

# 다중수신 수중음향통신을 위한 적응 시계열반전처리 기법의 이론연구와 실험적 검증

## Theoretical Development and Experimental Investigation of Underwater Acoustic Communication for Multiple Receiving Locations Based on the Adaptive Time-Reversal Processing

신기철\*, 변양현\*\*, 김재수\*\*  
(Kee-Cheol Shin\*, Yang-Hun Byun\*\*, Jea-Soo Kim\*\*)

\*넥스원퓨처(주) 수중연구소, \*\*한국해양대학교 해양개발공학부  
(접수일자: 2006년 5월 23일; 채택일자: 2006년 6월 20일)

시계열반전처리는 시간과 공간영역 동시에 집속을 수행할 수 있는 효과적인 방법으로 증명되어 왔으며, 시간영역에서의 집속 특성은 수중음향통신에서 광범위하게 이용되고 있다. 최근에는 해양도파관에서 동시 다중 집속이 적응 시계열반전처리에 의해 구현되었다. 본 연구에서 적응 시계열반전처리에 의한 동시 다중 집속은 다중 수신을 위한 수중음향통신 알고리즘으로 확장되며, 개발된 알고리즘은 수치실험과 실 데이터를 통해 다중 수신 위치에 동시에 자기동화가능함을 보였다.

**핵심용어:** 적응 시계열반전처리, 수중음향통신, 다중 집속, 심볼간 간섭, 혼선

**투고분야:** 수중음향분야 (5,5)

Time-reversal processing (TRP) has been shown as an effective way to focus in both time and space. The temporal focusing properties have been used extensively in underwater acoustics communications. Recently, adaptive time-reversal processing (ATRP) was applied to the simultaneous multiple focusing in an ocean waveguide. In this study, multiple focusing with ATRP is extended to the underwater acoustic communication algorithm for multiple receiving locations. The developed algorithm is applied to the underwater acoustic communication to show, via simulation and real data, that the simultaneous self-equalization at multiple receiving locations is achieved.

**Key words:** Adaptive time-reversal processing, Underwater acoustic communication, Multiple focusing,

Intersymbol interference (ISI), Cross-talk

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.5)

### 1. 서론

시계열반전처리 (time-reversal processing, TRP)는 공간상의 임의의 위치에서 방사된 신호를 임의의 위치에서 수신하고, 시간 축에서 반전하여 신호를 증폭하여 수신된 위치에서 다시 송신하면 신호원의 위치로 정확하게 다시 집속 (focusing)하는 원리를 이용한 것으로, 그림 1은 전형적인 TRP의 구현과정을 개념적으로 도시한 것이

다. TRP의 장점은 정밀한 매질의 정보를 필요로 하는 정합장처리와는 달리 매질에 대한 정보를 필요치 않다는 것이다 [1][2].

이러한 원리를 이용하여 외과적 수술 없이 인체내의 신장결석 (kidney stone)을 분쇄하거나, 전기·전파 분야에서 다중경로와 같은 전달현상에 의해 발생하는 왜곡현상을 복원하기 위해 이용되는 자기동화 (self-equalization) 등에 이용되고 있다 [3]. 수중음향 분야에서는 실험적인 검증과 함께 기본적인 연구가 활발히 진행되고 있으며, 주된 응용분야는 수중음향통신 [4-7]과 표적탐지 [2] 분야이다.

책임저자: 신기철 (kcshin@nex1.co.kr)  
경기도 용인시 기흥구 마북동 148-1 넥스원퓨처(주) 수중연구소  
(전화: 031-288-9390; 팩스: 031-288-9477)

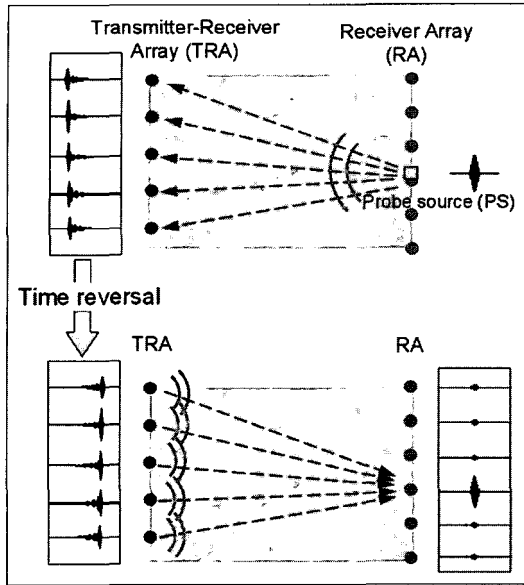


그림 1. 전형적인 시계열반전처리의 구현 과정  
Fig. 1. Schematic of a classical time reversal implementation.

