

다중 전달 경로 채널에서의 수중 디지털 통신을 위한 선 처리 기법

Pre-Coding Method for Underwater Digital Communications in a Multipath Channel

김 태 우*, 황 아 름*, 성 우 제*, 임 용 곤**
(Taewoo Kim*, Arom Hwang*, Woojae Seong*, Young-Kon Lim*)

*서울대학교 조선해양공학과, **한국해양연구원 해양시스템안전연구소
(접수일자: 2008년 2월 5일; 채택일자: 2008년 4월 8일)

수중 채널에서의 음파를 사용한 신호는 다중 전달 경로 현상에 의해 왜곡된다. 본 논문에서는 채널의 임펄스 응답을 바탕으로 신호를 미리 왜곡시켜 수신기에 도착했을 때 최소한의 등화만으로 신호를 받을 수 있는 선 처리 기법을 제안하였다. 그리고 음선 이론 기반 시뮬레이션과 수조 실험을 통해 제안한 기법의 성능을 검토하였다. 다중 전달 경로 현상이 약할 경우, SNR이 약 20 dB 일 때 BER이 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 의 성능을 보였고 다중 전달 경로 현상이 심한 환경에서 SNR이 약 30 dB 일 때 유사한 BER 성능을 보였다. 제안한 기법을 수중 운동체의 통신에 사용가능하도록 송수신기의 위치 변화에 따른 채널 예측 기법을 제안하였고 그 성능을 검토하였다.

핵심용어: 수중 디지털 통신, ISI, 선 처리, 다중 경로, 등화

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

Signals in an underwater channel get distorted by multipath propagation. In this paper, pre-coding method is suggested which helps comprehending the signals with minimum equalization. The signals are transformed based on the knowledge of the impulse response of the channel. Proposed pre-coding method is tested by simulations based on the ray theory and through water tank experiments. In weak multipath environment, in case of an SNR of about 20 dB, BER is $10^{-3} \sim 10^{-4}$, while in strong multipath environment, similar BER is achieved with SNR of about 30 dB. In order for the pre-coding method to be used for underwater vehicles, channel prediction method utilizing the waveguide invariant is suggested and tested.

Keywords: Underwater digital communication, Multipath, Pre-coding, Equalization

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

수중에서 음파를 사용하여 통신을 하면 전달되는 신호는 해저면, 해수면에서의 반사 및 굴절에 의해 발생하는 다중 전달 경로 현상 때문에 수신단에서 왜곡되기 마련이다. 수중 통신을 할 경우 다중 전달 경로 현상에 의해 수신기에서 받은 신호에는 ISI (Inter-Symbol Interference)가 발생한다. 이를 극복하기 위하여 동기 위상 방식 통신에서는 LMS (Least Mean Square), RLS (Recursive Least Square) 등의 알고리즘을 사용한 등화기를 사용함으로써

왜곡된 신호를 보정한다. 등화기를 사용한 신호의 왜곡 보정 방법은 일반적인 선박과 선박간의 수중 통신에 적절한 방법이다. 그러나 무인 잠수정과 같이 외부에서 전원을 공급받기 어렵고, 내장 전원으로 동작해야 하는 시스템의 경우 등화기 사용은 전체 시스템의 적재 및 연산 처리 자원에 부담을 주어 전체 시스템 성능을 저하시키는 원인이 된다. 그러므로 소형 수중 무선 시스템이 통신 신호를 받을 때 등화 없이 신호를 받을 수 있거나, 최소한의 등화만을 해도 필요한 데이터를 받을 수 있으면 전체적인 시스템의 성능을 향상시킬 수 있을 것이다. 국외에서는 G. F. Edelmann 등이 시역전처리 (Time Reversal Mirror; TRM)를 사용하여 송수신기간의 거리가 10km 떨어진 환경에서 500bit/s의 데이터 전송률로 수신측에

등화기를 사용하지 않고도 데이터를 수신하는 데 성공하였다 [1]. 국내에서는 페이지 컨주게이션을 이용하여 ISI를 감소시켜 통신을 하는 방법이 제안되었고 [2][3], 송신 빔 형성기를 사용하여 다중 전달 경로 현상에 의한 통신 성능의 저하를 극복하는 기법이 제안되었다 [4]. 그러나 이상의 방법들을 사용하여 통신을 할 경우 신호를 송신하는 쪽은 배열을 사용해야 하므로 설치비용 및 시간이 많이 소요되어 실용성이 저하된다. 본 논문에서 각각 1개의 송수신기만을 사용하는 환경에서 채널의 임펄스 응답을 바탕으로 신호를 송신 측에서 미리 왜곡하여 신호를 보냄으로써 수신 측에서 신호가 복원되는 선 처리 기법을 제안하고, 시뮬레이션과 실험을 통해 선 처리 기법의 성능을 확인하였다. 그리고 선 처리 기법을 수중 운동체에 대해 확장하여 적용할 수 있도록 송수신기의 위치 변화에 따른 채널 변화 예측 기법을 제안하고 제안된 기법의 적용 가능성과 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

II. 선 처리 통신 기법

2.1. 선 처리 기법

수중 채널 환경에서 채널의 임펄스 응답 (impulse response)을 $h(t)$, 송신기 (transmitter)가 보내는 신호를 $s(t)$, 수신기 (receiver)가 받는 응답 신호 $r(t)$ 라고 하면 $r(t)$, $s(t)$ 및 $h(t)$ 사이에는 식 (1)과 같은 관계식이 성립된다.

$$r(t) = s(t) * h(t). \tag{1}$$

식 (1)은 시 불변 선형 시스템 (Linear Time Invariant System; LTI system)일 때 성립하며 수중 음속을 고려하면, 수중 통신을 위해서 음파 신호가 전달되는 시간이 매우 짧기 때문에 수중 채널 환경을 시 불변 선형 시스템이라고 가정할 수 있기 때문에 수중 채널 환경에 적용이 가능하다.

식 (2)을 만족하는 $ih(t)$ 가 존재하면 $ih(t)$ 을 채널의 역 임펄스 응답 (inverse impulse response)이라고 한다.

$$h(t) * ih(t) = \delta(t). \tag{2}$$

역임펄스 응답 $ih(t)$ 을 전달하고자 하는 신호 $s(t)$ 와 콘볼루션 (convolution) 하여 송신하면 수신신호 $r(t)$ 는 전달하고자 하는 신호 $s(t)$ 와 같아지게 된다.

$$\begin{aligned} r(t) &= [s(t) * ih(t)] * h(t) \\ &= s(t) * [ih(t) * h(t)] \\ &= s(t) * \delta(t) \\ &= s(t). \end{aligned} \tag{3}$$

식 (2)를 푸리에 변환하면 주파수 영역에서 다음과 같은 식을 만족한다.

$$H(\omega)IH(\omega) = 1. \tag{4}$$

식 (4)에서 역 임펄스 응답은

$$ih(t) = F^{-1} \left\{ \frac{H^*(\omega)}{H(\omega)H^*(\omega)} \right\} \tag{5}$$

와 같이 얻을 수 있다.

임펄스 응답을 직접 획득 가능한 시뮬레이션 과 달리 실제 수중 환경에서는 하드웨어의 제약 및 신호 처리의 제약 등의 이유로 인해 직접 임펄스 응답 $h(t)$ 을 획득하기가 쉽지 않다. 직접 임펄스 응답을 구하는 방법 대신, 미리 약속된 신호를 송신하여 그 신호에 대한 채널 응답을 분석하고 이를 이용하여 임펄스 응답을 추정할 수 있으며, 임펄스를 대신하여 사용되는 신호를 pilot 신호라고 한다. Pilot 신호를 사용하여도 식 (1)의 관계가 성립되기 때문에 아래와 같은 주파수 영역에서 관계 역시 성립되게 된다.

$$R(f) = S(f)H(f).$$

여기서 $R(f)$, $S(f)$, $H(f)$ 는 각각 식 (1)의 $r(t)$, $s(t)$, $h(t)$ 을 푸리에 변환한 것이다. 주파수 응답 $H(f)$ 는 모든 주파수 대역의 정보를 포함한다. 실제로 Pilot 신호 $S(f)$ 는 보내고자 하는 신호와 동일한 주파수 대역을 지나는 대역 통과 신호가 되는 것이 바람직하다. 이는 해당 대역 외의 신호는 선처리 기법을 사용하는 데 필요 없기 때문이다. $S(f)$ 가 주파수 대역신호일 경우 전술한 $R(f)$, $S(f)$, $H(f)$ 에 대한 관계식은 식 (6)과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$R(f) = S(f)H_b(f) \tag{6}$$

