

# 수평 배열을 이용한 배열 불변성 기반의 음원 거리 추정 성능 분석

## Analysis of array invariant-based source-range estimation using a horizontal array

구흥주,<sup>1</sup> 변기훈,<sup>2</sup> 변성훈,<sup>3</sup> 김재수<sup>4†</sup>

(Hongju Gu,<sup>1</sup> Gihoon Byun,<sup>2</sup> Sung-Hoon Byun,<sup>3</sup> and J. S. Kim<sup>4†</sup>)

<sup>1</sup>대우조선해양, <sup>2</sup>Scripps Institution of Oceanography, <sup>3</sup>선박해양플랜트연구소, <sup>4</sup>한국해양대학교 해양공학과  
(Received November 7, 2018; revised January 7, 2019; accepted March 25, 2019)

**초 록:** 소나 체계에서 표적의 거리를 수동으로 추정하는 방법은 활발히 연구되고 있는 분야이다. 본 논문은 배열 불변성을 기반으로 여러 환경과 소나 매개변수에 따른 거리 추정 성능을 제시한다. 배열 불변성은 천해에서의 음원 거리 추정 기법으로서, 상세한 환경 정보가 불필요하며 연산량이 적어 실시간 거리 추정이 가능하다는 장점을 가진다. 본 논문에서는 기법의 성능을 확인하기 위해서 모의실험을 수행하였고, 2013년 진해항 인근에서 수행된 해상실험 데이터에 본 알고리즘을 적용하였다. 본 연구는 모의 실험을 통하여 음원의 방위각, 송신 신호의 길이, 그리고 수신 배열의 길이에 따른 거리 추정 성능을 보여준다. 또한, 네스티드 배열과 균일 선배열에 대한 거리 추정 결과를 비교하였다.  
**핵심용어:** 배열 불변성, 거리 추정, 수평 선 배열, 빔-시간 강도 패턴

**ABSTRACT:** In sonar systems, the passive ranging of a target is an active research area. This paper analyzed the performance of passive ranging based on an array invariant method for different environmental and sonar parameters. The array invariant developed for source range estimation in shallow water. The advantages of this method are that detailed environmental information is not required, and the real-time ranging is possible since the computational burden is very small. Simulation was performed to verify the algorithm. And this method is applied to sea-going experimental data in 2013 near Jinhae port. This study shows the performance of ranging for source orientation, transmission signal length, and length of a receiver through numerical simulation experiments. Also, the results using nested array and uniform line arrays are compared.

**Keywords:** Array invariant, Range estimation, Horizontal nested array, Beam-time intensity pattern

**PACS numbers:** 43.60.Jn, 43.30.Wi

### 1. 서 론

수중에서의 탐지 수단 가운데 널리 적용되는 소나를 이용한 거리 추정은 표적의 위치를 파악하는 것 뿐만 아니라 방사소음 분석 시 반드시 필요한 정보로 활용된다.<sup>[1]</sup>

소나가 쓰이는 해양은 공기 중에 비해 시공간적으

로 변동이 심하고 매우 불안정하므로 음원의 거리 추정이 매우 까다롭다. 따라서 해양 환경 변수의 영향을 감소시켜 성능을 향상시키기 위해 다양한 연구들이 수행되고 있다.

가장 널리 알려져 연구되고 있는 정합장 처리 기법(Matched Field Processing, MFP)은 해양음장을 모사하고 이것을 배열에서 측정된 신호와 정합하여 음원의 위치를 추정하는 기법이다. 이때 해양 환경을 정확하게 모사하는 것에 어려움이 있어 이에 따른 오정합 문제가 초래되며 다른 방식에 비해 연산량이

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

많다.<sup>[2,3]</sup> 또 다른 기법으로 거리와 주파수의 함수에서 모드간 간섭에 의한 강도의 기울기는 음원의 거리에 비례하여 나타난다는 도파관 불변성(waveguide invariant)이론을 통해 거리를 추정할 수 있다.<sup>[4]</sup> 이 방법은 많은 수의 도파관 모드에 대한 정보를 필요로 한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 배열 불변성(array invariant) 기법을 이용하여 음원의 거리를 추정한다. 이 기법은 이상적인 천해 해양 환경에서 광대역 신호의 분산 특징을 이용하여 음원의 거리를 추정한다. 또한 해양의 음속 구조나 해저면의 음향정보와 같은 상세한 환경 정보 없이 수신 신호와 수신 배열의 정보만으로 거리 추정이 가능하며 연산량이 적어 실시간 거리 추정이 가능하다는 장점을 가진다.<sup>[5-11]</sup>

