

# 수중에서의 도파관 불변성을 이용한 가상 음원 배열 기반의 다양한 거리 방향으로의 강인한 집속

## Robust variable range focusing with a virtual source array using the waveguide invariant in underwater

변기훈,<sup>1</sup> 김재수<sup>2†</sup>

(Gi Hoon Byun<sup>1</sup> and J. S. Kim<sup>2†</sup>)

<sup>1</sup>한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원, <sup>2</sup>한국해양대학교 해양공학과  
(Received November 30, 2016; accepted January 25, 2017)

**초 록:** 가상 음원 배열 개념은 시역전 처리에 시지연 빔조향 기법을 적용함으로써 가상 음원 배열로부터 나아가는 방향에 해당하는 선택된 위치에 음원 없이도 음파의 시·공간적 집속을 수행하는 방법이다. 하지만 가상 음원 배열 개념을 이용한 시역전 처리 방법은 가상 음원 배열에 해당하는 임계각 및 근거리를 벗어나는 범위외의 음파 집속이 불가능하다는 제약 조건이 따른다. 본 논문에서는 이러한 제약 조건을 해결하기 위해, 도파관 불변성 이론을 가상 음원 배열 개념에 적용하여 집속 음장의 수평 방향으로의 이동을 통해 임계각 및 근거리를 벗어나는 구간으로의 음파 집속 방법에 대한 연구를 수행하였다. 수치 실험의 결과를 통해 본 연구의 타당성을 검증하였으며, 기존의 가상 음원 배열 개념의 제약 조건에 관계없이 선택된 위치에서의 강인한 음파 집속 성능의 결과를 보였다.

**핵심용어:** 시역전 처리, 가상 음원 배열, 도파관 불변성, 시지연 빔조향

**ABSTRACT:** A concept of a VSA (Virtual Source Array) is the method for an acoustic spatio-temporal focus at a selected location in the outbound direction with respect to the VSA without the need of a probe source as combines a TRP (Time-Reversal Processing) and time-delay and beam-steering. However, in TRP using the VSA concept, it is limited to the critical angle and the short distances relevant to the VSA. In this paper, the waveguide invariant theory is applied to the VSA concept to refocus the received field at ranges greater other than the critical angle and the short ranges by shifting the focused field. The suggested method is verified via numerical simulation, and the results show that the robust acoustic focusing is achieved on the selected location regardless of the limitation on the conventional VSA concept.

**Keywords:** Time-reversal processing, Virtual source array, Waveguide invariant, Time-delay and beam-steering

**PACS numbers:** 43.30.Vh, 43.60.Fg, 43.60.Tj

## 1. 서 론

다중경로가 존재하는 복잡한 수중 채널에 대해 음원으로부터 방사된 음파는 시역전 거울(Time-Reversal Mirror, TRM)이라 정의되는 트랜스듀서 배열에 왜곡된 형태로 수신되게 된다. 이러한 수신 신호는 시역

전된 형태로 TRM으로부터 재 전파되며, 가역성 원리에 의해 원래 음원의 위치에서의 시·공간적 음파의 집속을 이룬다.<sup>[1,2]</sup> 이와같이 수중에서의 시역전 처리를 통한 효율적인 음파의 집속은 수중통신, 진함음 제거 및 표적 반향음 증대 등 다양한 분야에서 적용되어진다.<sup>[3-7]</sup> 하지만 시역전 처리를 통한 음파의 집속의 경우 집속하고자 하는 위치에 반드시 음원이 존재해야 하는 조건이 따른다.<sup>[1,2,8]</sup> 이러한 조건에 의해, 해저면 근처의 표적 탐지와 같이 음원을 배치하기

†Corresponding author: J. S. Kim (jskim@kmou.ac.kr)  
Department of 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 2016년도 한국음향학회 추계학술대회에서 발표하였던 논문임.”

