



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

LMS 알고리즘 기반의 적응 등화기를
적용한 수중 통신 시스템의 성능개선



2013년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

정 보 통 신 공 학 과

Yang Wu

공 학 석 사 학 위 논 문

LMS 알고리즘 기반의 적응 등화기를 적용한 수중 통신 시스템의 성능개선

지도교수 윤 중 락

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2013 년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

정 보 통 신 공 학 과

Yang Wu

Yang Wu의 공학석사 학위논문을 인준함.

2013년 2월 22일



주 심 공학박사 김 석 태 (인)

위 원 공학박사 박 규 칠 (인)

위 원 공학박사 윤 종 락 (인)

◆제 목 차 례◆

Abstract

I. 서 론	1
II. 수중 음향 통신 채널의 환경요인	3
2-1 다중경로 채널의 특성	3
2-2 손실, 배경잡음, 도플러 효과	6
III. BFSK 및 LMS 알고리즘의 적응 등화기	13
3-1 BFSK방식의 수중 음향 통신 시스템	13
3-2 LMS알고리즘의 적응 등화기	19
IV. 실험 및 결과	24
4-1 수치모의 실험	24
4-2 LMS알고리즘을 적용한 BFSK의 해상실험	28
V. 결 론	36
참 고 문 헌	37

Performance Improvement of the Underwater Communication Using Adaptive Equalizer based on LMS algorithm

Yang Wu

*Department of Information and communications Engineering, Graduate School, Pukyong National
University*

Abstract

Underwater acoustic (UWA) communications have been developed rapidly in recent years. Their applications are beginning to shift from military towards commercial. With the development of the UWA communication, more and more attentions are high speed transmission and high reliability transmission, especially the latter. In the channel of UWA, due to the multipath caused time delay spread. The multipath time delay spread not only limit the channel frequency band, but also leading to Inter-symbol Interference (ISI), constraint the transmission performance of system. In order to reduce the ISI and increase the transmission performance of system can use the adaptive equalizer to reduce ISI.

In this work, image transmission performance of UWA communication systems focuses on Binary Frequency Shift Keying (BFSK) in water, and the ways to remove ISI caused by multipath. We will adopt adaptive equalizer that based on LMS (Least Mean Square) algorithm to improve the transmission performance of system through simulation and experiment.

I. 서 론

수중 음향 통신은 인간이 접근하기 어려운 수중환경에서 의사전달 및 정보전송을 위해 사용된다. 수중 음향 통신을 이용한 시스템은 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)와 UUV (Unmanned Underwater Vehicles)등이 있으며, Link-Quest, Benthos 그리고 KIOST (한국해양과학기술원)에서는 수중 음향 네트워크 구축 및 통신을 위해 수중 음향 통신 모뎀을 개발하고 있다. 그 성능은 15kbps이하이며, 변조방식은 FSK (Frequency Shift Keying) 와 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 방식을 적용하고 있다[1][2].

수중에서는 급격한 산란 및 감쇠로 인해 전파를 이용한 원거리 전송이 제한된다. 그러므로 수중 통신에서는 음향을 이용한 정보전송이 유일한 방법이다. 이런 수중 음향 통신에서 시변성 (time varying)특성의 환경변화로 인해 지상과 같은 수준의 통신을 구현하기에는 많은 기술적 어려움이 있다. 대표적인 수중 음향 통신 시스템에 영향을 주는 요인은 손실 (Loss), 배경잡음 (Ambient noise), 다중경로 (Multipath), 도플러효과 (Doppler effect) 등이 있다[3].

다중경로는 해면과 해저 면의 경계면 반사에 의한 시변성에 기인한 요인으로 수중 음향 통신 채널의 대역폭의 제한과 각 경로 파의 지연에 의한 통신성능의 저하를 일으키는 대표적인 환경요인이다. 이런 다중경로 해수의 불 균일성으로 인한 음파의 굴절, 경계 면에서의 반사특성, 송-수신기간의 전파경로 등이 선행 해석되어야 한

다. 또한 다중경로에 의한 지연확산은 채널의 대역을 제한과 ISI (Inter Symbol Interference)를 증가시키고, 주파수 선택성 (Frequency Selectivity)을 증가시켜, 수중 음향 통신 시스템의 전송 성능을 저하시키게 된다[4].

본 논문에서는 수중 다중경로에서 BFSK (Binary Frequency Shift Keying) LMS알고리즘을 적용한 적응 등화기법 (Adaptive Equalizer)을 통해 ISI에 의한 전송성능 저하를 개선하였다. 성능평가는 수치모의 실험과 광안리 연안의 해상실험을 통해 LMS 알고리즘이 적용되기 전 BFSK의 성능과 LMS 알고리즘이 적용된 후의 성능을 BER (Bit Error Rate)특성 곡선을 통해 비교 확인하였다.



II. 수중 음향 통신 채널의 환경요인

2.1 다중경로 채널의 특성

수중 음향 통신 채널은 시변성과 다양한 환경 요인에 의하여 채널의 특성이 결정된다. 환경 요인 중 해수-해저면 반사에 의한 다중경로는 신호의 진폭과 위상을 변화시키며, 지연확산에 의한 수중 음향 통신 채널의 대역제한과 주파수 선택성 증가, ISI에 의한 오류율을 증가시켜 전송성능을 저하시키는 주요 환경요인이다[5]. 그림 1과 같이 다중경로는 송-수신기의 위치 및 거리, 해면의 변동 상태, 해저 면의 매질, 수심 등에 의해 결정되며, 지연확산을 야기한다.

그림 2는 송-수신기 위치에 따른 수중 다중경로 특성이다. 그림 2(a)는 거리 50m, 송-수신기의 수심 5m에서의 수신신호이며, 그림 2(b)는 거리 200m, 송-수신기의 수심 5m에서의 수신신호이다.

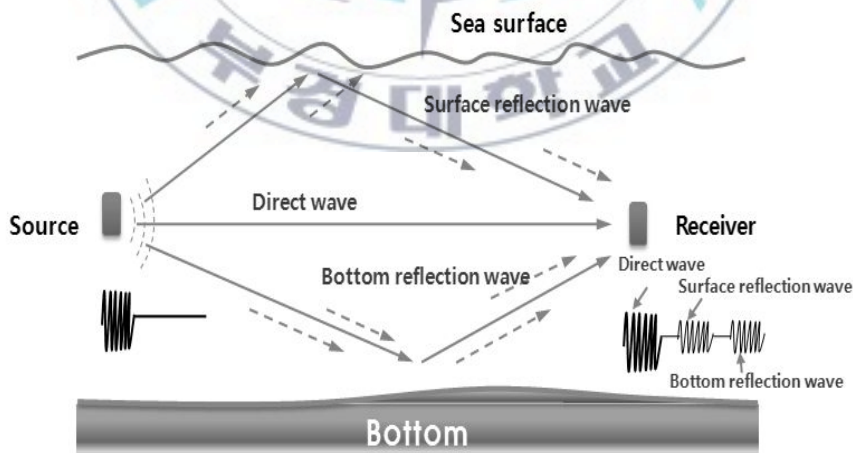


그림 1. 수중 다중경로 채널

그림 2(a)와 같이 상대적으로 근접한 거리는 반사파의 기여 성분이 작아져 지연확산이 짧다. 하지만, 그림 2(b)는 상대적으로 원거리에서 긴 지연확산 특성을 보인다. 따라서 수중 음향 통신 시스템의 다중경로의 지연확산특성에 의한 ISI는 그림 2(b)에 비하여 2(a)가 영향이 작다.

