한국음향학회지 제21권 제7호 pp. 606~613 (2002)

하이드로폰 송신 어레이를 이용한 수중 음향 통신 시스템의 성능 향상

Performance Enhancement of Underwater Acoustic Communication System Using Hydrophone Transmit Array

이 외 형*, 손 윤 준*, 김 기 만*
(Oe-Hyung Lee*, Yoon-Jun Son*, Ki-Man Kim*)

*한국해양대학교 전파공학과

(접수일자: 2002년 2월 5일; 수정일자: 2002년 9월 10일; 채택일자: 2002년 9월 23일)

본 논문에서는 수중에서 송신 빔 형성기를 이용한 고속 데이터 전송 기법을 연구하였다. 또한 범용 디지털 신호처리 프로세서와 다수의 디지탈-아날로그 변환기를 이용한 시험용 송신단을 설계 및 구현하였으며, 구현된 시스템을 이용하여 수조에서 실험을 수행하여 그 성능을 분석하였다. 이때 실험 과정을 단순화하기 위하여 채널 코딩 및 등화기 (equalizer) 등과 같은 과정은 생략하였고, 가장 간단한 디지털 통신 변조 기법인 OOK (On-Off Keying) 기법을 사용하였다. 실험 결과 5개의 하이드로폰 송신 어레이를 사용한 경우에 1개만 사용했을 때 보다 오차율 10^{-2}을 기준으로 전송 속도가 약 3배 향상되었으며, 실험에 사용된 수조에서 음성 신호 전송을 위해 400 bps 정도까지 가능함을 확인하였다.

핵심용어: 수중 통신, 송신 어레이, 빔 형성기, DSP 프로세서
투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper we applied a transmit beamforming technique to the underwater acoustic communication system for high rate data transmission. A prototype transmit system was designed and implemented with the general purpose DSP processor and multiple digital-to-analog converters. The performances of the implemented system were evaluated by the experiment in water tank. In order to simplify the procedure the channel coding and equalizer were omitted. And the simplest OOK (On-Off Keying) technique in digital communication methods was applied. The experimental result shows that the transmission data rate is higher about 3 times in the case of 5 hydrophone transmitting array than 1 hydrophone transmitter at bit error rate 10^{-2}. We verified that the maximum data rate was 400 bps for speech signal transmission in water tank.

Keywords: *Underwater communication, Transmit array, Beamformer, DSP processor*
ASK subject classification: *Underwater acoustics (5.6)*

I. 서 론

수중 통신은 무인 잠수정을 제어하거나 수집된 데이터를 전송하기 위해 그 연구가 필수적이며, 그 동안 고속·장기리 데이터 전송을 위해 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 육상과는 달리 수중에서는 매질 특성상 전파 대신 음파를 사용하여야 하고 음파는 고주파 손실이 커서 대역폭이 좁고 배경 잡음의 영향을 많이 받는다. 특히 천해 (shallow water) 환경에서는 신호의 다중 경로 전달로 인한 시간축 퍼짐 (time spreading) 현상과 낮은 신호 대 잡음비를 갖게 되어 이를 극복하기 위한 트랜스듀서 어레이를 갖는 수신기나 적응 등화기가 연구되었다.

기존에 연구된 수중 통신 시스템을 구체적으로 살펴보

책임저자: 김기만 (kimkim@hanara.kmaritime.ac.kr)
606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지
한국해양대학교 전파공학과
(전화: 051-410-4423; 팩스: 051-404-3986)

면, Baggeroer 등은 디지탈 음향 전송 시스템을 구현하여 1,200 bit/s로 데이터 전송을 성공하였다[1]. 또한 미국의 WHOI (Woods Hole Ocenographic Institution)는 미 해군 연구소의 지원으로 5.4 nautical miles 거리에서 MFSK 변조 기법을 사용하여 200 bit/s로 데이터 전송 실험을 수행하였다[2]. 이 시스템에서는 TMS320C44 범용 디지털 신호처리 프로세서를 사용하였다. 데이터 전송율을 높이기 위해 coherent 수신기가 최근 활발히 연구되고 있으며, QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조를 이용하여 60 m 거리에서 500 kbit/s 전송율을 실현한 시스템도 보고되었다[3]. 또한 LeBlanc 등은 수중 채널의 다중 경로 현상을 보상하기 위한 등화기 및 신호 대 잡음비 향상을 위하여 어레이 수신기를 이용한 시공간 처리 기법을 도입하여 고속 데이터 전송을 추구하였다[4]. Hung 등은 수신단에 적응 빔 형성 기법을 적용한 시스템을 구현하였다[5]. 국내에서는 간단한 수중 채널 모델을 이용하여 FSK (Frequency Shift Keying) 방식의 성능을 분석하고[6], DPSK (Differential Phase Shift Keying), BPSK (Binary Phase Shift Keying)와 같은 변조 기법에 따른 성능을 고찰하였다[7]. 그리고 수중에서 수집된 영상을 전송하기 위한 시스템을 개발한 것이 보고되었으며[8], 채널 추정을 이용한 방법을 제안하기도 하였다[9].