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 배열 불변성 기법의 개념과 이를 통한 거리 추정 알고리즘에 대해 설명한다. III장에서는 모의실험과 해상실험을 통한 거리 추정 결과를 제시하고 IV장에서는 여러 변수에 따른 배열 불변성 기반의 거리 추정 성능을 제시한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 배열 불변성 이론

배열 불변성은 이상적인 도파관에서 광대역 신호의 확산 특징을 사용하여 음원의 거리를 추정하는 기법이다. 이 기법은 평면파 빔 형성으로 빔-시간 영역 강도 패턴을 얻으며 이를 통해 거리를 추정한다.<sup>[5]</sup>

본 절에서는 배열 불변성 기반의 거리 추정 알고리즘의 유도 과정을 살펴본다.

해양 도파관 환경에서  $n$  번째 모드가 수신되는 시간  $t$  는 음원과 수신기 중심 사이의 거리  $r_0$  과  $n$  번째 모드의 군속도  $v_{gn}$  의 비로 Eq. (1)과 같다.

$$t = \frac{r_0}{v_{gn}(f)}. \quad (1)$$

이때  $f$  는 음원의 주파수 대역 내의 임의의 주파수이다. 좌표계에서 고각  $\phi$  와 방위각  $\theta$  을 Fig. 1과 같이 설정하였다. 수평 선배열이  $y$  축 방향으로 놓여 신호를 수신한다고 가정할 때  $n$  번째 모드가 수신되는 시간

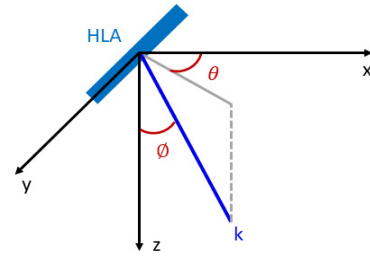


Fig. 1. Definition of the elevation angle and the bearing.

$t$  에 대하여 빔형성 출력의 최대치의 방위는 Eq. (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\tilde{s}_n(t) = \sin \tilde{\phi}_n(t) \sin \theta_0. \quad (2)$$

Eq. (2)를 거리에 대한 함수로 나타내기 위해 다음과 같은 이상적인 도파관에서 군속도와 고각의 관계를 이용한다.

$$\begin{aligned} v_{gn} &= \frac{\partial \omega}{\partial k_{zn}} = \frac{2\pi \partial f}{\partial \sqrt{k^2 - k_{zn}^2}} = \frac{2\pi \partial f}{\partial k \frac{k}{k_{zn}}} \\ &= \frac{2\pi \partial f}{\partial k} \sin \phi_n = c \sin \phi_n \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서  $c$  는 수중에서 음파의 전달속도를 의미한다. Eq. (1)과(3)을 Eq. (2)에 대입하면 Eq. (4)를 얻는다.

$$\tilde{s}_n(t) \equiv \tilde{s}(t) = \frac{r_0}{ct} \sin \theta_0. \quad (4)$$

$\tilde{s}_n(t)$  를  $\tilde{s}(t)$  로 모드에 대해 합쳐서 사용한 이유는 주파수 대역에 따른 빔-시간 영역 세기 패턴을 통해 설명된다. 빔-시간 영역 세기 패턴은 주파수 대역이 좁으면 불연속적인 선을 이루지만 주파수 대역이 넓으면 연속적인 하나의 선을 이룬다.

Eq. (4)에서 음속 구조가 깊이에 따라 변한다면  $\tilde{s}(t)$  를 Eq. (5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\tilde{s}(z, t) \simeq \frac{r_0}{c(z)t} \sin \theta_0. \quad (5)$$

음원의 주파수 대역이 충분히 클 때 빔-시간 영역

세기 패턴에서 연속적인 선의 기울기를 배열 불변 인자  $\chi$ 로 정의하며 Eq. (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \chi &\equiv \frac{d\tilde{s}(z,t)}{dt} = -\frac{c(z)}{r_0} \sin\theta_0 \cos^2\phi. \\ &= -\beta \left( \frac{c(z)}{r_0} \right) \sin\theta_0 \end{aligned} \quad (6)$$

