

논문 2011-48TC-1-1

수중 다중경로 채널에서 수면변동에 의한 지연확산이 텍스트 전송성능에 미치는 영향

(Effect of Text Transmission Performance on Delay Spread by Water Surface Fluctuation in Underwater Multipath Channel)

박 지 현*, 김 중 욱**, 윤 중 락***

(Ji Hyun Park, Jong Wook Kim, and Jong Rak Yoon)

요 약

본 논문에서는 수조 실험을 통해 수중 다중경로 채널의 수면변동과 지연확산이 텍스트 전송성능에 미치는 영향 확인하였다. 수면변동과 지연확산은 채널의 코히어런스 대역폭을 제한하는 요인으로 수중음향 통신의 전송성능을 제한한다. 잔잔한 수면과 교란하는 수면에 따른 응답특성 실험결과에서 수면 반사파의 진폭변동과 지연확산 특성을 확인하였다. 각각의 지연확산 유효치는 각각 5ms, 4ms로 그에 대응하는 코히어런스 대역폭은 200Hz, 250Hz였다. BFSK (Binary Frequency Shift Keying) 방식을 이용한 수중 텍스트 전송성능에서 지연확산에 따른 채널의 코히어런스 대역폭 제한으로 인해 잔잔한 수면인 경우 200bps 이하에서 10^{-4} , 교란하는 수면인 경우 250bps 이하에서 10^{-4} 으로 오류율이 나타났다. 따라서 본 실험을 통해 수중 다중경로 채널에서 수면변동에 의한 코히어런스 대역폭 제한은 수중음향 통신의 전송성능을 결정하는 중요한 요인임을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a water tank experiment using Binary Frequency Shift Keying (BFSK) method for text transmission performance by water surface fluctuation is conducted. Water surface fluctuation and delay spread which affect the channel coherence bandwidth is a limiting factor in underwater acoustic communication. The amplitude fluctuation and delay spread the smooth surface and fluctuation surface, were identified. The effective delay spread of both cases are 5ms, 4ms corresponding to the coherence bandwidth of 200Hz, 250Hz, respectively. The bit error rate of BFSK modulated text transmission is about 10^{-4} in less than 200bps in smooth surface but less than 250bps in fluctuation surface. Therefore, this experiment shows that the water surface fluctuation is important factor determining the performance of the underwater acoustic transmission.

Keywords : Underwater multipath channel, Water surface fluctuation, Delay spread, BFSK, Coherence bandwidth

I. 서 론

* 정회원, 부경대학교 음향진동공학연구소
(Institute of Acoustics and Vibration Engineering,
Pukyong National University)

** 정회원, *** 정회원-교신저자, 부경대학교 정보통신공
학과 석사과정
(Department of Information and Communications
Engineering, Pukyong National University)

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로
한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(NRF- 2010-355-D00044).

접수일자: 2010년12월21일, 수정완료일: 2011년1월13일

수중에서 정보전송은 채널의 환경요인과 수십kHz 이
하의 음파를 사용하기 때문에 지상과 통신에 비해 전송
성능이 제한적이다^[1]. 따라서 수중음향 통신 채널의 환
경요인은 저 용량의 텍스트 정보전송 성능에도 영향을
줄 수 있다.

수중에서 사용하는 수중음향 통신 시스템은 그림 1
과 같이 해면의 모선과 수중의 탐사선으로 구성된다.

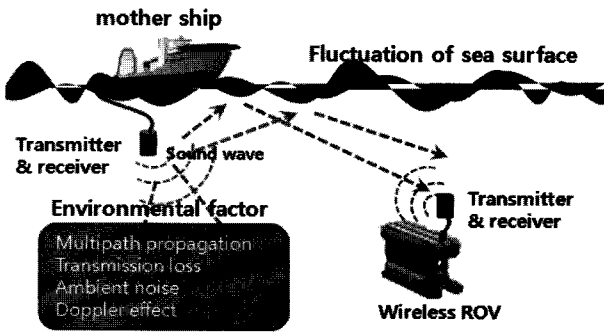


그림 1. 수중음향 통신 환경
Fig. 1. Underwater acoustic communication environment.