TRP는 수신된 신호를 단순히 시간영역에서 반전하여 송신하는 것이 기존의 방법이었으나, 이러한 방법에 적응성 개념을 추가한 적응 시계열반전처리 (adaptive TRP, ATRP)의 이론이 연구되었다 [8][9]. ATRP의 도입으로 여러 응용이 가능해져 한 위치에서 집속을 유지하면서 다른 위치에 음파가 도달하지 않는 음영구역을 만드는 기법이 음파전파모델을 통해 시뮬레이션으로 확인되었다 [8]. 또한 시가변적인 해양환경에서 양질의 집속을 오래 유지하기 위한 방법으로 ATRP가 이용되었으며, 최근에는 ATRP를 이용하여 여러 위치에 서로의 간섭 없이 다중 집속을 수행하는 알고리즘이 제안되었다 [10]. TRP를 이용한 통신은 그 가능성이 제시된 이후로 시뮬레이션과 실험실 수준의 실험 및 해양실험으로 증명되어 왔다 [4-7].

본 논문의 목적은 다중 수신 수중음향통신이 가능한 ATRP 기법을 개발하는 것으로, 구체적으로는 공간상의 여러 수신기들 위치에서 다중경로에 의한 왜곡현상을 보완하는 자기동화로 심볼간 간섭 (intersymbol interference, ISI)을 제거하고, 수신기들 상호간에 혼선 (cross-talk) 없이 수중음향통신이 가능한 ATRP 기법을 개발하는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 TRP와 ATRP 이론에 대해서 설명한다. 특히 다중 집속을 수행하는 ATRP의 이론은 다중 수신 수중음향통신을 위한 기초이론이다. III장에서는 수치시뮬레이션을 통해 다중 집속을 수행하게 되며, IV장에서는 실 해상에서 획득된 해양의 전달함수를 이용하여 설립된 이론을 수중음향통신에 적용한다.

## II. 이론

### 2.1. 시계열반전처리

TRP는 탐침음원 (probe source)으로부터 송/수신기 배열 (transmitter-receiver array, TRA)에 전파된 신호를 시간영역에서 반전시켜 다시 전송하면 원래의 신호가 발생된 위치로 집속되는 원리를 이용한다. 주파수 영역에서 TRP에 의한 집속 음장 (focused field) 또는 phase-conjugate 음장을 수식적으로 표현하면 식 (1)과 같다 (그림 2).

$$p(\vec{r}, \omega) = \sum_{j=1}^N S^*(\omega) G^*(\vec{r}_j | \vec{r}_{ps}, \omega) G(\vec{r} | \vec{r}_j, \omega) \\ = S^*(\omega) \mathbf{G}^*(\mathbf{r}_{array} | \vec{r}_{ps}, \omega) \mathbf{G}(\vec{r} | \mathbf{r}_{array}, \omega) \quad (1)$$

여기에서  $S(\omega)$ 는 탐침 음원신호의 스펙트럼이고,  $()$ 와  $()^*$ 는 각각 공액복소수 (complex conjugation)와 공액전치 (Hermitian transpose)이다.  $G(\vec{r}_j | \vec{r}_{ps}, \omega)$ 는 탐침 음원의 위치  $\vec{r}_{ps}$ 로부터 TRA의  $j$ 번째 소자 위치  $\vec{r}_j$ 에서의 전달함수를 나타내며,  $G(\vec{r} | \vec{r}_j, \omega)$ 는 TRA의  $j$ 번째 소자 위치  $\vec{r}_j$ 로부터 임의의 위치  $\vec{r}$ 로의 전달함수이다. 그리고  $N$ 는 TRA 소자의 총 개수이며,  $\mathbf{G}$ 와  $\mathbf{r}_{array}$ 는  $(N \times 1)$ 의 열 벡터이다.