도파관 환경에서 음파가 전달될 때 모드간의 간섭에 의해 전달 손실 패턴은 골과 마루를 갖는데 이것을 간섭 패턴이라 한다. 간섭패턴의 변화는 거리와 주파수의 함수로 도파관 전파의 특성을 포함하고 있다. 이 패턴의 기울기를 스칼라 매개변수로 나타낸 것이 도파관 불변 인자  $\beta$ 이다. 도파관 불변 인자는 이상적인 도파관 환경에서 Eq. (7)로 표현되며 임계각이  $20^\circ$ 이하인 천해에서 모드 군에 대해 대략적으로 1로 일정하다.

$$\beta = \cos^2\phi. \quad (7)$$

따라서 배열불변인자  $\chi$ 는 Eq. (8)로 표현된다.

$$\chi \equiv -\beta \left( \frac{c(z)}{r_0} \right) \sin\theta_0. \quad (8)$$

Eq. (8)의 변수를 이항하여 거리에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{r}_0 = -\beta \left( \frac{c(z)}{\hat{\chi}} \right) \sin\hat{\theta}_0. \quad (9)$$

위 식에서  $\hat{r}_0$ 는 거리 추정치,  $\hat{\chi}$ 는 배열 불변 인자의 추정치,  $\hat{\theta}_0$ 는 음원의 방위각 추정치이다. 음파의 전달속도  $c(z)$ 는 수신기가 위치한 깊이에서의 음속을 사용한다. 최종적으로 본 논문에서는 Eq. (9)를 통해 거리를 추정한다. 이 식에 의하면 음원의 거리는 음원의 주파수, 모드 차수, 음원의 깊이, 수신기의 깊이, 도파관의 깊이에 독립적임을 알 수 있다. 따라서 이상적인 도파관에서 배열 불변성 기반의 거리추정은 상세한 환경정보 없이 거리 추정이 가능하다.

### III. 배열 불변성 기반의 거리 추정: 모의실험 및 해상실험 결과

본 논문에 적용된 실험은 수심이 약 50m인 진해항 인근 해역에서 수행되었으며 구성은 Fig. 2와 같다. 음원은 선박에 의해 수심 30m로 예인되었으며 이동 중 전구를 깨뜨려 발생된 충격파 신호를 사용하였다. 수신 배열은 해저면에 설치되었다.

본 실험은 한국해양과학기술원(Korea Institute of Ocean Science & Technology, KIOST)의 장비를 사용하였으며 한국해양과학기술원으로부터 실험 데이터를 지원받았다.

실험 데이터는 두 가지로 Case 1은 음원과 수신기 사이의 거리가 767.5 m, 방위각이  $76.8^\circ$ 이고 Case 2는 음원과 수신기 사이의 거리가 718.7 m, 방위각이  $-41.7^\circ$ 로 설정되어 있다. 두 경우의 음속 분포는 실험에서 측정된 자료를 사용하였다.

수신 배열은 네 가지 주파수를 처리하기 위해 설계된 수평 네스티드(nested) 배열을 사용하였으며 총

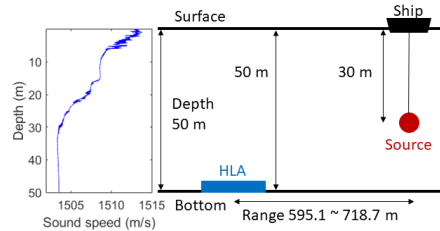


Fig. 2. Sound speed profile from CTD and configuration of experiment.

Table 1. Design frequency of 21-element horizontal line array.

	Design frequency (Hz)	Sensor interval (cm)	Array length (m)
Band1	100~200	750	60
Band2	200~400	375	30
Band3	400~800	187.5	15
Band4	800~1600	93.75	7.5

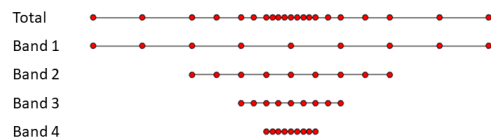


Fig. 3. Configuration of horizontal line array.

길이는 60m이다. 각 대역의 정보는 Table 1에 나타내었으며 배열의 형상은 Fig. 3과 같다.

### 3.1 모의실험 결과 분석

배열 불변성 기반의 거리 추정 알고리즘을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. 모의실험은 음원과 수신기의 위치를 해상실험과 동일하게 설정하여 Case 1과 Case 2 두 경우에 대해 분석하였고 수신 배열 또한 동일하게 설정하였다. 송신 신호는 길이가 0.01 s인 시간의 변화에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 사용하였고 해상실험 수신 신호의 주파수 대역인 100 Hz~250 Hz의 대역폭을 가지며 해닝(Hanning) 함수로 가중치를 부여하였다.