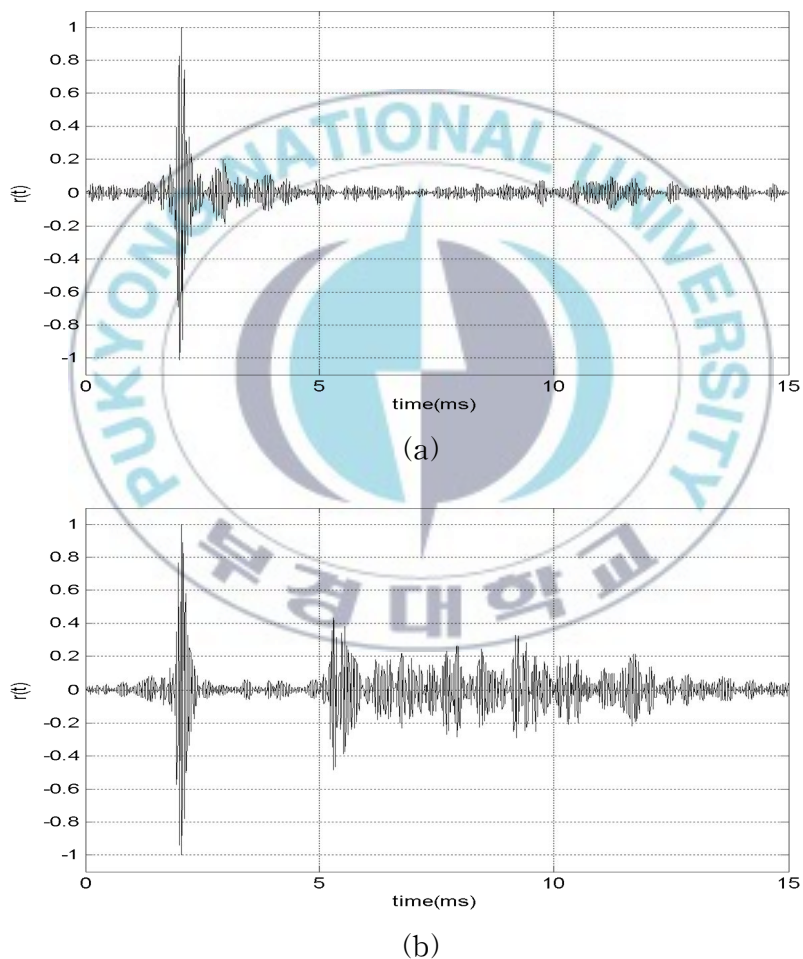


그림 2. 다중경로의 지연확산 특성, (a) 송-수신거리 50m, 수심 5m, (b) 송-수신거리 200m, 수심 5m

이런 다중경로에 영향을 주는 요인은 음속이다. 수중에서 음속은 온도, 염분도 및 압력에 의하여 결정된다. 수심에 따른 음파의 속도 분포는 일반적으로 그림 3과 같으며 위도, 계절 시간 및 기상조건에 따라 바뀌게 된다. 그림 4는 음향채널의 음속구조특징을 여름과 겨울에 따라 나타낸 것으로, 그림 4(a)는 여름의 경우로 수면에서 1525m/s의 음속을 가지며, 수심이 깊어지면 음속은 낮아졌다 다시 증가하는 특성을 보인다. 해면과 해저의 음속 변동폭은 50m/s이다. 그림 4(b)는 겨울의 경우로 수면에서는 1485m/s에서 수심이 증가하게 되면 음속은 낮아지다 1500m에서는 1472 m/s로 변화폭은 13m/s이다. 따라서 여름의 수중음향채널구조의 특성과 겨울의 수중음향채널구조의 특성이 다름을 알 수 있다.

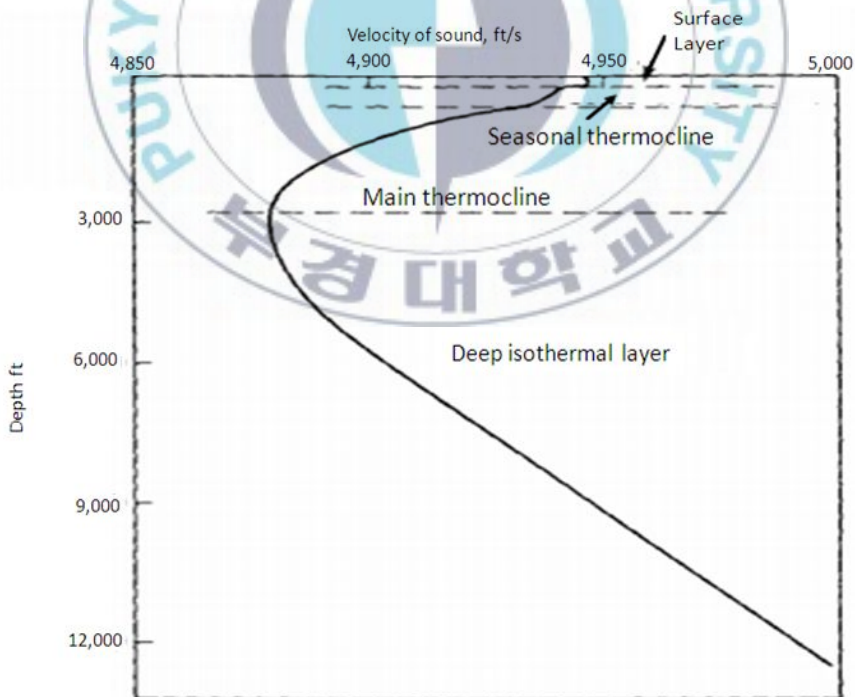
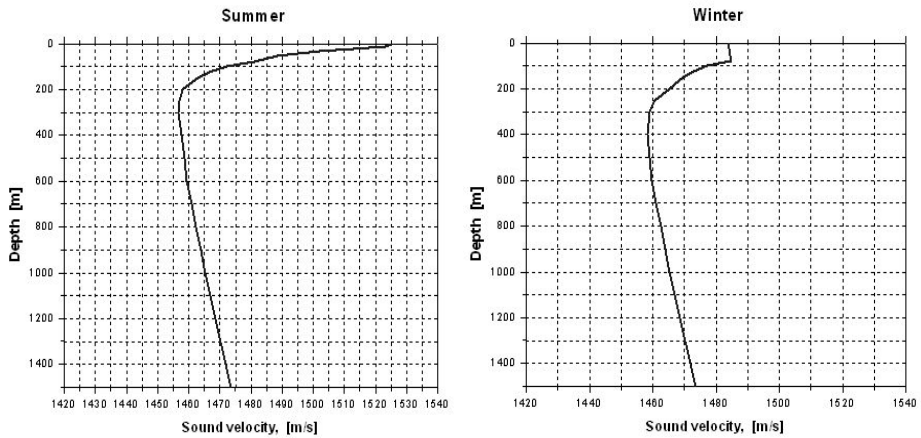


그림 3. 수심에서 따른 음속변화



(a)

(b)

그림 4. 여름과 겨울철 수중음향채널의 음속변화 (a)여름 (b)겨울

2.2 손실, 배경잡음, 도플러 효과

지상에서 널리 쓰이는 고주파 또는 광학에너지를 수중통신에서 사용하지 않는 이유는 수중에서 전자기파의 흡계수가 크기 때문이다. 수중에서 전자기파의 흡계수는 식 (1)과 같다[3].

$$\alpha_E = 3.45 \times 10^{-2} \sqrt{f} \quad (1)$$

여기서, α_E 는 전자기파의 흡계수(dB/km)이고, f 는 주파수(Hz)이다.

반면 수중에서 음파의 흡계수는 식 (2)와 같다.

$$\alpha_A = 10.3 \times 10^{-3} \sqrt{f^2} \quad (2)$$

여기서, α_A 는 음파의 흡계수(dB/km)이고, f 는 주파수(kHz)이다.

위의 식(2)와 식(3)과 같이 지상의 전자기파 및 수중의 음파는 주파수가 증가할수록 흡계수가 증가한다. 따라서 수중에서는 전자기파에 비해 상대적으로 낮은 손실의 음파가 수중 음향 통신에 적용되고 있다. 그림 5는 수중에서 음파와 전자파에 따른 흡계수 특성이다. 주파수의 증가에 따라 전자기파가 음파에 비해 상대적으로 감쇠계수가 증가됨을 보인다.

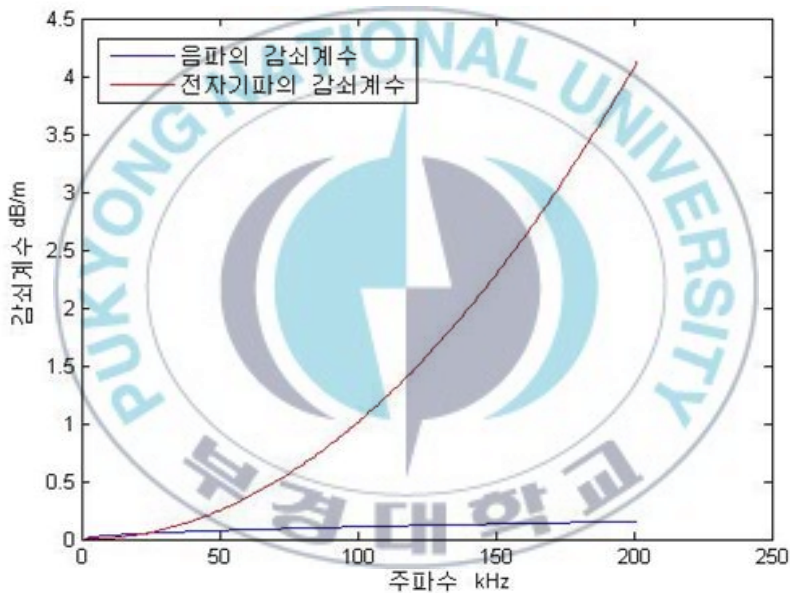


그림 5. 수중에서 음파와 전자파의 흡계수 특성

수중에서 음파의 손실은 해면이나 해저의 경계면이 없게 가정하여 음파가 모두 방향으로 발산하는 구면파 손실과 완전 반사 조건의 해면과 해저 경계면이 있고 가정한 원통형 손실로 구분된다. 구면파 손실과 원통형 손실은 각각 식 (3)과 (4)와 같다.

$$TL_{ss} = 20 \log r \quad (3)$$

$$TL_{cs} = 10 \log r \quad (4)$$

여기서, r 은 전달거리(m)이다.

수중 환경은 수심별, 지역별로 따르기 때문에 다양하게 나타나며 흡계수에 영향이 있다. 매질 흡수에 대한 전달손실은 전달거리에 비례하며 식 (5)와 같이 표현된다. 발산현상에 의한 음향에너지의 감소하는 흡수현상에 의한 감소보다 근거리 전파현상 해석 중요하며, 원거리 전파 현상 해석에는 흡수현상이 음향에너지의 감소를 지배한다[7].

$$TL_a = \alpha r \quad (5)$$

여기서, α 는 흡수계수(dB/km)이며, r 은 거리(km)이다.

따라서 총 손실은 식 (6)과 같이 주어진다.

$$TL = 20 \log r + \alpha r \quad (6)$$

그림 6은 주파수에 따른 흡수손실의 특성이며, 그림 7은 주파수 별흡수손실을 고려한 전파손실이다. 그림 6에서 주파수가 증가함에 따른 흡수 손실이 증가되며, 수온 또한 흡수손실에 영향을 준다. 그림 7에서 전파손실은 1kHz-20kHz 변화에서는 약 10dB의 변화가 발생하며, 100kHz에서는 약 70dB의 감소가 발생한다.