모선과 탐사선간의 수중음향 통신 채널의 환경요인은 손실, 배경잡음, 다중경로, 도플러 등이 있으며, 이중 다중경로는 전송성능을 결정하는 중요한 요인으로 수온, 수면-해저의 경계면 매질과 거칠기, 송-수신기의 이동 및 위치변화에 의해 특성을 달리한다^[2].

수면은 바람에 의해 시간적으로 변동하므로 송신신호의 수면 반사파의 특성은 시간적으로 변화한다. 이런 수면 반사파는 수면의 거칠기와 파고, 파도주파수, 입사파의 주파수 및 입사각도 등에 영향을 받는다^[3]. 이로 인해 수신신호는 진폭과 위상이 변하여 채널의 지연 확산특성이 변화한다. 따라서 채널의 코히어런스 대역폭을 제한하고, 주파수 선택성을 증가시켜 수중음향 통신 시스템의 전송성능을 제한한다.

본 논문에서는 수중 다중경로 채널의 수면변동에 의한 지연확산이 텍스트 전송성능에 미치는 영향을 BFSK (Binary Frequency Shift Keying) 방식을 이용하여 수조실험으로 해석하였다. 수면 상태는 잔잔한 수면 (smooth surface)과 교란하는 수면 (fluctuation surface)로 하였다.

II. 수중 다중경로 채널의 지연확산과 수면변동에 의한 수면 반사파의 변동특성

수중 다중경로 채널의 수신신호는 그림 2와 같이 직접파와 수면과 해저의 경계면 반사에 의한 다중 경로 반사파의 합으로 수신된다. 수면 반사파는 수면의 거칠기, 송신 주파수, 해면 입사각에 따라 진폭 및 위상 변동이 일어나 지연확산의 변화를 야기한다.

만약, 수중 다중경로 채널에서 배경잡음이 없다고 가정할 경우, 채널의 임펄스 응답 $h_c(t)$ 는 식 (1)과 같이

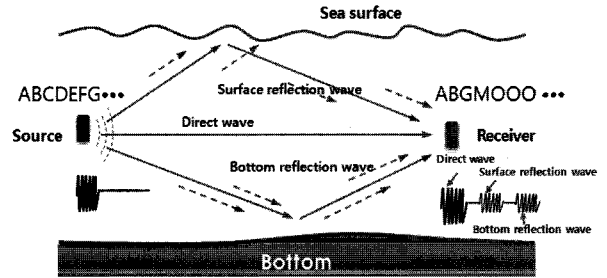


그림 2. 수중 다중경로 채널의 수신신호
Fig. 2. Receiver signal of underwater multipath channel.

주어진다.

$$h_c(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} \delta(t - \tau_n) + R(t) e^{-kt} \quad (1)$$

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.

다중경로 채널에서 이산 다중경로의 지연확산 τ_n 에 대한 지연확산 유효치 τ_{rms} 는 식 (2)와 같다^[4].

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (2)$$

여기서, $\overline{\tau}$ 와 $\overline{\tau^2}$ 는 평균 초과 지연 (mean excess delay) 과 평균 제곱 지연 (mean square delay)으로 식 (3)과 같다.

$$\overline{\tau} = \frac{\sum_n P(\tau_n) \tau_n}{\sum_n P(\tau_n)}, \quad \overline{\tau^2} = \frac{\sum_n P(\tau_n) \tau_n^2}{\sum_n P(\tau_n)} \quad (3)$$

여기서, $P(\tau_n)$ 는 n 차 경로의 전력밀도이다.

