

# 수중 음향 환경에서의 영상 전송 성능 비교분석

Performance Comparison of Image Transmission in Underwater Acoustic Environment

이 승 우\*

Lee, Seung-Woo

## ABSTRACT

Underwater acoustic(UWA) communication is one of the most difficult field in terms of severe channel environments such as multipath propagation, high temporal and spatial variability of channel conditions. Therefore, it is important to model and analyze the characteristics of underwater acoustic channel such as multipath propagation, transmission loss, reverberation, and ambient noise. In this paper, UWA communication channel is modeled with a ray tracing method and applied to image transmission. Quadrature phase shift keying(QPSK) and multichannel decision feedback equalizer(DFE) are utilized as phase-coherent modulation method and equalization technique, respectively. The objective is to improve the performance of the image transmission using vertical sensor array instead of single sensor in the viewpoint of bit error rate(BER), constellation diagram, and received image quality.

주요기술용어(주제어) : Underwater Acoustic Communication(수중통신), Adaptive Beamformer(적응빔형성), Adaptive Equalizer(적응등화기), Underwater Acoustic Channel Modeling(수중음향채널모델링)

## 1. 머리말

인간에게 있어서 통신은 매우 중요한 수단이었기에 과거부터 통신에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 특히 많은 연구가 진행되어온 대기중의 전파통신에 비해 수중에서 사용할 수 있는 통신시스템은 초기에 군사적 목적으로 연구 개발되었으나, 현재는 상업적인 목적으로 활발히 연구가 진행되고 있다<sup>1~3)</sup>.

과거 수중 음향 통신시스템은 음성통신을 위한 아

날로그 시스템으로 AM, FM방식을 이용하였다. 현재는 디지털 하드웨어 기술의 발달로 수중 음향 통신분야에서도 디지털 통신시스템의 설계에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

수중 음향 통신시스템의 설계는 수중환경 분석과 그 환경에 적합한 통신방법의 채택이 요구된다. 해양 환경은 과거 해양학 분야에서 많은 연구가 진행되었고 시스템 설계자들은 해양환경에 적합한 통신방법의 채택을 위해 RF통신에서 사용되는 디지털 통신방식을 특수한 수중환경에 적용하고자 하였다<sup>3)</sup>.

수중 통신시스템은 일반 무선 통신과는 달리 전파가 수중에서 급격한 감쇠특성을 갖기 때문에 음파를 이용한다. 그러나 수중에서 음파는 고주파로 갈수록

† 2008년 4월 29일 접수~2008년 6월 5일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : swlee@add.re.kr

손실이 크게 나타나고, 대역폭도 제한을 받는다. 또한 인공구조물과 물고기 등에 의한 배경잡음의 영향도 많이 받는다. 특히 디지털 통신에 있어서 다중경로에 의한 영향은 가장 심각한 문제로 알려져 있다. 직접파와 반사파들의 레벨 준위가 유사하게 들어오는 경우 다중경로의 영향을 배제하는 것을 어렵게 한다.

이러한 수중 통신시스템의 문제점을 해결하기 위해 과거에는 주로 FSK(Frequency Shift Keying)와 같은 비코히어런트 변조기법을 이용하였으나, 이는 대역폭이 제한된 수중환경에서 데이터 전송률이 떨어지는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 코히어런트 변조기법들을 수중환경에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[11]</sup>.

현재 다양한 알고리즘을 고려한 위상 코히어런트 수신기들이 소개되고 있으며, 이 수신기들은 수중환경에 의한 다양한 변화를 극복하기 위하여 적응 등화기 기법과 적응 빔형성(beamforming)기법 등을 사용하여 설계되어지고 있고, 이들의 성능향상을 위해 다양한 등화기구조와 알고리즘들이 연구 개발되고 있다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 기존에 제안된 송/수신기구조<sup>[1]</sup> 및 대표적인 위상 코히어런트 변조기법 중 하나인 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)를 이용하여 영상 정보를 전송하고 우리나라 근해의 다양한 수중음향 변수들을 고려한 채널 모델을 이용하며 수신기에서는 수직 선배열 센서와 적응 빔형성 기법을 적용한 모의 실험을 통하여 영상정보 전송성능을 분석하였다. 여러 가지 채널 환경에 대해 하나의 센서와 수직 선배열 센서를 이용한 경우를 비교 분석하였고 도플러에 의한 영향에 대해서도 분석하였다.

## 2. 수중 음향 채널 모델링

해양에서 음파의 전송특성은 거리에 따른 음파에너지의 전달손실(transmission loss), 다중경로에 의한 잔향(reverberation), 주위배경잡음(ambient noise) 등으로 대별된다. 이들의 특성은 수중의 시공간적 변화에 의해 특성을 달리하므로 수중 음향 통신 시스템을 설계하는 단계에서는 이들의 특성을 엄밀히 해석할

필요가 있다.

수중 음향 통신을 위해서는 수중 채널의 전달특성을 다음 식 (1)과 같은 임펄스 응답함수로 표현할 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$h(\tau, t) = \sum_{k=1}^K a_k e^{j\theta_k} \delta(t - \tau_k), \quad k=1, \dots, K \quad (1)$$

이 함수에서  $K$ 는 다중경로의 개수이고,  $a_k$ ,  $\tau_k$ ,  $\theta_k$ 는 각각 각 경로의 크기, 지연시간, 위상을 나타낸다. 이 전달함수의 각 파라미터들을 구하기 위해서는 음파의 전달경로와 전달경로에 따른 전달손실을 구하여 수신되는 신호의 손실을 추정하여야 한다. 이를 위해 음선추적(ray tracing)기법을 사용하여 음파의 전달경로와 확산에 의한 손실을 구하였고, 전달경로를 추적하면서 경계면에서의 감쇠를 고려하여 임의의 위치에서의 음파의 세기를 구하였다.