본 논문에서는 기존과는 다른 접근 방법으로 수중 통신 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 송신 빔 형성 기법을 적용하였다. 즉, 수신단뿐만 아니라 송신단도 트랜스듀서 어레이로 구성하여 원하는 수신기 방향으로 지향성을 줄 수 있으며, 이는 전송하고자 하는 데이터를 시간 영역에서 적절한 시간 지연을 하거나 주파수 영역에서 복소 가중치를 곱함으로써 실현된다. 이러한 송신 빔 형성은 이미 군용 소나 시스템에 적용되어 표적 검출 성능 향상에 이용되고 있으나 수중 통신 시스템에는 아직 적용되지 않고 있다. 이에 본 논문에서는 수중에서 고속 데이터 전송을 위해 하이드로폰 어레이를 갖는 송신단을 설계하고, 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다. 아울러 연구된 내용을 기반으로 하여 간략화된 시험용 수중 통신 시스템을 범용 디지털 신호처리 프로세서를 이용하여 구현하고, 수조에서 실험을 수행하여 그 결과를 제시하였다.

II. 수중 통신을 위한 송신 빔 형성 기법

본 논문에서는 수중 통신 시스템의 성능 향상을 위해서 빔 형성 기법, 특히 기존의 수신 빔 형성이 아닌 송신 빔 형성 기법에 대한 연구하였다. 그 동안 빔 형성 기법은 주로 어레이의 수신단에 사용되었다. 이것은 특정 방향으로의 신호는 강조하면서, 반면에 다른 방향의 간섭을 줄이는 것이다. i번째 센서에서 특정 방향으로 수신되는 협대역 신호는 다음과 같이 모델링된다.

$$x_i(n) = \exp[j(2\pi fn/f_s + k\, \boldsymbol{r}_i \cdot \boldsymbol{u})], \quad i = 1, \ldots, M \tag{1}$$

여기서 f_s는 샘플링 주파수를, k는 파수를, $\boldsymbol{r}_i$는 방향 벡터 그리고 $\boldsymbol{u}$는 단위 방향 벡터를 각각 나타낸다. 이러한 신호들의 합은 다음과 같다.

$$y(n) = \sum_{i=1}^{M} x_i(n) = e^{j2\pi fn/f_s} \sum_{i=1}^{M} e^{jk\boldsymbol{r}_i \cdot \boldsymbol{u}} \tag{2}$$

본 논문에서는 편의를 위해서 수신단은 하나의 센서로 이루어져 있고, 송신단과 수신단 사이의 방향은 알고 있다고 가정한다. 만약 단일 송신 소자로부터 송신된 신호를 x(n)이라 하면, 수신단에서 수신되는 신호 $y(n)$은 다음과 같다.

$$y(n) = \sum_{i=1}^{L} \alpha_i x(n - \tau_i) + v(n) \tag{3}$$

여기서 L은 고려된 다중경로의 수이다. α_i와 τ_i는 i번째 다중경로의 감쇠 상수와 경로 지연을 나타낸다. 그리고 $v(n)$은 첨가 백색 잡음을 나타낸다.

본 논문에서는 수중 통신 시스템의 성능을 향상시키기 위해서 송신단에 어레이 센서를 사용한다. 송신단에 M개의 어레이 센서가 사용되면, 수신단에서 수신되는 신호 $y(n)$은 다음과 같다:

$$y(n) = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{L} \alpha_{ij} x(n - \tau_{ij}) + v(n) \tag{4}$$

α_{ij}와 τ_{ij}는 각각 j번째 송신 센서와 수신기 사이에 i번째 다중경로의 감쇠 상수와 경로 지연을 나타낸다. 여기서 송신 신호 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}(n) &= [x_1(n) \;\; x_2(n) \;\cdots\; x_M(n)]^T \\ &= s(n) \cdot \boldsymbol{w} \end{aligned} \tag{5}$$

$s(n)$은 전송하고자 하는 메시지 신호이고, $\boldsymbol{w}$은 가중치 벡터이다. 여기서는 지향 벡터를 가중치 벡터로 사용하였다. 송신단에 선형 어레이를 사용할 경우, 그것에 따른 복소 (complex) 가중치 벡터는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{w} = [1 \;\; e^{-j2\pi d f \sin\theta / c} \;\cdots\; e^{-j2\pi d f (M-1)\sin\theta / c}]^T \tag{6}$$

위 식에서 c는 수중에서 음파의 전달 속도이다. 만약

L개의 다중경로가 존재하고 각 다중경로의 방향과 시간 지연을 안다면, 각 다중경로 방향 별로 송신 빔을 형성하여 성능을 더욱 향상시킬 수 있다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

연구된 시스템의 성능을 분석하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 송신단의 센서간 간격은 반파장으로 가정하였고, 센서는 모두 전방향성을 갖는다고 하였다. 메시지 신호는 시뮬레이션 편의상 BPSK로 변조되었으나 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 또는 OOK와 같은 다른 디지털 변조 기법 모두 적용 가능하다. 반송 주파수는 10 kHz로 하였다. 우선 송신단이 단일 센서일 때와 어레이 센서일 경우를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 분석하였다. 어레이 센서일 경우 그 수를 달리하여 즉, 2개, 4개, 8개로 나누어 각각에 대해서 시뮬레이션하였다. 그림 1은 송신단에 어레이 센서를 사용했을 경우 어레이 개수가 변화됨에 따른 빔 패턴의 변화를 보여 주고 있다. 여기서 어레이 개수가 많아짐에 따라 주 빔의 폭이 좁아지면서 부엽(sidelobe) 레벨이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 즉 수신기로 원하는 신호를 집중적으로 송신함으로써 수신 레벨을 증