지연확산 유효치 τ_{rms} 와 채널의 코히어런스 대역폭 B_c 의 관계는 식 (4)로 정의된다.

$$B_c \approx \frac{1}{\tau_{rms}} \quad (4)$$

따라서 채널의 코히어런스 대역폭 B_c 가 기저대역 신호의 대역폭 B_s 보다 넓다면, 송신 신호의 모든 주파수 성분은 왜곡이 없이 수신된다. 반대로 채널의 코히어런스 대역폭 B_c 가 기저대역 신호의 대역폭 B_s 보다 좁다

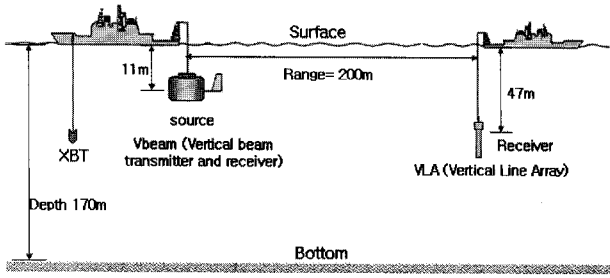


그림 3. 해상실험 구성도^[5]
 Fig. 3. Sea experimental configuration^[5].

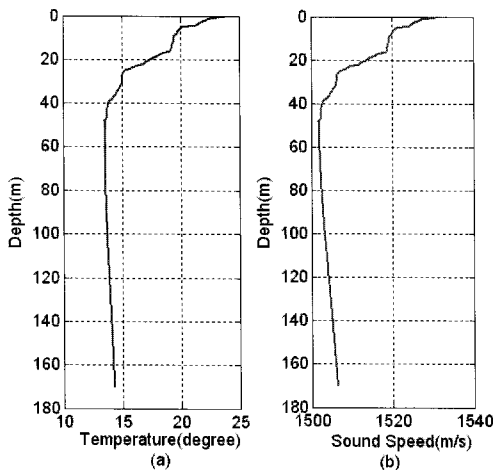


그림 4. (a) 수심에 따른 온도, (b) 수심에 따른 음속
 Fig. 4. (a) Temperature profile as a function of depth,
 (b) sound speed profile as a function of depth.

면, 이로 인한 ISI (Inter Symbol interference)가 발생되어 지연확산 의한 주파수 선택적 채널 (frequency selective channel) 특성을 가지게 된다.

식(2)와 식(4)에 대한 지연확산과 코히어런스 대역 특성을 통해 해역에서 수행한 실제 해상실험 자료를 분석하여 확인하였다.

해상 실험의 구성은 그림 3과 같다. 수심은 170m, 송신기의 수심 11m, 수신기의 수심 47m, 송, 수신기간의 거리는 약 200m이다. 실험 당시의 풍속은 15~16knot이며, 파고는 0.3~0.5m이다^[5]. 그림 4(a)는 수심에 따른 온도이며, 그림 4(b)는 그림 4(a)의 자료를 이용하여 구한 수심에 따른 음속의 변화이다.

그림 5(a)는 그림 4(b)의 음속자료를 이용하여 구한 송수신기간의 Ray traces이며, 그림 5(b)는 직접파, 해면 반사파, 해저 반사파, 해면-해저 반사파, 해저-해면 반사파에 대한 고유음선 (Eigen Ray)이다. 그림 5(b)에서 고유음선은 진폭이 상대적으로 큰 직접파와 수면 반

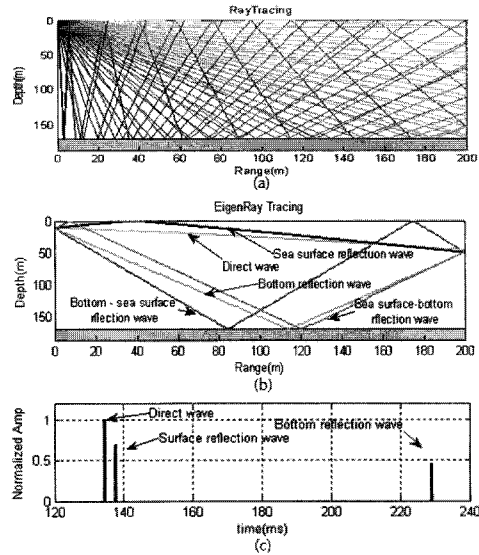


그림 5. 송수신기의 거리 200m
 (a) Ray traces, (b) 고유음 선, (c) 지연시간
 Fig. 5. Range 200m of source and receiver.
 (a) Ray traces, (b) Eigen Ray, (c) delay time.