해상실험 당시 해역의 환경정보를 토대로 정규 모드 기반의 KRAKEN 프로그램을 수행하여 음원과 수신기 사이의 그린함수를 구하고 송신 신호의 스펙트럼과 그린함수를 곱한 후 역 푸리에 변환을 통하여 수신 신호를 모의하였다.

수신 신호의 시간영역 평면과 빔 형성을 통해 빔-시간 영역 세기 패턴  $L_{bt}(s, t)$ 를 얻을 수 있으며 이를 Fig. 4에 나타내었다. 빔-시간 영역 세기 패턴에서 음원의 방위각은 가장 큰 값이 위치하는 각도에 해당한다. 저차 모드 일수록 속도가 빠르고 감쇠와 분산이 적어 가장 큰 값을 나타내며 고각이 0°에 가깝기 때문에 방위각으로 적절하다. Fig. 4의 점선은 음원의 방위각( $\sin\theta$ )을 의미한다.

빔-시간 영역 세기 패턴의 기울기인 배열 불변 인자를 얻기 위해 문턱 값 -10 dB을 설정한 후 최소 자승

근사를 사용하였다.

$$\hat{s}(t) = \hat{\chi}t + d. \quad (10)$$

이것은 기울기가  $\hat{\chi}$ 이고 상수항이  $d$ 인  $t$ 에 관한 일차식 Eq. (10)의 기울기를 구하는 것과 같으며 Fig. 4의 실선은 Eq. (10)을 의미한다. 결론적으로 Eq. (11)을 통하여 배열 불변 인자를 구하였다.

$$[\chi \ d]^T = (T^T T)^{-1} T^T S_1. \quad (11)$$

$$S_1 = [s_{\max}(t_1), s_{\max}(t_2), \dots, s_{\max}(t_N)]^T.$$

$$s_{\max}(t) = \arg \max_s L_{bt}(s, t).$$

$$T = [(t_1, t_2, \dots, t_N)^T \mathbf{1}^T], \quad t_j = t_1 + (j-1)\Delta t_s.$$

$$\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1].$$

위 식에서  $s_{\max}(t)$ 는 빔-시간 영역 세기에 문턱 값을 설정한 뒤 시간에 따른 최댓값이 위치하는 각도이다. 음파의 전달 속도는 수신기 위치에서 측정값을 사용하였고 추정된 방위각과 배열 불변 인자를 아래

Table 2. Result of source range estimation of simulation.

Case 1		Case 2	
Bearing angle (°)	76.8	Bearing angle (°)	-41.7
Estimated angle (°)	69.1	Estimated angle (°)	-37.1
Error rate (%)	10.0	Error rate (%)	11.0
Range (m)	767.5	Range (m)	718.7
Estimated range (m)	776.2	Estimated range (m)	747.5
Error rate (%)	1.1	Error rate (%)	4.0

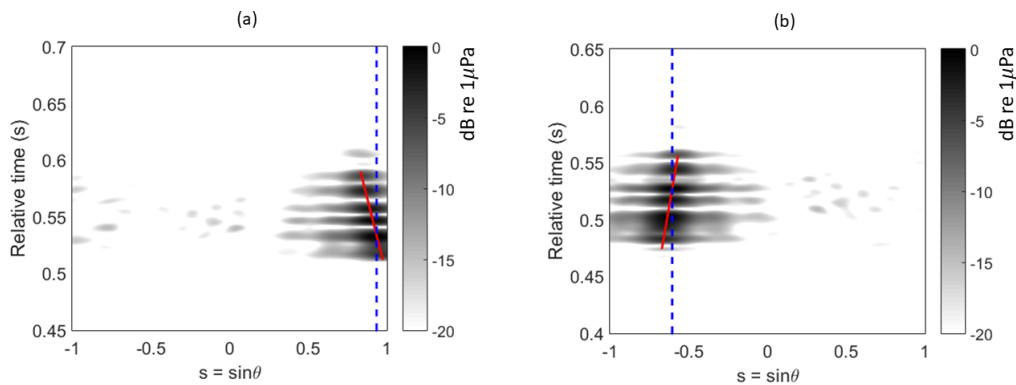


Fig. 4. Beam-time intensity pattern of simulation, (a) case 1, (b) case 2.

거리 추정 식에 대입하면 Table 2와 같은 거리 추정 결과를 얻었다.

두 경우 1.1%와 4.0%로 매우 작은 오차를 보이며 효율적인 거리 추정이 가능하다고 볼 수 있다.

