

# 음향채널이 존재하는 천해에서의 수동 시역전 통신 성능 분석

## Analysis of passive time-reversal communication performance in shallow water with underwater sound channel

최강훈,<sup>1</sup> 김선효,<sup>1</sup> 최지웅,<sup>1</sup> 김현수,<sup>1†</sup> 김병남<sup>2</sup>

(Kang-Hoon Choi,<sup>1</sup> Sunhyo Kim,<sup>1</sup> Jee Woong Choi,<sup>1</sup> Hyeonsu Kim,<sup>1†</sup> and Byoung-Nam Kim<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>한양대학교 해양융합공학과, <sup>2</sup>한국해양과학기술원

(Received November 27, 2017; revised December 28, 2017; accepted January 30, 2018)

**초 록:** 수동 시역전 기법은 시공간적인 집속효과를 통해 다중경로 채널응답에 의한 인접 심볼간 간섭의 영향을 줄임으로써 수중통신 시스템의 오류 성능을 향상시킬 수 있는 방법이다. 이러한 수동 시역전 기법은 일반적으로 시역전 결합에 사용되는 수신신호가 많을수록 큰 공간 다이버시티 이득을 얻기 때문에 많은 수의 수신기를 사용할 때 우수한 통신 성능을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 제한된 개수의 수신기를 사용하더라도 많은 수의 수신기를 사용할 때와 근접한 통신 성능을 얻을 수 있는 수신기의 개수와 조합에 대해 분석한다. 분석을 위해 2015년 5월에 제주 남서쪽 해역에서 수행된 SAVEX15(Shallow-water Acoustic Variability Experiment 2015) 실험 데이터를 활용한다. 음향채널이 존재하는 채널 특성 때문에 에너지가 집중되는 수심이 존재하였고 에너지가 집중되는 수심에 존재하는 수신기를 포함하여 수동 시역전 결합을 할 때, 일부의 수신기만을 사용하여 최적에 가까운 통신 성능을 도출할 수 있음을 보인다.

**핵심어:** 음향채널, 수동 시역전, 산란 함수, SAVEX15 (Shallow-water Acoustic Variability Experiment 2015)

**ABSTRACT:** A passive time-reversal technique can improve error performance of the underwater communication system by reducing influence of inter-symbol interferences, which is caused by a multipath channel response. The passive time-reversal communication system equipped with numerous receivers generally can obtain superior error performance since larger diversity gain can be obtained as the number of available received signal increased. In this paper, we analyze the optimal number and combination of receivers that can approximately achieve the best error performance when using the limited number of receivers. For this analysis, we use communication data collected during SAVEX15 (Shallow-water Acoustic Variability Experiment 2015) carried out in the south-western part of Jeju Island from May 14 to May 28, 2015. Analysis results show that there are depths of energy concentration due to the channel characteristics in which the underwater sound channel are present, and the passive time-reversal technique using the limited number of the receivers can derive near-optimal communication performance if the receivers for time-reversal processing are located at the depths where energy is concentrated.

**Keywords:** Underwater sound channel, Passive time-reversal, Scattering function, SAVEX15 (Shallow-water Acoustic Variability Experiment 2015)

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

<sup>†</sup>Corresponding author: Hyeonsu Kim (hskim00@hanyang.ac.kr)  
Department of Marine Science and Convergence Engineering,  
Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan,  
Gyeonggi-do 15588, Republic of Korea  
(Tel: 82-31-400-4154)

“이 논문은 2017년도 공동 학술대회(한국소음진동공학회, 한국음향학회, 대한기계학회 동역학및제어부문)에서 발표하였던 논문임.”

## 1. 서 론

전자기파는 수중에서 높은 감쇠손실로 인해 전파 거리가 매우 짧기 때문에 수중통신은 주파수와 음속 구조에 따라 수천 km까지 전파가 가능한 음파를 이용하여 연구되어 왔다. 그러나 수중에서의 음파는 해양의 수직 음속구조에 따라 굴절되고 해수면 및 해

저면과 같은 경계면에서 반사되면서 복잡한 다중경로로 전파된다. 또한 송수신기 간의 상대적인 이동이나 해수면 변동은 전파되는 음파의 특성을 시간에 따라 변화하게 한다. 이와 같이 수중에서의 음파는 환경에 따라 전파특성이 크게 달라지므로 수중음향 통신 성능은 수중환경에 따라 결정된다고 볼 수 있다.<sup>[1]</sup>

이러한 수중통신 환경에서 수중채널에 의한 통신 신호의 왜곡을 줄이기 위한 방법으로써 시역전 기법을 적용한 수중통신 연구가 진행되어왔다.<sup>[2-4]</sup> 시역전 기법은 수신된 통신신호에 시역전된 채널응답을 컨볼루션함으로써 신호를 시간 집속시키고 배열 수신기를 이용하여 수신된 신호들을 공간 집속시킴으로써 인접 심볼간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)을 줄이고 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 증가시킨다.<sup>[5,6]</sup> 이러한 시역전 기법은 다수의 수신기를 이용하여 수신된 신호들을 결합함으로써 공간 다이버시티 이득을 얻어 전송된 신호의 오류율을 크게 낮출 수 있다는 장점을 갖지만 공간 다이버시티 이득을 얻기 위해 항상 다수의 수신기를 운용하는 것은 공간적으로 비효율적이며 많은 전력 소비가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 실험 데이터를 통해 음향채널 내에 에너지가 집중되는 수심이 존재하는 해양환경에서 수심별로 채널특성과 통신 성능을 비교하였으며, 배열 수신기 내의 인접한 수신기들에 수신된 신호들을 시역전 결합하고 결합되는 수신기의 조합에 따라 변화되는 수심별 채널특성과 통신 성능을 비교 분석하였다. 분석결과는 음향채널 축에 의해 에너지가 집중되어 높은 신호대잡음비를 가지며 ISI의 영향을 상대적으로 적게 받은 통신신호가 수신된 수신기를 포함하였을 경우 시역전 통신 성능이 다수의 수신기를 사용했을 때의 통신 성능에 가까워짐을 보였다.