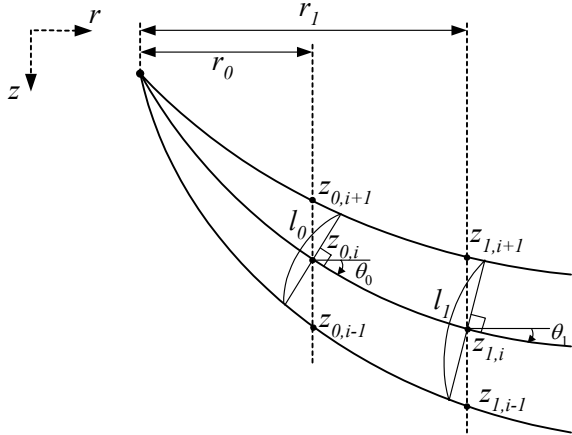
### 가. 전달손실

전달경로가 구해지면 각 전달경로에 의한 전달손실을 구하는데 이때 확산손실, 해수면 반사손실, 해저면 반사손실, 흡수손실 등을 고려해야 한다. 진행하는 음파의 에너지가 산란이나 회절에 의해 인접하는 음선 밖으로 새어나가지 않는다고 가정하면,  $i$ 번째 음선을 따라가면서 변화하는 음파의 세기를 구하고  $r_0$ 위치에서의 음파의 세기  $I_0$ 와  $r_1$ 위치에서의 음파의 세기  $I_1$ 의 비는  $I_0$ 에 의해서 생기는 면적과  $I_1$ 에 의해서 생기는 면적비의 역수와 같게 된다. 이에  $I_0$ 에 의한 면적과  $I_1$ 에 의한 면적을 인접한 음선의 위치정보와 음선의 각도로부터 구하면 식 (2)를 만족하며 이로부터  $r_0$ 에서부터  $r_1$ 까지 진행되는 동안 발생하는 확산손실을 구한다.

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{2\pi r_0 I_0}{2\pi r_1 I_1} = \frac{r_0 (|z_{0,i-1} - z_{0,i}| + |z_{0,i} - z_{0,i+1}|) \cos \theta_0}{r_1 (|z_{1,i-1} - z_{1,i}| + |z_{1,i} - z_{1,i+1}|) \cos \theta_1} \quad (2)$$

음파가 수면에 반사될 경우 경계면에서 대기와 해수의 임피던스의 불일치로 인해 크기와 위상이 변하게 된다. 음파의 수면반사에 대한 연구가 지속적으로 행해지고 있으나 모든 경우를 만족시키는 일반식은

구하기가 어렵기 때문에 일반적으로 수면의 상태에 따라 실험을 통해 분석한 실험 데이터를 많이 사용한다.<sup>[12]</sup>



[그림 1] 음파의 확산손실

대표적인 실험식은 Marsh 등이 해상 자료로부터 해상상태의 반사손실을 실험적으로 구한 식 (3)과 같다.<sup>[6]</sup>

$$\alpha_s = -10 \log[1 - 0.0234(fH)^{\frac{3}{2}}] \quad (3)$$

여기서  $f$ 는 주파수(kHz)이고,  $H$ 는 평균파고(ft)를 나타낸다.

음파가 해저면에 반사될 때는 일반적으로 경계면에서 해저침전물의 밀도와 해수의 밀도차이가 클수록 반사손실은 작고 해저표면이 거칠수록 반사손실은 커지는 경향을 가진다. 또한 입사각이 클 경우 침전물 내부로 침투하는 음파의 성분이 증가하여 손실이 커지게 된다. Mackenzie 등은 침전물 내에서의 흡수를 고려하여 해저면 반사손실을 분석하였다.<sup>[5]</sup>

식 (4)와 같은 반사손실이 발생하게 된다.

$$\alpha_{bot} = kf^n \quad (4)$$

음파가 수중에서 전달될 때 흡수손실은 주파수가 높아질수록 증가하게 되어 높은 주파수를 가지는 신호가 멀리 전달되지 못하는 주요한 요인이 된다. 수

중음향 모델링에서는 이러한 현상을 고려하기 위해 일반적으로 Thorp가 제안한 식 (5)를 사용한다.<sup>[5]</sup>

$$\alpha = \frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (5)$$

이와 같은 확산손실, 해수면 반사손실, 해저면 반사손실 그리고 흡수손실 등을 모두 고려하면,  $i$ 번째 음선을 따라가면서 변하는 음파의 세기는 식 (6)과 같다.

$$I_i(r, z) = \eta_{sp} (\eta_{surf})^{n_{surf}} (\eta_{bot})^{n_{bot}} 10^{-\alpha S/10} I_0 \quad (6)$$

여기서  $I_i$ 는  $i$ 번째 음선의  $(r, z)$ 위치에서의 음파의 세기이고,  $I_0$ 는 음원으로부터 1m 떨어진 위치에서의 음파의 세기를 나타낸다.  $n_{surf}$ ,  $n_{bot}$ 는 각각 해수면과 해저면에 반사되는 회수이며,  $-10 \log \eta_{sp}$ ,  $-10 \log \eta_{surf}$ ,  $-10 \log \eta_{bot}$ 는 각각 확산손실, 해수면 반사손실, 해저면 반사손실을 나타낸다. 그리고  $\alpha$ ,  $S$ 는 각각 흡수손실계수(dB/kyd)와 전달경로의 길이(kyd)를 나타낸다.