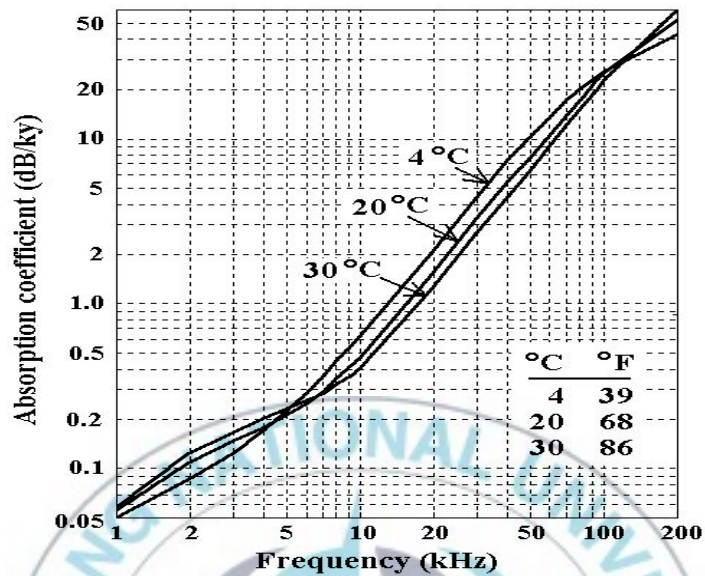


그림 6. 해수온도에 따른 주파수에 따른 흡수손실[3]

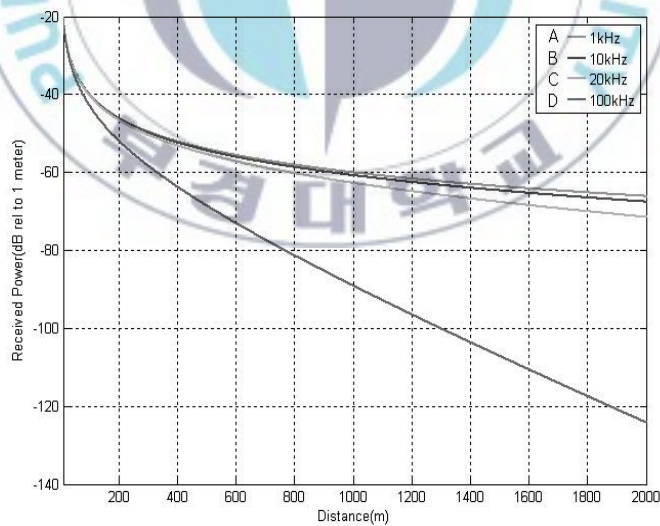


그림 7. 주파수별 흡수손실을 고려한 구면전파손실,

A:1kHz, B:10kHz, C:20kHz, D:100kHz

수중 음향 통신의 신호대 잡음비에 영향을 미치는 요인은 배경잡음이다. 수중의 배경잡음은 관측 장비에 영향을 미치는 잡음(Ambient Noise), 자체소음(Self Noise), 반향소음으로 구분할 수 있다.

해양 환경 소음은 소나(SONAR) 시스템 사용자가 관심을 갖고 있는 목표 이외의 각종 소음원이다. 자체 소음은 소나시스템을 탑재하고 있는 선박이 발생하는 소음을 말한다. 그림 8은 심해와 천해의 배경잡음의 특성을 보여주는 것으로, 선박의 크기, 풍속 그리고 해상상태에 따라 결정이 된다. 천해의 배경잡음으로 통행선박과 해상상태, 풍속등과 연안산업시설에 의한 잡음이 부가적으로 혼입되기 때문에 심해보다는 배경잡음이 높게 나타난다. 이것은 항만에 정박되어 있는 선박과 조선소 및 기타 연안시설에서의 잡음이 지면을 통해 수중으로 전파되기 때문이다[3]. 따라서 배경잡음의 특성에 의해 저주파를 사용할 경우 높은 파워의 전송출력이 요구됨을 알 수 있으며, 수중음향통신시스템의 전송주파수를 결정에 잡음특성을 고려하여 낮은 잡음특성의 주파수를 선택하여 전송할 경우 잡음과 전송출력의 문제를 해결 할 수 있다. 일반적으로 정보전송에 수중음향통신시스템의 경우 배경잡음이 낮은 20kHz-50kHz의 배경잡음이 낮은 주파수 대역이 선택된다.

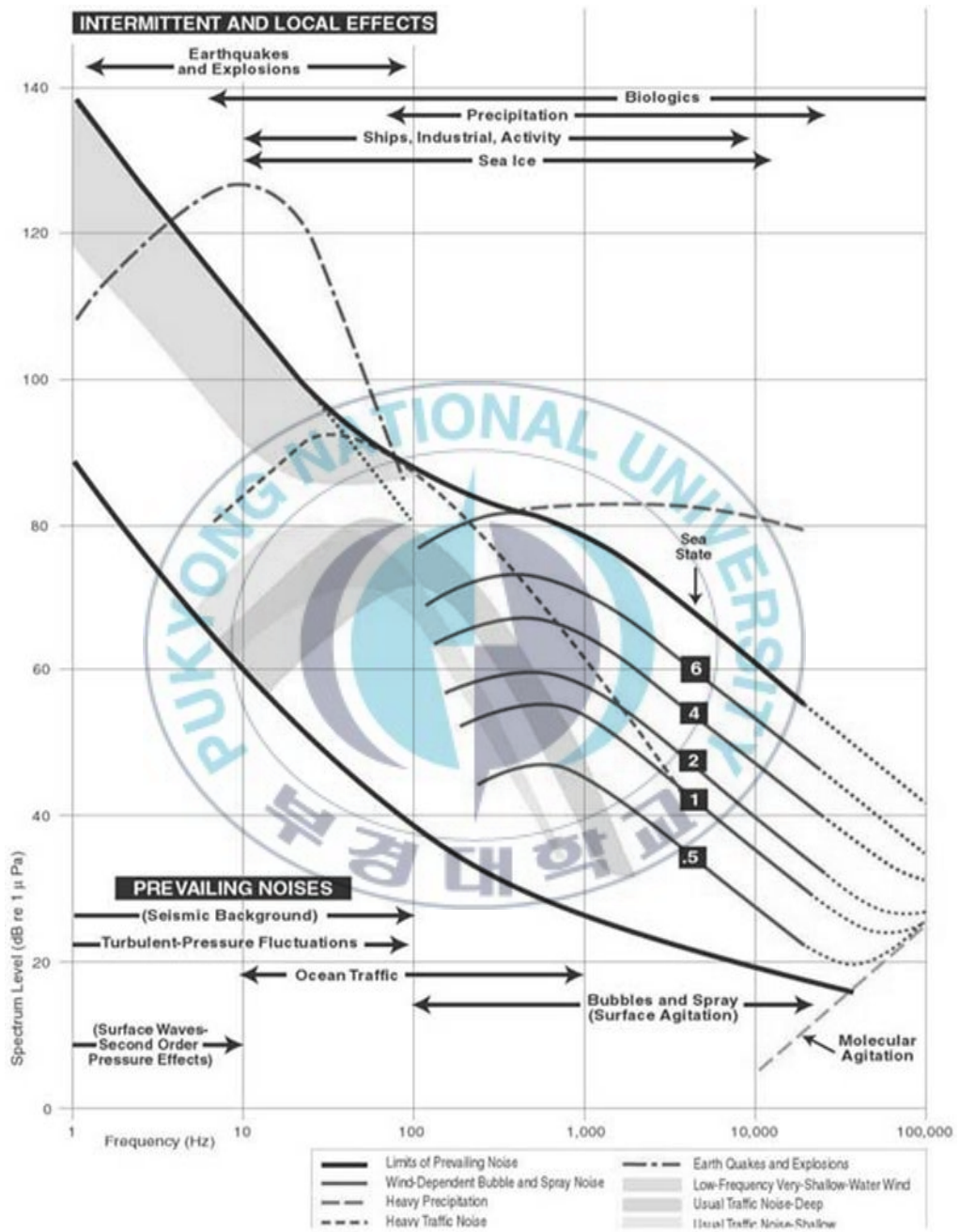
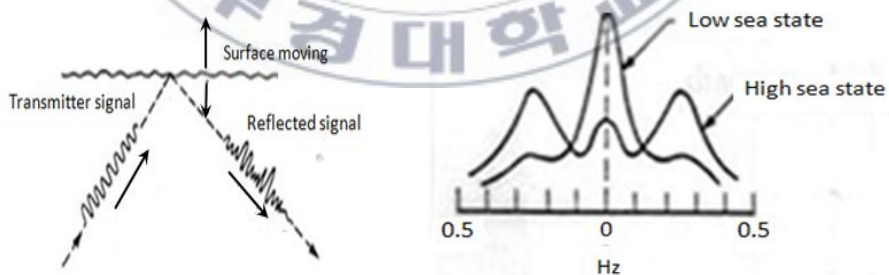


그림 8. 심해와 천해의 배경잡음 특성

수중의 환경적 변동요인 중 도플러 효과는 송수신기의 이동에 의하여 발생한다. 특히 그림 9(a)와 같이 해면의 상하 교란 운동과 송-수신기의 이동 등에 의하여 발생한다. 해면의 상하 교란 운동에 의하여 발생하는 도플러 효과는 그림 9(b)와 같이 전송 주파수를 중심으로 스펙트럼(spectrum)이 양측파대로 관측된다[3]. 스펙트럼의 변동 대역폭은 풍속 에 관련되어 식 (7)과 같이 나타난다. 이러한 특성은 전송 주파수가 고주파수인 경우 통신시스템의 성능을 좌우할 정도로 심각한 문제로 알려져 있다.

$$B_{doppler} = 2f_w \left[1 + \frac{4\pi f_0 \cos \theta_0}{c} h_w \right] \quad (7)$$

여기서 $f_w = 2/w [Hz]$ 는 파도 주파수, $h_w = 0.05w^{5/2} [m]$ 는 파고, f_0 는 반송파의 주파수, θ_0 는 입사각이며, c 는 음속이다.