어려운 환경에서는 시역전 처리를 통한 음파의 집속 효율성이 크게 저하됨을 알 수 있다.<sup>[9]</sup>

이러한 제약 조건을 부분적으로 해결하기 위해 Walker *et al.*<sup>[8]</sup>은 시역전 처리에 가상 음원 배열(Virtual Source Array, VSA) 개념을 도입하여 천해 환경에 대해 음원이 존재하지 않는 위치로의 음파 집속에 관한 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 TRM과 VSA라고 정의되는 선 배열 사이에서 동기화된<sup>[8-10]</sup> 신호들에 시지연 빔 조향 기법을 적용하는 원리이며, 시지연이 적용된 신호들을 TRM에서 재 전파함으로써 VSA에서의 일차 집속 이후, VSA로부터 나아가는 방향에 해당하는 임계각  $\theta_c$  및 근거리 범위 내에서 원하는 지점으로의 이차 집속을 구현하는 방법이다.

Yu *et al.*<sup>[9]</sup>는 이러한 방법을 이용하여 해저면 근처 또는 해저면에 묻혀있는 표적의 탐지와 같이 음원을 배치하기 힘든 환경에서의 집속에 대한 연구를 수행하였으며, Byun과 Kim<sup>[11]</sup>은 적응성을 VSA 개념에 적용하여 음원이 존재하지 않는 위치에서의 다중 집속에 대한 방법을 제안하였다.

하지만 TRM으로부터 전파된 신호 중 임계각을 벗어나는 구간으로 전달되는 신호들의 에너지는 거리에 따라 급격하게 감소되므로<sup>[12,13]</sup> TRM과 VSA사이의 시지연이 적용된 신호들은 VSA로부터 임계각 범위 내의 선택된 위치로만 집속이 제한됨을 알 수 있다.<sup>[8,9]</sup> 또한, 전파된 신호들이 VSA로부터 멀어 질수록 경계면에서의 반사 및 굴절 효과에 따라 근거리에서 효율적인 시지연-빔조향 기법에 대한 집속 성능이 현저히 저하됨을 알 수 있다.<sup>[8,9]</sup>

본 논문에서는 이러한 제약 조건들을 해결하기 위해 도파관 불변성 이론<sup>[14-16]</sup>을 VSA 개념에 적용하여 임계각 및 근거리 범위를 벗어나는 구간으로의 음파 집속에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 VSA 개념 및 도파관 불변성 이론에 대해 설명한다. III장에서는 도파관 불변성 이론을 VSA 개념에 적용하여 임계각 및 근거리 범위를 벗어나는 구간으로의 음파 집속에 대한 방법을 제안하며, 수치 실험을 통해 이를 검증한다. 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 배경 이론 설명

### 2.1 가상 음원 배열 개념

Fig. 1은 TRM으로부터 재 전파된 음장 및 가상 점 음원의 개념에 대한 모식도를 자유 공간에서 나타낸 것이다.

Fig. 1과 같이 TRM으로부터 시역전된 형태로 재 전파되는 음장은 시역전 처리 원리에 따라 원래 점 음원 위치로의 집속을 이루게 된다. 집속된 TRM과 PS(Probe Source) 사이의 음장은 점 음원으로부터 특정 원뿔형 범위 내에서 다시 발산하는 형태로 나아가게 되며, 이때 원래의 점 음원은 발산하는 음장에 대한 가상의 점 음원으로 간주될 수 있다.<sup>[8]</sup>

이러한 가상 점 음원 개념을 확장하여 Fig. 2와 같이 배열을 고려할 수 있으며, 이때의 배열을 VSA라고 정의한다.<sup>[8]</sup>

VSA 개념을 기반으로 한 시역전 처리에서의 원하는 지점  $\vec{r}_s = (r_s, z_s)$ 으로의 집속 음장은 아래 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\vec{r}) = \sum_{k=1}^M \left[ \sum_{j=1}^N G_{\omega}^*(\vec{r}_k | \vec{r}_j) e^{-i\omega t_j} \right] G_{\omega}(\vec{r} | \vec{r}_k), \quad (1)$$

여기에서  $G_{\omega}$ 는 주파수 영역에서의 전달함수를 의

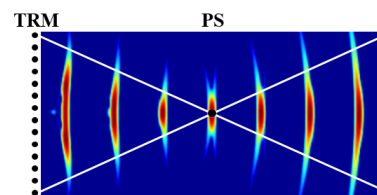


Fig. 1. Time-reversal focusing as a virtual point source schematic.