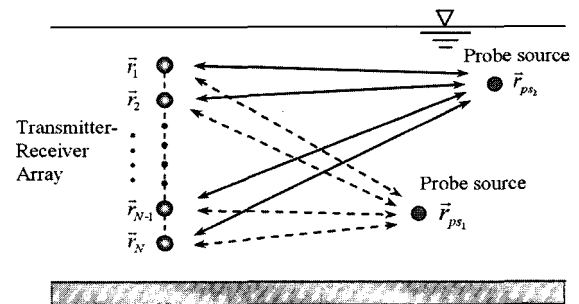


그림 2. 시계열반전처리 개요  
Fig. 2. Schematic for time-reversal processing.

### 2.2. 적응 시계열반전처리에 의한 다중 집속

ATRP의 기본개념은 수신된 신호를 시계열 반전 후 TRA로부터 전송하기 전에 신호에 목적에 부합하는 가중치를 주어 전송하는 것이다[8]. TRA에 수신된 신호벡터를 식 (2)와 같이 일반화된 가중벡터로 표현하면 식 (1)은 식 (3)과 같이 보다 일반화된 형태로 표현할 수 있다.  $()^T$ 는 전치행렬이다.

$$\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_{n-1}, w_n]^T \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 p(\bar{r}_j, \omega) &= \sum_{i=1}^N S^*(\omega) w^i(\bar{r}_j | \bar{r}_{B_i}, \omega) G(\bar{r}_j | \bar{r}_j, \omega) \\
 &= S^*(\omega) \mathbf{w}^* (\mathbf{r}_{array} | \bar{r}_{B_i}, \omega) G(\bar{r}_j | \mathbf{r}_{array}, \omega)
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기에서  $\mathbf{w}$ 가  $G(\mathbf{r}_{array} | \bar{r}_{B_i}, \omega)$ 일 경우 TRP와 같다.

ATRP에서는 집속의 목적에 따라 전송을 위한 가중벡터  $\mathbf{w}$ 를 계산하게 된다. 집속의 목적이 선택적 집속과 다자점 동시 집속일 경우 MCM (multiple constraint method)을 이용한 ATRP 기법을 사용할 수 있다 [10]. 다중 구속조건에 의한 문제는 목적함수에 대한 최적화 문제로 표현된다.

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^* \mathbf{K} \mathbf{w} \quad \text{subject to } \mathbf{M}^* \mathbf{w} = \mathbf{c}, \tag{4}$$

여기에서 상호 스펙트럼 밀도 행렬 (Cross-Spectral Density Matrix, CSDM)  $\mathbf{K}$ 는 각 탐침음원 신호에 의해서 구성되는 CSDM의 합으로 표현된다.

$$\mathbf{K} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{G}(\mathbf{r}_{array} | \bar{r}_{B_q}, \omega) \mathbf{G}^*(\mathbf{r}_{array} | \bar{r}_{B_q}, \omega) \tag{5}$$

그리고, 구속조건이  $M$ 개라 할 때, 식 (4)에서  $\mathbf{M}$ 은 TRA에 수신된 신호벡터들로 구성되는  $(N \times M)$  행렬이고,  $\mathbf{c}$ 는 응답 반응을 나타내는  $(M \times 1)$ 의 구속치 벡터이다. 식 (4)의 최적화 문제의 해는 여러 문헌을 통해 잘 알려져 있으며, 식 (6)의 범함수를 최소로 하는 해를 갖는다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{w}^* \mathbf{K} \mathbf{w} - \lambda (\mathbf{M}^* \mathbf{w} - \mathbf{c}), \tag{6}$$

가중벡터  $\mathbf{w}$ 에 관하여 도함수를 구한 후, Lagrange 승수벡터  $\lambda$ 에 대해서 풀어 가중벡터에 대한 해를 얻는다. 즉,

$$\mathbf{w} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M} [\mathbf{M}^* \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}]^{-1} \mathbf{c} \tag{7}$$

구속치 벡터  $\mathbf{c}$ 의 각 요소의 값은 집속과 널링 (nulling)을 위한 구속치로 이용된다. 일반적으로 1의 구속치는 집속에, 0의 구속치는 널링에 사용된다. 또한 구속치를 적절히 조절함으로써 TRA에 의해서 형성된 공간 음장에서 상대적인 기여도를 제어할 수도 있다.