여기서 $H_b(f)$ 는 $H(f)$ 의 대역 통과 필터링을 한 신호이다. 식 (6)으로부터 역임펄스 응답 $ih_b(t)$ 을 아래와 같은 과정을 거쳐 구할 수 있다.

$$IH(f) = 1/H_b(f) = S(f)/R(f) \quad (7)$$

$$ih_b(t) = F^{-1}\left\{\frac{1}{H_b(f)}\right\} = F^{-1}\left\{\frac{S(f)}{R(f)}\right\}. \quad (8)$$

위 식은 보내고자하는 신호의 주파수 대역에서만 성립한다. 실제 해양에서 수중 통신을 할 경우 해양 환경 및 장비 등의 영향에 의해서 그림 1에 적시되어 있는 무인 잠수정과 모선의 통신 상황과 같이 송신기에서 수신기로 가는 채널 임펄스 응답과 수신기에서 송신기로 가는 임펄스 응답이 일치하는 역전성의 원리 (reciprocity principle)가 성립되지 않은 경우가 발생할 수 있다. 역전성의 원리가 성립하지 않은 경우에는 동일한 pilot 신호를 2회 송신하여 아래와 같은 방법으로 역임펄스 응답을 도출할 수 있다. 송신단에서 수신단으로 가는 채널의 대역 제한 임펄스 응답을 h_1 , 수신단에서 송신단으로 가는 채널의 대역 제한 임펄스 응답을 h_2 라고 하면, 송신단에서 pilot 신호 $s(t)$ 를 송신하면 수신단에서 수신되는 신호 $r_{12}(t)$ 는 아래와 같이 된다.

$$r_{12}(t) = s(t)*h_1(t). \quad (9)$$

수신단에서 $r_{12}(t)$ 을 송신단으로 송신한다면, 송신단에서 수신되는 신호 $r_{21}(t)$ 는 아래와 같이 된다.

$$r_{21}(t) = s(t)*h_1(t)*h_2(t). \quad (10)$$

수신단에서 송신단에서 송신한 pilot 신호와 동일한 신호 $s(t)$ 를 송신단에 송신하게 되면, 송신단에서 수신되는 신호 $r'_{21}(t)$ 는 아래와 같이 된다.

$$r'_{21}(t) = s(t)*h_2(t). \quad (11)$$

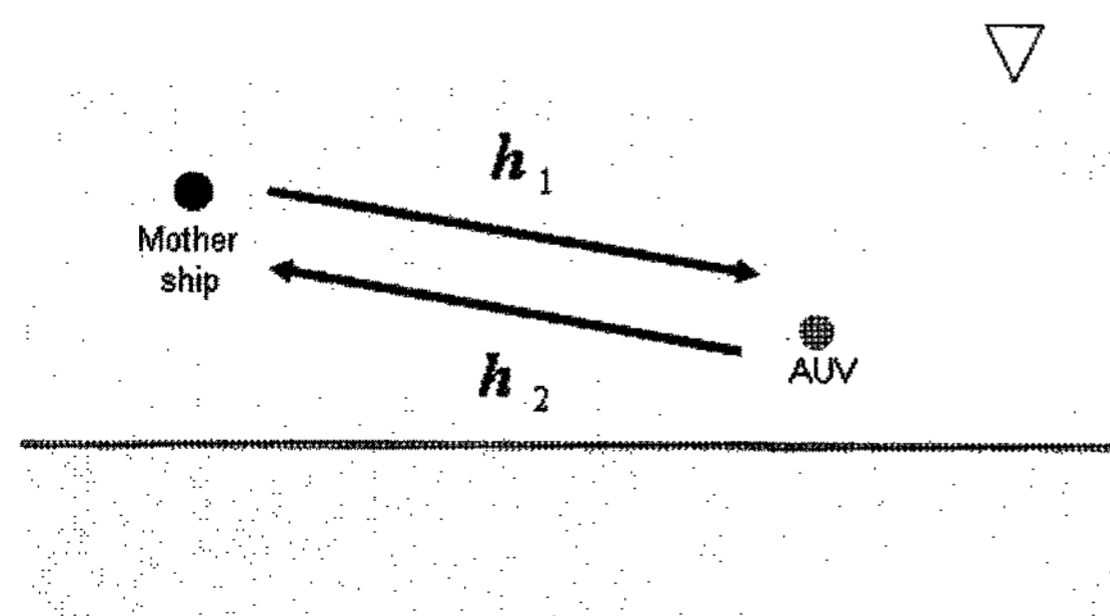


그림 1. 역전성이 성립하지 않는 채널의 예: h_1, h_2 은 각 각의 임펄스 응답

Fig. 1. Example of channel in which the reciprocity doesn't exist; here h_1, h_2 are channel impulse response for each direction, respectively.

식 (10)과 (11)을 이용하며 송신단에서 수신단으로의 채널 임펄스 응답을 구할 수 있게 되며 이를 바탕으로 $h_1(t)$ 의 역임펄스 응답을 구할 수 있다.

2.2. 도파관 불변성 기반 채널 예측 기법

전술한 선 처리 기법은 송신기, 수신기가 모두 고정되어 있는 경우를 가정하고 있기 때문에 실제 해양에서 모선과 AUV와 같이 송신기, 수신기가 이동하는 경우에 적용하기 어렵다. 송신기 또는 수신기가 이동하는 경우에는 이동에 따른 선 처리 보정이 필요하게 되는데, 이러한 보정을 위해서는 이동에 따른 채널 특성 변화를 예측하는 것이 필요하다. 이에 본 논문에서는 도파관 불변성 이론 [7]을 기반으로 하는 채널 예측 기법을 제안하였다.

이미 알려진 바와 같이 거리 독립 환경에서의 도파관 불변성은 아래 식과 같이 거리와 주파수의 상관관계로 표현할 수 있다.

$$\omega(t) = \omega_0 \left(\frac{r(t)}{r_0} \right)^\beta \quad (12)$$

여기서 ω_0 와 r_0 는 각각 주파수와 음원 거리의 초기 값이고, β 는 불변량을 나타낸다. β 는 아래 식과 같이 group slowness δ_g 와 phase slowness δ_p 의 관계로 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial S_g}{\partial S_p} \equiv \frac{1}{\beta}. \quad (13)$$

일반적으로 불변량 β 는 환경에 대해서 달라지나, Pekeris 도파관에서는 1로 근사됨이 알려져 있다.

본 논문에서는 식 (12)의 관계를 이용하여 음원의 이동에 따른 거리 편차에 대해 주파수를 보정함으로써 제안한 선 처리 기법이 송신기와 수신기가 이동하는 경우에도 적용 가능성을 보였다.

III. 음선 이론 기반 채널 모델링을 통한 선 처리 기법 시뮬레이션

3.1. 시뮬레이션 조건

제안된 선 처리 기법과 채널 예측 기법의 성능을 검증하기 위하여 그림 2와 같은 해양 환경을 가정하였다. 선 처리 기법 성능 검증을 위해서 해양 바닥 재질에 따라서

수중 채널 환경에서의 다중 경로 현상이 변화하게 됨으로 해양 바닥 재질이 제안된 기법의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 바닥 매질은 진흙과 모래인 2가지 경우를 각각 가정하였다.