#### 나. 배경잡음

일반적으로 능동소나를 운용하는 주파수 대역(1kHz <  $f$  < 10kHz)에서는 다른 소음원의 영향에 비해 바람에 의한 수면소음의 영향이 우세하다. 따라서 본 모델에서는 Knudsen 등에 의해 실험적으로 얻어진 식 (7)을 이용한다.<sup>[7]</sup>

$$NL = -17.13 \log f + 40 + 20 \log v \quad (7)$$

여기서  $f$ 는 주파수(kHz)이고,  $v$ 는 풍속(knots)이다.

#### 다. 도플러 변이

음파가 해수면에 반사될 경우 파도의 움직임에 따라 도플러 변이가 생기게 되는데 이때 파도의 움직임은 풍속의 영향을 많이 받게 된다. 풍속의 영향에 의한 도플러 변이는 다음 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$Doppler\ spread = 0.07v + 0.3 \quad (8)$$

여기서  $v$ 는 풍속(knots)을 나타낸다.

### 3. 변조방식 및 송/수신기의 구조

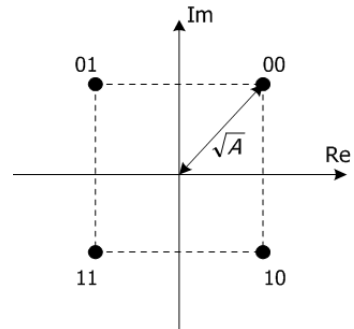
#### 가. 디지털신호 변조방식

전자파 통신 환경에서 적용되는 변조방식은 수중 음향 환경에도 그대로 적용 할 수 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 전송채널의 특성을 좌우하는 전달 손실, 배경잡음, 다중경로 효과와 도플러 효과 등은 해양의 수심, 해상 상태 및 사용주파수 등에 의해 좌우된다. 이런 환경적 영향을 고려하여 통신방식을 선택해야 함은 물론이고, 정보원의 정보량에 대한 것도 고려해야 한다. 데이터 통신 시스템에서 사용되는 일반적인 변조방식은 FSK와 같은 비코히어런트 기법과 PSK, QAM 등의 코히어런트 기법이 있다. 본 논문에서는 대표적인 코히어런트 기법중 하나인 QPSK를 사용하였다<sup>[8]</sup>.

PSK 변조방식은 통신채널을 통해 전송할 정보를 반송파의 위상에 실어서 보내는 디지털신호 변조방식이다. 반송파의 위상변화가  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 이므로 위상변조를 통해 디지털 정보를 전송하기 위하여 사용되는 반송파 위상은  $\theta_m = 2\pi m/M$ ,  $m=0, 1, \dots, M-1$ 이다. 따라서 QPSK 변조방식의 경우 4개의 반송파위상  $\theta_0 = \pi/4$ ,  $\theta_1 = 3\pi/4$ ,  $\theta_2 = 5\pi/4$ ,  $\theta_3 = 7\pi/4$ 를 갖는다.  $M$ 개의 반송파 위상 변조 신호 파형의 일반적인 표현식은 다음 식 (9)와 같다.

$$u_m(t) = A g_T(t) \cos(2\pi f_c t + \frac{2\pi m}{M}) \quad (9)$$

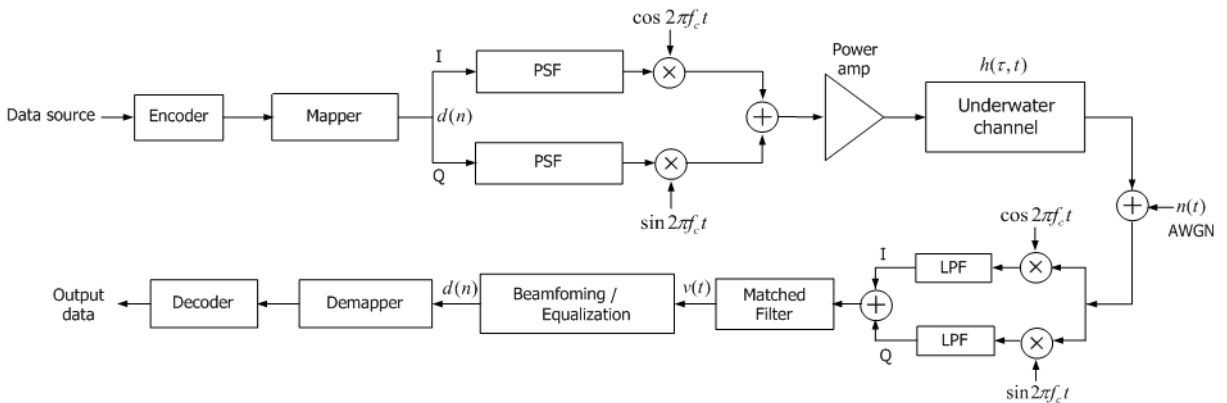
여기서  $g_T(t)$ 는 전송펄스를 나타내는식이며, 전송된 신호의 스펙트럼 특성을 결정한다. 또한  $A$ 는 신호의 진폭이다. PSK 변조방식의 신호들은 모두 동일한 에너지를 가지고 있다. 그림 2에 QPSK신호의 성상도(constellation)를 나타내었다.



[그림 2] QPSK 신호의 성상도

#### 나. 송/수신기의 구조

일반적인 통신시스템 설계에 있어서 송/수신기의 설계는 통신기법 못지않는 중요한 과정이다. 특히 수중 음향 채널의 경우 앞서 언급한 바와 같이 해양의 시공간적 특성에 따른 영향으로 인해 통신 성능의 현격한 저하를 야기한다. 다양한 수중통신 송/수신 시스템을 바탕으로<sup>[1~3,11,13]</sup>, 실제 수중 채널의 특성뿐만 아니라 배열센서 및 빔형성 기법을 통한 성능 향상을 확인하기 위한 시스템을 구성하였다. 그림 3은 구성된 전체 송/수신기의 블록 다이어그램이다.