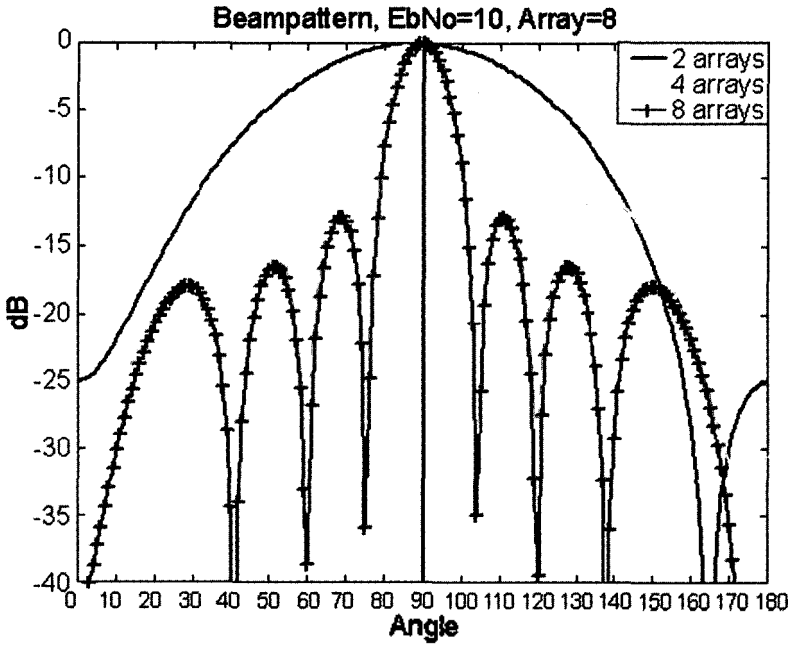
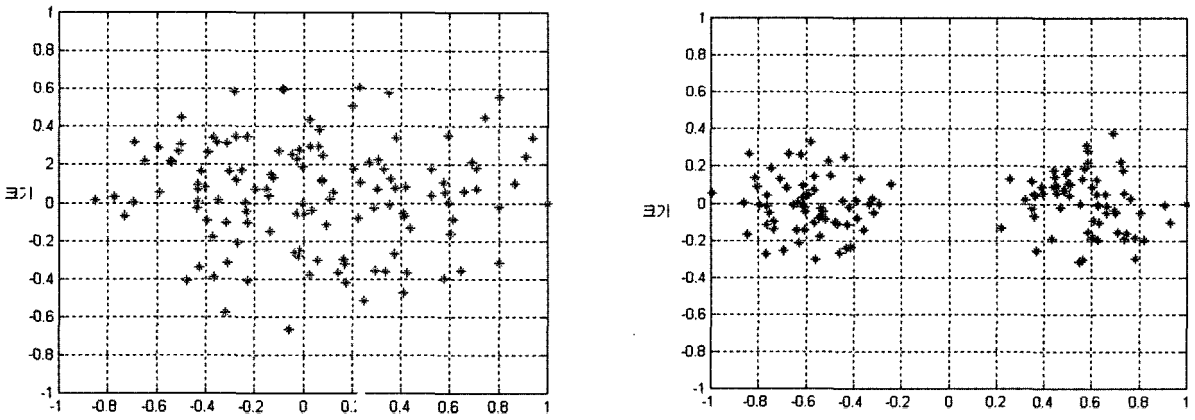


그림 1. 송신 센서 수에 따른 빔 패턴
Fig. 1. Beampattern according to the number of transmit sensor.



(a) 단일 송신 센서인 경우
(a) Single transmit sensor

(b) 송신 센서가 8개인 경우
(b) 8-transmit array

그림 2. 수신된 신호의 성상도
Fig. 2. Constellations of the received signal.

가시키며 부엽 영역 방향에서 입사하는 신호의 이득을 낮추게 된다. 그림 2에는 이진 (binary) 데이터의 분리도를 나타내는 성상도 (constellation)를 나타내었다. (a)는 단일 센서일 때, (b)는 어레이 센서일 경우이다. 그림에서 보이듯이 단일 센서인 경우 BPSK 신호가 서로 섞여 있어서 오차 발생 확률이 높으나 어레이 센서를 사용할 경우 1과 -1로 더욱 잘 분리됨을 알 수 있다. 이는 향상된 수신 신호대 잡음비를 나타내며 결국 데이터의 모호성을 낮추어 이진 데이터의 검출 (decision) 성능을 향상시킨다. 검출 성능의 향상은 같은 오차율을 기준으로 할 때 전송 속도를 높일 수 있게 하여 상대적으로 송신 센서가 한 개 일때 보다 고속 데이터 전송이 가능하게 된다.