배경 소음이 제안된 기법의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 다양한 레벨의 신호대 잡음비 (Signal to Noise Ratio; SNR)를 가지고 있는 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise; AWGN)을 발생시켜 다중 전달 경로 영향이 반영된 신호에 더하였다. 이때 신호대 잡음비는 pilot 신호를 바탕으로 역임펄스 응답을 계산할 때 pilot 신호와 같이 들어온 소음의 영향이 증폭되는 사실로부터 pilot 신호가 배경 소음이 없는 채널을 통과했을 때의 신호와 배경 소음과의 파워 (power) 비로 정의하였다. pilot 신호로서 임펄스를 사용하였으며 채널의 임펄스 응답은 음선 이론을 이용한 음파 전달 모델링 프로그램 [6]을 이용하여 구하였다. 다중 경로 현상이 상대적으로 미약한 환경과 심한 환경의 통신 성능 비교를 위해 바닥 매질이 진흙인 경우와 바닥 매질이 모래인 경우 2가지 환경을 가정하였다. 이 때 사용한 환경 인자는 표 1에 정리되어 있다. 통신 기법으로서는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)을 [8][9] 적용하여, QPSK 변조기에서 나온 신호를 소스 신호로 삼아 역임펄스 응답과 콘볼루션하여 송신하고 채널을 통과하여 수신된 신호를 복조하도록 하였다. QPSK 통신 기법 사용을 위한 주요 인자들은 표 2에 정리되어 있으며, 인자 값들은 한국 해양연구원 해양시스템안전연구소의 실험실 수중 통신 실험 시 사용하는 값을 인용하여 사용하였다. 채널 예측 기법을 검증하기 위해서 바닥이 진흙이고 도파관 불변인자 β 의 값은 1인 Pekeris 도파관 환경을 가정하였다. 도파관 불변성은 음파의 세기의 정보이므로, 도파관의 한 지점의 임펄스 응답을 알면 식 (12)을 이용하여 다른 지점에서의 주파수 응답 (Frequency response) 크기 값을 예측하였다. 채널 예측 기법에 대한 시뮬레이션은 주변 소음 없이 수중 채널에는 다중 전달 경로 현상만 존재한다고 가정하고 수행하였다.

3.2. 시뮬레이션 결과

3.2.1. 선 처리 기법

선 처리 통신 기법의 성능 평가를 위해 송신기에 송신한 원본 데이터와 수신기에서 수신하여 복원된 데이터를 비교하여 에러를 측정하여 구한 비트오율 (Bit Error Rate; BER)을 이용하였다. 비트오율이 낮을수록 송신한 원본 데이터에 대한 수신기의 복원 성능이 좋다고 할 수 있다.

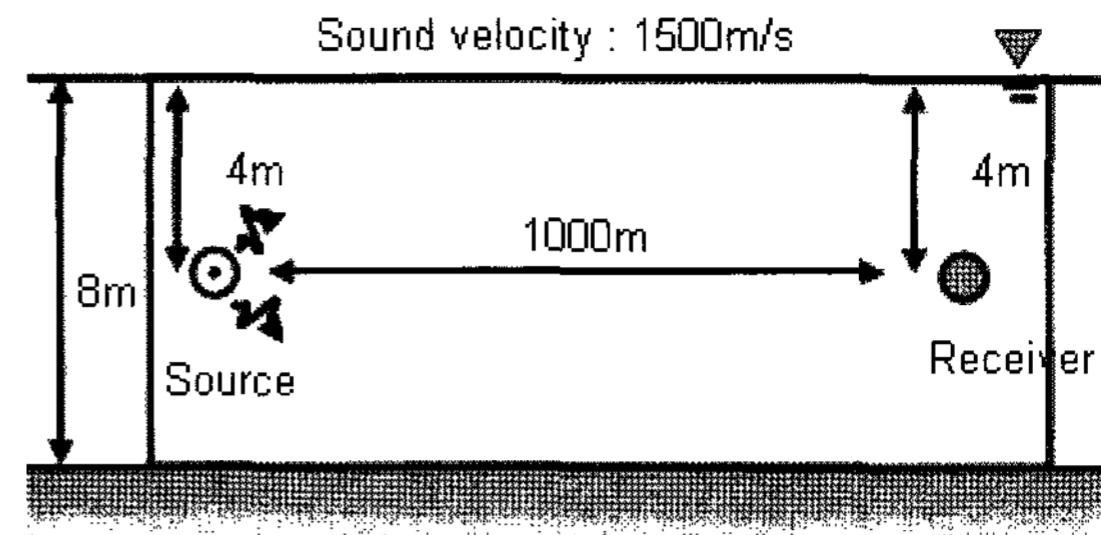


그림 2. 음선 이론 기반 음파 전달 모델링 프로그램으로 가정한 수중 채널 환경

Fig. 2. Underwater channel environment assumed in ray theory based sound propagation modeling program.

표 1. 음선 이론 기반 음파 전달 모델링에 사용한 환경 인자

Table 1. Simulation details in ray based sound propagation modeling program.

	바닥 음속 (m/s)	밀도 (g/cm ³)	감쇠계수 (dB/λ)
진흙바닥	1490	1.4	0.2
모래바닥	1600	1.7	0.15

표 2. Pre-coding 시뮬레이션에 사용한 QPSK 설정 값

Table 2. QPSK setting in the pre-coding simulation.

반송파 주파수	25 KHz
데이터 전송율	10,000 bit/s
Roll off factor	0.5
샘플링 주파수	100 KHz

바닥 매질이 진흙인 경우와 모래인 경우 각각의 환경에서 선 처리 기법 시뮬레이션에 대한 BER 결과가 그림 3에 제시되어 있다. 바닥 매질이 진흙인 경우 SNR가 약 20 dB일 때 BER이 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 을 보였고, 바닥 매질이 모래일 경우 SNR가 30 dB일 때 BER이 10^{-3} 정도의 성능을 보였다. 그림 3으로부터 다중 전달 경로 현상이 약한 환경일 경우 다중 전달 경로 현상이 심한 환경에 비해 상대적으로 낮은 SNR로 같은 수준의 비트 오류로 통신을 할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과의 원인은 크게 2가지로 생각할 수 있다. 첫 번째 원인은 동일 SNR이라고 하더라도 잡음의 절대적인 크기가 다르기 때문이다. 모래 바닥에서의 임펄스 응답의 평균 파워가 진흙 바닥에서의 임펄스 응답의 평균 파워보다 크기 때문에 동일 SNR일지라도 진흙일 때 잡음의 절대적 크기가 모래일 때 잡음의 절대적 크기보다 더 커지게 된다. 두 번째 원인은 바닥이 모래일 경우 잡음에 의한 임펄스 응답의 훼손 정도가 바닥 매질이 진흙인 경우에 비해 상대적으로 더 심했기 때문이다. 바닥 매질이 모래인 경우의 임펄스 응답이 바닥 매질이 진흙인 경우에 비해 상대적으로 더 길기 때문에 임펄스 응답의 정보의 훼손이 더 심하였다.