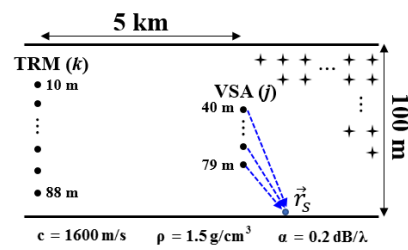


Fig. 2. A scenario for a virtual source array concept in a time-reversal processing.

미하며,  $(\ )^*$ 는 공액복소수를 나타낸다. Eq. (1)에서의  $G_\omega(\vec{r}_k|\vec{r}_j)$ 는 TRM의 위치  $\vec{r}_k = (r_k, z_k)$ 와 VSA의 위치  $\vec{r}_j = (r_j, z_j)$ 사이의 동기화된 전달함수이며,  $t_j$ 는 VSA와 집속하고자하는 위치  $\vec{r}_s = (r_s, z_s)$ 사이의 시지연을 의미한다.  $M$ 과  $N$ 은 각각 TRM과 VSA의 센서 개수를 나타낸다.

만약 VSA와 집속하고자 하는 위치  $\vec{r}_s$ 사이를 균일 매질이라고 가정한다면, Eq. (2)와 같이 간단한 시지연 빔조향 기법을 바탕으로 VSA와 집속하고자하는 위치  $\vec{r}_s$  사이의 거리에 따른 시지연  $t_j$ 를 계산할 수 있다. 여기에서  $c$ 는 균일 매질에서의 음속을 가정한다.

$$t_j = \sqrt{(r_j - r_s)^2 + (z_j - z_s)^2} / c, \quad (2)$$

TRM과 VSA사이의 시역전 및 시지연이 적용된 음장은 TRM으로부터 임의의 위치  $\vec{r}$ 에 해당하는 음장  $G_\omega(\vec{r}|\vec{r}_k)$ 으로 재 전파되며, 시지연된 형태의 음장이

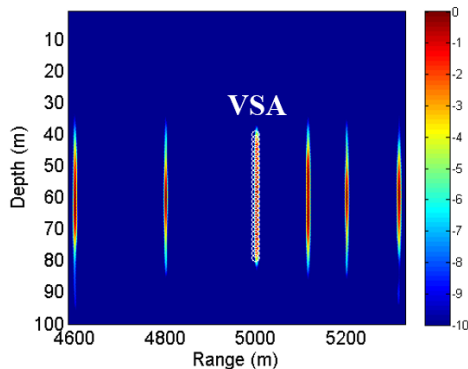


Fig. 3. Simulated coherent focusing in a TRP.

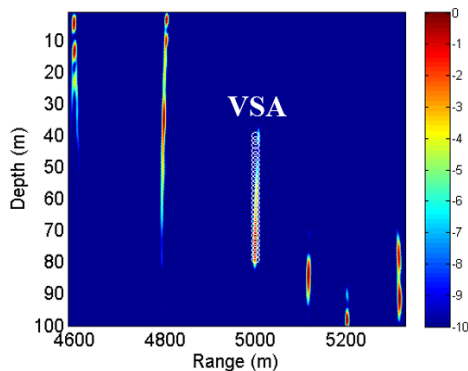


Fig. 4. Simulated coherent focusing using a VSA concept in a TRP at  $\vec{r}_s = (5200\text{m}, 100\text{m})$ .

VSA에 일차적으로 집속된 후, 선택된 위치  $\vec{r}_s$ 에서의 최종적인 집속이 구현되는 원리이다. 즉, VSA 개념을 이용한 시역전 처리에서의 집속은 TRM과 VSA사이의 전달함수를 확장하여 음장을 알지 못하는 위치  $\vec{r}_s$ 로의 집속을 구현하는 방법이다.