[그림 3] 송/수신기 블록다이어그램

### 1) 송신기

송신기는 일반적으로 디지털통신에서 이용되는 기본구조로 이루어져있다. 인코더단에서는 영상정보를 이진정보로 바꾸고, 이 이진정보는 디지털 변조기법에 의해 동위상(inphase)신호와 직교(quadrature)신호로 구성되는 복소심벌로 만든다. 이 변조된 심벌은 펄스형상필터(pulse shaping filter)를 통해 필터링된다. 펄스형상필터는 널리 사용되고 있는 제곱근 상승 코사인 필터(square root raised cosine filter)를 이용하였고, 이때 롤-오프롤(roll-off factor)은 0.2로 하였다. 이 필터링된 심벌들은 반송주파수  $f_c$ 로 변조된다. 수중 음향 채널은 반송주파수에 따른 전송거리에 대한 감쇠 등의 여러 요인에 의한 전송손실과 배경잡음이 매우 큰 채널이므로 고풍력의 신호를 송신하여야 하고 이를 위해 신호를 증폭한다.

### 2) 수신기

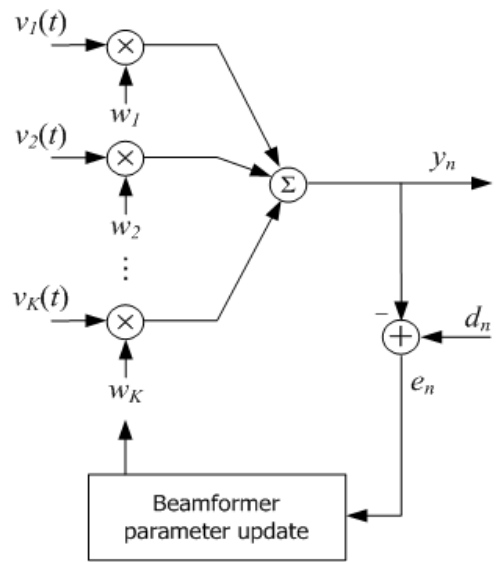
수신기는 수중 음향 채널을 통과한 수신신호를 동위상 신호 및 직교신호로 복조하여 다시 복소신호로 만든다. 이 신호를 저역 통과 필터(low pass filter)를 통과시킨 후, 정합 필터(matched filter)를 이용하여 필터링한다. 필터링된 신호를 적응 빔형성기(adaptive beamformer)와 적응 등화기(adaptive equalizer)를 결합한 단을 통과시켜 수중 음향 채널을 예측하고 위상 동기화를 통하여 다중경로의 영향으로 왜곡된 신호에서 원심벌로 복원한다. 이 복원된 심벌은 디지털 변조기법에 의해 변조된 심벌이므로 복조기로 통하여 이진정보로 복조한다. 마지막으로 이 이진정보들은 디코더에 의해 원래의 데이터형태로 복원된다.

### 3) 적응 빔형성기 및 등화기

센서를 한 개만 사용하는 것이 아니라 여러 개를 사용해서, 즉 배열 센서를 이용해서 다양한 형태의 공간적인 필터링 기능을 제공하는 것을 빔형성기 라고 한다. 배열 센서가 음파를 수신하면 빔형성기는 이 신호를 가공하게 되는데 빔형성기의 목적은 잡음과 간섭신호가 있을 때 특정한 방향에서 들어오는 신호를 추정하는 것이다.

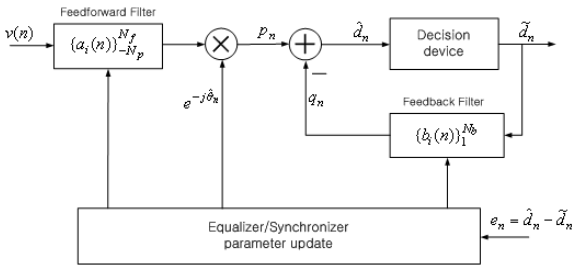
수신기에서 수직 선배열 센서를 이용함으로써 센서 출력으로부터 적응 빔형성을 할 수 있고 따라서 다중

경로에 의한 영향을 감소시킬수 있다. 그림 4는 적응 빔형성기의 블록다이어그램으로 빔형성기의 동작은 송신기와 수신기 사이에 미리 알고 있는 심벌정보 (known sequence,  $d_n$ )와 센서 출력( $y_n$ )의 차에서 오차( $e_n$ )를 구하여 업데이트 알고리즘에 따라 가중치 탭을 업데이트 하게 되며 가중치 탭 업데이트는 훈련 구간(training mode)에서만 수행되어진다. 빔형성기의 가중치 탭 업데이트 알고리즘은 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 이용하였다.



[그림 4] 적응 빔형성기

위상 코히어런트 통신시스템에서 수신기의 구조 중 다중경로에 의한 심벌간의 간섭을 제거하는 등화기와 위상 동기기 부분은 통신시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 기존통신시스템에서 사용된 등화기와 동기기의 분리된 구조는 수중 음향 통신환경에서의 강한시변 다중경로의 영향에서 빈약한 위상 추적 성능을 보이며, 이 영향으로 등화기의 성능 또한 저하되었다. 이를 보상하기 위해서 최근 수중 통신시스템에서는 적응 결정례환 등화기(adaptive decision feedback equalizer)와 반송파 동기기(carrier synchronizer)의 결합된 구조가 제안되었고, 본 논문에서도 이를 사용하여 수신기를 구성하였다<sup>[1,13]</sup>. 그림 5는 구성한 적응 결정례환 등화기의 블록다이어그램이다.