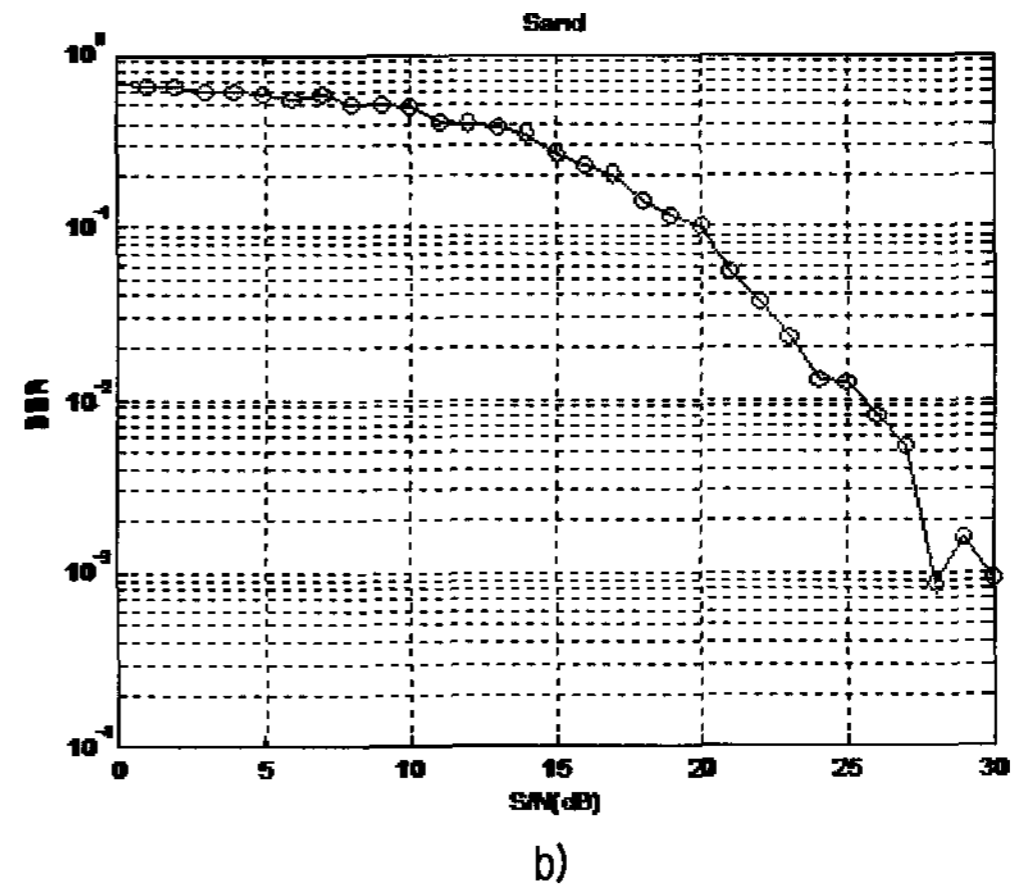
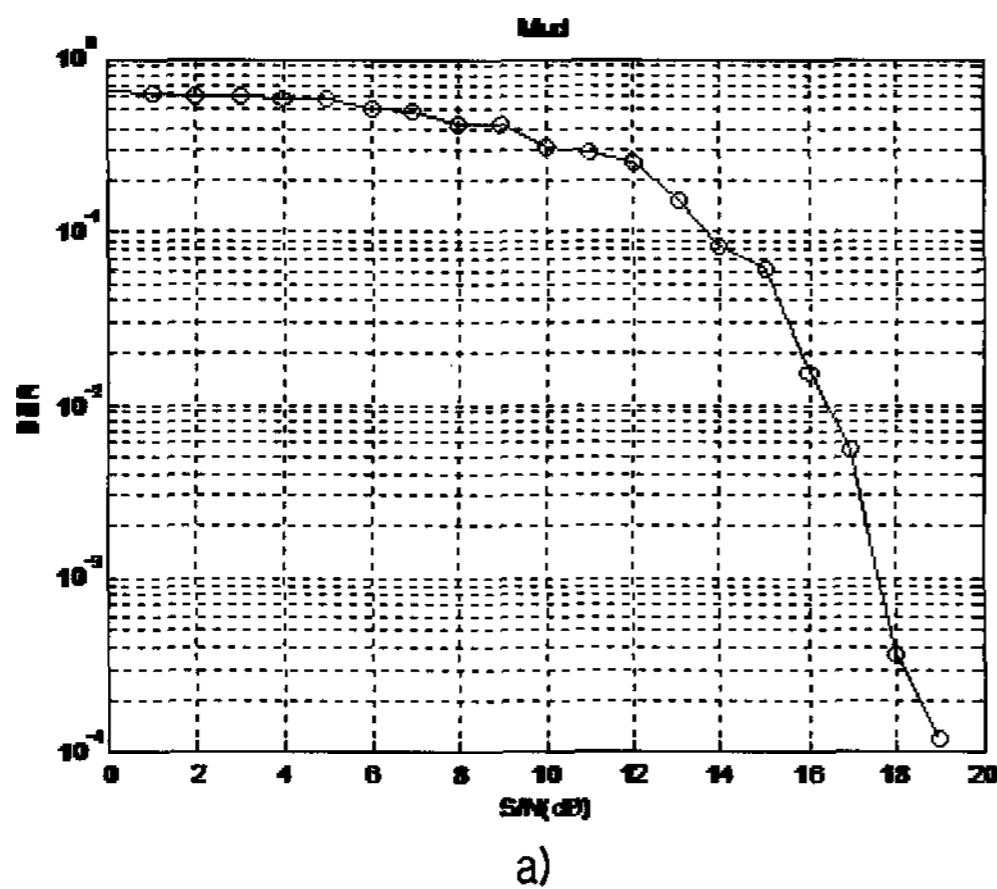


그림 3. 시뮬레이션 결과 (BER) a) 진흙 b) 모래
Fig. 3. Results of simulation (BER) a) Mud b) Sand.

3.2.2. 채널 예측 기법

채널 예측 기법에 대한 시뮬레이션은 그림 2에 제시되어 있는 송신기로부터 1000 m 떨어진 곳에 수신기가 존재한다고 가정할 때 수신기 위치에서의 임펄스 응답을 구하고 당해 임펄스 응답을 이용하여 다른 지점에서의 임펄스 응답을 예측하였다. 제안된 채널 예측 기법을 송신기로부터 거리가 750 m~1250 m인 구간에 대해서 10 m 간격으로 적용하여 각 지점의 임펄스 응답을 예측하였다. 그림 4는 1010 m 지점의 임펄스 응답을 예측한 결과를 보여 주고 있다.

그림 5는 각 지점에서 3.2.1절에서와 같이 500개 심벌을 선 처리 기법을 적용하여 송신하였을 때 수신기에 발생하는 심벌 에러수를 보여주고 있다. 제안된 기법 성능을 확인하기 위하여 임펄스 응답의 보정 없는 경우, 도파관 불변성을 사용하여 주파수 응답 크기만을 보정한 경우 및 도파관 불변성을 사용하여 주파수 응답 크기를 보정하고 해당 위치의 주파수 응답의 위상을 사용하여 위상을 보정한 경우에 대하여 동일한 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 5를 살펴보면 900 m~1100 m까지는 3가지 방법 모두 전송 에러가 없으나 그 이상의 거리를 벗어나면 전송 심벌에 에러가 나타나기 시작하고 있음을 확인할 수 있으며, 보정이 전혀 하지 않은 경우 (A)에 비해 주파수 응답 크기를 보정한 경우 (B)가 좀 더 에러 수가 적으며, 크기와 위상 모두를 보정한 경우 (C)에는 전 구간에서 에러 없이 데이터가 전송되었음을 확인할 수 있다. 그림 5는 채널 예측 기법을 적용할 때 주파수 응답의 크기 보정 뿐만 아니라 주파수 위상 보정 또한 고려해야 한다는 사실을 보여주고 있다.

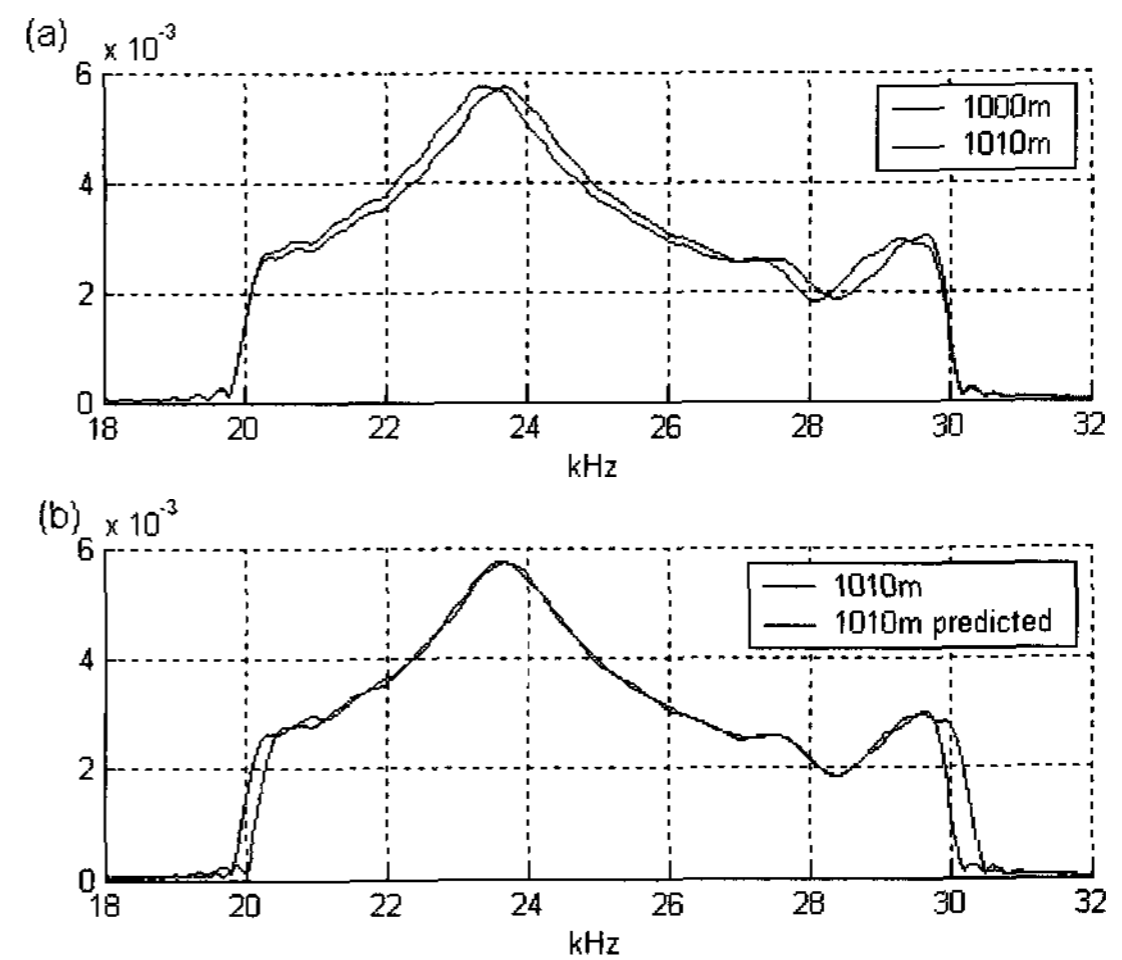


그림 4. 주파수 응답 예측
(a) 1000 m 와 1010 m의 주파수 응답
(b) 1000 m의 주파수 응답으로 1010 m의 주파수 응답을 예측한 결과

Fig. 4. Frequency response prediction.
(a) Frequency response at 1000m, 1010m.
(b) Prediction result of frequency response at 1010m by using frequency response at 1000m.