Figs. 3과 4는 KRAKEN 모델<sup>[17]</sup>을 바탕으로 Fig. 2와 같은 Pekeris 도파관에서의 VSA 개념에 대한 수치 실험 결과이며, TRM으로부터 재 전파되는 신호의 전달 과정을 스냅샷을 통해 나타낸 것이다. 여기에서 TRM은 10m에서 80m까지 등 간격으로 27개, VSA는 40m에서 79m까지 등 간격으로 27개의 센서로 구성되며, 음속은 1,500 m/s로 가정한다. 또한, 수치 실험에서 사용된 신호는 펄스 길이 12ms의 Hanning 창 함수 및 주파수 450 ~ 550 Hz의 밴드 폭을 가지는 chirp 신호를 모의하였으며, 그림 오른쪽의 컬러바는 집속되는 음장의 정규화된 세기를 나타낸다.

Fig. 3은 TRM으로부터 재 전파된 음장의 집속 결과를 나타내며, Eq. (2)에서의 시지연 값을 적용하지 않은 일반적인 시역전 처리의 결과이다. 따라서 VSA에서의 일차 집속만 이루어짐을 확인할 수 있다. 반면, Fig. 4는 VSA 개념을 이용한 시역전 처리의 집속 결과를 나타내며, VSA에서의 일차 집속 이후 집속하고자하는 위치  $\vec{r}_s = (5200\text{m}, 100\text{m})$  즉, 음원이 존재하지 않는 위치로의 이차 집속이 이루어짐을 확인할 수 있다.

## 2.2 도파관 불변성 이론 설명

해양에서의 음장 변화는 서로 다른 정규 모드들의 상호 간섭에 의해 발생한다. 도파관 불변성 이론에 따라 일정한 음장에 해당하는 기울기  $\beta$ 는 Eq. (3)과 같이 수식적으로 나타낼 수 있으며, 주파수-거리 평면에서의 기울기  $\beta$ 값은 불변함을 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다.<sup>[14-16]</sup> 여기에서  $r$ 과  $\omega$ 는 각각 수평 거리 및 각주파수를 의미하며,  $\Delta r$  및  $\Delta \omega$ 는 해당 변화량을 나타낸다.

$$\beta = \frac{r}{\omega} \frac{\Delta \omega}{\Delta r}, \quad (3)$$

Fig. 5는 Fig. 2와 같은 Pekeris 도파관 환경에서의 수심 40m에 해당하는 송·수신 센서에 대해 주파수

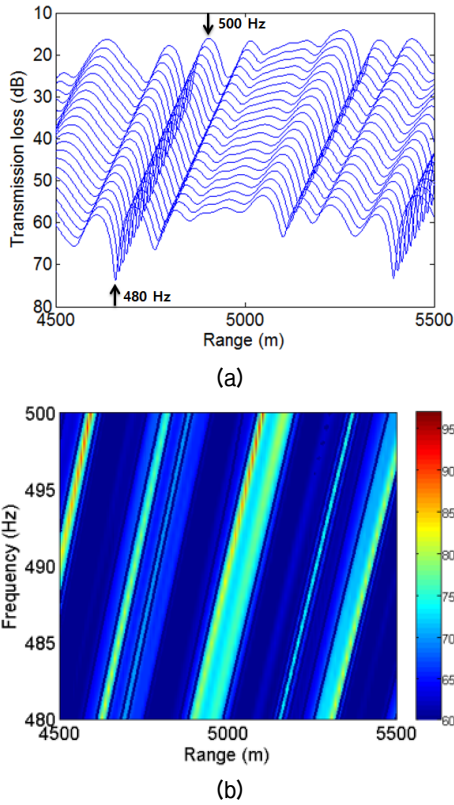


Fig. 5. Waveguide invariant using the simulation. (a) Transmission loss plot for 480–500 Hz with a 1 Hz interval. (b) Contour plot of (a).

480 Hz에서 500 Hz까지 1 Hz 간격으로 계산된 음장을 나타내며, 이를 통해 Pekeris 도파관에서의 스칼라 변수  $\beta$ 는 1임을 알 수 있다.<sup>[14-16]</sup>

$$r' \approx \frac{\omega + \Delta\omega}{\omega} r, \quad (4)$$

Eq. (4)는  $\beta$  값이 1인 Pekeris 도파관 환경에서의 주파수와 거리에 대한 음장 변화의 관계식을 나타낸다. 즉, 도파관 불변성 이론을 VSA 개념에 적용하여 TRM으로부터 재 전파되기 전 신호벡터의 적절한 주파수 성분 변화를 통해 집중하고자 하는 음장의 수평 방향으로의 위치 변화가 가능함을 나타낸다.