(a) 송신신호 변화

(b) 스펙트럼 확산특성

그림 9. 해면운동에 의한 도플러 효과[3]

III. BFSK 및 LMS 알고리즘의 적응 등화기

3.1 BFSK방식의 수중 음향 통신 시스템

본 논문에서는 BFSK(Binary Frequency Shift Keying) 변조방식을 적용하였다. BFSK 방식은 신호의 발생이 간단하며, 비 동기식과 동기식 변·복조로 구성할 수 있다. 또한 단순하고 널리 사용되는 변조한 형식으로 저속 모델에 널리 사용하며, 변조방식은 베이스밴드 신호의 펄스 값이 0이나 1에 따라 주파수가 변화되는 주파수 변조방식이다[8][9].

BFSK 변조방식의 송신기는 2개의 반송파를 이용하여 디지털 정보 “0” 또는 “1”에 대응하여 송신한다. BFSK의 변조신호는 식 8과 같다[10].

$$s(t) = A \cos(w_c t + w_d \int_{-\infty}^t D(t') dt' + \theta) \quad (8)$$
$$D(t) = \{1, b_k = 1\}, \{-1, b_k = 0\}$$

BFSK의 기본 원리는 그림 10과 같이 주어진다. BFSK 방식의 수중 음향 통신 시스템의 구성도는 그림 11과 같으며, 이진 신호 “0” 또는 “1”은 입력신호를 변조하여, BFSK 변조방식으로 변조 후 수중 다중경로 채널로 전송한다. 수신신호가 필터를 통하여 BFSK 방식으로 복조하고 LMS 등화기를 거쳐 송신정보를 출력된다.

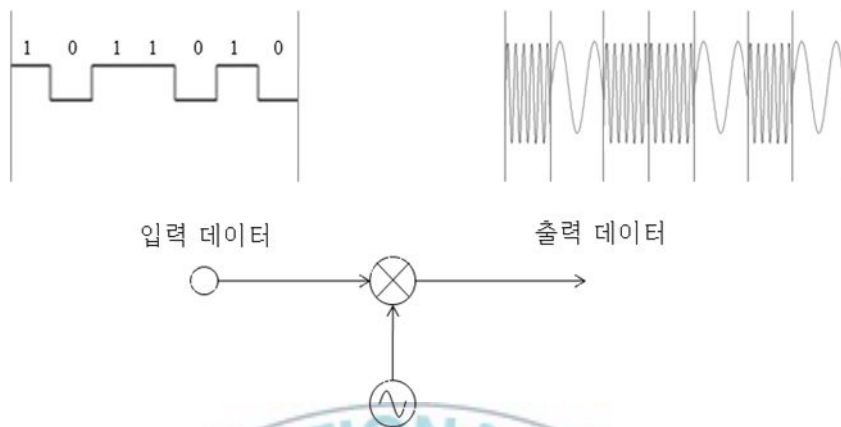


그림 10. BFSK의 원리

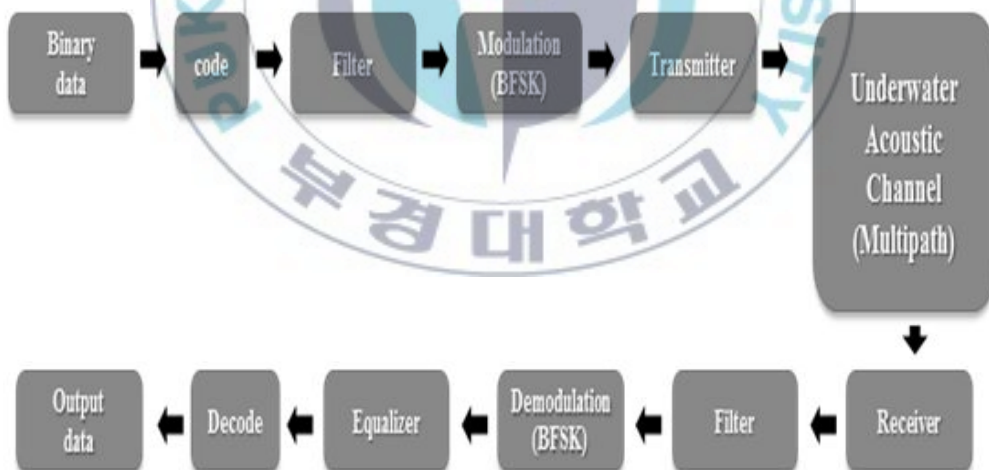


그림 11. BFSK방식을 적용한 수중 음향 통신 시스템의 구성도

그림 11의 구성도에서 변조 된 등가 저역통과 신호 $s_l(t)$ 는 송신기를 통해 수중음향 통신 채널로 송신되며, 송신신호 $s(t)$ 는 식 (9)와 같다[5].

$$s(t) = Re[s_l(t)e^{j2\pi f_c t}] \quad (9)$$

만약, 수중 다중경로 채널에서 배경잡음이 없다고 가정할 경우, 채널의 임펄스 응답 $h_c(t)$ 는 식 (10)과 같다[5].

$$h_c(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} \delta(t - \tau_n) + R(t)e^{-kt} \quad (10)$$

여기서, 첫째 항은 직접파를 포함한 이산적인 복 반사로, α_n 는 n 차 다중 경로 신호의 진폭으로 경계면에서의 반사손실, 경로손실 및 흡수손실에 의해 결정되며, τ_n 은 n 차 다중경로 지연시간이다. 둘째 항은 연속적인 산란파에 의한 복 반사를 나타내며 수면의 교란이나 수중부유생물체에 기인된다. $R(t)$ 는 랜덤 진폭 및 위상이며, k 는 지연시간을 결정하는 감쇠상수이다[5].

식 (10)의 수중 다중경로 채널을 통해 수신기로 수신되는 신호 $r(t)$ 는 식 (11)과 같다. 식 (11)의 둘째 항의 연속적인 산란파에 의한 복 반사는 무시하였다.

$$\begin{aligned}
r(t) &= \text{Re} \left(\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} D_k p(t-kT) e^{j2\pi f_c t} \right] \right) \\
&= \text{Re} \left(\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_0 D_k p(t-kT) \right] e^{j2\pi f_c t} \right) + \text{Re} \left(\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} D_k p(t-kT) \right] e^{j2\pi f_c t} \right)
\end{aligned} \tag{11}$$

식(11)의 1항은 직접파 성분이고, 2항은 다중경로에 의해 ISI를 야기하는 반사파 성분이다. 해양환경이 시간적으로 크게 변화하지 않아 다중경로의 경로길이가 변화하지 않는다면 진폭 α_n 은 일정하다고 할 수 있다. 그러나 반송주파수가 큰 경우 τ_n 의 미소변화에 의해서도 위상은 크게 변화하게 되어 신호대역 내에서 다중경로에 의한 전체신호의 크기는 보상간섭 혹은 역 위상간섭에 의해 큰 변화율로 변화하게 된다. 따라서 다중경로에 의해 수신된 신호는 진폭 및 위상 변동이 일어나 지연확산되어 수신된다. 수신신호의 지연확산에 따른 지연확산 유효치는 τ_{rms} 는 식 (12)와 같다[11].

$$\tau_{rms} = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \tag{12}$$

여기서, $\bar{\tau}$ 와 $\bar{\tau^2}$ 는 평균 초과 지연 (mean excess delay) 과 평균 제곱 지연 (mean square delay)으로 식 (13)과 같다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_n P(\tau_n) \tau_n}{\sum_n P(\tau_n)}, \quad \bar{\tau^2} = \frac{\sum_n P(\tau_n) \tau_n^2}{\sum_n P(\tau_n)} \tag{13}$$

여기서, $P(\tau_n)$ 는 n 차 경로의 전력밀도이다.

지연확산 유효치 τ_{rms} 와 채널의 대역폭 B_c 의 관계는 식 (14)로 정

의된다.

$$B_c \approx \frac{1}{5\tau_{rms}} \quad (14)$$

따라서 채널의 대역폭 B_c 가 기저대역 신호의 대역폭 B_s 보다 넓다면, 송신 신호의 모든 주파수 성분은 왜곡이 없이 수신된다. 반대로 채널의 대역폭 B_c 가 기저대역 신호의 대역폭 B_s 보다 좁다면, 이로 인한 ISI (Inter Symbol interference)가 발생되어 지연확산 의한 주파수 선택적 채널 (frequency selective channel) 특성을 가지게 된다[11]. 그림 12는 식 (14)를 도식한 것으로 신호의 대역과 채널의 대역에 대한 관계를 설명하고 있다. 그림 13은 해상실험의 결과로 수중 다중경로 환경에서 수신신호의 지연확산과 채널의 대역 특성을 분석한 결과이다. 그림 13(a)는 직접파와 해면반사파가 포함된 시간파형이이며, 그림 13(b)는 각각의 수신신호의 스펙트럼이다. 수면 반사파가 포함된 신호는 지연확산 된 수면 반사파의 영향으로 신호대역(직접파 신호대역)에서 주파수 선택성이 보인다. 그림 13(c)와 7(d)는 수신신호를 힐버트 변환(Hilbert transform)하여 구한 등가 저역통과 신호의 자기상관 함수와 등가 저역통과 신호의 스펙트럼 특성이다. (e)는 직접파와 직접파 및 해면반사파가 포함된 수신신호의 스펙트럼으로 지연확산 유효치에 따른채널의 대역폭은 416Hz로 제한되며, 주파수 선택성이 존재한다.