IV. 하드웨어 구현 및 수조 실험 결과

4.1. 하드웨어 구현

다 채널 송신 어레이를 위한 하드웨어를 그림 3과 같이 설계하고 구현하였다. 구현된 하드웨어는 아날로그-디지탈 변환기, 범용 디지털 신호처리 프로세서, 디지탈-아날로그 변환기 어레이 등으로 구성된다. 먼저 외부에서 입력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위해 아날로그-디지탈 변환기는 MAXIM사의 MAX180을 사용하였다. MAX180은 입력된 아날로그 신호를 12비트 디지털 형태로 변환해주며, 최대 100 kHz 샘플링이 가능한 칩이다. MAX180을 통해 입력되어 디지털 신호처리 프로세서에서 처리된 신호를 전송하기 위한 송신 어레이 시스템은 8개의 디지탈-아날로그 변환기로 구성되어 있다. 사용된 디지탈-아날로그 변환기는 BURR-BROWN사의 DAC712이다. DAC712는 16비트의 병렬 입력을 가지고 있으며, 제어 신호에 따라 내부의 버퍼에 데이터를 저장하거나 입력된 디지털 데이터를 아날로그 신호로 변환하여 출력하게 된다. 정확한 송신 빔 형성을 위해서는 디지털 신호처리 프로세서로부터 출력된 다채널 데이터가 동시에 디지탈-아날로그 변환되어야만 한다. 하지만 디지털 신호처리 프로세서는 하나의 포트밖에 없기 때문에 출력 데이터는 순차적으로 각 채널 디지탈-아날로그 변환기에 전송되기 앞서 버퍼로 보낸다. 7채널의 데이터를 각 채널 버퍼에 저장하고 있다가 마지막 8번째 데이터를 전송 받은 후 동시에 데이터를 변환하도록 하였다.

4.2. 실험 환경

구현된 시스템을 이용하여 실내 수조에서 실험을 수행하고 획득한 실험 데이터를 이용한 다양한 분석을 통해 연구된 방법의 성능을 검증하였다. 실험에서는 버스트 (Burst) 형태의 정현파로 실험하였으며, 각각 지향 방향과 송신 하이드로폰 수에 따라 수행하였다. 아울러 버스트율 (Burst rate)과 정현파 펄스 길이를 조정하면서 그 영향을 고찰하였다.

실험에 사용된 수조의 크기는 5 m × 7 m × 5 m (가로×세로×깊이)이며, 수신 하이드로폰은 한 쪽 벽면 중앙으로부터 1 m, 깊이 2 m 떨어진 지점에 배치하였으며, 송신 하이드로폰 어레이는 수신 하이드로폰으로부터 같은 깊이에서 2 m 떨어진 지점에 배치하였다. 송신 하이드로폰 어레이는 5개로 구성되어 있으나 선택적으로 사용 가능하다. 각 하이드로폰은 10 kHz에서 전방향성 (omnidirectional)을 갖도록 설계되어 있으며, 하이드로폰 사이의 간격은 수중에서 10 kHz의 반파장에 해당되도록 제작된 것이다. 그림 4에는 실험 구성도를 나타내었으며, 그림 5에는 수조 내에 설치된 수신 하이드로폰과 송신 하이드로폰 어레이의 사진을 나타내었다.

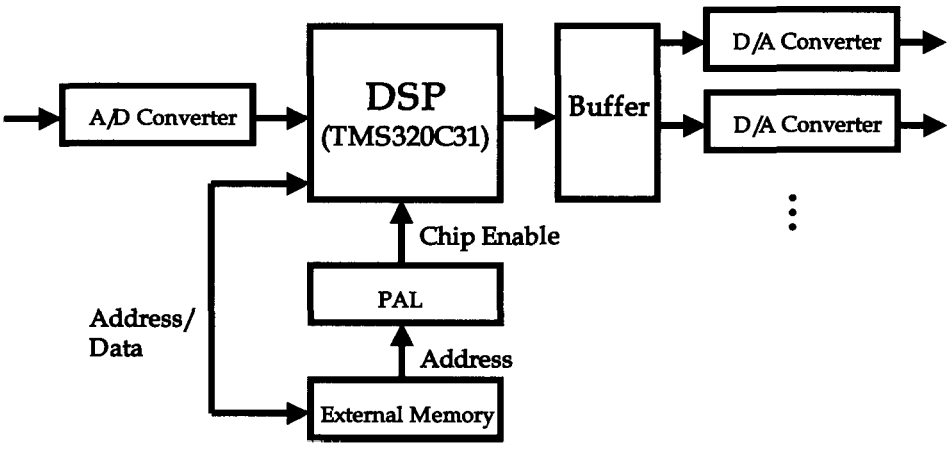


그림 3. 구현된 디지털 신호처리 시스템의 구성도
Fig. 3. Block diagram of the implemented DSP System.