### 2.3. 다중수신 수중음향통신 알고리즘

TRP를 이용한 수중통신의 첫 단계는 각 통신 접속점에 위치한 탐침음원으로부터 탐침펄스 (probe pulse)를 송신하는 과정으로, 각 탐침펄스에는 전파 과정에서 해양환경에 의한 다중경로 및 채널의 왜곡현상 등이 포함되어 TRA에 수신된다. TRA 수신된 신호들은 디지털화 과정을 거쳐 시스템의 기억장치에 저장된다. 두 번째 단계는 기억장치에 저장된 신호들을 시계열-반전하고 증폭하는 과정으로, 시계열-반전은 후입 선출법 (last-in first out, LIFO)으로 디지털 기억장치에서 읽어 들어는 간단한 작업으로 수행할 수 있다. 시계열-반전 이외의 어떠한 가공을 하지 않고 TRA로부터 전송하는 방법이 전형적인 TRP 방법이다.

2.2절에서 설명한 바와 같이 탐침음원과 TRA 간의 전달함수  $\mathbf{G}$ 를 알면 주파수 영역에서 구속조건을 통해 다중수신 수중음향통신이 가능하다. 두 탐침음원의 경우에 대하여 구속조건을 통해 얻을 수 있는 다중수신 수중음향통신의 예 중 하나는 두 수신 위치에 모두 혼신 또는 간섭 없이 동일한 메시지 신호를 보내는 것이다. 이를 위한 가중벡터는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$\mathbf{w} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M} [\mathbf{M}^* \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}]^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

여기에서

$$\mathbf{K} = \sum_{q=1}^2 \mathbf{G}(\mathbf{r}_{array} | \bar{r}_{B_q}, \omega) \mathbf{G}^*(\mathbf{r}_{array} | \bar{r}_{B_q}, \omega) \tag{9}$$

$$\mathbf{M} = [\mathbf{G}(\mathbf{r}_{array} | \bar{r}_{B_1}, \omega) \quad \mathbf{G}(\mathbf{r}_{array} | \bar{r}_{B_2}, \omega)] \tag{10}$$

이와 유사하게 한 위치에는 신호를 집속하면서, 다른 위치에 신호를 보내지 않는 가중벡터는 식 (9)와 같이 간단히 구현할 수 있다.

$$\mathbf{w} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M} [\mathbf{M}^* \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}]^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

또한 두 수신 위치에 서로 다른 신호를 보내는 상황도 고려할 수 있다. 이 경우에 가중벡터는 집속과 널링을 각 위치에 적용함으로써 구현되며, 가중벡터는 각각 식 (12)의  $\mathbf{w}_1$ 과 식 (13)의  $\mathbf{w}_2$ 와 같고, 최종적으로 TRA로부터 전송되는 신호의 스펙트럼은 식 (14)로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{w}_1 = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M} [\mathbf{M}^* \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}]^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{w}_2 = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M} [\mathbf{M}^* \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$S_1^*(\omega) \mathbf{w}_1^*(\mathbf{r}_{array} | \vec{r}_{ps}, \omega) + S_2^*(\omega) \mathbf{w}_2^*(\mathbf{r}_{array} | \vec{r}_{ps}, \omega) \quad (14)$$

### III. 적응 다중 집속과 널링 수치실험

본 절에서는 해양도파관에서 ATRP에 의한 다중 집속을 수치실험한다. 수치실험을 위한 TRA와 해양도파관의 환경은 그림 3과 같다. 탐침음원들은 각각 A:  $\vec{r}_{ps} = (4.8\text{km}, 80\text{m})$ 와 B:  $\vec{r}_{ps} = (5.2\text{km}, 40\text{m})$ 에 위치한다. 음향환경은 거리-독립 환경과 전형적인 하향 굴절의 형태로 해지면과 연속적으로 상호작용이 발생한다. 수치실험을 위한 주파수는 500Hz이며, 음향전파모델로는 정상모드 모델인 KRAKEN을 사용하였다 [11].

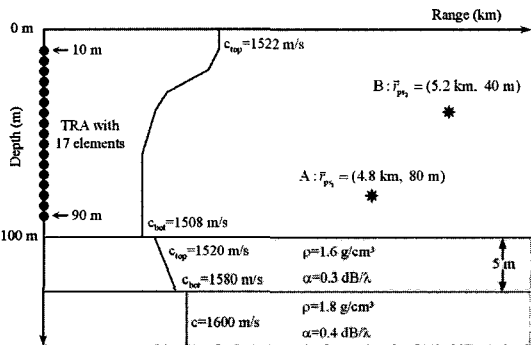


그림 3. 시계열반전처리를 위한 해양도파관  
Fig. 3. Description of waveguide for time-reversal processing.