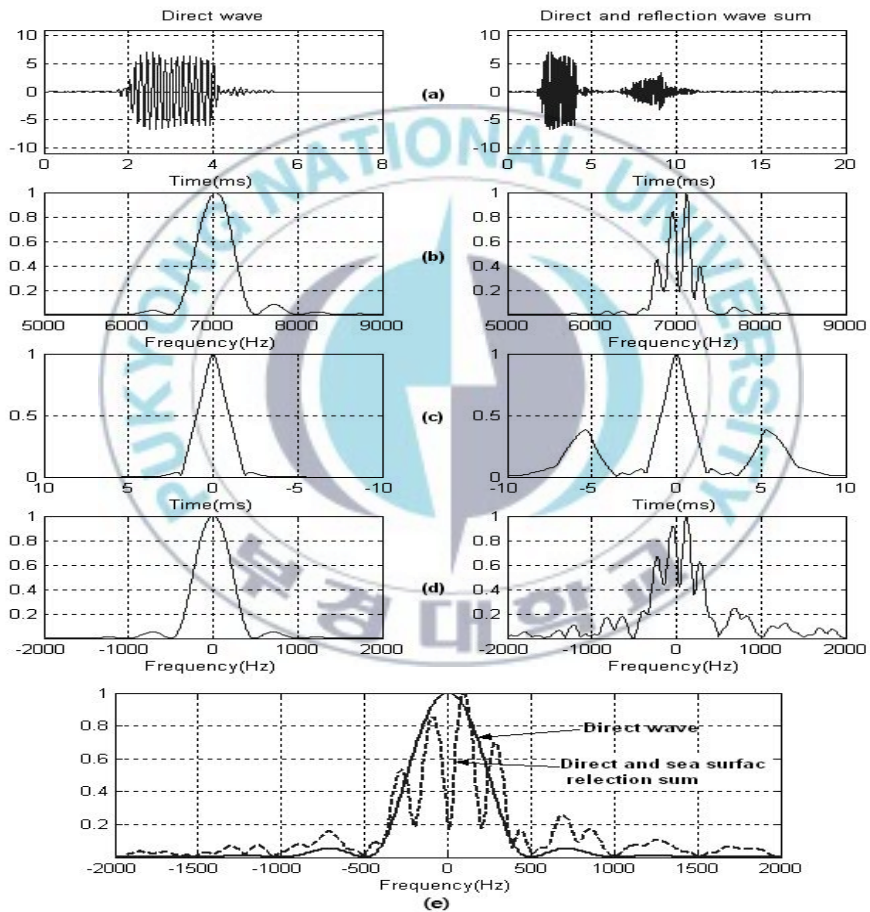


그림 13. 지연확산에 의한 코히어런스 대역 특성, (a) 수신신호, (b) 수신신호 스펙트럼, (c) 등가 저역통과 신호의 자기상관 함수, (d) 등가 저역통과 신호의 스펙트럼, (e) 주파수 선택성

3.2 LSM 알고리즘의 적응 등화기

수중 음향 통신시스템에서 다중경로는 지연확산에 의한 대역제한 및 ISI, 주파수 선택성 증가로 인해 시스템 성능을 저하시킨다. 수중음향채널특성 변화와 계산복잡성에 대하여 고려하여야 수중음향 통신시스템에 적용되는 대표적인 알고리즘방식이 LMS (Least Mean Square)로 가장 대중적인 알고리즘의 하나이며, LMS방식의 등화기는 수렴속도가 늦지만 시스템에 적용하기 쉬워 많이 사용하는 알고리즘으로 ISI억압하는데 사용되는 방식이기도 하다.

LMS 알고리즘은 training sequence를 이용하여 transversal 필터에서 다중 채널을 추정하고 계수를 사용하여 다음에 수신되는 데이터의 다중경로에 의한 왜곡을 보상한다. 그림 14는 LMS (Least Mean Square) 알고리즘의 구성도이다[12].

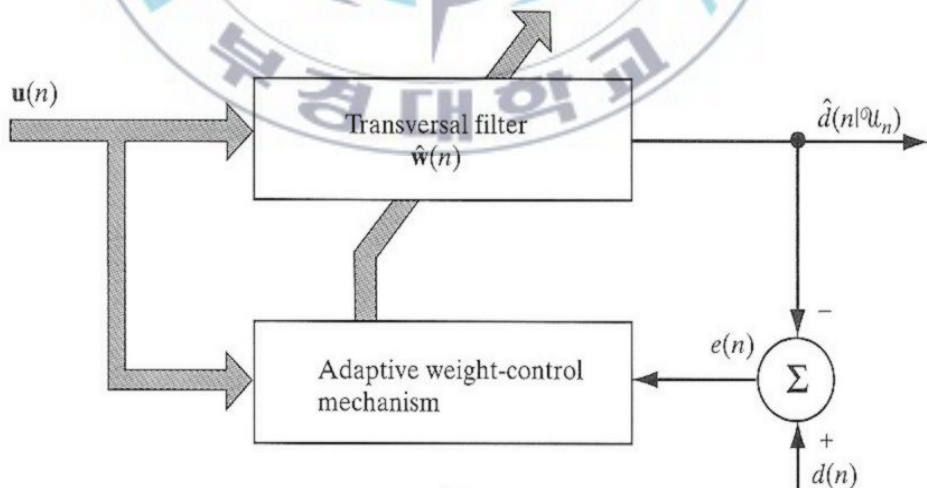


그림 14. Least Mean Square (LMS)

기본적인 LMS 알고리즘은 갱신 텡-가중치, 추정에러, 필터 출력 등의 함수로 구성이 되며, 갱신 텡-가중치는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w(n+1) = [w(n) + k(n)e^*(n)] \quad (15)$$

추정에러 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (16)$$

필터 출력은 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = w^H(n)u(n) \quad (17)$$

여기에서, $d(n)$ 은 희망응답이며, $u(n)$ 은 텡 입력벡터이다.

등화기의 텡 가중 계수는 평균자승에러 최소화의 표준에 충족하게 조정된 귀납적함수로 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min(E[e(k)]^2) = \min(E[d(k) + y(k)]^2) \quad (18)$$

그림 14에서 보는 바와 같이 선형등화기의 추정은 식 19와 같다.

$$y(k) = \sum_{j=-k}^k w_{ff-j} u(n-j) \quad (19)$$

여기서, w_{ff-j} 는 등화기의 탭 가중 계수이다.

그림 15(a)는 Transversal 필터의 구성요소이며, 그림 15(b)는 Adaptive weight control의 구성요소이다.

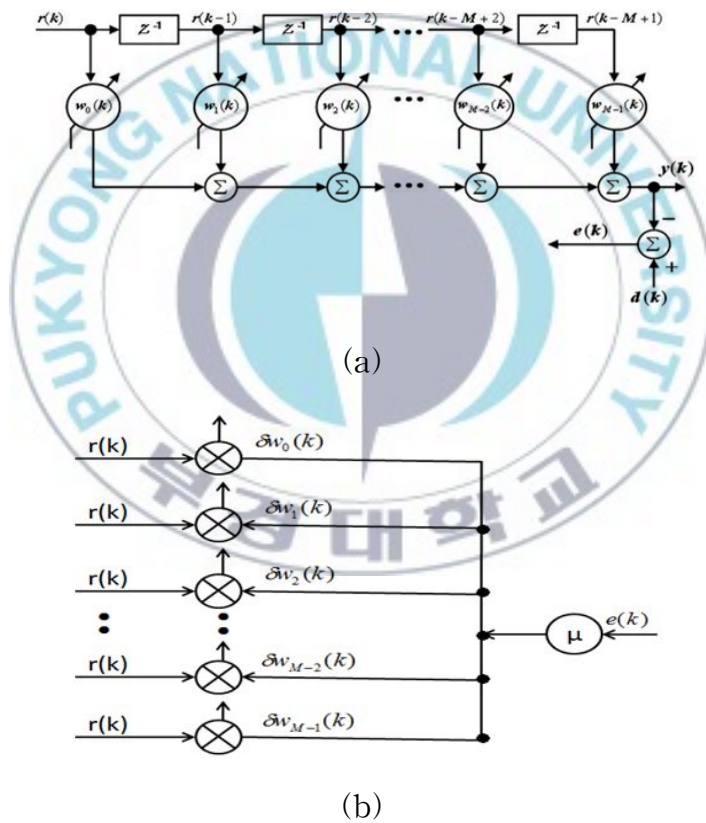
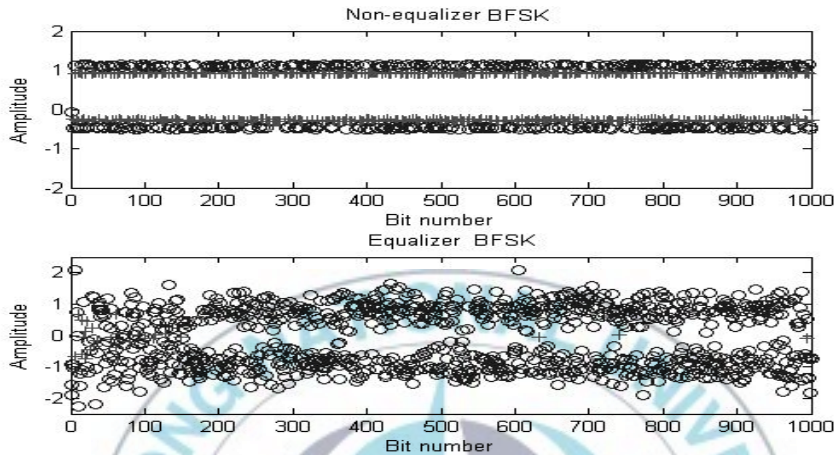
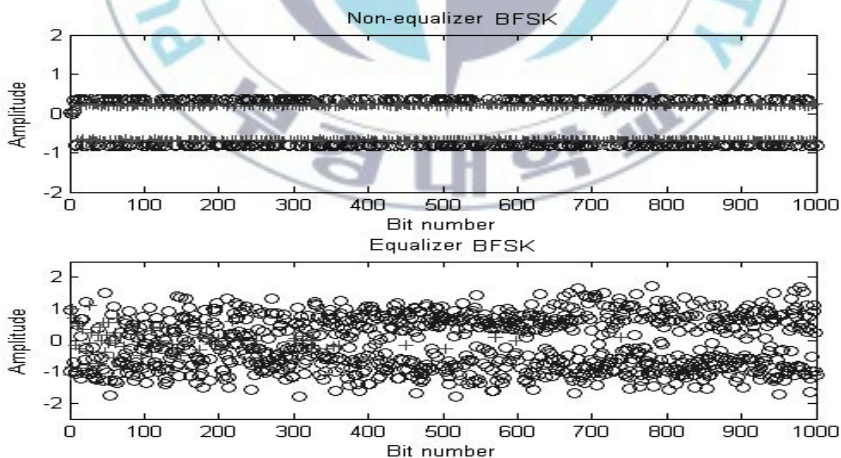