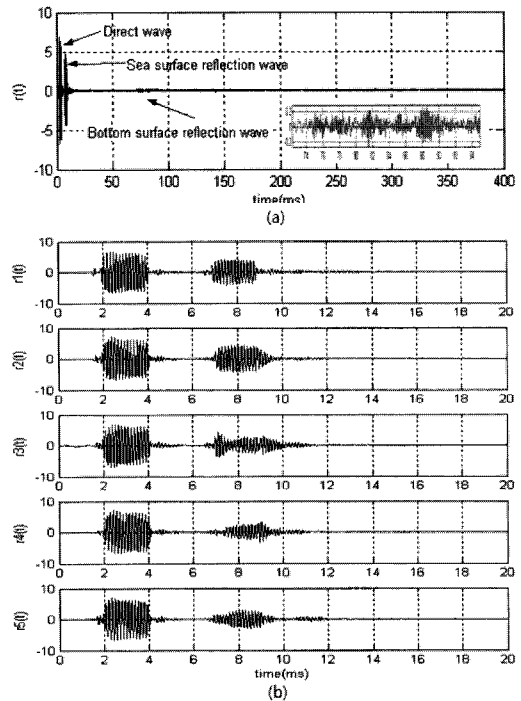


그림 6. 해상실험의 수신신호
 (a) 거리 200m의 응답특성, (b) 2초 간격으로 수신된 직접파와 해면 반사파
 Fig. 6. Receiver signal of sea experimental.
 (a) response characteristic of range 200m,
 (b) direct and sea surface reflected wave of 2 sec interval.

사파 그리고 해저 반사파만을 고려한 지연시간은 그림 5(c)와 같다. 직접파 도달 후 수면 반사파는 3.2ms 지연

되어 수신되며, 해저 반사파는 94ms 지연되어 수신되었다. 해저 저질은 모래로 해저반사계수는 4로 가정하였다^[6].

그림 6(a)는 해상 실험에서 수신된 채널의 응답신호로 송신신호는 2ms의 7kHz의 tone burst를 사용하였다. 송신주기는 2초 간격이며, 해면 반사파의 지연시간은 5ms, 해저 반사파는 75ms로 수신되었다. 그림6(a)에서 보는바와 같이 실험해역의 해저 면은 모래와 진흙으로 구성된 경계면으로 직접파와 해면반사파에 비해 해저반사파는 진폭이 아주 적어 지연확산 유효치에 기여하지 않는 것으로 해석되었다.

해저면 반사파를 제외한 직접파와 해면 반사파의 수신신호는 그림 6(b)와 같다. 그림에서 보는바와 같이 직접파에 비해 해면 반사파는 수면의 시변성으로 인해 시간에 따라 진폭과 지연확산이 변동됨을 알 수 있고 따라서 채널의 코히어런스 대역폭이 시간에 따라 변화함을 알 수 있다.