### III. 수치 실험 결과 분석

#### 3.1 가상 음원 배열 제약 조건

Figs. 6과 7은 중심 주파수 500 Hz에 대한 VSA 개념

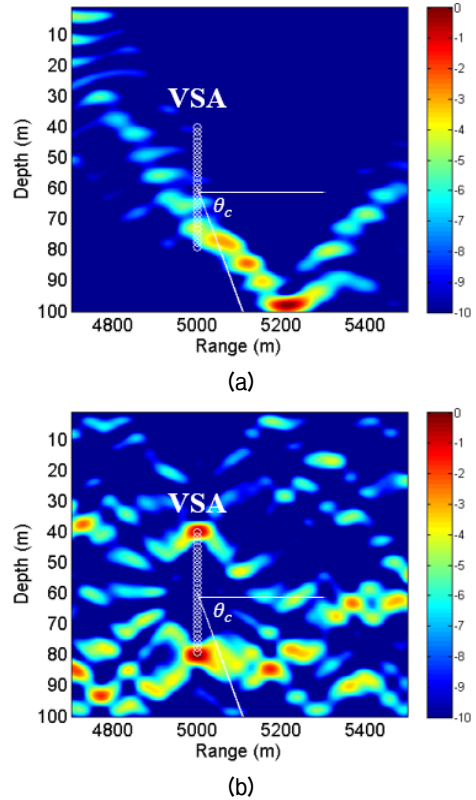


Fig. 6. Simulated single frequency time-reversal focusing at 500 Hz. (a) The focal location (5200 m, 100 m) is selected within the critical angle ( $\theta_c = 20.4^\circ$ ) with respect to the VSA. (b) The focal location (5000 m, 100 m) is selected beyond the critical angle ( $\theta_c = 20.4^\circ$ ) with respect to the VSA.

기반의 공간적 집중 및 제약 조건을 나타낸다. Fig. 6(a)는 임계각 범위내의 위치  $\vec{r}_s = (5200 \text{ m}, 100 \text{ m})$ 에서의 집중 결과를 나타내며 VSA 개념에 따라 음원이 없는 위치에서의 공간적 집중이 이루어짐을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 6(b)는 임계각 범위를 벗어나는 위치  $\vec{r}_s = (5000 \text{ m}, 100 \text{ m})$ 에 대한 공간적 집중 결과를 나타내며, 집중하고자 하는 위치  $\vec{r}_s$ 에서의 집중이 불가능함을 확인할 수 있다.

Fig. 7(a)는 VSA로부터 상대적으로 가까운 위치  $\vec{r}_s = (5100 \text{ m}, 60 \text{ m})$ 에 대한 공간적 집중 결과를 나타낸다. 하지만 Fig. 7(b)와 같이 VSA로부터 상대적으로 먼 거리에 위치한 지점  $\vec{r}_s = (5400 \text{ m}, 60 \text{ m})$ 으로의 집중을 수행할 경우, 선택된 위치에서의 집중이 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통해, 음원