그림 15. (a) transversal 필터의 구성 요소,
(b) adaptive weight control의 구성 요소

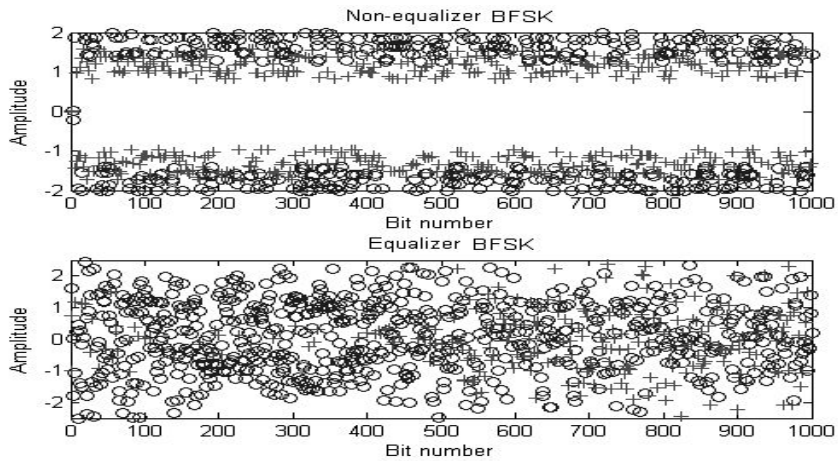
그림 16은 BFSK의 LMS 알고리즘 적용 전과 후의 성능을 수치
 모의 한 결과이다. 그림 16과 같이 적응 등화기 적용 후 성능이 개
 선됨을 알 수 있으며, 표 1은 각 거리에 따른 비트오류율이다[12].



(a) 거리 10m에서 BFSK적응등화기 성능
 (사용 전과 후의 BFSK 성능(각각의 비트오류:509,3))



(b) 거리 500m에서 BFSK적응 등화기 성능
 (사용 전과 후의 BFSK 성능(각각의 비트오류:760,16))



(c) 거리 1000m에서 BFSK적응 등화기 성능
(사용 전과후의 BFSK 성능(각각의 비트오류:860,328))

그림 16. 거리에 따른 BFSK의 등화기 적용 전과 적용 후의 성능

표 1. BFSK방식의 적응 등화기 적용 전과 적용 후의 비트 오류율

Range[m]	Without adaptive equalizer(bit error rate)	With adaptive equalizer(bit error rate)
10	0.509	0.003
500	0.760	0.016
1000	0.860	0.328

IV. 실험 및 결과

4.1 수치모의 실험

다중경로 환경에서 BFSK방식의 성능을 수치모의 실험하였다. 수치모의 실험에서 BFSK방식에 LMS 알고리즘을 적용하기 전과 적용 후의 성능개선을 확인하였다. 그림 17은 수치모의 구성도이다. 변조방식은 BFSK방식이며, 수심은 150m, 송-수신기의 거리는 100m, 송신기의 수심은 5m, 수신기의 수심은 97m이다. BFSK변조방식의 마크 주파수는 20kHz와 스페이스 주파수는 25kHz, 전송속도는 250bps이다. 표 2는 수치모의 실험의 파라메타이다.

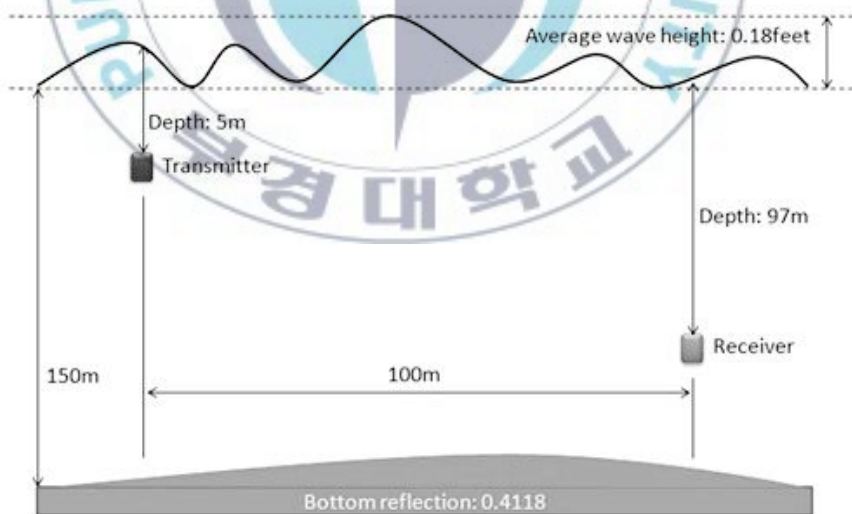


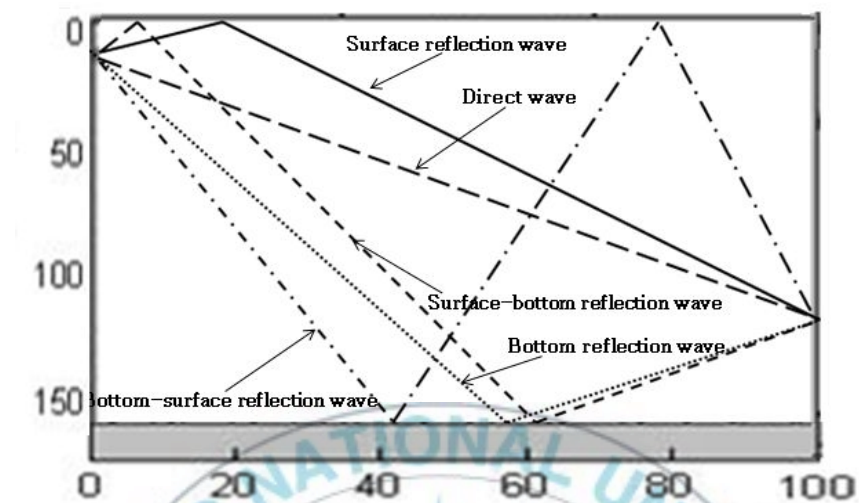
그림 17. 수치모의 구성도

표 2. 수치모의 실험 파라메타

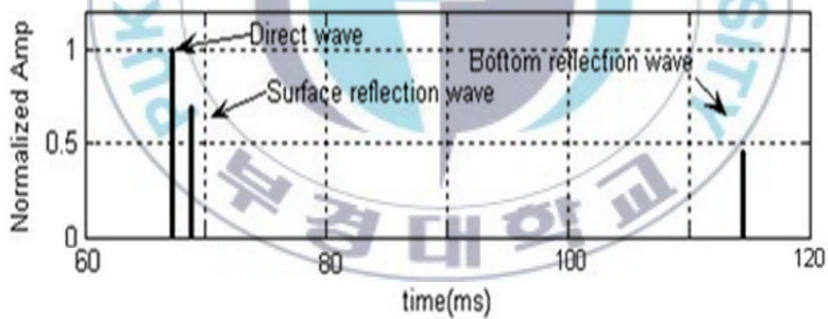
Modulation	BFSK
Depth(m)	150m
Transmitter and receiver range(m)	100m
Source and receiver depth(m)	5m, 97m
Carrier frequency	20kHz, 25kHz
Wave height	0.18feet
bps	250bps

그림 18(a)는 직접파, 수면의 반사파, 수면-저의 반사파, 수저-면의 반사파에 대한 고유음선 (Eigen Ray)이다. 지연시간은 그림 18(b)와 같이 주어진다. 직접파 도달 후 수면의 반사파가 1.6ms 지연되어 수신된다. 수저의 반사파는 47ms 지연되어 수신된다. 수저 저질은 모래로 수저의 반사계수는 4로 가정하였다.