#### 3.1. 적응 집속과 널링

ATRP를 이용하여 원하는 위치에는 음파를 집속시키면서, 다른 위치에는 적응적으로 음영지역을 만들 수 있

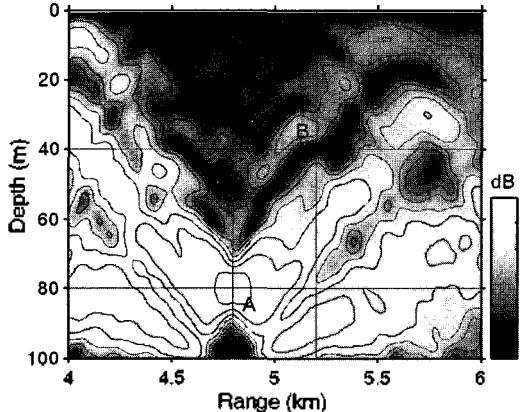


그림 4. 500Hz에서의 phase conjugation 실험  
Fig. 4. Single frequency phase conjugation experiment at 500Hz.

다. 그림 4는 주파수 500Hz에서 공간상의 A 위치에는 집속을 유지하고, B 위치에는 널을 조향한 경우로, 식 (11)의 기중벡터에 의해 사용된 결과이다.

#### 3.2. 적응 다중 집속

다중 구속조건에 의해 두 위치에 동시에 집속을 위한 기중벡터를 계산한 후 이를 TRA에 의해 전송하여 형성된 공간음장은 그림 5와 같다. 그림 5의 특징은 A와 B 위치에 집속을 형성하면서 적응처리에 의해 상호간에 비외곡 특성을 갖는다는 것이다. 따라서 적응 다중 집속은 신호간 간섭이 중요한 다중 수중음향통신에 중요한 응용성을 가지고 있다. 다중수신 수중음향통신에서는 ISI 및 혼선이 주된 문제이기 때문에, 적응 다중 집속기법을 이용하면 원하는 메시지를 혼선 없이 전송할 수 있다.

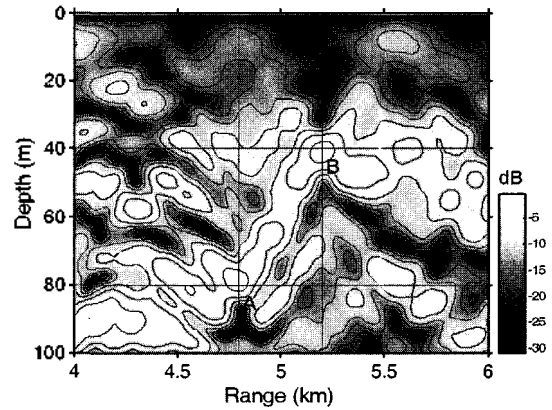


그림 5. 비외곡 특성을 갖는 적응 다중 집속  
Fig. 5. Adaptive multiple focusing with distortionless response at points A and B.

### IV. 천해해양환경에서 다중수신 수중음향통신

#### 4.1. 실험 환경

천해 해양환경에서 ATRP의 실험을 위해 미국 스크립스 해양연구소에서 2003년 4월에 이탈리아 서부해안 엘바섬 근처에서 수행된 실험 자료를 이용하였다 [9]. 실험의 대략적인 구성은 그림 6과 같으며, 수심은 대략 118m이다.

송신신호는 Hann창함수 형태의 주파수 2.5-4.5 kHz 의 150ms chirp 펄스를 사용하였다. 실험은 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 채널을 이용하여 다중 음원들과 다중 수신기들을 순차적으로 송신과 수신을 반복하여 TRA와 RA 간의 송신신호 대역에 해당하는 대역폭 제한된 전달함수를 획득할 수 있는 시스템으로 구성되었다.

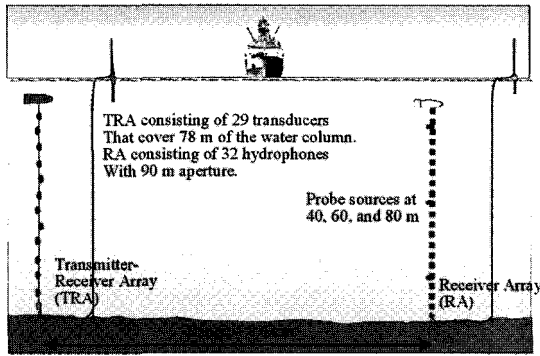


그림 6. 해양 실험의 구성  
Fig. 6. Experimental setup at sea.

