-1328 (2018).
14. S. H. Abadi, D. Rouseff, and D. R. Dowling, "Blind deconvolution for robust signal estimation and approximate source localization," J. Acoust. Soc. Am. **131**, 2599-2610 (2010).
15. S. -H. Byun, Christopher M. A. Verlinder, and K. G. Sabra, "Blind deconvolution of shipping sources in an ocean waveguide," J. Acoust. Soc. Am. **141**, 797-807 (2017).
16. K. G. Sabra and D. R. Dowling, "Blind sound channel deconvolution using artificial time reversal," J. Acoust. Soc. Am. **116**, 262-271 (2004).
17. K. G. Sabra, H. C. Song, and D. R. Dowling, "Ray-based blind deconvolution in ocean sound channels," J. Acoust. Soc. Am. **127**, EL42-EL47 (2010).
18. M. B. Porter, "The BELLHOP manual and user's guide: PRELIMINARY DRAFT," Heat, Light and Sound Research, Inc, 2010.
19. S. H. Nam, D. J. Kim, S. W. Lee, B. G. Kim, K. M. Kang, and Y. K. Cho, "Nonlinear internal wave spirals in the northern East China Sea," Sci, Rep. **8**, 3473 (2018).

저자 약력

▶ 조 성 일 (Seong-il Cho)



2016년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학사
2018년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학석사
2018년 2월 ~ 현재: 한국해양대학교 수료
후 연구원

▶ 변 기 훈 (Gihoon Byun)



2013년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학사
2015년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학석사
2018년 2월: 한국해양과학기술원-한국해
양대학교 해양과학기술전문대학원 공
학박사
2018년 ~ 현재: Scripps Institution of Ocean-
ography, 박사후연구원

▶ 변 성 훈 (Sung-Hoon Byun)



1998년 2월: 서울대학교 조선해양공학과
공학사
2000년 2월: 서울대학교 조선해양공학과
공학석사
2012년 8월: 서울대학교 조선해양공학과
공학박사
2014년 8월 ~ 2015년 7월: Georgia Institute
of Technology, 박사후연구원
2000년 ~ 현재: 한국해양과학기술원 부설
선박해양플랜트연구소 책임연구원

▶ 김 재 수 (J. S. Kim)



1981년: 서울대학교 조선공학과 공학사
1984년: 미국 University of Florida, 해양공
학 공학석사
1989년: 미국 MIT, 해양공학, 수중음향 공
학박사
1990년~1991년: 국방과학연구소 선임연구원
1999년~2001년: 미국 Scripps 해양연구소
Visiting Scientist
2009년~2010년: 미국 Scripps 해양연구소
Visiting Scientist
1991년~현재: 한국해양대학교 해양공학과
교수