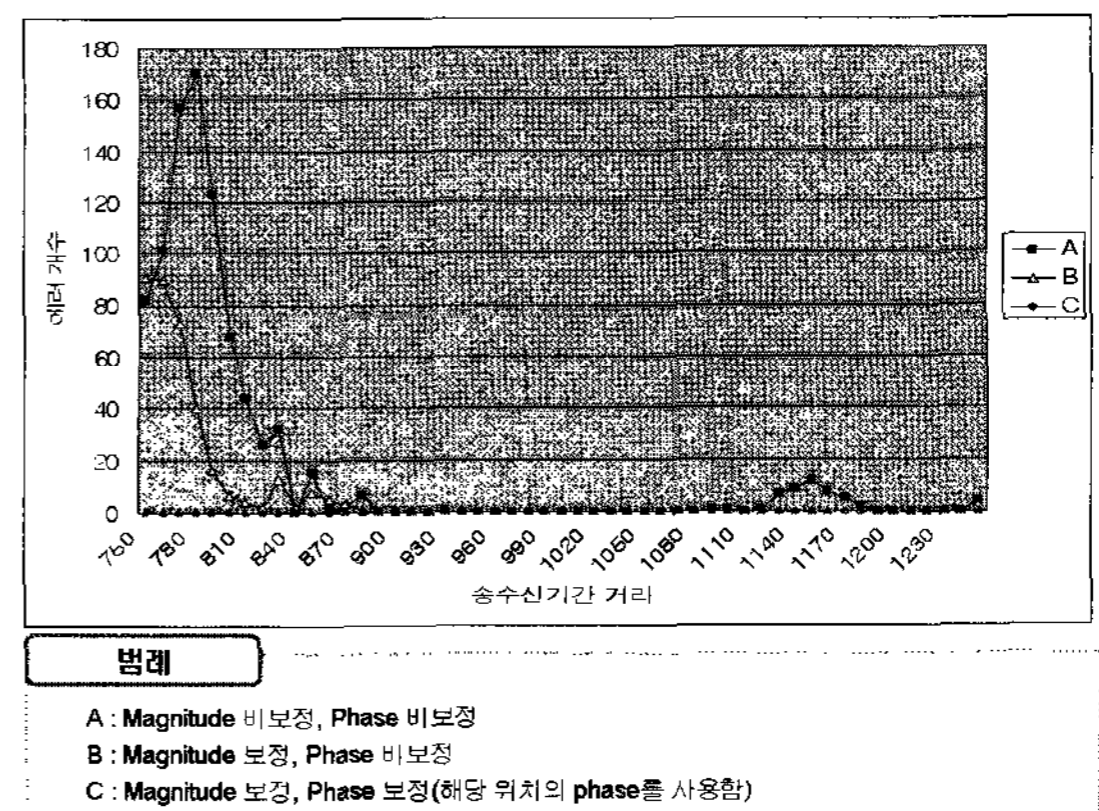


그림 5. 채널 예측 기법 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation result of channel prediction.

IV. 실험

3.1. 실험 조건

시뮬레이션을 통하여 확인한 선 처리 기법이 실제 해양 환경에서의 성능 검증을 위하여 수조에서 실험을 수행하였다. 수조 실험은 제원이 1 m인 정도인 서울대학교 조선해양공학과 소형 음향 수조와 100 m × 30 m인 한국 해양연구원 산하 해양 시스템 안전 연구소의 해양 공학 수조에서 각각 수행되었다. 소형 음향 수조 실험은 실제 환경에서 성능 예측을 위해서 수행하였으며, 해양 공학 수조 실험은 고정된 위치에서 제안된 기법의 소형 수조에 비해 장거리 통신 성능을 확인하기 위하여 수행하였다.

소형 수조 실험에서 사용된 환경은 그림 6에 제시되어 있다. Pilot 신호는 각각 Gaussian pulse 와 PN 수열이 사용되었다 [10]. Gaussian pulse는 Pilot 신호는 Gaussian

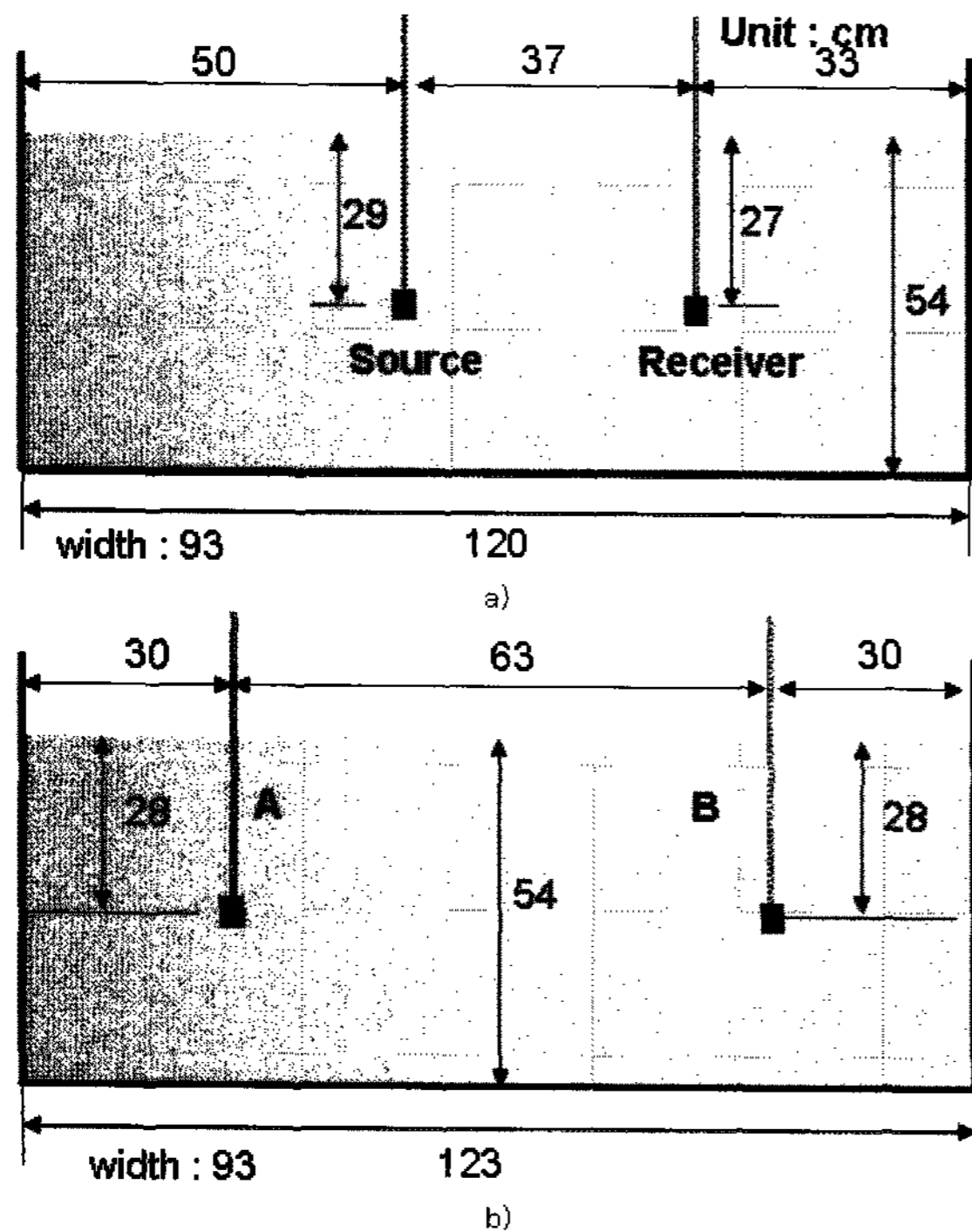


그림 6. 소형 음향 수조 실험 환경
a) Gaussian pulse b) PN 수열
Fig. 6. The small water tank environment.
a) Gaussian pulse b) PN sequence.