### 3.2 해상실험 결과 분석

해상실험에서 실제로 전구를 깨트려 발생된 충격파 신호를 수신하여 모의실험과 같은 방법으로 거리 추정을 실시하였다. 빔-시간 영역 세기 패턴은 Fig. 5와 같으며 Table 3과 같은 거리 추정 결과를 얻었다.

해상실험 거리 추정 결과 오차율 13.6%, 17.0%의 성능을 보였다.

모의실험에 비해 오차가 큰 원인은 음원과 배열 위치 정보의 부정확성에 의한 것으로 추측할 수 있다. 해상실험 시 음원은 선박에 의해 예인되며 선박의 움직임에 의해 진행방향 뒤 쪽으로 기울어짐이 발생한다. 또한 수신배열의 경우 선박이 일자로 예인하며 끌고 간 후 일정 지점에서 해저면에 설치한다. 배열이 선박의 진행방향에 맞추어 일자로 설치

Table 3. Result of source range estimation of experimental results.

Case 1		Case 2	
Bearing angle (°)	76.8	Bearing angle (°)	-41.7
Estimated angle (°)	75.7	Estimated angle (°)	-46.7
Error rate (%)	1.4	Error rate (%)	12.0
Range (m)	767.5	Range (m)	718.7
Estimated range (m)	872.1	Estimated range (m)	596.5
Error rate (%)	13.6	Error rate (%)	17.0

되었다는 가정 하에 배열 중심의 위치를 계산하여 결정하는데 이때 실제 실험 환경에서의 기울어짐, 위치, 모양 등을 보정한다면 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

오차의 또 다른 원인으로 음원 신호 길이의 영향을 고려할 수 있다. 송신 신호의 길이에 따른 거리 추정 성능은 다음 장에 제시된다.

## IV. 배열 불변성 기반의 거리 추정: 성능 분석 및 예측

여러 가지 요소에 따른 거리 추정 성능을 비교하기 위해 기본적인 모의실험의 환경을 설정하였다. 모의실험은 Fig. 6과 같이 수심을 50m로 일정하게 설정하고 수신기는 해저면에, 음원은 수심 30m에 위치시켰다. 음원과 수신 배열의 중심 사이의 거리는 1km, 방위각은 30°로 설정하였다. 음속은 수심에 따라 1500 m/s로 일정한 Pekeris 음속 구조이다.

송신 신호는 시간의 변화에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 LFM 신호를 사용하였고 100 Hz~250 Hz의 대역폭을 가진다. 신호 길이는 0.01 s이며 해닝 함수로 가중치를 부여하였다. 수신 배열은 앞 장과 동일한 수평 네스티드 선 배열이며 각 대역의 정보는 Table 1과 같다.

### 4.1 음원의 방위각에 따른 거리 추정 성능

음원의 방위각에 따른 거리 추정 성능을 분석하기 위해 주어진 환경에서 방위각만을 변경하여 먼저 두

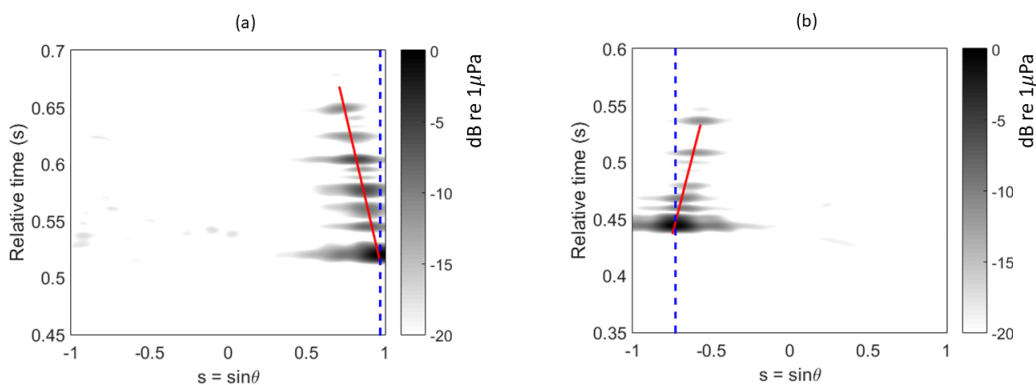


Fig. 5. Beam-time intensity pattern of experimental data, (a) case 1, (b) case 2.