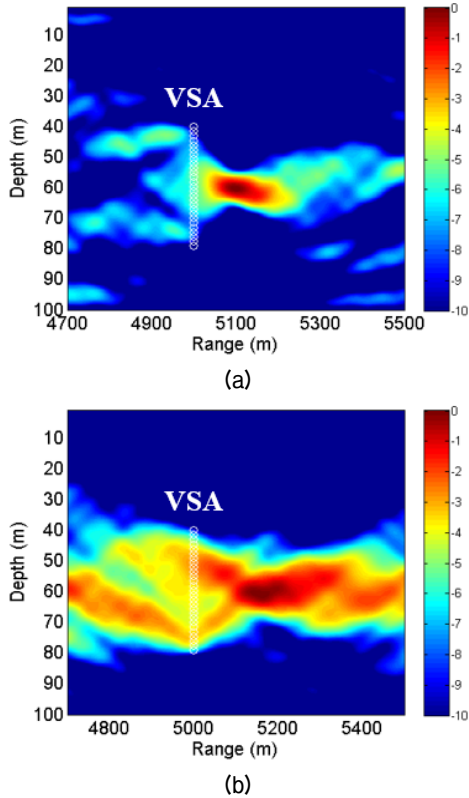


Fig. 7. Simulated single frequency time-reversal focusing at 500 Hz. (a) The focal location (5100m, 60m) relevant to the VSA is selected. (b) The focal location (5400m, 60m) relevant to the VSA is selected.

이 존재하지 않는 위치로의 집속이 가능하다는 VSA 개념의 장점에도 불구하고 임계각 범위 및 시지연 빔 조향 기법이 효율적으로 적용이 가능한 근거리 범위 내에서만 집속이 가능하다는 제약 조건을 확인할 수 있다.

### 3.2 가상 음원 배열 개념으로의 도파관 불변성 이론의 적용

Fig. 6(b)와 같이 임계각을 벗어나는 구간으로의 집속을 위해, 도파관 불변성 이론을 바탕으로 TRM으로부터 재 전파되는 주파수 성분을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{5000\text{m}}{5200\text{m}} \times 500\text{Hz} = 480.77\text{Hz}, \quad (5)$$

여기에서 분모 항은 Fig. 6(a)와 같이 중심 주파수 500

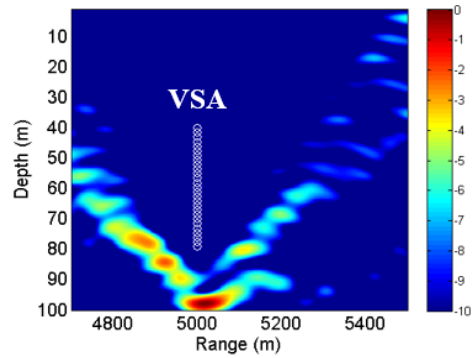


Fig. 8. Simulated single frequency focusing at 500 Hz using waveguide invariant with a  $\Delta\omega = -19.23$  Hz frequency shift.

Hz에 대하여 VSA 개념을 이용한 시역전 처리가 가능한 위치  $r$ , 분자 항은 도파관 불변성을 이용하여 집속하고자하는 새로운 위치  $r'$ 를 의미한다. 즉, Eq. (5)를 통해 계산된 주파수 성분에 해당하는 전달함수를 기존의 중심 주파수 500 Hz를 대신하여 Eq. (6)과 같이 TRM으로부터 재 전파시킴으로써 임계각을 벗어나는 위치  $\vec{r}_s = (5000\text{m}, 100\text{m})$ 로의 집속이 가능함을 Fig. 8을 통해 확인할 수 있다.

$$P(\vec{r}) = \sum_{k=1}^M \left[ \sum_{j=1}^N G_{\omega + \Delta\omega}^*(\vec{r}_k | \vec{r}_j) e^{-i(\omega + \Delta\omega)t_j} \right] G_{\omega}(\vec{r} | \vec{r}_k), \quad (6)$$

또한, Fig. 7(b)와 같이 VSA로부터 상대적으로 먼 거리에 해당하는 위치로의 집속을 위해 Eq. (5)와 동일한 방법으로 집속하고자하는 위치 5,400m에 대한 주파수 성분을 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{5400\text{m}}{5100\text{m}} \times 500\text{Hz} = 529.41\text{Hz}, \quad (7)$$

Fig. 9는 Eq. (7)을 통해 계산된 주파수에 해당하는 성분을 중심 주파수 500 Hz 대신하여 TRM으로부터 재 전파시킨 결과이며 위치  $\vec{r}_s = (5400\text{m}, 60\text{m})$ 에서의 공간적 집속이 이루어짐을 확인할 수 있다.