표 3. 수조 실험에서 사용한 QPSK 설정 값
Table 3. QPSK setting in the water tank experiment.

반송파 주파수	100 KHz
데이터 전송율	80,000 bit/s
Roll off factor	0.5
샘플링 주파수	1 MHz

pulse를 사용하였다. Gaussian pulse란 시간 영역에서의 파형이 가우스 분포 함수 형태를 지니는 pulse를 말하며 식 (24)과 같이 표현된다.

$$f(t) = Ae^{-(t/\sigma)^2}. \quad (14)$$

코드 분할 다중 접속 방식 (Code Division Multiple Access; CDMA)에서 심벌의 복조 및 변조에 사용되는 PN 수열 자기 상관 특성이 좋으며, 스펙트럼 형태가 백색 소음과 유사하다는 특징을 가지고 있다. PN 수열을 pilot 신호로 이용할 경우 Gaussian pulse와는 달리 PN 수열 자체의 자기 상관 특성 결과를 바탕으로 심벌 단위로 채널의 임펄스 응답을 알 수 있으므로 채널 파악의 신뢰성이 상대적으로 높다 [5][12]. QPSK 통신 인자는 소형 음향 수조에 적합하도록 선정하였으며, 표 3에 정리되어 있다.

해양 공학 수조에서 실험은 소형 음향 수조 실험에 비해 긴 송신기와 수신기의 거리를 설정하고 실제 해역에서의 장거리 통신에서의 제안된 기법의 성능을 예측하고자 하였다. 실험 결과의 신뢰도를 획득하기 위하여 한국 해양연구원 해양시스템안전연구소의 실험해역 통신 실험 시 사용했던 실험 장비를 사용하였으며 [11], QPSK 통신의 주요 인자 값 역시 표 2에 정리되어 있는 값을 사용하였다. 다만 pilot 신호로 127 심벌을 가지고 있는 PN 수열을 사용하였고 샘플링 주파수를 250 kHz로 하였다. 그림 7은 해양 공학 수조 환경 및 실험 장비를 보여주고 있다.

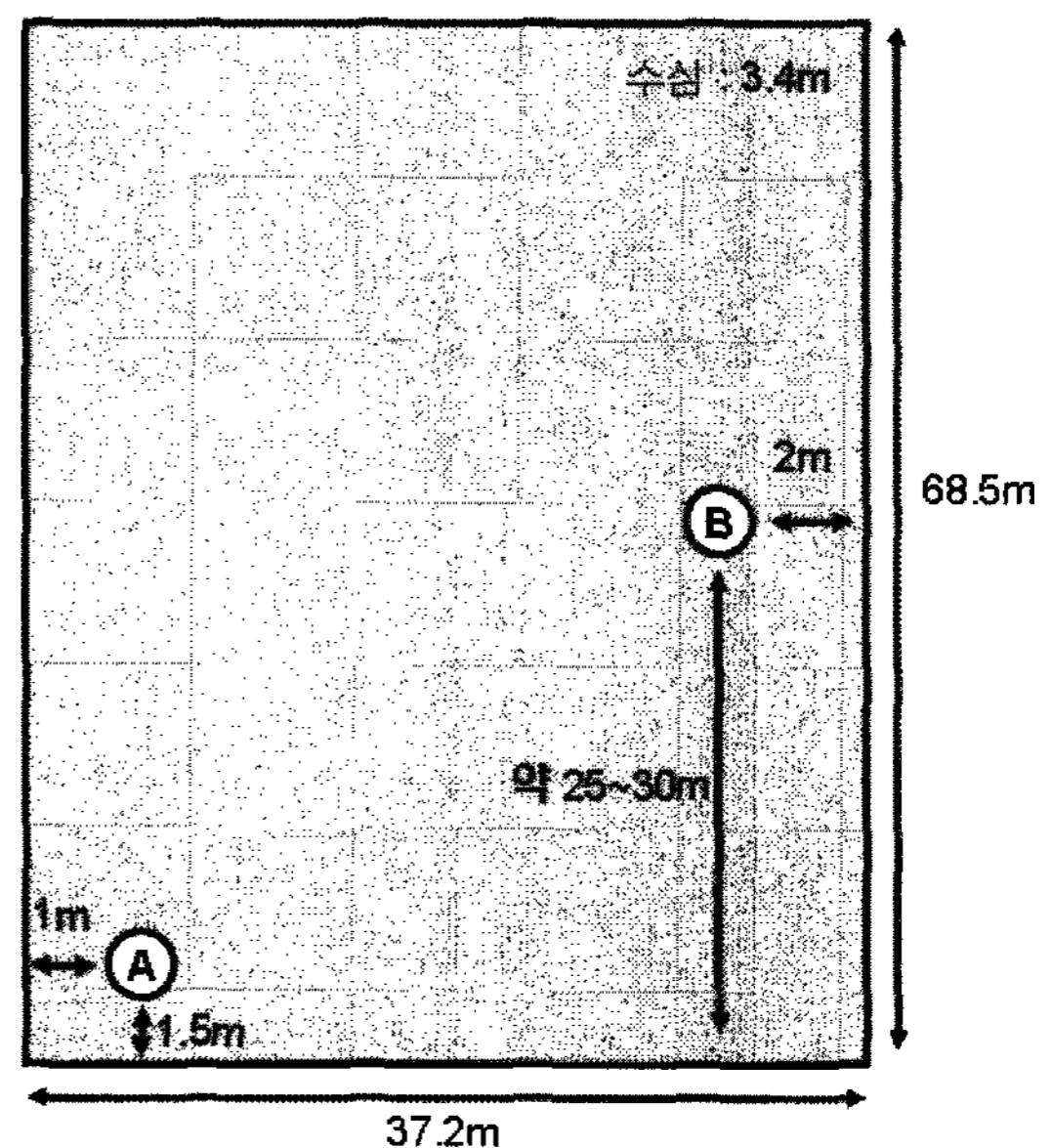


그림 7. 해양 수조 실험 환경
Fig. 7. Ocean water tank experiment environment.

3.2. 소형 수조 실험

소형 수조 실험에서는 소형 음향 수조 실험 환경에서 소음에 강인한 100 KHz가 중심 주파수가 되도록 하고, 주파수 대역이 65~135 KHz 되도록 하였다. PN 수열은 심벌의 길이를 31심벌, 127심벌 2가지로 두어 PN 신호의 길이에 따른 성능의 변화를 관측하였다. 또한 시뮬레이션과 달리 실험에서는 역임펄스 응답을 구하기 위하여 다중 전달 경로 현상 반영 수준을 결정하는 pilot 신호를 송신한 순간으로부터 pilot 신호의 응답 측정을 종료하는 시각 사이의 시간, pilot 응답 시간 (Pilot Response Duration; PRD)을 도입하였다. 그림 8은 pilot 응답 시간의 예이다. PRD가 길수록 다중 전달 경로 현상을 더 많이 반영할 수 있어서 선 처리 디지털 통신 기법의 성능이 좋아지나 송수신기 사이에 반응하는 시간이 길어지고 역임펄스 응답을 구하는데 많은 시간이 소요된다. 반대로 PRD가 짧아지면 반응하는 시간은 짧아지고 역임펄스 응답을 구하는데 소요되는 계산시간이 짧아지나 다중 전달 경로 현상을 충분히 반영하지 못하여 선 처리 디지털 통신 기법의 성능이 저하된다.