본 논문은 아래와 같이 구성된다. 제 II 장에서는 수동 시역전 기법과 채널 특성을 나타내는 통신 채널 파라미터를 설명하고 제 III 장에서는 통신 실험 환경과 송신신호 및 신호분석 방법을 설명한다. 제 IV 장에서는 실험 환경의 채널 임펄스 응답과 수심별 수신기에 의한 시역전 통신 결과와 통신 채널 파라미터 분석 결과를 제시하며 제 V 장에서는 결론을 맺는다.

## II. 이 론

### 2.1 수동 시역전 기법

해양 경계면에 의한 음파의 반사 및 산란, 수직 음속구조에 의한 음파의 굴절 등으로 인해 수중채널은 다중경로 특성을 갖게 되며 이러한 특성 때문에 발생하는 ISI를 줄이기 위해 시역전 기법이 연구되어왔다.<sup>[2-4]</sup> Fig. 1은 수동 시역전 기법의 모식도로써 송신기에서 전송한 정보신호  $s(t)$ 가  $i$ 번째 채널  $h_i(t)$ 를 거쳐 수신 선배열의  $i$ 번째 수신기에서 수신된 후 신호처리되는 과정을 나타낸 것이다. 배열 수신기에 수신된 신호  $r_i(t)$ 로부터 다중경로 채널 임펄스 응답  $h_i(t)$ 을 추정하고 이를 시역전 시킨 후 수신신호와 상호상관을 취하고 합하면 시역전 처리된 신호  $y(t)$ 가 생성되며 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{i=1}^M r_i(t) * h_i(-t) \\ &= \sum_{i=1}^M [s(t) * h_i(t)] * h_i(-t) \\ &= s(t) * \sum_{i=1}^M [h_i(t) * h_i(-t)] \\ &= s(t) * q(t), \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $y(t)$ 는 시역전 처리된 신호,  $r_i(t)$ 와  $h_i(t)$ 는  $i$ 번째 수신기로부터 수신된 통신신호와 채널 임펄스 응답이고,  $M$ 은 수신기 개수이며 \*는 컨볼루션의 연산자이다. 각 수신기의 채널 정보는 통신신호 이전에 송신된 탐침(probe) 신호를 이용하여 도출된다. 또한,  $q$ -함수  $q(t)$ 는 각 수신기의 채널 임펄스 응답의 자기상관 함으로 시역전 통신 성능을 평가하는 지표로써 사용되며, 델타 함수에 근접할수록 통신신호 내

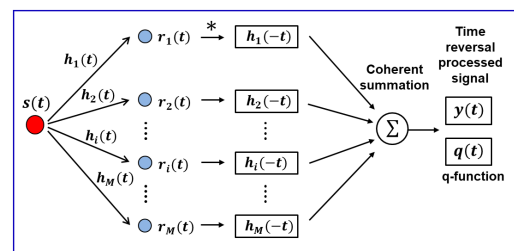


Fig. 1. Block diagram of the passive time-reversal technique.

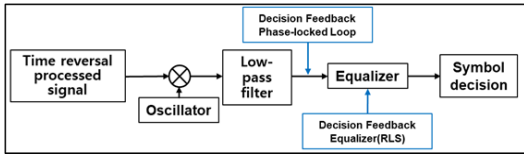


Fig. 2. Block diagram of time-reversal communications combined with a DFPLL and DFE.

ISI의 영향이 줄어든다. 하지만 실제 수중채널을 통해 전송된 신호는 채널의 시변동성으로 인해 채널 임펄스 응답 특성이 시간에 따라 변화하는 다중경로 성분을 갖기 때문에 시역전 기법을 통해 다중경로가 완벽히 제거될 수 없으며 잔여 ISI가 남으므로 오류 성능을 최적화할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 다중경로의 자기상관성을 이용하여 ISI를 완화하는 수동 시역전과 함께 Fig. 2와 같이 결정 궤환 위상 고정 루프(Decision Feedback Phase Locked Loop, DFPLL)를 이용하여 도플러에 의해 왜곡된 위상을 보정하고, 결정 궤환 등화기(Decision Feedback Equalizer, DFE)를 통하여 채널의 잔여 ISI를 제거하는 복조 과정을 통해 심볼을 검출한다.<sup>[7]</sup>

## 2.2 통신 채널 파라미터

수중에서의 음향 통신 성능은 환경에 매우 의존적 이므로 음향 통신 채널의 특성을 나타내는 통신 채널 파라미터를 확인하는 것은 통신 성능을 예측하는 데에 매우 중요하다. 본 논문에서는 통신 채널 파라미터로써 산란 함수를 통해 채널특성을 확인하고 출력 SNR로써 통신 성능과의 비교 및 분석을 수행한다.