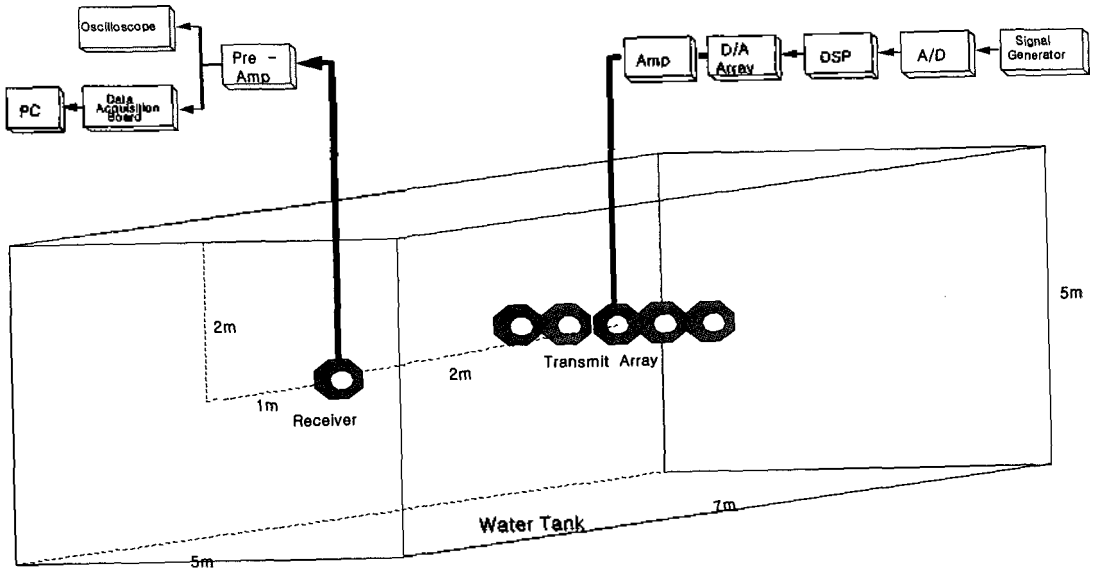
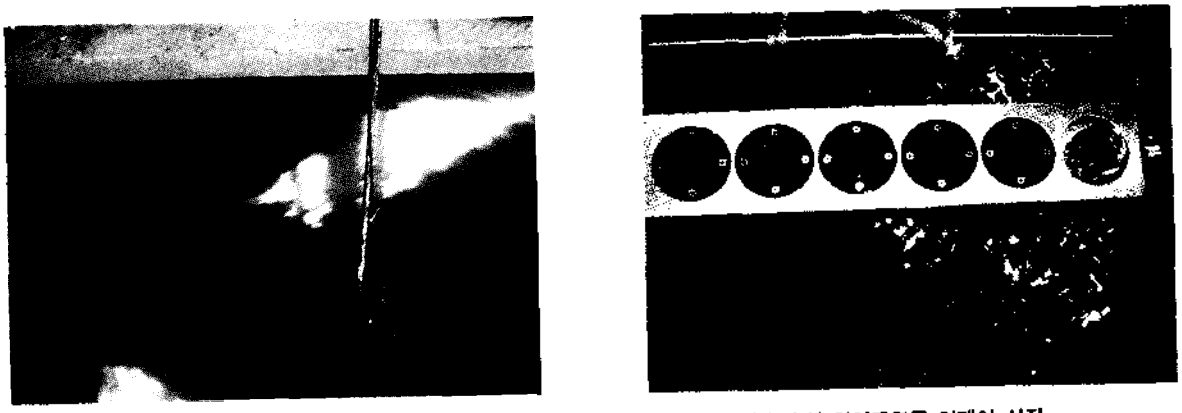


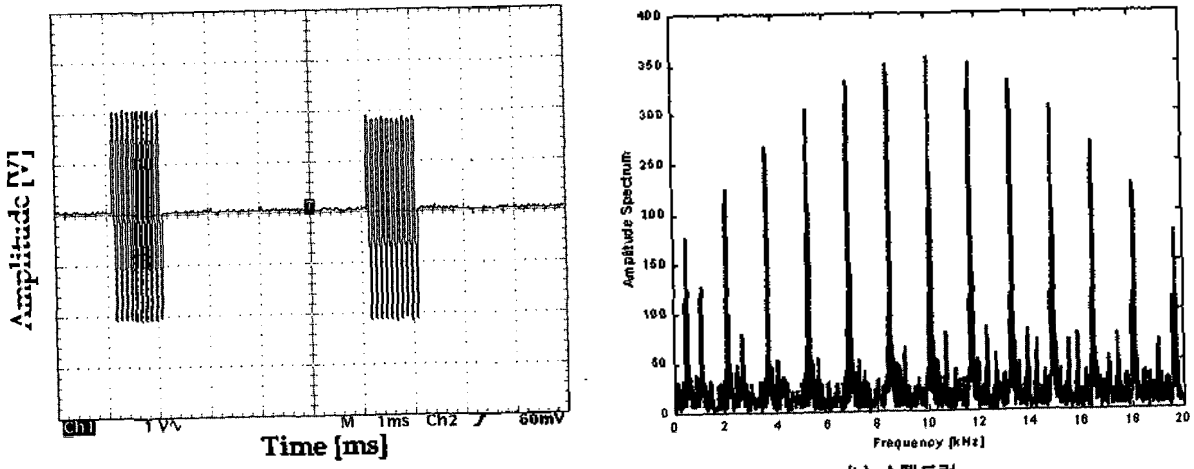
그림 4. 실험 구성 및 사용된 수조의 구조도
Fig. 4. Setup for experiment and schematics of water tank.



(a) 수조내에 설치된 수신 하이드로폰 사진
(a) Receiving hydrophone in water tank

(b) 송신 하이드로폰 어레이 사진
(b) Transmitting hydrophone array

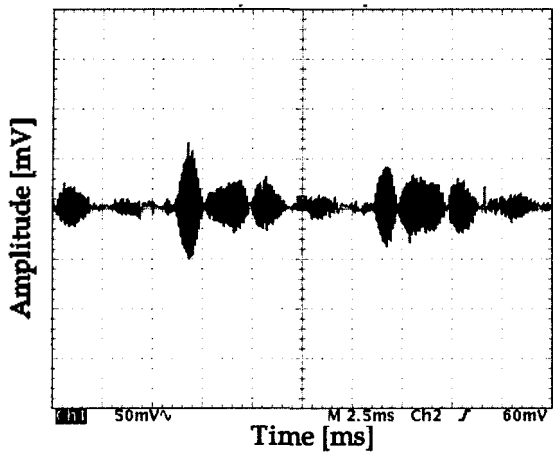
그림 5. 수로 및 하이드로폰
Fig. 5. Water tank and the hydrophones.