LMS 알고리즘에서 중요한 요소는 step-size(μ)이며, step-size(μ)는 알고리즘의 수렴속도를 제어한다. 따라서 LMS 알고리즘을 사용한 적응 필터에서는 실험을 통해 최적 step-size(μ)값을 찾는 것이 중요하다. 그림 19에서 step-size(μ)에 따른 수렴속도가 다른 특성으로 $\mu=0.1$ 일 때 약 20bit에서 수렴하며, $\mu=0.008$ 일 때 약 100bit에서 수렴한다. 그림 20은 LMS 적응 등화기를 적용 후 오차의 변화이며, 그림 21은 SNR에 따른 BFSK 변조방식의 LMS 적응 알고리즘을 적용 전후의 BER 특성을 비교한 것이다. 그림 21에서 LMS 적용 후 성능이 개선됨을 확인하였다.

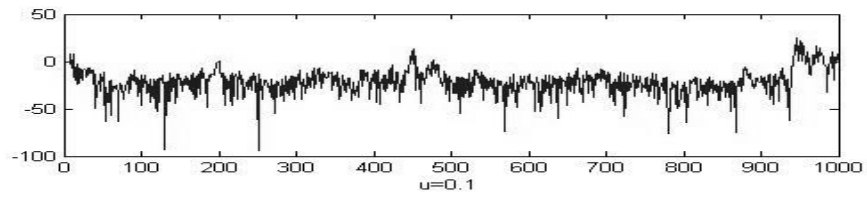


(a) 고유음선

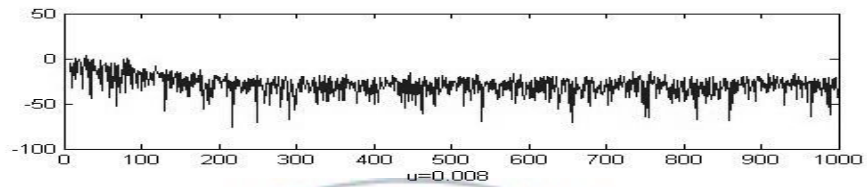


(b) 지연시간

그림 18. 송수신의 거리 100m에서의 고유음선과 지연시간 특성



(a)



(b)

그림 19. step-size(μ)에 따른 수렴속도, (a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.08$

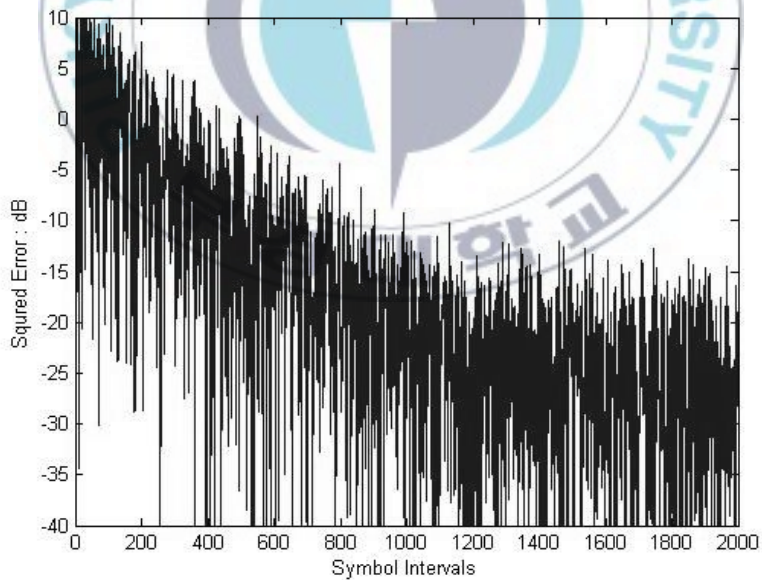


그림 20. LMS 적응 등화기 적용 후의 오차 변화

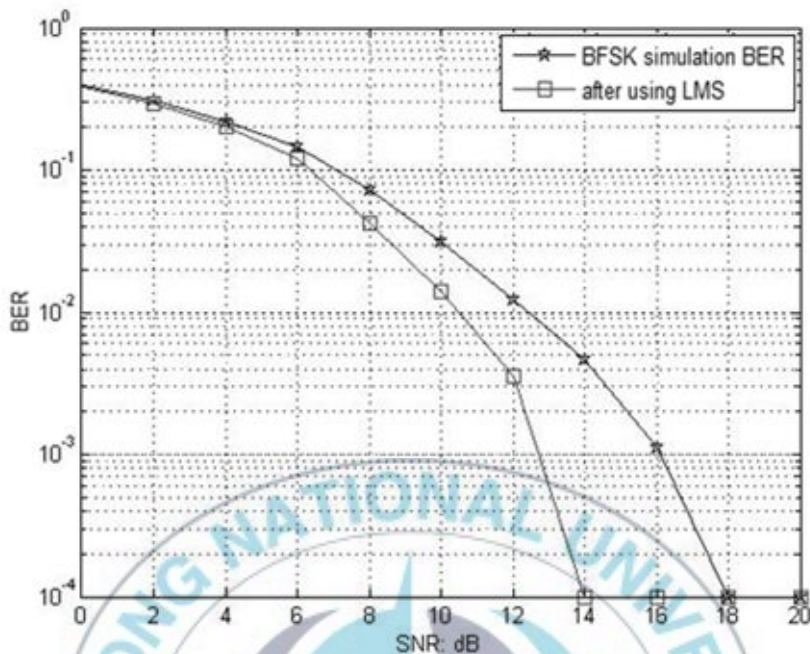


그림 21. BFSK방식의 적응 등화기 적용 전과 후의 BER 특성

4.2 LMS알고리즘을 적용한 BFSK의 해상실험

LMS알고리즘을 적용한 BFSK의 성능을 평가하기 위해 그림 22와 같이 해상 실험하였다. 변조방식은 BFSK 방식으로 거리는 50m, 100m, 200m, 송신기의 수심은 7m, 수신기의 수심은 5m, 20m로 하였다. 다중경로 특성을 분석하기 위해 LFM (Liner Frequency Modulation)을 이용하였다. 표 3은 해상실험의 파라메타이며, 그림 23은 실험해역의 수심에 따른 음속과 온도로 수온은 16°에서 9°로 수심에 따른 변화하였으며, 이에 따른 음속은 그림 22(b)와 같이

1508 m/s에서 1488 m/s로 변화하였다.

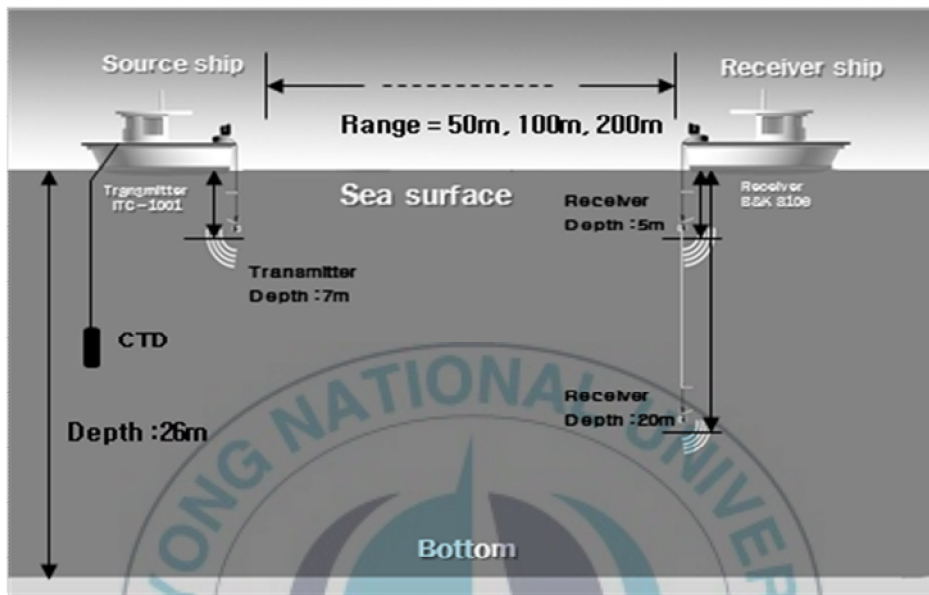


그림 22. 해상실험의 구성도

표 3. 실험의 파라미터

Modulation	BFSK, LFM
Depth(m)	26m
Transmitter and receiver range(m)	50m, 100m, 200 m
Receiver depth(m)	5m, 20m
Bottom sediment	sandy mud
Transmission data	Image (50 × 50) 8bit (20,000bit)

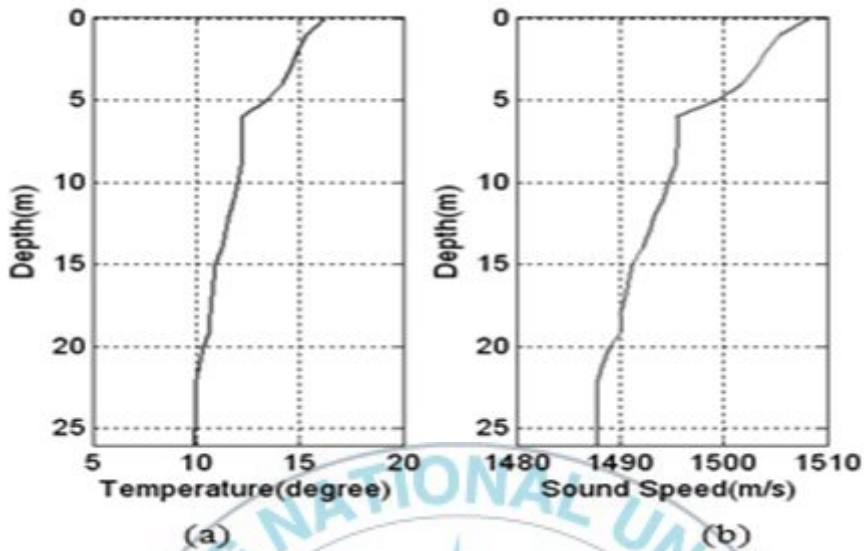
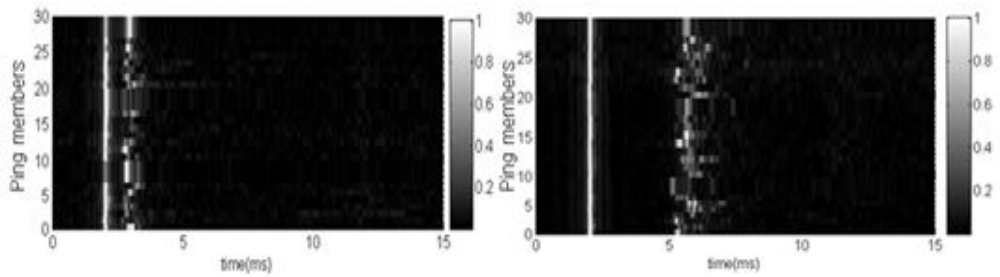


그림 23. 수심에 따른 (a) 온도, (b) 음속

이미지 전송 성능 실험에서 채널의 다중경로 특성을 확인하기 위하여 다중경로 환경 요인분석에 사용한 LFM 신호를 이용하였다. 송-수신기의 거리는 50m, 100m, 200m, 그리고 수신기의 수심 5m, 20m로 응답특성은 그림 24와 같다.