그림 9는 Gaussian pulse와 PN 수열을 각각 pilot 신호

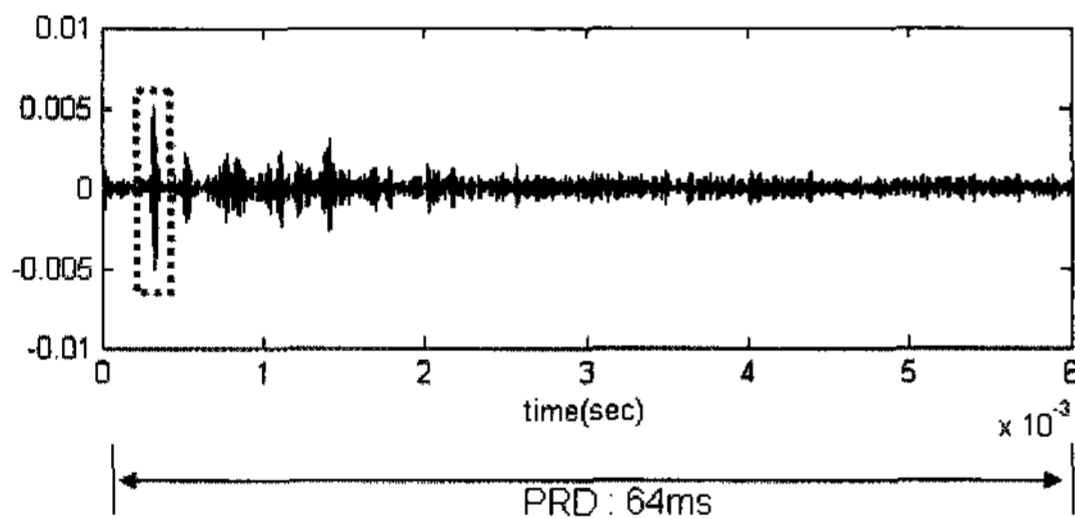


그림 8. pilot 응답 시간의 예 (64 ms)
Fig. 8. Example of pilot response time (64 ms).

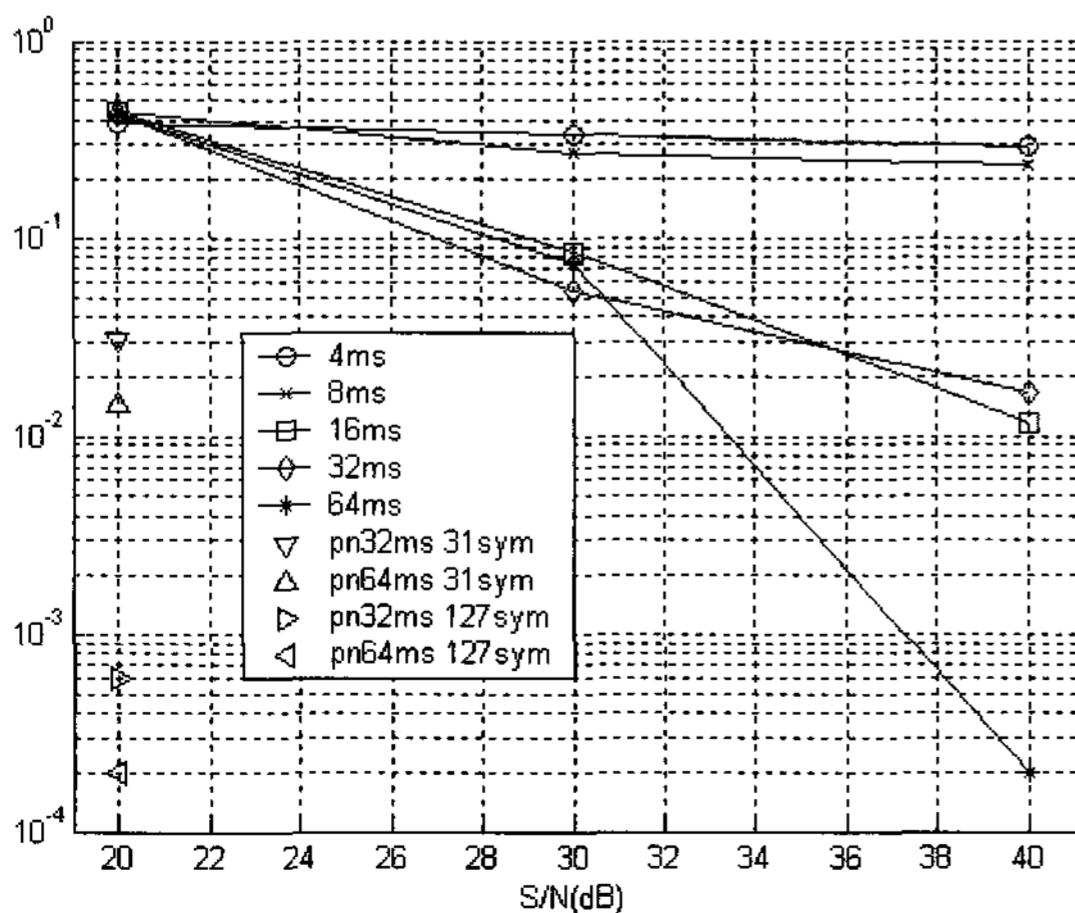


그림 9. S/N과 PRD에 따른 BER
Fig. 9. BER according to S/N and PRD.

를 사용한 경우에 대한 다양한 SNR와 PRD에 따른 BER을 보여 주고 있다. 그림 9에서 선이 있는 결과가 Gaussian pulse 을 사용한 결과이며, 선 없이 삼각형만으로 표현된 결과 PN 수열을 사용한 경우 결과이다. 그림 9로부터 양 쪽 경우 모두 PRD가 작아서 다중 전달 경로 현상을 충분히 반영하지 못하면 SNR가 높다고 하더라도 데이터의 에러 율은 높은 상태를 유지되지만 PRD가 충분히 길어서 다중 전달 경로 현상이 충분히 반영되면 SNR가 높아짐에 따라 에러 율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 PN 수열을 pilot 신호로 쓰는 경우가 Gaussian pulse를 pilot 신호로 쓰는 경우보다 동일한 SNR에서 더 낮은 BER을 나타내고 있다는 것을 확인할 수 있다.

3.3. 해양 공학 수조 실험

해양 공학 수조 실험은 그림 7의 센서 A 에서 센서 B로 선 처리를 사용하여 데이터를 전송하는 실험과 B에서 A로 선 처리를 사용하여 데이터를 전송하는 실험으로 수행하였다. 그림 10은 각각의 데이터 전송 결과를 보여 주고 있다. 그림 10으로부터 두 개의 실험 모두 오류 없이 데이터를 전송한 사실을 확인할 수 있다. 선 처리의 성능을 보다 명확히 나타내기 위해 비트 오류율 구하는 것이 가장 바람직하나 실험을 비트 오류율 구할 수 있을 정도의 횟수로 수행할 수 없었다.

V. 결론

본 논문에서는 수중 환경에서 등화기의 사용 없이 디지털 통신이 가능한 선 처리 기법과 수중 운동체간의 통신에 선 처리 기법을 사용하기 위하여 송수신기의 위치 이동에 따른 채널 예측 기법을 제안하였고 음선 이론 기반의 채널 모델링을 통한 시뮬레이션을 통하여 선 처리 기법과 채널 예측 기법의 성능을 검증하였다. 또한 소형 음향 수조 및 해양 공학 수조 환경에서 선 처리 기법에 대한 실험을 수행하고 실제 환경에서도 제안된 기법이 등화기 없는 데이터 복원 성공을 통하여 적절한 성능을 보여주고 있음을 검증하였다. 등화기가 없어도 데이터를 복원할 수 있음을 확인하였으며, 선 처리 기법으로 인한 성능을 평가하였다. 선 처리 디지털 통신 기법은 SNR가 높을수록, pilot 응답 시간이 길수록 성능이 향상되었다. 그러나 충분한 pilot 응답 시간이 주어지지 않으면 SNR이 높다고 하더라도 높은 수준의 에러 율을 나타내었다. Pilot 신호