그림 7은 그림 6(b)를 이용하여 지연확산과 코히어런스 대역 특성을 분석한 결과이다. 그림 7(a)는 직접파와 해면반사파가 포함된 시간과형이이며, 그림 7(b)는 각각의 수신신호의 스펙트럼이다. 수면 반사파가 포함된 신호는 지연확산 된 수면 반사파의 영향으로 신호대역(직접파 신호대역)에서 주파수 선택성이 보인다. 그림 7(c)와 7(d)는 수신신호를 힐버트 변환(Hilbert transform)하여 구한 등가 저역통과 신호의 자기상관 함수와 등가 저역통과 신호의 스펙트럼 특성이다. (c)의 자기상관 함수에 식 (2)와 (3)을 적용하면 지연확산 유효치는 약 2.4ms이다. 수면반사파의 진폭은 수면의 변동에 따라 변화하므로 지연확산 유효치는 변화하며 잔잔한 수면상태에서 최대치를 보이고 교란상태인 경우 작아질 것으로 예상할 수 있다. 이로 인해 (d)의 신호대역내의 주파수 선택성이 달라진다. (e)는 직접파와 직접파 및 해면 반사파가 포함된 수신신호의 스펙트럼으로 지연확산 유효치에 따른 코히어런스 대역폭은 416Hz로 제한되며, 주파수 선택성이 존재한다.

수면반사파의 진폭은 수면의 변동에 따라 변화하므로 수면의 거칠기에 의해 결정된다. 수면의 거칠기 K 는 식 (5)로 주어진다^[7].

$$K = k\sigma \sin\theta_i \quad (5)$$

$$\mu \sim \exp(-2K^2) \quad (6)$$

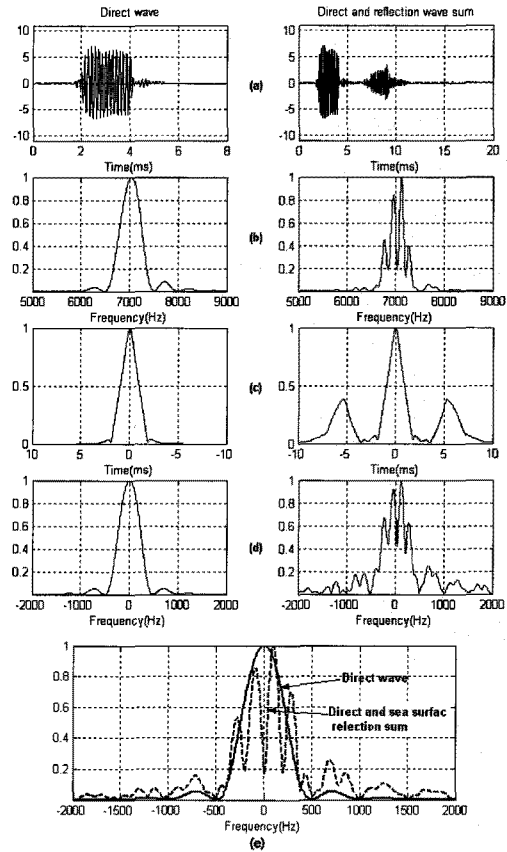


그림 7. 지연확산에 의한 코히어런스 대역 특성, (a) 수신신호, (b) 수신신호 스펙트럼, (c) 등가 저역통과 신호의 자기상관 함수, (d) 등가 저역통과 신호의 스펙트럼, (e) 주파수 선택성

Fig. 7. Coherence bandwidth character with respected to delay spread, (a) received signal, (b) received signal spectrum, (c) autocorrelation function of equivalent low pass signal, (d) spectrum of equivalent low pass signal, (e) frequency selectivity.

여기서, σ 는 경계면 거칠기의 표준 유효치이며, θ_i 는 수평입사각, k 는 파수로 $2\pi f_0/c$ 이다. 만약 거칠기 $K \ll 1$ 이면 해면은 잔잔하지만, $K \gg 1$ 이라면 해면은 교란하며 반사된 신호는 산란되어 진폭이 감소한다. $K \gg 1$ 인 경우, 직접파를 포함한 수면 거칠기에 따른 수신 음압진폭 P 는 $\mu < 1$ 에 의해 감소 될 수 있으며 식 (7)과 같다.

$$P = \left(\frac{A}{r}\right) \left[(1 + \mu^2 - 2\mu \cos\left(\frac{2khd}{r}\right))^{1/2} \right] \quad (7)$$

여기서, r 은 송, 수신기 사이의 거리이며 h 는 송신기의 수심, d 는 수신기의 수심이다. μ 가 작을수록 해면 거칠기는 증가하고, 직접파를 상대적으로 크게 수신하게