### 2.2.1 산란 함수

수중 음향채널은 다중경로에 의한 시간 지연 확산과 시변동성에 따른 도플러 확산 특성을 갖는다. 이러한 이중 확산 채널특성을 나타내는 산란 함수는 아래 식과 같이 표현된다.<sup>[8]</sup>

$$P(f, \tau) = E \left[ \left| \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) \exp(-i2\pi ft) dt \right|^2 \right], \quad (2)$$

여기서  $h(t, \tau)$ 는 통신신호 구간내의 시변 채널 임펄스 응답이고,  $P(f, \tau)$ 는 산란 함수로써 시변 채널 임

펄스 응답의 관측 시간( $t$ )을 기준으로 푸리에 변환하고 제곱의 기댓값으로 나타내며, 지연 시간( $\tau$ )과 주파수 천이( $f$ )의 함수로 표현된다. 본 논문에서는 통신신호의 최소 자승법을 통해 통신신호 구간 내의 시변 채널 임펄스 응답을 추정하여 산란 함수를 도출하였고, 산란 함수를 주파수와 시간에 대해 적분함으로써 전력 지연 프로파일  $P_d(\tau)$ 와 도플러 전력 스펙트럼  $P_D(f)$ 를 도출한다.<sup>[8]</sup>

RMS(Root Mean Squared) 지연 확산  $\sigma_\tau$ 는 통신채널의 시간 분산 특성을 나타내는 파라미터로써 다중경로에 의한 채널 임펄스 응답으로부터 도출되며, ISI의 발생정도를 예측할 수 있는 중요한 파라미터이다. RMS 지연 확산은 산란 함수로 도출한 전력 지연 프로파일의 정규화된 음압세기  $P_d(\tau_k)$ 와 가장 앞서 들어오는 채널을 기준으로 하는 지연 시간  $\tau_k$ 의 함수로써 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2}, \quad \bar{\tau} = \frac{\sum_k P_d(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P_d(\tau_k)}, \quad \bar{\tau}^2 = \frac{\sum_k P_d(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P_d(\tau_k)}. \quad (3)$$

본 논문에서는 다중경로의 영향을 정확히 반영하기 위해 잡음레벨 이상의 에너지를 갖는 채널성분만을 분석에 사용하였다.<sup>[9]</sup> RMS 도플러 확산  $\sigma_v$ 는 해수면 변동이나 송수신기의 이동, 해양환경 변동 등에 의해 나타나는 통신채널의 시변동성을 대표하는 파라미터로써 도플러 효과와 관련된 통신 성능 평가 척도이다. RMS 도플러 확산은 도플러 전력 스펙트럼을 통해 도출되며 중심 주파수에 대한 주파수 천이  $v_k$ 와 그에 해당하는 정규화된 음압세기  $P_D(v_k)$ 의 함수로써 Eq. (4)와 같이 표현된다. RMS 도플러 확산 산출에 있어 도플러에 지배적인 영향을 갖는 에너지만을 사용하기 위해 최대 음압세기를 기준으로 -10 dB 이상인 주파수 성분의 에너지만 이용하였다.<sup>[10]</sup>

$$\sigma_v = \sqrt{\overline{v^2} - \bar{v}^2}, \quad \bar{v} = \frac{\sum_k P_D(v_k) v_k}{\sum_k P_D(v_k)}, \quad \bar{v}^2 = \frac{\sum_k P_D(v_k) v_k^2}{\sum_k P_D(v_k)}. \quad (4)$$

RMS 지연 확산과 RMS 도플러 확산은 다중경로에

의한 채널의 시간 분산적 특성과 시변동성을 확인하는데 사용되었으며 IV장에서 통신 성능과 비교 및 분석하였다.

### 2.2.2 신호대잡음비

SNR은 통신 시스템을 평가하는 통신 채널 파라미터로서 사용되며 입력 SNR과 출력 SNR이 있다. 입력 SNR은 통과대역에서 통신신호의 밴드폭에 대해 밴드통과 필터 신호처리된 신호의 배경소음 에너지와 통신신호 에너지 비로써 도출되며 수신된 통신신호의 에너지 크기를 나타낸다. 배경소음 에너지는 통신신호 구간 외의 신호 에너지로부터 산출되고 통신신호 에너지는 통신신호 구간 내의 신호 에너지와 배경소음 에너지의 차이로부터 산출된다.<sup>[5]</sup> 출력 SNR은 송신된 심볼과 수신단에서 신호처리 과정을 거쳐 검출된 심볼간의 평균제곱 오차 역수로서 비트 오류율(Bit Error Rate, BER)과 같이 통신 성능을 나타내며 Eq. (5)와 같이 표현된다.<sup>[5]</sup>

$$\text{Output SNR} = 1/E \left[ |I_n - \hat{I}_n|^2 \right], \quad (5)$$

여기서  $I_n$ 은 송신된 심볼이고  $\hat{I}_n$ 은 복조를 통해 추정된 심볼이며,  $E[\cdot]$ 는 기대값을 나타낸다. 본 논문에서는 수신된 통신신호와 시역전 처리된 통신신호의 수신별 입력 SNR을 비교하고 출력 SNR로써 수신별 통신 성능을 확인하였다.