Figs. 8, 9와 동일한 조건에 대하여, 도파관 불변성 이론을 이용한 VSA 개념에서의 집속 음장 변화를 보기 위해 Figs. 10, 11과 같이 시간에 따른 시계열 신호의 집속 현상을 스냅샷을 통해 나타내었다.



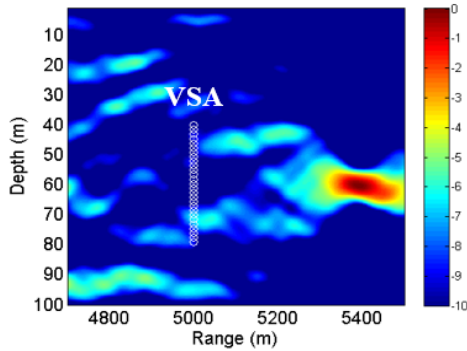


Fig. 9. Simulated single frequency focusing at 500 Hz using waveguide invariant with a  $\Delta\omega = +29.41$  Hz frequency shift.

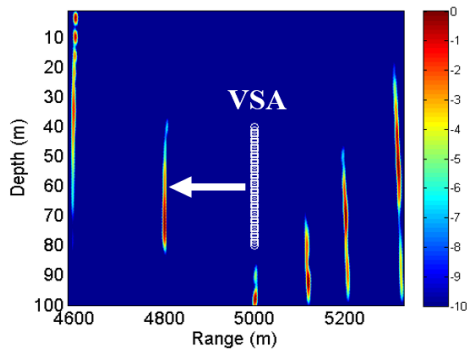


Fig. 10. Simulated coherent focusing in a VSA concept using the waveguide invariant with a  $\Delta\omega = -19.23$  Hz frequency shift.

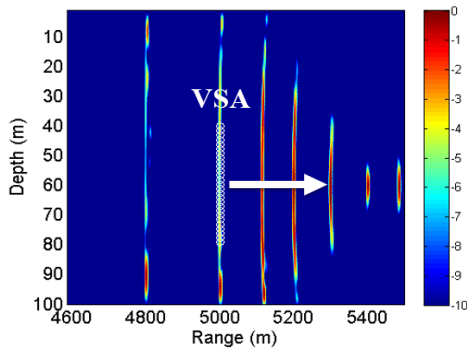


Fig. 11. Simulated coherent focusing in a VSA concept using the waveguide invariant with a  $\Delta\omega = +29.41$  Hz frequency shift.

도파관 불변성 이론이 적용된 VSA 개념을 이용한 집속의 경우, VSA에서 일차적으로 집속되는 음장의 수평방향으로의 이동을 확인할 수 있다.

즉, Fig. 5(a)와 같이 주파수 성분의 증가 또는 감소에 따른 음장의 수평방향으로 이동 특성을 VSA 개념

에 적용하여, VSA 각 센서에 일차적으로 집속되는 음장들을 수평방향으로 이동 집속시키는 개념으로 생각할 수 있다. 하지만 VSA 개념을 이용한 수평 방향으로의 이동 집속 역시 일반적인 시역전 처리에서의 도파관 불변성 적용의 확장 개념이므로 중심 주파수 10% 범위 내에서 효율적인 이동 집속이 가능함을 알 수 있다.<sup>[14]</sup>

위의 결과를 통해, 기존의 VSA 개념에 해당하는 제약 조건에 관계없이 선택된 위치에서의 강인한 집속 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 도파관 불변성 이론을 VSA 개념 기반의 시역전 처리 방법에 적용함으로써, 기존의 VSA 개념의 제약 조건에 해당하는 임계각 및 근거리 범위를 벗어나는 구간으로의 집속에 대한 연구를 수행하였다. 도파관 불변성 이론에 따라 TRM으로부터 VSA에 일차적으로 집속되는 음장의 수평방향으로의 이동을 구현할 수 있었으며, 이를 통해 최종적으로 집속하고자 하는 위치에서의 강인한 집속이 가능함을 확인하였다.