가지 경우에 대해 분석한다. 첫 번째는 음원을 브로드사이드 방향에 위치시켜 이때의 음원의 방위각을

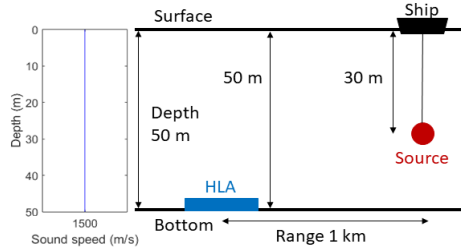


Fig. 6. Sound speed profile and configuration of simulation.

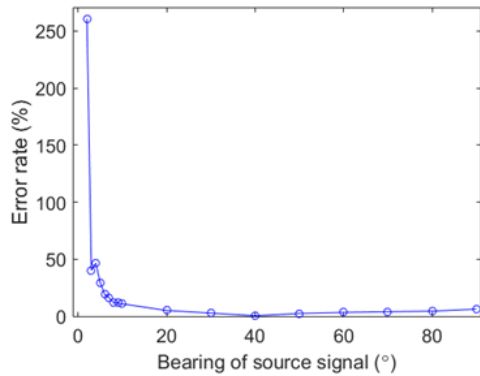


Fig. 7. Error rate of range estimation according to the source orientation.

Table 4. Result of source range estimation according to the source orientation.

Bearing angle (°)	Estimated range (m)	Error rate (%)
0	-	-
90	1061.7	6.2

0°로 설정하였다. 두 번째는 음원을 엔드파이어 방향에 위치시키고 이때의 방위각을 90°로 설정하였다.

거리 추정 결과는 Table 4와 같으며 Fig. 7은 음원의 방위각에 따른 거리 추정 성능을 나타낸다. 두 경우의 범-시간 강도 패턴은 Fig. 8와 같다. 음원이 브로드사이드 방향에 위치하면 엔드파이어 방향에 위치할 때보다 패턴의 기울기가 급해지는 것을 알 수 있다.

거리 추정 결과에 따르면 음원의 방위각이 10° 이상인 경우에는 안정적인 거리 추정 성능을 보인다. 음원이 브로드사이드 방향에 있는 경우 물리적 유효 배열 길이가 0에 가까워지므로 거리 추정이 불가능하다.

#### 4.2 송신 신호의 길이에 따른 거리 추정 성능

송신 신호의 길이에 따른 거리 추정 성능을 분석하기 위해 주어진 환경에서 신호의 길이만을 변경하여 먼저 두 가지 경우에 대해 분석하였다. 첫 번째는 송신 신호의 길이가 0.01 s이며 두 번째는 송신 신호의 길이가 0.2 s로 대역폭은 100 Hz~250 Hz로 같게 설정하였다. 거리 추정 결과는 Table 5와 같으며 Fig. 9은 음원의 방위각에 따른 거리 추정 성능을 나타낸다.

결과에 따르면 송신 신호가 짧을수록 안정적인 거

Table 5. Result of range estimation according to the transmission signal length.

signal length (s)	Estimated range (m)	Error rate (%)
0.01	1084.8	8.5
0.20	2393.8	139.4

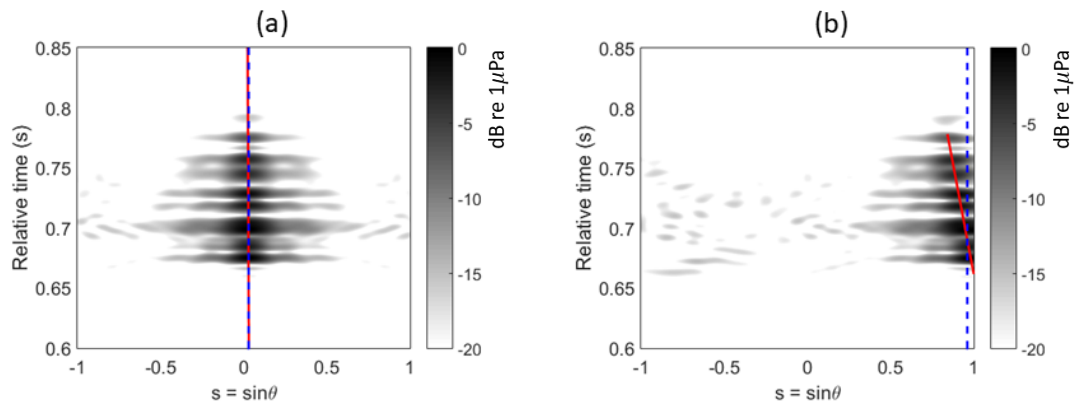


Fig. 8. Beam-time intensity pattern, (a) broadside (0°), (b) endfire (90°).