## III. 해상 실험

SAVEX15(Shallow-water Acoustic Variability Experiment 2015) 실험은 2015년 5월 14일부터 2주 동안 제주 남서쪽 해역(북위 32° 33', 동경 126° 8.1')에서 천해에서의 음파 전달 특성, 수중음향 통신 및 해양환경의 시변동 특성 등을 연구하기 위해 한미 공동으로 수행되었다.<sup>[11]</sup> 본 논문에서 분석하고자 하는 통신실험 환경은 단일입력 다중출력 시스템이고, 송수신기간 수평거리는 약 2.7km이며 수심은 100m~102m로 비교적 평탄한 지형이었다(Fig. 3). Fig. 4는 실험 모식도이며 수신기는 3.75 m의 등간격으로 16개 채널의 수

직 선배열(Vertical Line Array, VLA)을 사용하였고, 23.5 m에서 79.5 m의 수심까지 총 56.25 m 길이로 배치되었다. 실험 중 CTD(Conductivity-Temperature-Depth)를 이용하여 측정된 수직 음속구조를 통해 심해에 전형적으로 나타나는 음향채널이 수심 100 m의 천해임에도 불구하고 존재하는 것을 확인하였다.<sup>[11]</sup> 송신기는 음향채널 축(-40 m)에 가까운 38 m에 배치하였고 실험해역의 해상상태는 평균풍속 6.6 m/s, 유효파고 59.5 cm로써 WMO(World Meteorological Organization) 기준 Sea state 2의 비교적 안정적인 상태였다.

송신신호는 Fig. 5과 같이 탐침신호와 통신신호로 구성되었다. 탐침신호는 길이 20 ms, 13 kHz - 17 kHz 밴드폭의 선형 주파수 변조(Linear Frequency Modulation, LFM) 신호였으며, 탐침 신호를 정합 필터링함으로써 수동 시역전 기법에 이용되는 채널 임펄스 응답  $h_i(t)$ 를 추정하였다. 통신신호는 중심주파수 15 kHz, 밴드폭 1.25 kHz로써 BPSK(Binary Phase-Shift Keying) 변조방식으로 생성하였고, ISI의 영향을 최소화하기 위해 롤 오프인자 0.25인 제곱근 상승 코사인 필터를 사용하였으며 심볼 전송 속도는 1000 symbol/s로 설계하였다. 통신신호는 수동 시역전 통신 성능 도출과 통신신호 구간 내의 시변 채널 임펄스 응답  $[h(t, \tau)]$  추정 및 채널 파라미터 도출에 이용되었다. 통신신호 앞에 100개(0.1 s)의 심볼로 이루어진 훈련 시퀀스는 통신 채널의 위상 추적을 위한 DFPLL과 잔여 ISI 제거를 위한 DFE에 이용되었다. DFE는 망각인자 0.999의 RLS(Recursive Least Squares) 알고리즘을 사용하였으며 통신 성능에 지배적인 영향을 미

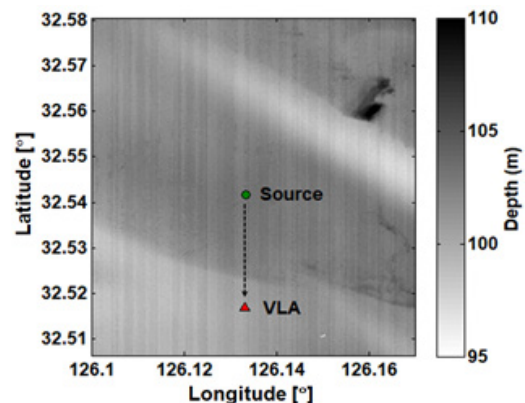


Fig. 3. Experimental site.

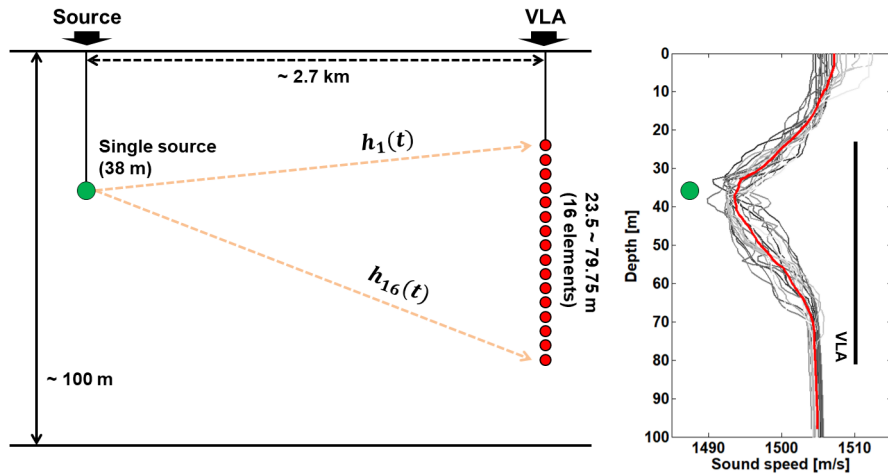


Fig. 4. Experimental configuration and sound speed profiles.

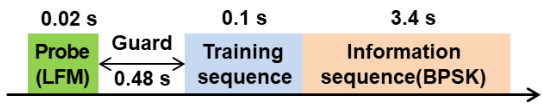


Fig. 5. The transmitted signal structure.