### 4.2. 다중수신 수중음향통신의 구현

해양환경의 시변화가 없거나 또는 미미할 경우 상반성 원리 (reciprocity principle)에 의해 순방향 (탐침음원으로부터 TRA 방향)과 역방향 (TRA로부터 탐침음원 방향)으로의 전달함수는 동일한 것으로 가정할 수 있다.

선형 시불변 시스템으로 가정하였을 경우 주파수영역의 전달함수는 deconvolution에 의해 식 (13)으로 얻어진다.

$$H(\omega) = \frac{R(\omega)}{S(\omega)} \quad (13)$$

여기에서  $S(\omega)$ ,  $R(\omega)$ 와  $H(\omega)$ 는 각각 송신신호, 수신신호와 전달함수에 상응하는 주파수영역 표현이다.

실험에 의해 획득된 신호는 2.5-4.5 kHz 주파수 대역의 전달함수를 포함하고 있으므로, 이를 활용하여 대역 제한된 전달함수를 계산한다. 그림 7은 수심 40m에 위치한 탐침음원으로부터 TRA에 수신된 신호의 시계열 도

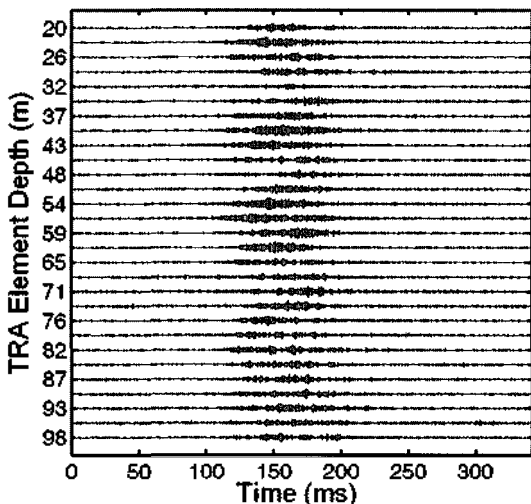


그림 7. 수심 40-m 탐침음원으로부터 TRA에 수신된 시계열 신호.  
Fig. 7. The time series received at the TRA with a probe source at 40-m depth.

달 구조이며, 마찬가지로 수심 60m와 80m의 탐침음원들로부터의 시간영역 신호를 이용하여 식 (13)을 사용하여 대역 제한된 순방향 전달함수를 계산한다.

TRP와 ATRP에 의한 결과를 비교하기 위해 세 탐침음원들로부터 TRA에 수신된 신호들을 동시에 방사하는 경우를 예증하도록 한다. 이후의 과정에서 통신을 위한 1-bit 심볼 신호는 중심주파수 3.5kHz의 Hann창함수 형태를 갖는 4.3ms 펄스를 사용한다.

그림 8은 세 탐침음원들에 의해 TRA에 수신된 신호들을 단순 중첩시켜 시계열 반전한 후 역방향으로 전파시켜 RA에서 수신한 시계열 신호이다. 각 탐침음원의 수심에서 수신된 신호인 그림 8 (b), (c), (d)를 보면 4.3ms의 1-bit 심볼신호가 상호간의 간섭과 다중경로 효과로 인해 상당히 신장되어 있음을 확인할 수 있다. 신호의 중첩에 의해 다중 위치에 동시 집속을 수행하게 되면 집속위치에서 탐침음원 간의 상호 간섭 및 혼선이 발생하기 때문에 양질의 집속을 획득할 수 없다. 이러한 현상은 통신에서 ISI로 알려진 것과 유사하다.