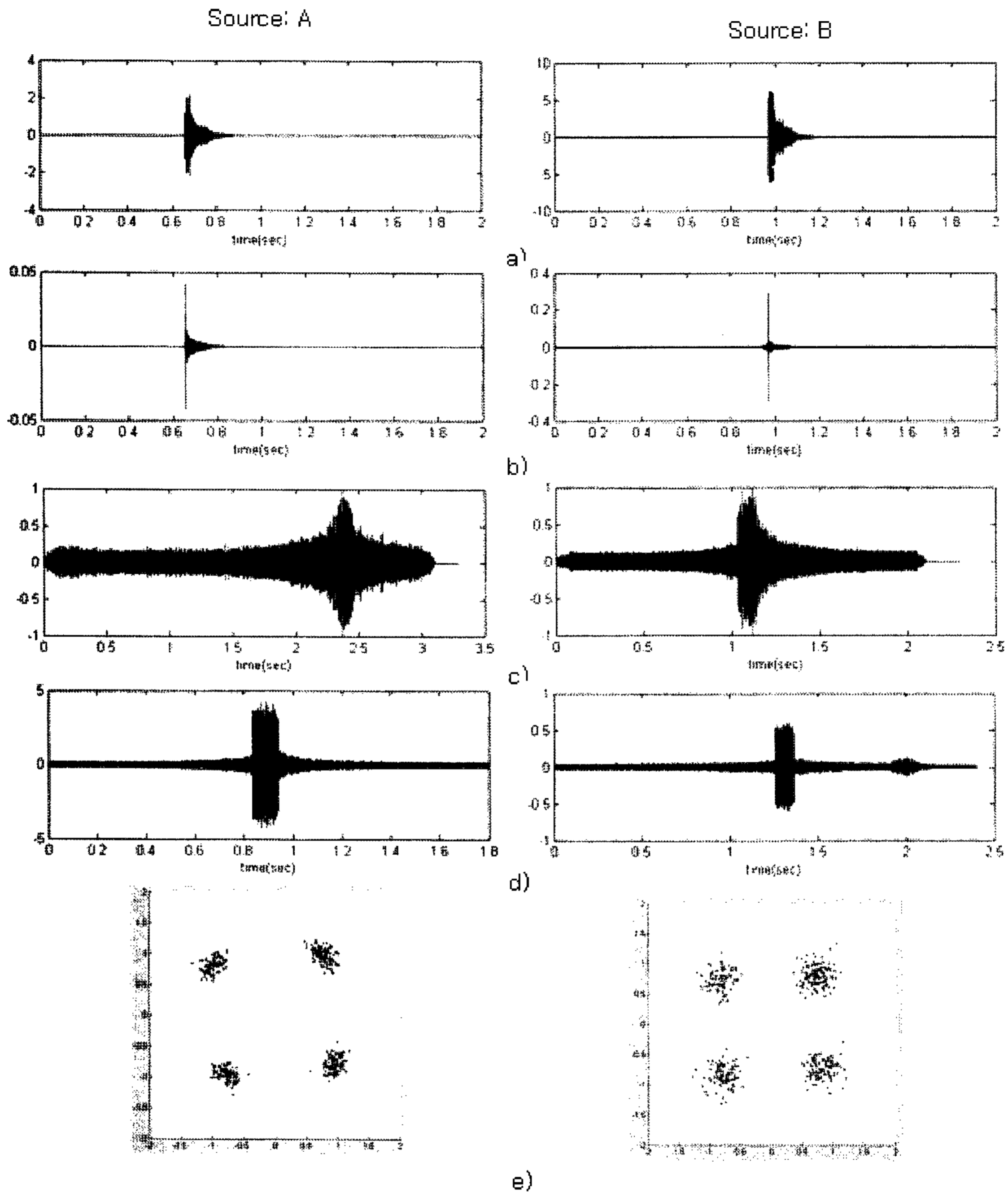


그림 10. 해양 공학 수조 실험결과

(a) Pilot 신호 전달 결과 (b) 임펄스 응답 (c) Pre-coding한 데이터 (d) 전송 데이터 (e) Constellation

Fig. 10. Experimental results at ocean engineering tank.

(a) Pilot signal transmission result (b) Impulse response (c) Pre-coded data (d) Transmitted data (e) Constellation.

로 Gaussian pulse와 변조된 PN 수열 사용한 수조 실험을 통하여 동일 SNR일 경우 PN 수열이 Gaussian pulse에 비해 낮은 에러 오율을 보여주고 있음을 확인하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 주파수 응답 크기에 대한 채널 예측 기법이 선 처리 디지털 통신 기법의 성능을 향상시키는 것은 확인하였으며, 간단한 주파수 위상 보정을 통하여 주파수 위상 보정이 병행될 경우 보다 좋은

결과를 기대할 수 있다는 사실을 확인하였다.

향후 연구 과제로서 실제 해양 환경에서의 선 처리 기법의 유용성을 검증하기 위한 실험이 수행되어야 할 필요가 있을 것이다. 또한 채널 예측 기법에 대한 실제 환경에서 실험을 통한 성능 검증 작업이 필요할 것이며, 채널 예측 기법에 사용될 정밀한 위상 예측 기법 개발이 필요할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국해양연구원의 위탁과제인 “수중무선통신망 시스템 개발” 과제 중 “수중 음향 채널 추정기법 개발”의 연구결과의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Geoffrey F. Edelman, T. Akal, William S. Hodgkiss, Seongil Kim, William A. Kuperman, and Hee Chun Song, "An Initial Demonstration of Underwater Acoustic Communication Using Time Reversal," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 27(3), 602-609, 2002.
2. 윤종락, 박문갑, 노용주, "수동 페이지 컨주게이션 수중음향통신 기법의 비트오류 영향 인자", *한국음향학회지* 24(8), 454-461, 2005.
3. Oe-Hyung Lee, Yoon-jun Son and Ki-Man Kim, "Underwater Digital Communication Using Acoustic Channel Estimation," 2453-2456 4, *OCEANS02*, Oct. 2002.
4. 이외형, 손윤준, 김기만, "하이드로폰 송신 어레이를 이용한 수중 음향 통신 시스템의 성능 향상", *한국음향학회지* 21(7), 606-613, 2002.
5. 김승근, 김시문, 임용곤, "PN 신호열을 이용한 수중음향 천해역 채널 특성 분석", 제 22회 수중음향학 학술발표회 논문집, 2007.
6. 박철수, 조용진, 안종우, 성우제, "천해 음파전달 모의에 적합한 음선기반 광대역 신호 모델링 기법에 관한 연구", *한국음향학회지* 25(6), 298-304, 2006.
7. G. L. D'Spain and W. A. Kuperman, "Application of wave-guide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth," *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(5), 2454-2468, 1999.
8. D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 25(1), 4-27, 2000.
9. Simon Haykin, *Communication Systems*, (4ed, John Wiley & Sons, Inc., 2001).
10. 김태우, 김경섭, 성우제, 변성훈, 임용곤, "다중 전달 경로 채널에서의 수중 통신을 위한 pre-coding 기법", *한국음향학회 학술발표대회 논문집* 25(2(s)), 43-48, 2006.
11. 김태우, 성우제, 변성훈, "수조에서의 pre-coding 기법 실험", *한국음향학회 학술발표대회 논문집* 26(1(s)), 61-64, 2007.
12. John G. Proakis, *Contemporary Communication Systems Using MATLAB and Simulink*, (Thomson Brooks/Cole, 2004).

저자 약력

• 김 태 우 (Taewoo Kim)

2006년: 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
 2008년: 서울대학교 조선해양공학과 (석사)
 2008년~현재: 현대 중공업
 ※주관심 분야: 수중통신, 신호처리, 지역전처리

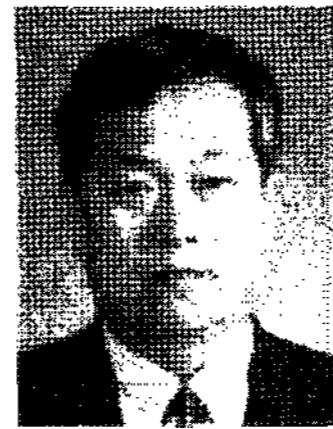
• 황 아 름 (Arom Hwang)

2001년: 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
 2007년: 서울대학교 조선해양공학과 (박사)
 2008년~현재: 서울대학교 BK21 해양 기술 인력 양성 사업단
 ※주관심 분야: AUV, 수중 통신, 배열 신호처리, 소나 시스템

• 성 우 제 (Woojae Seong)

1982년: 서울대학교 조선공학과 (학사)
 1990년: M.I.T. 해양공학과 (박사)
 현재: 서울대학교 조선해양공학과 교수
 ※주관심 분야: 음전달 모델링, 지음향역산, 정합장처리, AUV

• 임 용 곤 (Young-Kon Lim)



1979년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
 1984년 2월: 충남대학교 전력전자공학과 (공학석사)
 1994년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
 1980년 7월 ~ 현재: 한국해양연구원 책임연구원
 ※주관심분야: 수중음향 통신 시스템 및 네트워크, 네트워크 프로토콜