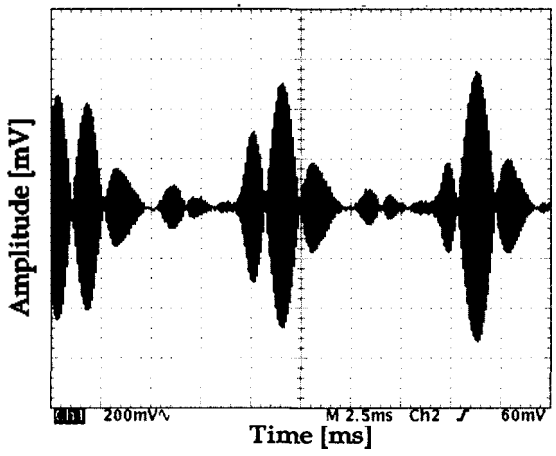
(a) 파형
(a) Waveform

(b) 스펙트럼
(b) Spectrum

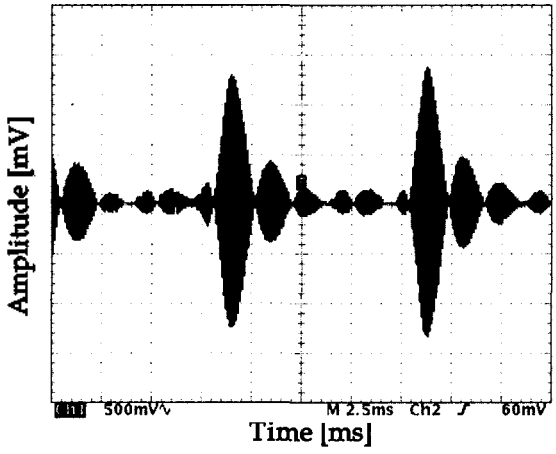
그림 6. 송신되는 버스트 파
Fig. 6. Transmitting burst signal.



(a) 1개
(a) 1



(b) 3개
(b) 3



(c) 5개
(c) 5

그림 7. 송신 하이드로폰 수에 따른 버스트 파의 수신 파형
Fig. 7. Received signal according to the number of transmit hydrophone.

4.3. 실험 결과 분석

수중에서의 디지털 통신 기법 적용에 따른 성능을 분석하기 위해 버스트 파를 발생하여 수신기에서 수신된 신호를 분석하였다. 사용된 버스트 파는 10 kHz의 반송주파수를 가지며, 펄스의 길이와 버스트율을 변화시키면서 실험하였다. 그림 6은 오실로스코프에 나타난 펄스의 길이가 1 msec이고, 버스트율이 5 msec인 버스트 파의 시간에 따른 파형과 그 스펙트럼을 보여준다. 이때 최대 및 최소 피크 차는 4V로 하였으며, 그림 6(a)에서 세로축 격자 사이의 간격은 1V이고, 가로축은 1 ms를 나타낸다. 그림에서 주파수가 10 kHz이기 때문에 펄스 구간 내에 10 cycle이 포함되어 있는 것을 볼 수 있다.

먼저 송신 하이드로폰 수에 따른 결과를 고찰하였다. 그림 7은 송신 하이드로폰이 1개, 3개, 5개일 때 결과 파형으로 각 그림의 세로축 간격은 각각 50 mV, 200 mV 및 500 mV이다. 이때 펄스의 길이는 1 msec, 버스트율은 10 msec이다. 이 결과에서 송신 하이드로폰 수가 증가할수록 수신 레벨이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 송신 하이드로폰이 1개인 경우 수신 레벨은 최대 및 최소 피크 차가 100 mV 정도이지만 3개인 경우 1 V, 5개인 경우 2.5 V로 상승하였다. 아울러 그림에서 몇 가지 현상을 관찰할 수 있다. 첫 번째, 주 (main) 버스트파 뒤로 작은 크기의 버스트 파들이 뒤따르는 것을 볼 수 있는데 이는 수조 벽면에 반사되어 수신기에 입사된 잔향의 영향이다. 두 번째, 펄스가 구형파 (square) 형태로 송신되었음에도 그 포락선 (envelop)이 변화된 것은 하이드로폰 응답 특성이 대역 통과 특성을 갖고 있기 때문이다[10]. 마지막으로 1