치는 채널을 모두 추정하기 위해 다중경로 누적에너지의 97 %에 해당되는 시간에 상응하여 앞먹임 (feedforward) 탭 개수를 설정하고 되먹임 (feedback) 탭 개수는 앞먹임 탭 개수의 절반 길이로 설정하였다.<sup>[12]</sup>

### IV. 실험 결과

#### 4.1 수심별 시역전 통신 성능: 단일 수신기

음향채널이 존재하는 천해환경인 SAVEX15 실험

해역에서 수심별 채널 임펄스 응답과 단일 수신기에 의한 시역전 통신 성능 및 통신 채널 파라미터를 도출 하였다. Fig. 6는 LFM 신호의 정합필터를 통해 추정된 수신신호의 수심별 채널 임펄스 응답으로써 10 ms - 15 ms의 지연확산이 발생하는 것을 확인할 수 있고 음향채널의 영향으로 최소 음속층을 통해 전파되는 음파가 낮은 음속으로 인해 늦게 수신됨을 알 수 있다. 또한 음향채널 내에 포함되어 있는 수신기들에서 상대적으로 큰 에너지가 수신됨을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 단일 수신기의 수심별 시역전 통신 성능 및 통신 채널 파라미터 도출 결과이다. Fig. 7(a)는 시역전 통신 성능을 나타내는 수심별  $q(t)$  로써 음향채널 내의 6번째 채널(수심 42.25 m)과 8번째 채널(수심

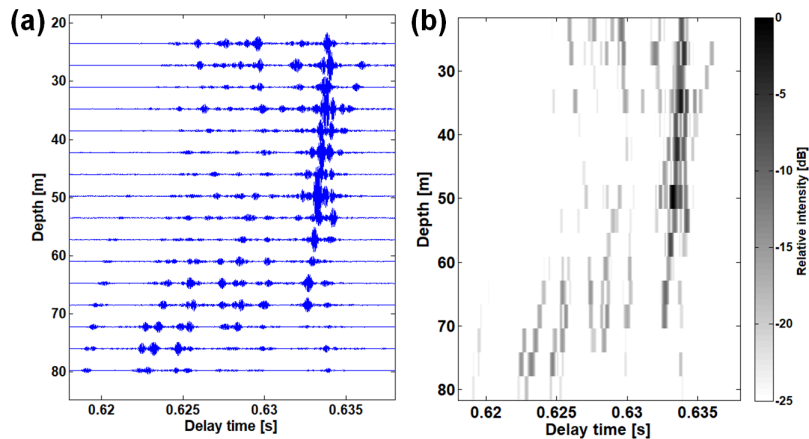


Fig. 6. Channel impulse responses by depth (LFM matched filtering) (a) normalized responses and (b) dB scale.

49.75 m)에서 시간 집중된 주엽(main lobe)의 에너지가 부엽(side lobe)의 에너지보다 상대적으로 크게 수신되었다. Fig. 7(b)는 입력 SNR을 나타낸 것으로 수신신호(Receiver X-tal, RX)와 시역전 신호(Time Reversal, TR) 모두 음향채널 내의 8번째 채널에서 입력 SNR이 가장 높게 나타났고 시역전에 의한 신호의 시간 집중으로 RX보다 TR의 입력 SNR이 상대적으로 높게 나타난다. Fig. 7(c)는 시역전 처리 전후의 RMS 지연 확산을 나타낸 것이다. 시역전 후에 주엽의 에너지에 비해 다중경로 에너지가 감소함에 따라 TR의 RMS 지연 확산은 RX에 비해 감소하였으며 이는 ISI의 영향이 시역전 신호처리를 통해 줄어들음을 의미한다. Fig. 7(d)는 채널의 시변특성을 나타내는 RMS 도플러 확산을 산출한 결과이다. 위상보정을 하지 않았을 때 0.1 Hz~0.16 Hz의 값을 갖는 수신기가 존재하였으나 DFPLL이 적용되었을 때 0 Hz로 수렴되어 채널의 시변특성에 의한 위상왜곡이 보정됨을 알 수 있다. Fig. 7(e)은 출력 SNR 도출결과로서 채널보상

을 하지 않았을 때는 평균 -3.4 dB, 시역전 신호처리를 했을 때는 평균 -1.9 dB로 시역전 신호처리를 하지 않았을 때보다 약 1.5 dB 증가하였다. 시역전 신호처리 이후 DFPLL을 적용할 경우 시역전 신호처리만 했을 때보다 평균 출력 SNR이 약 5.6 dB 향상되었으며 이는 시역전 신호처리를 하더라도 위상왜곡이 남아있고 추가적인 위상보정이 필요함을 나타낸다. 시역전 신호처리와 위상보정 후 결정계환등화기를 적용할 경우 적용하지 않았을 때보다 평균 출력 SNR은 약 4.6 dB 향상되었으며 이는 시역전 신호처리 이후에 남아있는 잔여 ISI를 등화기가 효과적으로 제거함을 의미한다. 채널별로 살펴보면 입력 SNR이 크고 RMS 지연 확산이 작은 8번째 채널의 출력 SNR이 약 15.0 dB로 가장 높게 나타났다.