ATRP에 의한 다중 집속을 이용하여 원하는 위치에는 신호를 집속하면서, 다른 위치에는 신호가 도달하지 않는 음영지역을 생성할 수 있다. 그림 9는 수심 40m와 80m의 탐침음원의 위치에서는 집속을 유지하면서 수심 60m의 탐침음원 위치에는 널을 조향한 경우이다. ATRP를 사용하면 신호들의 중첩에 의한 다중 집속과는 다르게 탐침음원 각각에 비 왜곡 응답을 주기 때문에 탐침음원간의 상호 간섭과 혼선이 사라진다. 따라서 다중 위치에 ISI가

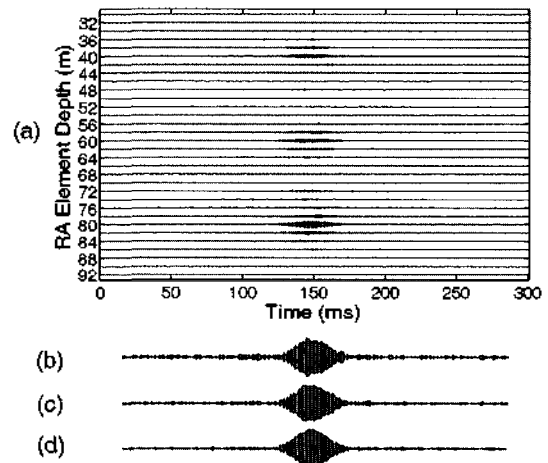


그림 8. 신호벡터의 중첩에 의한 기존 시계열반전처리에 의해 RA에 수신된 시계열 신호. (a) 수심별 (b) 40m 수신기 (c) 60m 수신기 (d) 80m 수신기.

Fig. 8. The time series received at the RA by the classical time-reversal processing based on superposition of signal vectors. (a) is depth-stacked time series, and (b), (c), (d) are time-series at 40-m, 60-m, and 80-m receiver depth respectively.

발생되지 않는 신호를 얻을 수 있으므로 다중 수신을 위한 수중음향통신에 적합한 방법이라 할 수 있다.

최종적으로 그림 10은 각 탐침음원의 위치에 10-bit (43ms)의 BPSK 메시지를 송신한 경우로 탐침음원 수신에서의 수신기들은 동일한 메시지를 수신한다. 다중 수신을 위한 ATRP에 의해 그림 10의 (b), (c), (d)은 상호간의 혼선과 bit 심볼의 신장 없이 원하는 메시지 신호를 동시에 수신하고 있다.

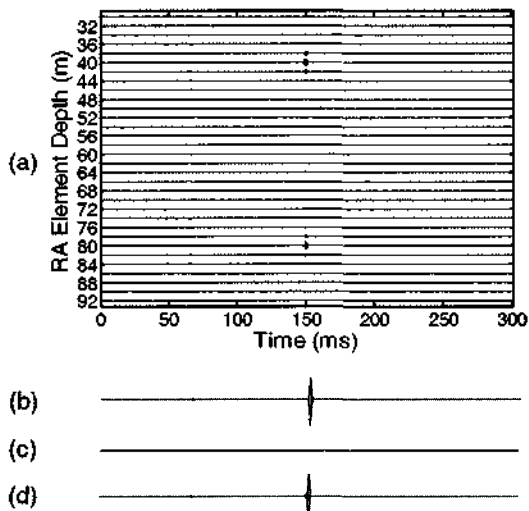


그림 9. 수신 60m에 널을 조향한 적응 시계열반전처리에 의해 RA에 수신된 시계열 신호. (a) 수심별 (b) 40m 수신기 (c) 60m 수신기 (d) 80m 수신기

Fig. 9. The time series received at the RA by the adaptive time-reversal processing. A null is placed at depth of 60 m. (a) is depth-stacked time series, and (b), (c), (d) are time-series at 40-m, 60-m, and 80-m receiver depth respectively.

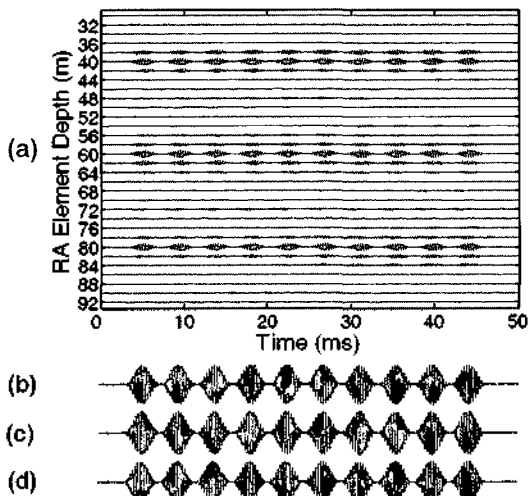


그림 10. 적응 시계열반전처리에 의한 10-bit BPSK 펄스 전파. (a) 수심별 (b) 40m 수신기 (c) 60m 수신기 (d) 80m 수신기

Fig. 10. 10-bit BPSK pulse propagation by the adaptive time-reversal processing. (a) is depth-stacked time series, and (b), (c), (d) are time-series at 40-m, 60-m, and 80-m receiver depth respectively.