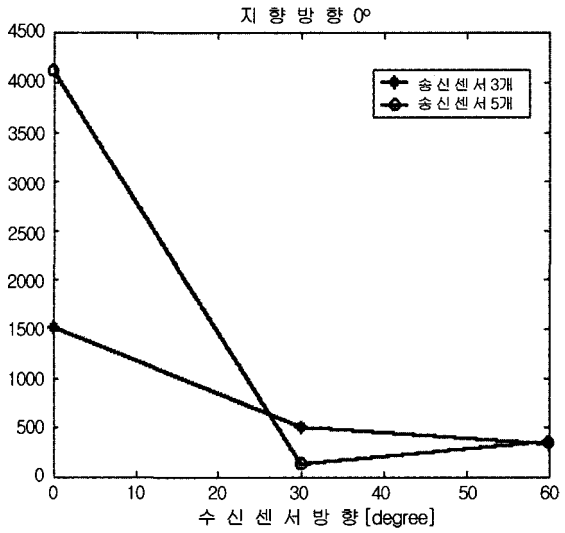
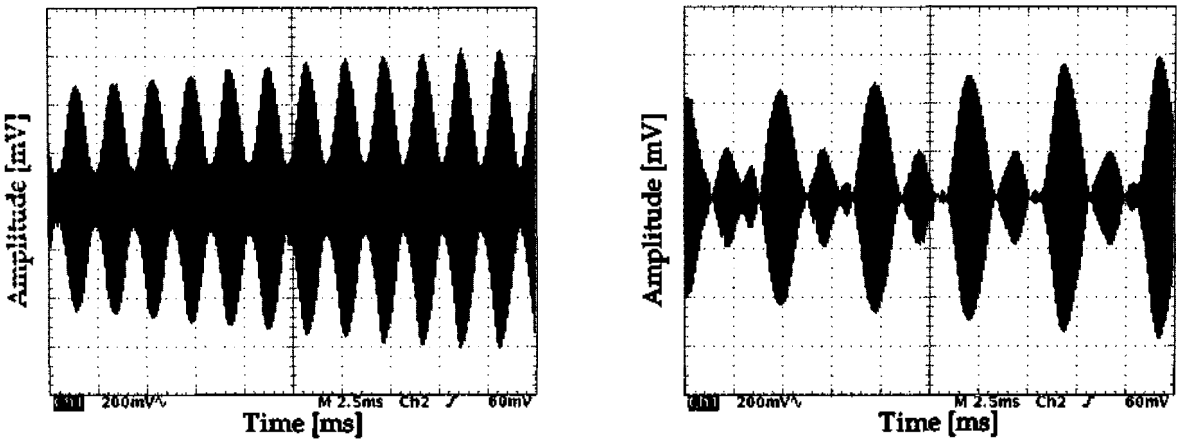


그림 8. 부엽 영역에서의 수신 신호 레벨 변화
Fig. 8. Received signal level in sidelobe region.



(a) 2 msec (b) 5 msec
(a) 2 msec (b) 5 msec

그림 9. 버스트율의 변화에 따른 수신 파형
Fig. 9. Received signal according to the burst rate.

msec 길이를 전송하였는데 수신된 펄스는 약 2 msec 정도로 시간축 퍼짐 현상이 발생한 것을 볼 수 있다.

그림 8에는 송신 어레이의 지향 방향을 0도로 하였을 때 수신 하이드로폰을 지향 방향이 아닌 다른 방향, 30도와 60도에 배치하였을 경우 수신 신호 레벨을 나타낸 것이다. 수신기가 지향 방향과 일치할 때는 높은 수신 레벨을 나타내었으나 빔의 부엽 영역에 해당되는 다른 각도에서는 이득이 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 예를 들어 송신 하이드로폰이 5개인 경우 지향 방향에서는 약 4.1 V 정도였으나 부엽 영역인 30도에서는 150 mV로 크게 감소하였다. 이는 30도 방향에서 이론적인 송신 빔 패턴이 약 30 dB 정도의 이득 감쇄를 나타내는 것을 감안하면 실험 결과는 약 28.5 dB의 이득 감쇄를 나타내어 이론치와 거의 유사한 결과를 얻었다. 또한 그림에서 송신 하이드로폰 수가 증가할수록 부엽 영역에서 더욱 큰 이득 감소율을 볼 수 있다. 이는 앞선 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 일치하는 내용이다. 즉 송신 하이드로폰 수가 증가하면 평균 부엽 레벨이 감소한다. 그림에서 60도에서는 오히려 증가하는 것처럼 보이나 이는 빔 패턴상의 부엽 영역에서 이득의 변화 때문이다. 즉 그림 1에서처럼 모든 부엽 영역에서 일정한 감쇄 이득을 갖지는 않기 때문이다.

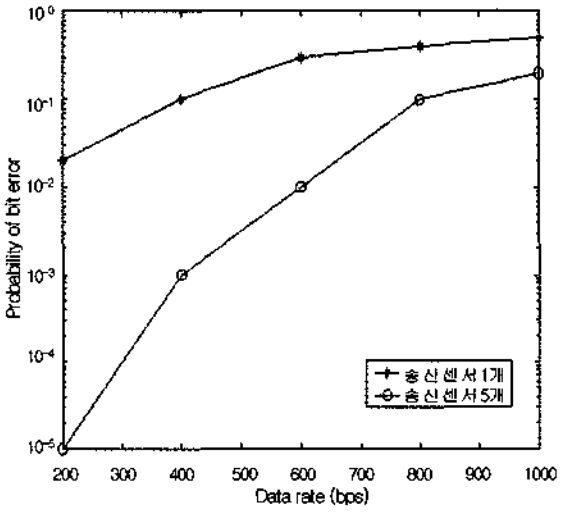


그림 10. 데이터 전송율에 따른 비트 오차율
Fig. 10. Bit error rate according to the data transmission rate.