[그림 5] 적응 결정례환 등화기

DFE(Decision Feedback Equalizer)는 피드포워드 필터(feedforward filter)와 피드백 필터(feedback filter)의 두 부분으로 구성되어있다. 피드포워드 필터는 적응 빔형성기의 출력을 입력으로하여 예측하고자 하는 심벌의 심벌간 간섭을 보상하는 것으로 일반적인 트랜스버설 등화기(transversal equalizer)와 동일하다. 피드백 필터는 예측심벌 이전의 판정신호를 이용하여 현재 예측심벌의 심벌간 간섭을 제거하기 위해 사용된다.

등화기 가중치 탭의 업데이트 알고리즘으로는 대표적으로 LMS(Least Mean Square) 알고리즘과 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘이 사용되고 있다. 이때 수신기를 통해 수신된 신호는 다음 식 (10)과 같다<sup>[13]</sup>.

$$v(t) = \sum_n d_n h(t - nT - \tau) e^{j\theta} + \omega(t) \quad (10)$$

여기서  $d_n$ 은 디지털 변조기법에 의한 전송심벌이고,  $h(t, \tau)$ 는 수중 음향 채널의 임펄스응답함수이며,  $\theta$ 는 위상,  $\omega(t)$ 는 백색 가우스 잡음이다.

등화기의 동작은 훈련 구간(training mode)과 결정 직접 구간(decision direct mode)의 두 개의 부분으로 나누어져 수행되어진다. 먼저 훈련 구간에서 송신기와 수신기 사이에 미리 알고 있는 심벌정보(known sequence)를 이용하여 수신심벌의 예상값( $\hat{d}_n$ )과의 차에서 예상 오차( $e_n$ )를 구하여 업데이트 알고리즘에 따라 가중치 탭을 업데이트하고, 이 구간에서 예측된 가중치 탭들은 결정 직접 구간의 초기값이 된다. 결정 직접 구간에서는 판정할 신호의 예상값( $\hat{d}_n$ )과 결정값( $\tilde{d}_n$ )의 차에서 예상 오차( $e_n$ )를 구하여 가중치 탭

을 업데이트 하여 수행된다.

본 논문에서는 RLS 알고리즘과 LMS 알고리즘을 결합하여 가중치 탭을 효율적으로 업데이트하는 방식을 이용하였다. RLS 알고리즘은 수렴속도는 빠르나 업데이트를 수행하는데 많은 계산과정이 필요하기 때문에 훈련구간에서는 RLS 알고리즘을 이용하여 수행하고 결정 직접 구간에서는 계산량이 적은 LMS 알고리즘을 이용하여 수행하였다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과

본 장에서는 우리나라 동해에서 획득한 음속구조로부터 수중 음향 채널의 파라미터들을 결정하였고, 3장에서 구성한 통신 시스템을 이용하여 수신기에서 하나의 센서를 이용한 경우와 여러개의 센서를 이용한 경우에 대해 다중경로에 따른 영상 전송성능을 비교 분석하였다. 또한 수중 음향 채널을 구성하기 위해 2장에서 설명한 흡수손실, 확산손실, 반사손실, 배경잡음, 도플러 변이 등을 적용하여 4가지의 서로 다른 해양환경에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 모의실험을 수행하였다.

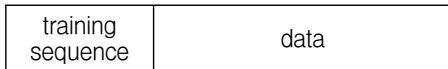
##### 가. 시뮬레이션 환경

다중경로와 각 경로의 전달손실에 따른 성능을 분석하기 위해 본 논문에서는 표 1과 같은 4가지의 서로다른 수중 음향 채널을 구성하였다. 해양환경은 크게 송/수신기사이의 거리에 따른 구분과 해양의 수심에 따른 구분으로 나눌 수 있으며 채널 1은 심해에서의 채널이고, 채널 2, 채널 3, 채널 4는 천해에서의 거리에 따른 채널이다.

[표 1] 컴퓨터 시뮬레이션 환경

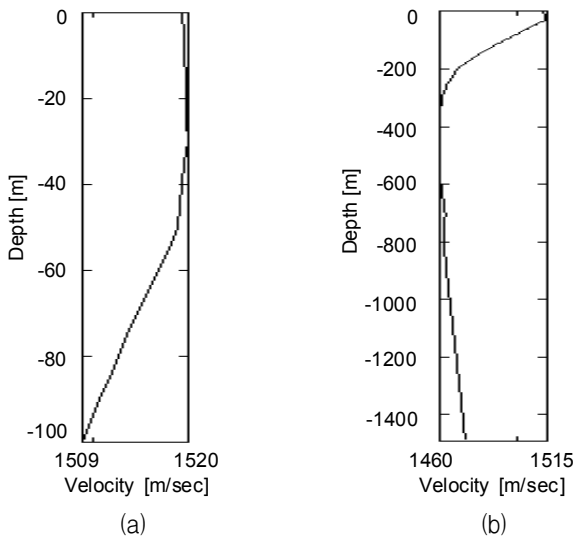
	거리(R)	수심(H)	송/수신기의 위치
채널1	10km	1500m	Tx: 650m, Rx: 650m
채널2	500m	100m	Tx: 50m, Rx: 50m
채널3	4km	100m	Tx: 50m, Rx: 50m
채널4	10km	100m	Tx: 50m, Rx: 50m

컴퓨터 시뮬레이션에서 사용한 해양 환경은 풍속이 14노트(knot) 정도인 해상 상태(sea state)이고, 해저면 상태(bottom type)는 모래이며 배경잡음은 55dB로 하였다. 그리고 통신에 사용한 반송파 주파수는 10kHz로 설정하였다. 디지털 변조방식은 QPSK를 사용하였고, 심벌 전송률은 5000sps로 하였다. 수신기에서는 7개의 센서를 수직으로 배열하였으며 전송된 영상은 256×256 픽셀 4bit 흑백 비트맵 영상이다. 전송된 프레임의 구조는 그림 6과 같으며 하나의 프레임은 송신기와 수신기 사이에 미리 알고 있는 500비트의 심벌정보(known sequence)와 2500비트의 영상정보(data)로 구성되어 있다.