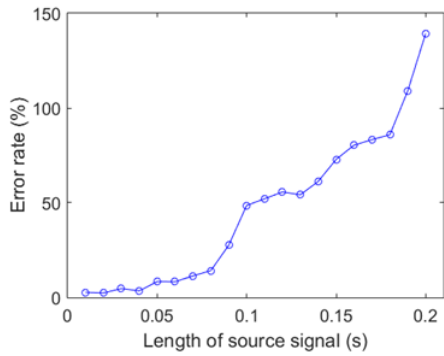


Fig. 9. Error rate of range estimation according to the transmission signal length.

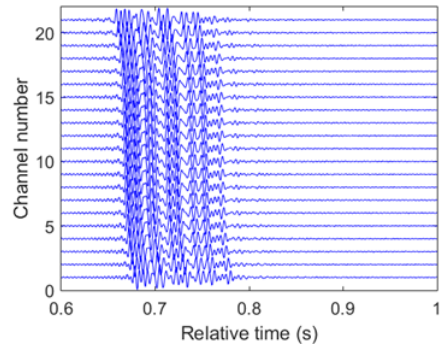
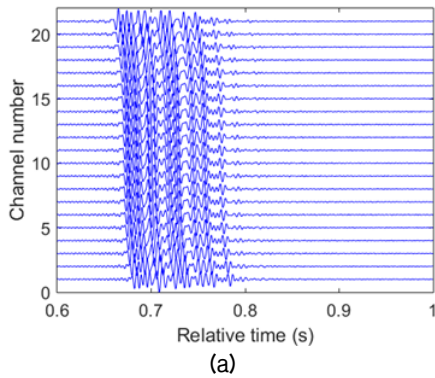
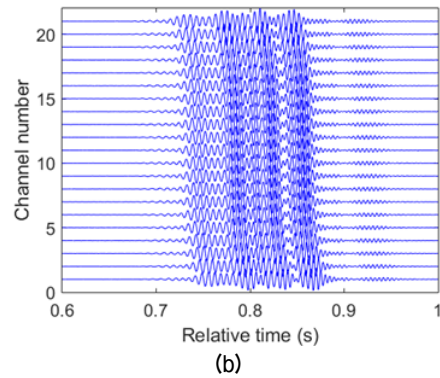


Fig. 10. Channel Impulse response.



(a)



(b)

Fig. 11. Received signal, (a) 0.01 s, (b) 0.2 s.

리 추정 성능을 보인다. 신호가 길어질 때 성능이 저하되는 원인은 채널응답특성과 관련이 있다. Fig. 10은 모의실험 환경에서 채널응답특성이다. 이는 Fig. 11의 송신 신호의 길이가 0.01 s인 경우의 수신 신호와 매우 유사하지만 송신신호의 길이가 0.2s일 때와는 다른 경향을 보인다. 배열 불변성은 수신 신호에 나타나는 채널응답특성을 이용해 거리를 추정하는데 송신 신호의 길이가 길어지면 다중경로 영향에 의해 신호가 중첩되기 때문에 수신신호에서 채널응답특성을 바로 파악할 수 없다. 따라서 배열 불변성 기반의 거리 추정은 임펄스 신호 분석에 적합한 기법이라 할 수 있다. 이를 극복하기 위해 수신 신호에서 채널응답특성을 추정하는 과정이 요구된다.

### 4.3 수신 배열의 길이에 따른 거리 추정 성능

네스티드 배열의 길이에 따른 성능 확인을 위한 모의실험에서 각 경우의 센서 개수는 동일하며 상이한 배열 길이를 갖는다. 거리 추정 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Result of source range estimation according to the length of a receiver.

Array length (m)	Estimated range (m)	Error rate (%)
60	1084.8	8.5
30	1061.9	6.2
15	1065.9	6.6
7.5	1059.7	6.0
3.75	1065.5	6.6

수신기의 길이와 무관하게 거리 추정이 가능했다. 다만 길이 60m의 경우 가장 간격이 넓은 band 1은 송신 신호의 주파수에 대해 반파장 이상의 센서 간격이 존재하므로 모호성을 발생시킨다. 따라서 다른 경우에 비해 약간 더 높은 오차 보이는 것으로 판단된다.

### 4.4 네스티드 배열과 균일 선배열(Uniform line array)의 거리 추정 성능 비교

균일 선배열을 이용하여 음원의 방위각, 송신 신호의 길이, 길이에 따른 거리 추정 성능을 분석한 후

Table 7. Result of range estimation according to the source orientation.