#### 4.2 수심별 시역전 통신 성능: 다중 수신기

본 절에서는 시역전에 이용되는 수신기 개수와 수신에 따라 시역전 통신 성능과 통신 채널 파라미터

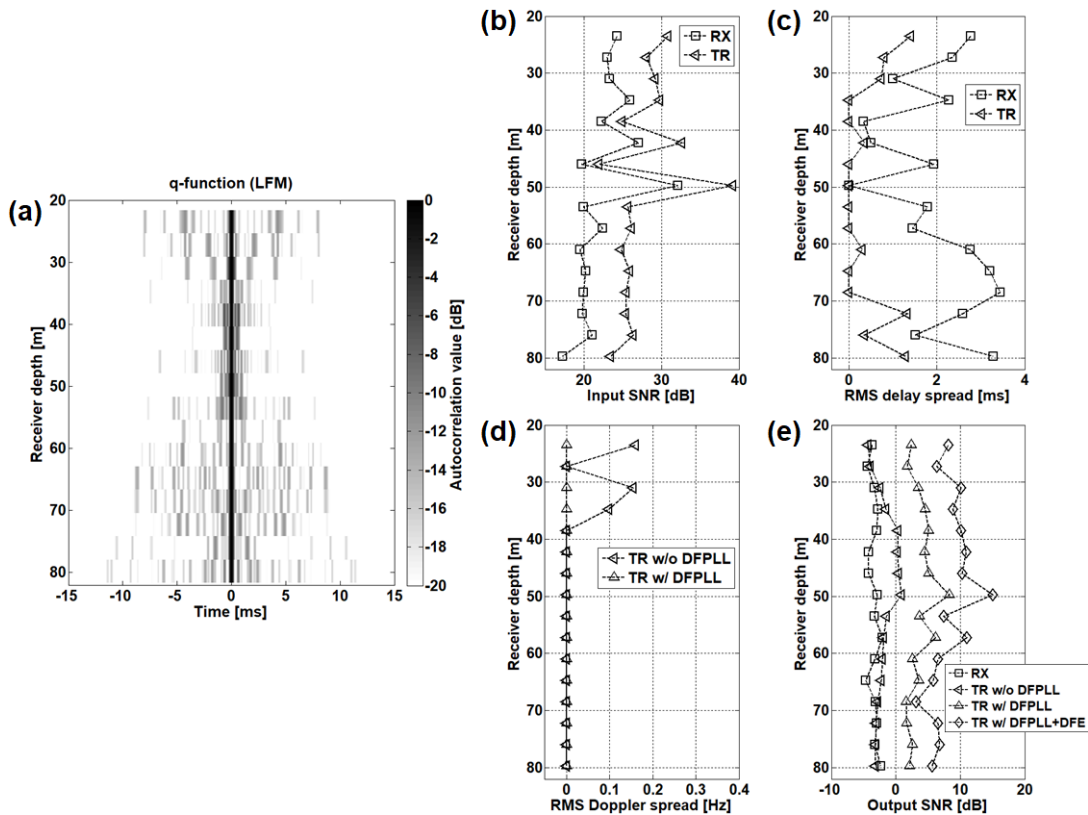


Fig. 7. Results of the time-reversal communication performance and channel parameters of single receiver in depth (a) q-function, (b) input SNR, (c) RMS delay spread, (d) RMS Doppler spread, (e) output SNR.

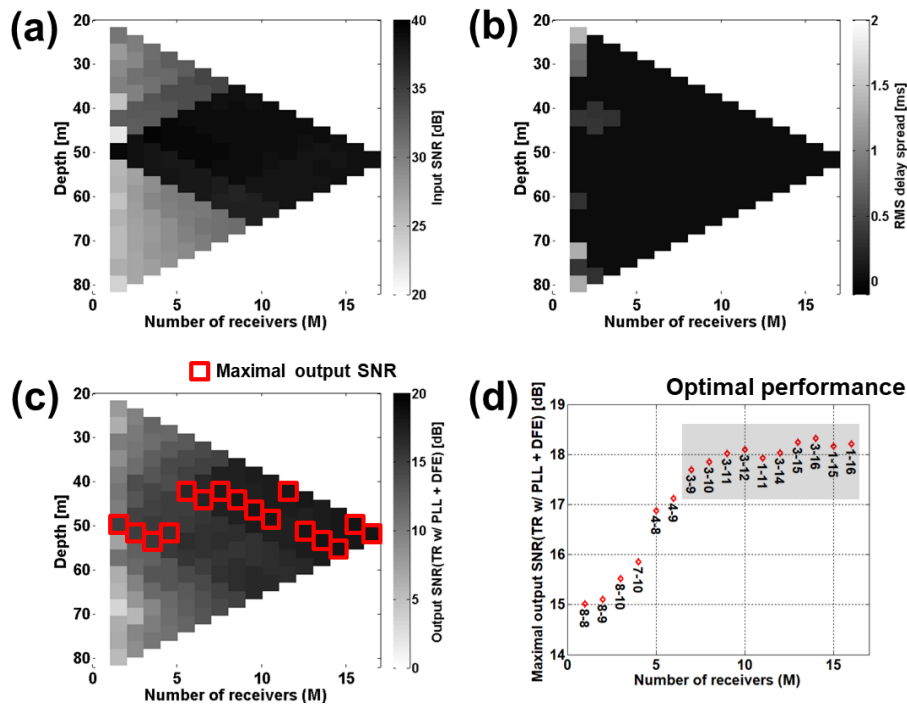


Fig. 8 Results of the time-reversal receivers communication performance and channel parameters of multiple receivers in depth (a) input SNR, (b) RMS delay spread, (c) output SNR (TR w/ DFPLL + DFE), (d) maximal output SNR (TR w/ DFPLL + DFE).

를 비교 분석한다. 먼저 수직 선배열 내 16개의 수신기 중 인접한 수신기들에 수신된 신호들을 결합하여 시역전 통신 성능을 도출한다. 즉, 수신기 사이의 거리는 고정되며 기준 수신기만 변경하는 방법으로 결과를 도출하였다. 예를 들어, 2개의 수신기를 시역전 성능도출에 사용할 경우 수신기 간 거리가 일정한 수신기의 15개 조합(1번째, 2번째 채널), (2번째, 3번째 채널), ..., (15번째, 16번째 채널)에 의한 결과가 얻어지며, 3개의 수신기를 시역전 성능도출에 사용할 경우 수신기 간 거리가 일정한 14개의 조합(1번째, 2번째, 3번째 채널), (2번째, 3번째, 4번째 채널), ..., (14번째, 15번째, 16번째 채널)에 의한 결과가 얻어진다.