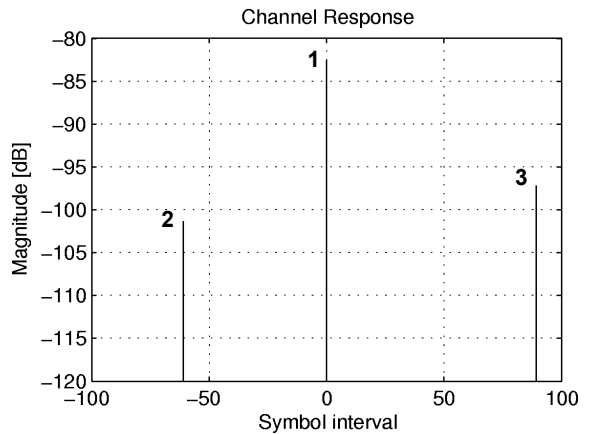
[그림 6] 프레임 구조

본 논문에서 사용한 심해(1500m)와 천해(100m)의 음속구조는 그림 7과 같다.

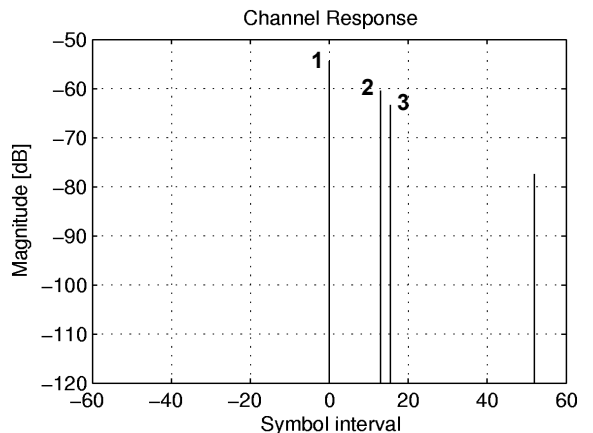


[그림 7] 음속구조  
(a)천해, (b)심해

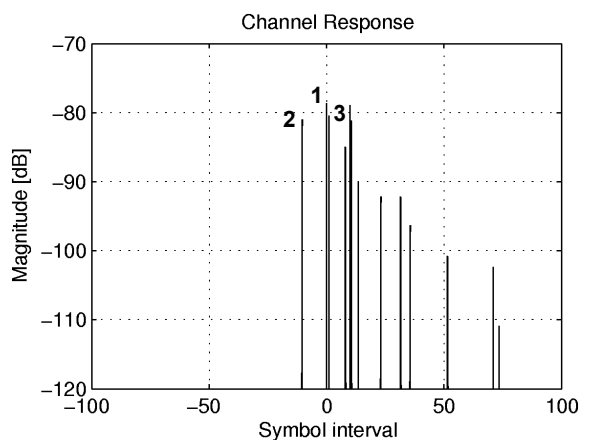
모든 채널에 대해 동일한 송신출력으로 시뮬레이션했을 경우 거리가 가까운 채널 2에서 가장 좋은 전송



[그림 8] 채널 1의 채널 임펄스 응답

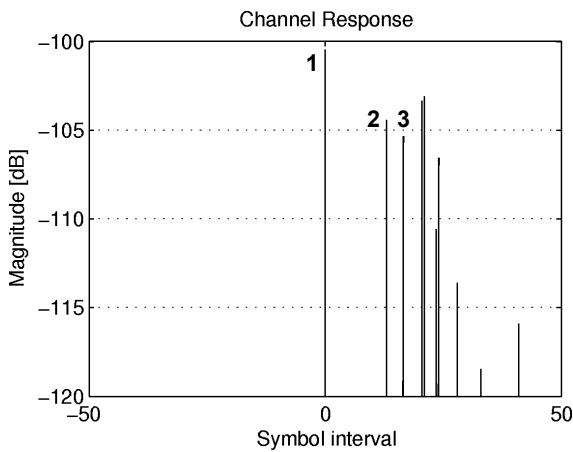


[그림 9] 채널 2의 채널 임펄스 응답



[그림 10] 채널 3의 채널 임펄스 응답

성능을 보였고 거리가 먼 채널 1과 채널 4에서는 채널 2나 채널 3에 비해 좋지 않은 전송성능을 보였는데 수심이 얕은 채널 4 보다는 수심이 깊은 채널 1이 더 좋은 전송성능을 보였다. 그러나 각 채널에 따른 전송손실은 서로의 차이가 매우 크므로 동일한 송신 출력으로 시뮬레이션 했을 경우 각 채널에 대한 영상 전송성능의 차이를 알아보기 힘들기 때문에 각 채널에 따른 감쇠를 고려하여 송신출력을 결정하였다. 이렇게 구성된 4가지 수중 음향 채널에 대하여 전송성능을 분석하였다.