다음으로 펄스의 길이를 일정하게 하고, 버스트율을 조정하였다. 그림 9는 펄스의 길이가 1 msec이고, 버스트율은 각각 2 msec와 5 msec인 경우 수신된 파형이며 세로축 간격은 200 mV이다. 이 실험을 바탕으로 간단한 디지털 통신 신호를 송신하였다. 수조 벽면으로 인한 잔향의 영향으로 M-ary ASK (Amplitude Shift Keying)을 사용하기 어려우며, 하이드로폰의 특성 문제로 인해 FSK 변조 기법은 사용할 수 없었다. 이에 가장 간단한 형태인 OOK 기법을 사용하여 송신하였고, 수신단에서는 상관(correlation) 기법을 사용하여 복조하였다. 그 결과 동일한 문턱치인 경우 송신 하이드로폰 수가 증가할수록 수신 성능이 개선되었으며, 이를 그림 10에 비트 오차율로 나타내었다. 그림 10은 전송율에 따른 오차율을 나타낸 것으로써 송신 센서 수가 증가할수록 오차율이 낮아진 것을 볼 수 있다. 또한 오차율 10^{-3}이 무선 이동 통신 시스템에서 일반적으로 허용되는 음성 신호 전송 오차율이므로 이를 기준으로 보면 실험에 사용된 수조 내에서 400 bps

정도의 속도로 송수신이 가능함을 확인하였다. 그러나 전송율이 증가하면서 펄스의 길이가 너무 짧은 경우 신호대 잡음비가 감소하여 이진 데이터 검출 오차가 크게 증가하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 수중 통신 시스템의 성능을 개선하기 위하여 송신 빔 형성을 위한 하이드로폰 어레이 시스템을 구현하고 그 성능을 분석하였다. 이를 위해 하드웨어를 직접 설계 및 구현하여 수조에서 실험을 수행하였다. 실험을 통해 송신 하이드로폰 수가 증가할수록 성능이 개선되며, 5개 어레이를 사용할 경우 1개만 사용할 경우보다 수신 레벨이 25배 이상 증가하는 것을 확인하였고, 그 결과 OOK 변조 기법을 적용한 경우 오차율 10^{-3}을 기준으로 전송율이 400 bps 정도까지 가능하다는 것을 확인하였고 이는 송신 센서를 한 개만 사용한 경우에 비해 약 3배 이상 전송율이 향상된 것이다. 이러한 결과들은 앞으로 디지털 수중 통신 시스템 구현에 있어서 고속, 고품질, 원거리 데이터 전송을 가능하게 할 것이다.

그러나 하이드로폰들의 서로 다른 감도 문제가 해결되어야 하며, 하이드로폰 특성의 제약으로 인하여 가장 간단한 OOK 변조 기법만 적용한 것은 개선되어야 할 것이다. 추후에는 실제 수중 통신에서 많이 적용되고 있는 FSK나 PSK 변조 기법을 사용하여 구현된 시스템의 성능을 입증하여야 한다. 또한 실제 해양 환경에 적용하기 위해 오류정정 코딩 기법, 등화기의 도입이 이루어져야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (2001-2-30200-001-2) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. A. Baggeroer, D. E. Koelsch, K. von der Heydt, and J. Catipovic, "DATS – A digital acoustic telemetry system for underwater communications," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, 126–129, Boston, 1981.
2. L. E. Freitab, J. S. Merriam, D. E. Frye, and J. A. Catipovic, "A long term deep water acoustic telemetry experiment," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, 467–471, Hawaii, 1991.
3. A. Kaya and S. Yauchi, "An acoustic communication system for subsea robot," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, 765–770, Seattle, 1989.
4. P. P. J. Beaujean and L. R. LeBlanc, "Spatio-temporal processing of coherent acoustic communications data in shallow water," *IEEE Conf. Oceanic Eng.*, Providence, 1625–1628, Sept. 2000.
5. H.-S. Hung, S.-H. Chang, S.-L. Chen and C.-W. Chang, "Real time implementation of Frost beamformer for underwater communications," *Journal of Marine Science and Technology*, 7 (1), 1–7, 1999.
6. 윤종락, 백승관, 박지현, 임춘단, "FSK 방식의 수중 데이터 전송 특성 해석," 제4회 해상무기체계 발전 세미나 논문집, 299–303, July 2002.
7. 손근영, 노용주, 윤종락, "수중 데이터 통신 시스템 개발 – 변조 방식의 성능 분석," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 19 (2(s)), 345–348, Nov. 1998.
8. 임용곤, 박종원, 최영철, "Multipath를 고려한 수중영상 전송 시스템 설계," 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, 4 (1), 419–424, May 2000.
9. O. H. Lee, Y. J. Son and K. M. Kim, "Underwater acoustic communications using channel estimation," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, 1573–1576, Biloxi, Oct. 2002.
10. R. J. Bobber, *Underwater Electroacoustic Measurements*, Naval Research Laboratory, 2000.
11. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3d ed. New York: McGraw-Hill, 1983.
12. D. B. Killoyle and A. B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 25 (1), 4–27, 2000.

저자 약력

● 이 외 형 (Oe-Hyung Lee)

2001년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2001년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
※ 주관심분야: 수중 통신, DSP 및 마이크로프로세서 하드웨어 구현

● 손 윤 준 (Yoon-Jun Son)

2000년 2월: 한국해양대학교 제어계측공학과 (공학사)
2001년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
※ 주관심분야: 소나 신호처리

● 김 기 만 (Ki-Man Kim)

1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의용공학교실 (Fellow)
1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 부교수
※ 주관심분야: 수중 통신, 소나 신호처리, 3차원 음향제어, 채널 추정, DSP 및 CPLD 구현