## V. 결 론

시계열반전처리는 시간과 공간영역 동시에 집속을 수행할 수 있는 효과적인 방법이며, 최근 이러한 특성을 이용한 수중음향통신이 시도되고 있다. 본 연구에서는 시계열반전처리에 적응적 개념을 도입하여 다중 수신위치에 상호간 간섭과 혼선이 없이 동시에 공간적으로 분포된 수신기에 메시지 전송이 가능한 수중음향통신 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 수치실험과 실험 해양 데이터를 이용하여 실현 가능성을 제시하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-002-D00379)

## 참고 문헌

1. Mathias Fink, "Time-reversal acoustics," *Phys. Today*, **50**, 34-40, 1997.
2. W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, T. Akal, C. Ferla, and D. R. Jackson, "Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time reversal mirror," *J. Acoust. Soc. Am.* **103** (1), 25-40, 1998.
3. Mathias Fink, "Time Reversal of Ultrasonic Fields-Part I: Basic Principles," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, **39** (5), 555-566, 1992.
4. Kevin B. Smith, Antonio A. M. Abrantes, and Andres Larraza, "Examination of time-reversal acoustics in shallow water and applications to noncoherent underwater communications," *J. Acoust. Soc. Am.* **113** (6), 3095-3110, 2003.
5. James V. Candy, Alan W. Meyer, Andrew J. Poggio, and Brian L. Guidry, "Time-reversal processing for an acoustic communications experiment in a highly reverberant environment," *J. Acoust. Soc. Am.* **115** (4), 1621-1631, 2004.
6. 윤종라, 박문갑, 노용주, "수동 페이저 컨주게이션 수중음향통신 기법의 비트 오류 영향 인자," *한국음향학회지*, **24** (8), 454-461, 2005.
7. G. F. Edelmann, T. Akal, W. S. Hodgkiss, Seongil Kim, W. A. Kuperman, and H. C. Song, "An Initial Demonstration of Underwater Acoustic Communication Using Time Reversal," *IEEE J. Ocean Eng.*, **27** (3), 602-609, 2002.
8. J. S. Kim, H. C. Song, and W. A. Kuperman, "Adaptive time-reversal mirror," *J. Acoust. Soc. Am.* **109** (5), 1817-1825, 2001.
9. Seongil 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** (1), 145-157, 2003.
10. J. S. Kim and K. C. Shin, "Multiple focusing with adaptive time-reversal mirror," *J. Acoust. Soc. Am.* **115** (2), 600-

606, 2004.  
 11. M. B. Porter, *The KREAKEN Normal Mode Program*,  
 (SACLANT Undersea Research Center SM-245, La Spezia,  
 Italy, 1991)

---

**저자 약력**

---

• **신기철 (Kee-Cheol Shin)**



1996년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학사)  
 1998년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학석사)  
 2003년 8월: 한국해양대학교 해양개발공학과 (공학박사)  
 2003년~2004년: 한국과학재단 산진연구원, BB21  
 박사후과정  
 2005년~현재: 넥스원퓨처(주) 수중연구소 선임연구원  
 \*주관심분야: 수중음향신호처리, 정합장 및 시계열반전  
 처리, DSP 시스템 개발 및 구현

• **변양현 (Yang-Hun Byun)**



1998년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 졸업 (공학사)  
 2000년 2월: 한국해양대학교 대학원 해양공학과  
 졸업 (공학석사)  
 2001년 3월~2001년 12월: 대우통신 특산연구소,  
 연구원  
 2001년 12월~2005년 9월: STX엔진 전자통신연구소,  
 선임연구원  
 2005년 9월~현재: 한국해양대학교 해양개발공학과  
 박사과정

\*주관심분야: 수중음향, 소나신호처리, 알고리즘 개발 및 구현

• **김재수 (Jea-Soo Kim)**

한국음향학회 제23권 제4호 참조  
 1991년~현재: 한국해양대학교 해양개발공학부 교수