Fig. 8는 수신기 개수와 수심에 따른 시역전 통신 성능과 통신 채널 파라미터 분석결과이다. Fig. 8(a)는 입력 SNR을 나타낸 것으로 음향채널 내에 존재하는 수신기 중 입력 SNR이 가장 큰 8번째 채널을 포함한 시역전 신호들의 입력 SNR이 높게 나타났다. Fig. 8(b)는 RMS 지연 확산을 나타낸 것으로 수신기 4개를 이용한 시역전 신호로부터 RMS 지연 확산이 0ms로 수렴하는 것으로 나타났으며, 이는 4개 이상의 수신

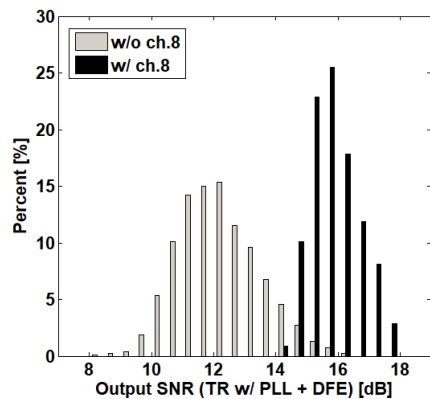


Fig. 9. Distribution of the results of the time-reversal communication performance using random 4 receivers (TR w/ DFPLL + DFE).

기를 이용한 시역전 신호부터 ISI의 영향이 현저하게 줄어드는 것으로 볼 수 있다. Fig. 8(c)는 DFPLL과 DFE가 적용된 시역전 신호의 출력 SNR을 나타낸 것이다. 입력 SNR과 마찬가지로 8번째 채널을 포함하였을 때 출력 SNR이 높게 나타나며 3번째 채널(수심 31 m)부터 16번째 채널(수심 79.75 m)까지의 수신기 14개를 포함한 시역전을 수행하였을 때 18.3dB로 가

장 높게 나타났다. Fig. 8(d)는 Fig. 8(c)에서 제시한 수신기 개수에 따른 출력 SNR 최댓값( $\diamond$ )과 시역전 신호처리에 사용된 채널의 범위를 나타내며 출력 SNR 최댓값 모두 입력 SNR이 높은 8번째 채널을 포함하

Table 1. The output SNRs (TR w/ DFPLL + DFE) and combinations of receivers which are within 1 dB about the best output SNR of 18.3 dB among the random 4 receivers combination for the passive time-reversal.

No.	Combination of the channels for passive time-reversal	Output SNR (TR w/ PLL + DFE) [dB]
1	[2 3 4 8]	17.30
2	[3 4 5 8]	17.82
3	[3 4 7 8]	17.67
4	[3 4 8 9]	17.74
5	[3 4 8 10]	17.77
6	[3 4 8 11]	17.66
7	[3 4 8 12]	17.83
8	[3 4 8 14]	17.70
9	[3 4 8 15]	17.99
10	[3 4 8 16]	17.51
11	[3 8 12 14]	17.37
12	[4 5 7 8]	17.37
13	[4 5 8 9]	17.37
14	[4 5 8 11]	17.33
15	[4 5 8 15]	17.46
16	[4 7 8 9]	17.33
17	[4 7 8 10]	17.33
18	[4 7 8 12]	17.36
19	[4 7 8 15]	17.46
20	[4 8 9 10]	17.42
21	[4 8 9 11]	17.45
22	[4 8 9 12]	17.50
23	[4 8 9 14]	17.62
24	[4 8 9 15]	17.63
25	[4 8 9 16]	17.42
26	[4 8 10 15]	17.54
27	[4 8 11 12]	17.41
28	[4 8 11 15]	17.58
29	[4 8 11 16]	17.44
30	[4 8 12 14]	17.34
31	[4 8 14 15]	17.31
32	[4 8 14 16]	17.44
33	[4 8 15 16]	17.43

였다. 따라서 입력 SNR이 높은 채널을 포함하여 시역전 결합을 하는 것이 통신 성능을 최적화하는데 중요한 요소인 것으로 판단할 수 있다. 수신기 개수 7개 이상( $M \geq 7$ )인 경우의 출력 SNR 최댓값은 본 논문의 실험환경에서의 통신 성능 최댓값인 18.3 dB와 비교하였을 때 1 dB 이내의 값을 보였다. 결과적으로 성능이 우수한 일부 수신기를 포함하여 시역전을 수행한다면, 통신 성능은 모든 수신기를 사용한 시역전 통신 성능과 유사하게 도출될 수 있는 것뿐만 아니라 더 나은 공간 효율성을 얻을 수 있다. 이는 수중 통신 환경에서 수십벌 통신 채널 파라미터를 확인하여 수신기를 배치한다면 최소의 공간 및 수신기를 이용하여 최적에 가까운 시역전 통신 성능을 기대할 수 있음을 보여준다.