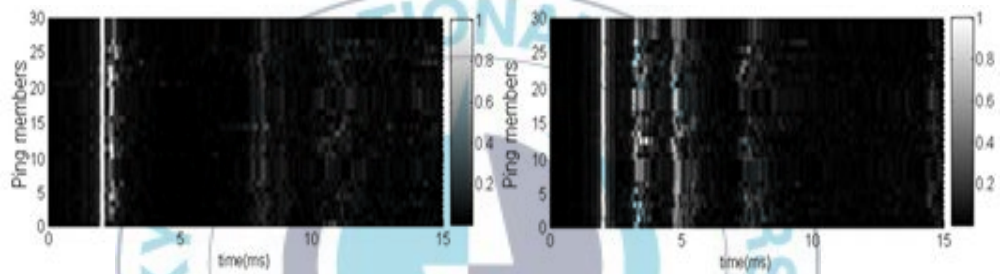
표 4는 각 거리별 수신신호에 대한 RMS 지연확산과 채널 대역폭을 추정한 결과이다. 실험을 통하여 수심 5m에서 거리가 증가할수록 채널의 대역폭이 감소되며, 송-수신기의 거리가 50m, 수심은 5m에서 지연확산 0.0610으로 채널 대역폭 346Hz로 상대적으로 넓은 대역폭을 가진다.



(a) 수심 5m

(b) 20m

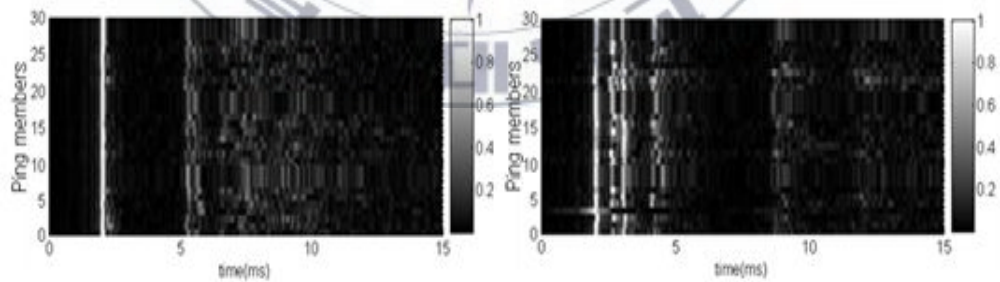
송신기 거리 50m



(a) 수심 5m

(b) 20m

송신기 거리 100m



(a) 수심 5m

(b) 20m

송신기 거리 200m

그림 24. 송신기 거리 및 수심에 따른 채널 응답 특성

표 4. 수심과 거리에 따른 RMS 지연확산과 코히어런스 대역폭

Transmitter-receiver range(m)	Receiver depth(m)	Effective delay spread(ms)	Coherence bandwidth(Hz)
50	5	0.610	346
	20	1.711	117
100	5	1.623	123
	20	1.934	103
200	5	1.843	109
	20	1.338	149

그림 25, 그림 26, 그림 27은 각각의 거리와 수심에 따른 이미지 전송성능의 결과이다. 그림 25는 거리 50m, 수심 5m, 20m에서 이미지 전송결과로 표 5와 같이 거리 50m, 수심 5m에서 적응 등화기 적용 전 BER(Bit Error Rate)은 0.071이며, 적용 후 BER은 0.021이다. 수심 20m에서는 적용 전 0.041이며, 적용 후 0.019로 성능이 개선되었다. 그림 26과 표 6은 거리 100m, 수심 5m, 20m에서 이미지 전송과 적응 등화기 적용 전과 후의 BER이다. 거리 100m, 수심 5m에서 적응 등화기 적용 전 BER(Bit Error Rate)은 0.037이며, 적용 후 BER은 0.007이다. 수심 20m에서는 적용 전 0.2이며, 적용 후 0.122로 성능이 개선되었다. 그림 27과 표 7은 거리 200m, 수심 5m, 20m인 경우로 적응 등화기 적용 전 각각 BER(Bit Error Rate)은 0.114, 0.505이며, 적용 후 BER은 0.069, 0.404로 성능이 개선되었다.

따라서 BFSK방식을 이용한 수중 음향 통신 시스템의 전송성능 개선에서 LMS 알고리즘을 적용한 적응 등화기가 성능개선에 효과적임을 확인하였다.

수심(m)	LMS 적용 전	LMS 적용 후
5		
20		

그림 25. 거리 50m에 대한 이미지 전송성능

표 5. 거리 50m에 대한 적응 등화기 성능

수심(m)	LMS 적용 전	LMS 적용 후
5	0.071	0.021
20	0.041	0.019

수심(m)	LMS 적용 전	LMS 적용 후
5		
20		

그림 26. 거리 100m에 대한 이미지 전송성능

표 6. 거리 100m에 대한 적응 등화기 성능

수심(m)	LMS 적용 전	LMS 적용 후
5	0.037	0.007
20	0.2	0.122

수심(m)	LMS 적용 전	LMS 적용 후
5		
20		

그림 27. 거리 200m에 대한 이미지 전송성능

표 7. 거리 200m에 대한 적응 등화기 성능

수심(m)	LMS 적용 전	LMS 적용 후
5	0.114	0.069
20	0.505	0.404

V. 결 론

본 논문은 수중 음향 채널에서 수중 통신 시스템의 전송 성능을 개선을 개선하기 위해 LMS알고리즘을 적용한 적응 등화기의 성능을 평가하였다.

수중 음향 통신 채널의 다중경로에 의한 지연확산이 채널의 대역폭을 제한하고, ISI (Inter Symbol Interference)를 증가시켜 성능을 저하시킨다.

다중경로에 대한 ISI에 대한 성능저하를 개선하기 위한 LMS 알고리즘의 적응 등화기 적용을 수치모의 실험과 해상실험을 통해 성능을 확인하였다. 성능평가에서 LMS 알고리즘을 적용한 적응 등화기의 성능이 수치모의 실험 및 해상실험의 결과에서 거리 별, 수심 별 성능을 확인하였고, LMS 알고리즘을 적용한 적응 등화기의 성능이 우수함을 확인하였다.

따라서 수중 다중경로 환경에서 지연확산에 의한 ISI를 효과적으로 개선하고, BFSK방식의 수중 음향 통신 시스템의 성능개선에 LMS알고리즘을 적용한 적응 등화기가 효과적임을 확인 하였다.

참 고 문 헌

- [1] Milica Stojanovic, “Recent Advance in High-Speed Underwater Acoustic Communication”, Journal of Oceanic engineering, Vol. 21, No.2, pp. 125-130, April 1996.
- [2] 김종육, “극천해 다중경로 환경에서 BFSK의 이미지 전송 성능”, 부경대학교 대학원, 정보통신공학과, 2012.
- [3] Robert J. Urick, “Principles of Underwater Sound”, pp.128-142, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [4] JongWook Kim, Kyu-Chil Park, Jihyun Park, and Jong Rak Yoon, “Coherence Bandwidth Effects on Underwater Image Transmission in Multipath Channel”, Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 07HG05.
- [5] 박지현, 김종육, 윤종락, “수중 다중경로 채널에서 수면변동에 의한 지연확산이 텍스트 전송성능에 미치는 영향”, 대한전자공학회, TC편 제1호, PP. 1-8, 2011.
- [6] L. Berkhovskikh and Y. Lysanov, “Fundamentals of Ocean Acoustic”, Springer, 1982.
- [7] Milica Stojanovic, “Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization”, IEEE Communication Magazine, January 2009.
- [8] 손근영, “무선 수중 데이터 설계를 위한 수중 음향채널 특성 해석”, 부경대학교 대학원, 정보통신공학과, 2002.2.
- [9] 김종육, “극천해 다중경로 환경에서 BFSK의 이미지 전송 성능”, 부경대학교 대학원, 정보통신공학과, 2012.2.

- [10] John G. Proakis, Digital Communications, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 185-200 2000.
- [11] 박용완, 홍인기, 최정희, 이동통신공학, 제2판, 생능출판사, pp. 175-189, 2007.
- [12] 박지현, “수중 다중경로 시간확산채널에서 적응등화기와 직교 주파수분할 다중화기법의 성능해석”, 부경대학교 대학원, 정보통신공학과, 2008.