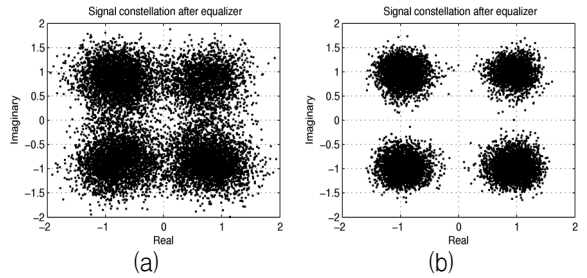
[그림 11] 채널 4의 채널 임펄스 응답

나. 시뮬레이션 결과

앞에서 구성한 4가지 채널의 특성으로부터 채널에 따라 다중경로에 대한 영향을 받는 정도가 차이남을 알 수 있다.

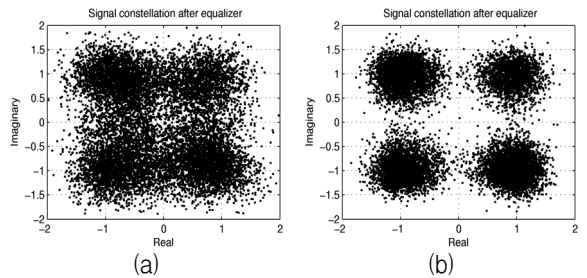
1) 채널별 수신된 신호의 성상도

그림 12~15는 각 채널에 따른 수신된 신호의 등화기를 통과한 후의 성상도를 나타낸다. 이를 통하여 채널특성이 전송성능에 미치는 영향을 알 수 있다. 성상이 선명할수록 복원율이 높다고 할 수 있는데 모든 채널에서 수신기에서 하나의 센서를 이용했을 경우 보다 수직 선배열 센서를 이용했을 경우 성상의 형태가 더 선명함을 볼 수 있다. 또한 채널 1이 가장 선명한 성상도를 가지고 채널 3이 가장 선명하지 못한 성상도를 가짐을 볼 수 있다.



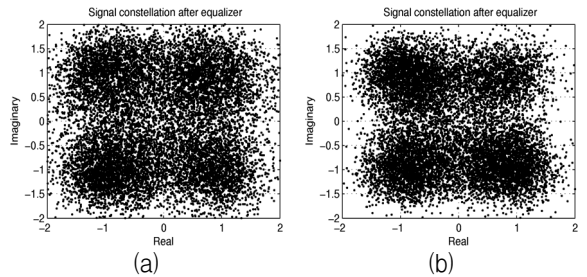
[그림 12] 채널1의 수신된 QPSK신호의 성상도

(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우



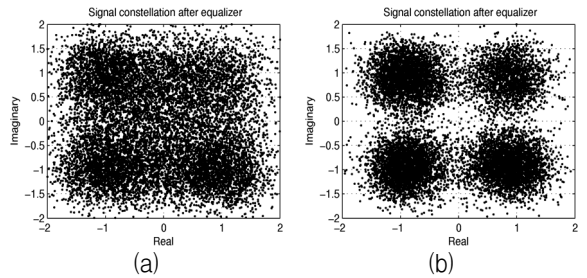
[그림 13] 채널2의 수신된 QPSK신호의 성상도

(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우



[그림 14] 채널3의 수신된 QPSK신호의 성상도

(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우



[그림 15] 채널4의 수신된 QPSK신호의 성상도

(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우



2) 채널별 비트 에러율

표 2는 채널에 따른 비트 에러율을 나타낸다. 비트 에러율 역시 성장도와 마찬가지로 수신기에서 한 개의 센서를 이용했을 경우에 비해 수직 선배열 센서를 이용했을 경우 더 낮은 비트 에러율을 가짐을 볼 수 있다. 또한 채널 1이 가장 낮은 비트 에러율을 가지고 채널 3이 가장 높은 비트 에러율을 가짐을 볼 수 있다.

[표 2] 채널별 비트 에러율

	한 개의 센서	수직 선배열 센서
채널1	0.04684	0.00004
채널2	0.08384	0.00086
채널3	0.26536	0.04716
채널4	0.22368	0.00672

3) 채널별 수신된 영상

그림 16은 송신기에서 전송된 256×256 픽셀의 4비트 흑백 비트맵 정지영상이다.



[그림 16] 전송된 정지영상

그림 17~20은 각 채널에 따른 수신기에서 수신된 영상이다. 앞의 결과와 마찬가지로 수신기에서 하나의 센서를 이용한 경우가 수직 선배열 센서를 이용한 경우보다 비트 에러로 인한 반점이 많이 생겼음을 볼 수 있다.



(a) (b)

[그림 17] 채널1의 수신된 영상

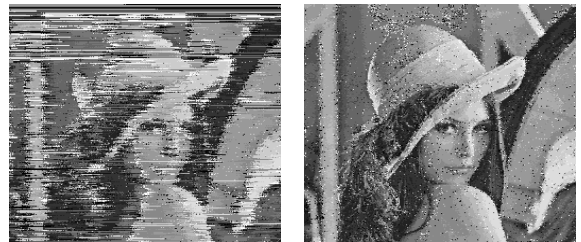
(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우



(a) (b)

[그림 18] 채널2의 수신된 영상

(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우



(a) (b)

[그림 19] 채널3의 수신된 영상

(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우



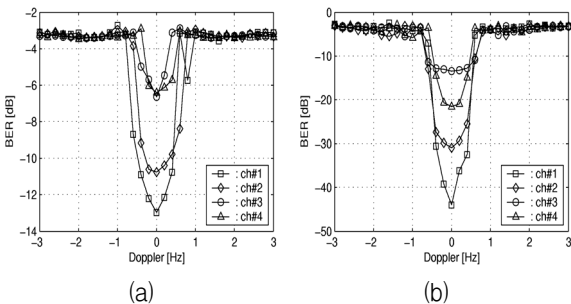
(a) (b)

[그림 20] 채널4의 수신된 영상

(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우

4) 도플러에 의한 영향

그림 21은 도플러에 의한 영향을 각 채널별 비트 에러율로 비교한 그림이다. 도플러에 의한 신호주파수의 변이가 생겼을 경우 전반적으로 비트 에러율이 높아진 것을 볼 수 있다. 앞의 결과와 마찬가지로 도플러가 생겼을 경우에도 수신기에서 하나의 센서를 이용했을 경우보다 수직 선배열 센서를 이용했을 경우 좀더 나은 결과를 볼 수 있다. 그러나 두 경우 모두 도플러가 조금만 생겨도 비트 에러율이 급격히 증가하는 취약함을 볼 수 있다.