하지만, 일반적으로 신호의 주파수가 높아짐에 따라 환경 변동에 따른 집속오차가 발생하며, VSA로부터 나아가는 방향에 대한 영역은 균일 매질이라 가정하는 VSA 개념 특성상 수심이 깊어짐에 따라 음속 굴절의 영향이 집속 성능의 저하를 야기할 것으로 보인다. 또한  $\beta$  값을 계산하기 힘든 복잡한 해양 환경의 경우, 본 연구에서 제안된 방법의 구현이 어려움을 알 수 있다.

즉, 해양 환경 변동에 따른 집속 성능 영향 및  $\beta$  값에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 생각되어진다.

본 연구를 통해 기존의 VSA 개념의 제약 조건에 관계없이 음원이 존재하지 않는 위치로의 강인한 집속에 대한 활용 가능성을 제시하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 2013년 해양수산부 재원으로 한국해양

과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “해양음향측심 물성 모니터링기 국산화 개발” 연구임.

## References

1. W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, and H. C. Song, “Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror,” *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 25-40 (1997).
2. W. S. Hodgkiss, H. C. Song, and W. A. Kuperman, “A long-range and variable focus phase-conjugation experiment in shallow water,” *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 1597-1604 (1998).
3. H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, W. J. Higley, K. Raghukumar, T. Akal, and M. Stevenson, “Spatial diversity in passive time reversal communications,” *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 2067-2076 (2006).
4. J. R. Yoon, M. K. Park, and Y. J. Ro, “Bit error parameters on passive phase conjugation underwater acoustic communication” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **24**, 454-461 (2005).
5. M. J. Eom, J. S. Kim, J.-H. Cho, H. Y. Kim, and I. I. Sung, “Algorithm and experimental verification of underwater acoustic communication based on passive time-reversal mirror” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **33**, 392-399 (2014).
6. S. Kim, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, G. F. Edelmann, and T. Akal, “Echo-to-reverberation enhancement using a time reversal mirror,” *J. Acoust. Soc. Am.* **115**, 1525-1531 (2004).
7. H. C. Song, S. Kim, W. S. Hodgkiss, and W. A. Kuperman, “Environmentally adaptive reverberation nulling using a time reversal mirror,” *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, 762-768 (2004).
8. S. C. Walker, P. Roux, and W. A. Kuperman, “Synchronized time-reversal focusing with application to remote imaging from a distant virtual source array,” *J. Acoust. Soc. Am.* **125**, 3828-3834 (2009).
9. Z. B. Yu, H. F. Zaho, X. Y. Gong, and N. R. Chapman, “Time-reversal mirror-virtual source array method for acoustic imaging of proud and buried targets,” *IEEE J. Ocean Eng.* **41**, 382-394 (2016).
10. H. C. Song, P. Roux, T. Akal, G. Edelmann, W. Higley, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, K. Raghukumar, and M. Stevenson, “Time reversal ocean acoustic experiments at 3.5 kHz: applications to active sonar and undersea communications,” in *Proc. AIP*, 522-529 (2009).
11. G. H. Byun and J. S. Kim, “Robust focusing in time-reversal mirror with a virtual source array,” *J. Acoust. Soc. Am.* **136**, 2148 (2014).
12. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H.

Schmidt, *Computational Ocean Acoustics* (American Institute of Physics, New York, 1994), pp. 42-46.

13. S. Kim, G. F. Edelmann, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, and H. C. Song, “Spatial resolution of time-reversal arrays in shallow water,” *J. Acoust. Soc. Am.* **110**, 820-829 (2001).
14. H. C. Song, W. A. Kuperman, and W. S. Hodgkiss, “A time-reversal mirror with variable range focusing,” *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 3234-3240 (1998).
15. G. L. D’Spain, and W. A. Kuperman, “Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth,” *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 2454-2468 (1999).
16. S. Kim, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, G. F. Edelmann, and T. Akal, “Robust time reversal focusing in the ocean,” *J. Acoust. Soc. Am.* **114**, 145-157 (2003).
17. M. B. Porter, “The KRAKEN normal mode program,” SACLANT Undersea Research Centre. 1992.

## 저자 약력

### ▶ 변 기 훈 (Gi Hoon Byun)



2013년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학사)  
2015년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학석사)  
2015년 9월 ~ 현재: 한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 박사과정

### ▶ 김 재 수 (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