Bearing angle (°)	Estimated range (m)	Error rate (%)
0	-	-
90	1016.1	1.6

Table 8. Result of range estimation according to the transmission signal length.

signal length (s)	Estimated range (m)	Error rate (%)
0.01	1045.8	4.6
0.20	2166.7	116.7

Table 9. Result of range estimation according to the length of a receiver.

Array length (m)	Estimated range (m)	Error rate (%)
60	1045.8	4.6
30	1060.0	6.0
15	1063.8	6.4
7.5	1064.8	6.5
3.75	1064.8	6.5

네스티드 배열의 성능과 비교하였다.

균일 선 배열은 네스티드 배열과 동일하게 센서 개수는 21개 총 길이는 60 m로 설정하였다.

균일 선 배열에서의 음원의 방위각, 송신 신호의 길이, 수신 배열의 길이에 따른 거리 추정 결과는 각각 Tables 7~9와 같다. 균일 선 배열에서는 네스티드 배열과 마찬가지로 음원의 방위각이 10° 이상인 경우와 송신 신호가 짧을수록 정확한 추정 성능을 보였다. 또한 센서 개수를 21개로 고정시키고 수신기의 길이만을 변화시켜 거리 추정 성능을 확인했을 때 수신기의 길이와 무관하게 안정적인 거리 추정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 다만 60 m의 경우 송신 신호의 중심주파수에 대해 가장 이상적인 센서 간격을 가지고 있기 때문에 약간의 성능 향상을 보인다. 결론적으로 네스티드 배열과 균일 선배열의 거리 추정 성능은 큰 차이가 있다고 보기 어렵다.

## V. 결 론

배열 불변성 기반의 거리 추정은 환경정보 없이 실시간으로 음원의 거리를 추정하는 기법이다. 본

논문에서는 배열 불변성 기반의 거리 추정이 가능함을 확인하고 알고리즘의 성능을 분석하였다.

모의실험을 수행한 결과 설정한 두 가지 경우에 대해 각각 1.1%와 4.0%의 오차율로 매우 정확한 값을 얻었다. 해상실험 데이터에 동일한 기법을 적용하였을 때 오차율이 각각 13.6%와 17.0%인 거리 추정 성능을 보였다.

성능 분석 결과 이 기법은 두 가지 한계점을 가진다. 첫 번째는 음원의 방위각이 10° 이하일 때 거리 추정 성능이 불안정한 것이며 두 번째는 신호의 길이가 긴 경우 거리 추정이 어렵다는 것이다. 수신 배열의 설계 간격이 신호의 반파장 이하를 만족하는 경우 길이와 관계없이 안정적인 거리 추정이 가능함을 확인했으며 이때 네스티드 배열과 균일 선배열을 통한 거리 추정은 큰 성능의 차이를 보이지 않았다.

## 감사의 글

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “중주파수 대역의 배열 센서를 이용하는 장거리 수중음향 원격 탐사 핵심 기술 개발”에 의해 수행되었음 (PES3180).

## References

1. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics. 4th Ed* (Wiley: New Jersey, 1999), pp. 435-470.
2. A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, “Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem,” *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 571-587 (1988).
3. A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and P. N. Mikhalevsky, “An overview of matched field method in ocean acoustics,” *IEEE. J. Oceanic Engineering*, **18**, 401-424 (1993).
4. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustic. 2nd Ed.* (Springer, New York, 2011), pp. 133-139.
5. S. Lee and N. C. Makris, “The array invariant,” *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 336-351 (2006).
6. H. C. Song and C. G. 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. G. 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. 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).

11. G. Byun, C. Cho, H. C. Song, J. S. Kim, and S. H. Byun, “Array invariant-based calibration of array tilt using a source of opportunity,” J. Acoust. Soc. Am. **143**, 1318-1315 (2018).

▶ 김재수 (J. S. Kim)



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

저자 약력

▶ 구홍주 (Hongju Gu)



2016년 8월: 한국해양대학교 해양공학과 공학사  
 2018년 8월: 한국해양대학교 해양공학과 공학석사  
 2018년 4월 ~ 현재: 대우조선해양 사원

▶ 변기훈 (Gihoon Byun)



2013년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 공학사  
 2015년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 공학석사  
 2018년 2월: 한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 공학박사  
 2018년 ~ 현재: Scripps Institution of Oceanography, 박사후연구원

▶ 변성훈 (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