[그림 21] 도플러에 의한 비트 에러율

(a) 하나의 센서를 이용한 경우, (b) 선배열 센서를 이용한 경우

5) 시뮬레이션 결과 비교

시뮬레이션 결과에서 4가지 채널의 특성에 따라 수신기에서 센서를 하나만 이용했을 경우와 수직 선배열 센서를 이용한 경우에 대해 다중경로에 대한 영향 및 도플러에 대한 영향 등을 비교할 수 있었다. 이로부터 수직 선배열 센서를 이용했을 경우 센서를 하나만 이용했을 경우에 비해 복잡한 다중경로의 특성을 가지는 채널에서 보다 나은 영상 전송성능을 보임을 확인할 수 있었다. 그러나 하나의 센서를 이용했을 경우나 수직 선배열 센서를 이용했을 경우 모두 도플러에는 매우 취약함을 알 수 있었다.

이들 결과에서 볼 수 있듯이 복잡한 채널에서는 두 경우 모두 영상 전송성능이 크게 저하되지만 수직 선배열 센서를 이용하였을 경우 좀 더 나은 전송성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 특히 수중 채널의 수심이 깊을 경우 좋은 전송성능을 보였으며 수심이 얕을 경우 채널에 복잡한 다중경로가 발생하여 전송성능에 민감하게 나타남을 볼 수 있었다.

5. 맺음말

본 논문에서는 수중 통신 환경을 분석하고 이것을 수중 통신시스템에 적용하여 정지영상의 전송성능을 비교 분석하고자 하였다. 수중 채널에서 가장 극복하기 어려운 다중경로 환경의 영향을 고려하여 전송성능을 분석하였는데 수중 통신 채널에서는 송/수신기 간의 거리, 해수면상태, 해저면상태 등에 따라 다중경로의 특성이 결정된다. 고려한 수중환경은 우리나라 동해에서 획득한 음속구조로부터 음선추적기법을 사용하여 전달경로를 구하고 전달손실, 흡수손실 및 확산손실 등을 고려하여 수중 음향 통신 채널을 모델링하였다.

대역폭을 효율적으로 사용하여 전송효율을 높일 수 있는 위상 코히어런트 통신시스템을 수직 선배열 센서를 이용한 적응 빔형성기 및 적응 등화기 기법을 이용하여 구성하였고, 대표적인 코히어런트 기법인 QPSK 기법에 대하여 다양한 수중 환경에서의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 전송성능을 비교 분석하였다. 수중 음향 채널에서 발생하는 전달손실과 다중경로 수의 증가에 따른 전송성능의 일반적인 저하, 도플러에 의한 전송성능의 저하 등을 확인하였고, 수직 선배열 센서를 이용한 적응 빔형성 기법이 복잡한 수중환경에서 더 나은 성능을 보임을 확인하였다.

다중경로의 영향, 도플러의 변화 등은 수신신호에 왜곡 현상을 발생시켰고, 이것을 극복하기 위하여 수직 선배열 센서 및 적응 빔형성 기법을 이용하는 것 이외에도 여러 가지 기법이 이용되어야 할 것이다. 추후 더 나은 성능의 적응 등화기 기법의 적용과 채널 코딩 기법 등의 적용 뿐만 아니라 여러가지 기법을 적용하여 다중경로의 영향, 채널의 변화 및 도플러의 영향 등을 더욱 줄인다면 실제 수중 음향 통신의 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] M. Stojanovic, J. Catipovic and J. Proakis, "Phase-coherent Digital Communications for Underwater Acoustic Channels", IEEE J. of

- Oceanic Eng., Vol. 19, pp. 100~111, Jan. 1994.
- [2] R. S. H. Istepanian and M. Stojanovic, "High Speed Underwater Acoustic Communications", Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 1~35, 2002.
- [3] M. Stojanovic, "Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communications", IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 21, No. 2, pp. 125~136, April 1996.
- [4] A. Essebbar, G. Loubet, and F. Vial, "Underwater Acoustic Channel Simulations for Communication", Proc. IEEE OCEANS' 94, pp. 495~500, Sept. 1994.
- [5] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, 1983.
- [6] P. C. Etter, Underwater Acoustic Modeling Principles, Techniques and Applications, 2nd Ed., Chapman and Hall, London, 1996.
- [7] V. O. Knudsen, R. S. Alford and J. W. Emling, "Underwater Ambient Noise", J. Marine Res., Vol. 7, pp. 410~429, June 1997.
- [8] J. G. Proakis, Digital Communications, 4th Ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [9] J. G. Proakis, "Adaptive Equalization Techniques for Acoustic Telemetry Channels", IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 16, No. 2, pp. 21~31, Jan. 1991.
- [10] A. D. Waite, Sonar for Practising Engineers, 3rd Ed., John Wiley and Sons, 2002.
- [11] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry", IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 25, pp. 4~27, Jan. 2000.
- [12] W. S. Burdic, Underwater Acoustic System Analysis, 2nd Ed., Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- [13] R. S. H. Istepanian and M. Stojanovic, Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.