Fig. 9는 16개의 수신기 중 수신기 수심과 간격에 관계없이 임의의 수신기 4개를 선정하는 조합의 모든 경우에서의 출력 SNR 도출 결과 분포도이며 입력 SNR이 가장 큰 8 번째 채널을 포함한 결과와 포함하지 않은 결과로 구분하였다. 8번째 채널을 포함한 시역전 신호의 출력 SNR 기댓값은 15.9 dB이고 8번째 채널을 포함하지 않은 시역전 신호의 출력 SNR 기댓값은 12.2 dB로 약 3.7 dB 정도의 성능 차이가 발생하였다. Table 1은 임의의 수신기 4개를 수동 시역전 결합하는 모든 조합 중 최대 출력 SNR 값인 18.3 dB를 기준으로 하여 1 dB 이내의 성능이 도출되는 수신기 조합과 출력 SNR 값이다. 8번째 채널을 포함했을 때 본 통신환경의 최대 출력 SNR 값과 1 dB 이내의 성능이 도출되는 조합이 존재하는 것으로 보아 입력 SNR이 높은 채널의 수신신호를 시역전 결합에 포함하는 것이 통신 성능을 최적화하는데 유리하며 이용하는 수신기의 배치에 따라 통신 성능이 결정됨을 알 수 있다.

## V. 결 론

SAVEX15 실험 해역은 음향채널이 존재하는 천해 환경으로써 음향채널 내의 최소 음속층을 따라 전파되어 상대적으로 큰 에너지의 직접파가 존재하므로 에너지가 집중되는 수심이 존재하게 된다. 본 논문에서는 단일 수신기와 다중 수신기에 의한 수심별



시역전 통신 성능과 통신 채널 파라미터를 확인하였고 음향채널 내에 에너지가 집중된 수신기를 포함하여 시역전된 통신신호들이 높은 입력 SNR 및 출력 SNR을 보임을 알 수 있었다. 또한 RMS 지연확산은 수신기 4개를 이용한 시역전 신호부터 0 ms으로 수렴하여 ISI의 영향이 현저하게 줄어드는 것으로 나타났다으며 성능이 우수한 채널을 포함한 일부 수신기만 사용하더라도 최적에 가까운 시역전 통신 성능을 도출할 수 있음을 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 남서해 천해역 해저퇴적층 지음향 특성 연구(PE99531), 한국해양과학기술진흥원의 분산형 수중 관측 제어망 개발, 한국연구재단의 백터센서와 수동 시역전 기법을 이용한 수중 음향 통신 성능 분석 연구의 지원에 의해 수행되었습니다

## References

1. D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Ocean. Eng.* **25**, 4-27 (2000).
2. H. C. Song, "Peer-reviewed technical communication: an overview of underwater time-reversal communication," *IEEE J. Ocean. Eng.* **41**, 644-655 (2016).
3. G. Edelmann, T. Akal, W. Hodgkiss, S. Kim, W. Kuperman, H. Song, and T. Akal, "An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal mirror," *IEEE J. Ocean. Eng.* **27**, 602-609 (2002).
4. D. Rouseff, D. Jackson, W. Fox, C. Jones, J. Ritcey, and D. Dowling, "Underwater acoustic communications by passive-phase conjugation: Theory and experimental results," *IEEE J. Ocean. Eng.* **26**, 821-831 (2001).
5. 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).
6. H. C. Song and W. S. Hodgkiss, "Self-synchronization and spatial diversity of passive time reversal communication (L)," *J. Acoust. Soc. Am.* **137**, 2974-2977 (2015).
7. J. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*

(McGraw-Hill, New York, 2008). pp. 290-327.

8. P. A. van Walree and M. Smedsrud, "A discrete-time channel simulator driven by measured scattering functions," *IEEE J. Select. Areas Commun.* **26**, 1628-1637 (2008).
9. T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice* (Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2002), pp.177-210.
10. A. F. Molisch and M. Steinbauer, "Condensed parameters for characterizing wideband mobile radio channels," *Int. J. Wireless Inf. Newtw.* **6**, 133-154 (1999).
11. H. C. Song, S. -M. Kim, B.-N. Kim, and S. H. Nam, "Shallow-water acoustic variability experiment 2015 (SAVEX15) in the northern East China Sea," *J. Acoust. Soc. Am.* **140**, 3012 (2016).
12. J. W. Choi and P. H. Dahl, "Measurement and simulation of the channel intensity impulse response for a site in the East China Sea," *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 2677-2685 (2006).

## 저자 약력

### ▶ 최 강 훈 (Kang-Hoon Choi)



2012년 2월: 한양대학교 해양환경과학과 이학사  
2014년 3월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합 공학과 석·박사 통합과정

### ▶ 김 선 호 (Sunhyo Kim)



2009년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 학사  
2011년 2월: 한양대학교 해양환경과학과 석사  
2016년 8월: 한양대학교 해양융합과학과 박사  
2016년 10월: 한양대학교 박사 후 연구원  
2017년 10월 ~ 현재: 한양대학교 연구조 교수

### ▶ 최 지 웅 (Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 학사  
1998년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 석사  
2002년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 박사  
2002년 11월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate  
2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합 공학과 교수

## ▶ 김 현 수 (Hyeonsu Kim)



2008년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사  
 2010년 2월: 인하대학교 전자공학과 석사  
 2017년 8월: 인하대학교 전자공학과 박사  
 2017년 9월 ~ 현재: 한양대학교 박사 후 연구원

## ▶ 김 병 남 (Byoung-Nam Kim)



1997년 2월: 세명대학교 물리학과 학사  
 1999년 8월: 성균관대학교 물리학과 석사  
 2007년 8월: 성균관대학교 물리학과 박사  
 2007년 8월 ~ 현재: 한국해양과학기술원 책임연구원