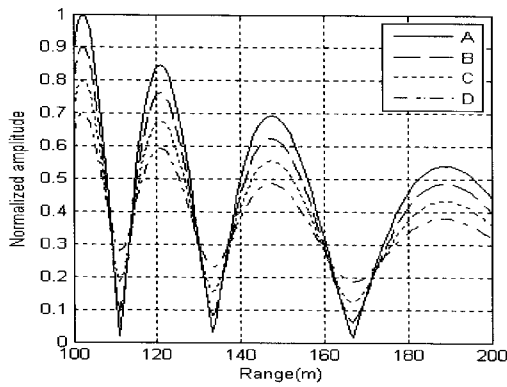


그림 8. 송신기 깊이 10m에서 송신신호 5kHz의 대한 수신기 깊이 10m에서의 음압진폭, 경계면 거칠기 $\mu=1$ (A), $\mu=0.8$ (B), $\mu=0.6$ (C), 그리고 $\mu=0.4$ (D)
 Fig. 8. Pressure amplitudes at a receiver of 10m depth from a 5kHz source at 10m depth, surface roughness $\mu=1$ (A), $\mu=0.8$ (B), $\mu=0.6$ (C), and $\mu=0.4$ (D).

된다.

그림 8은 거칠기에 따른 거리 별 음압진폭(pressure amplitude)의 변동특성이다. 경계면의 거칠기가 증가할 수록 수신신호의 음압진폭이 감소된다. 또한 경계면 거칠기가 시변적 경계면인 경우 반사파의 진폭변동은 시변적 특성을 가진다. 따라서 수중 다중경로 채널에서 수면변동에 의한 수면 반사파의 진폭변동은 지연확산에 영향을 끼쳐 채널의 코히어런스 대역을 변화시켜 수중 음향 통신 시스템의 전송능력이 변화한다.

III. 수조 실험 및 결과

수면 변동에 의한 지연확산 변화가 텍스트 전송능에 미치는 영향을 해석하는데 적용한 수중음향 통신 시스템의 구성은 그림 9와 같다. 입력 정보신호는 “0”과 “1”의 2진 텍스트 정보 신호이며, 2진 신호 $D_k(t)$ 에 대한 등가 저역통과 신호(equivalent lowpass signal)는 $s_l(t)$ 식 (8)과 같다^[8].

$$s_l(t) = \sum_k D_k p(t - kT_b) \quad (8)$$

여기서 $D_k(t)$ 는 2진 정보 데이터 신호이며, BFSK 방식의 경우, “0” 일 때 $f_1 = A \cos(w_1 t)$ 이며, “1” 일 때 $f_2 = A \cos(w_2 t)$ 이다. $p(t)$ 는 성형 함수, T_b 는 비트 지속 시간이다.

변조 된 등가 저역통과 신호 $s_l(t)$ 는 송신기를 통해

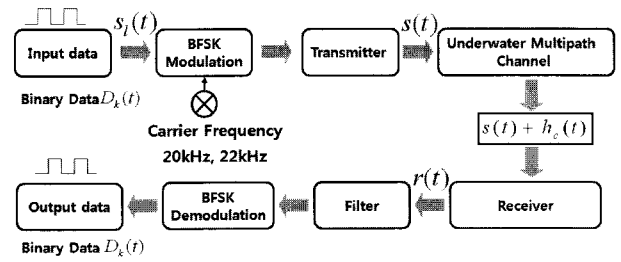


그림 9. 수중음향 통신 시스템 구성
 Fig. 9. Underwater acoustic communication system configuration.

수중음향 통신 채널로 송신되며, 송신신호 $s(t)$ 는 식 (9)와 같다.

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

식 (1)의 수중 다중경로 채널을 통해 수신기로 수신되는 신호 $r(t)$ 는 식 (10)과 같다. 식 (1) 둘째 항의 연속적인 산란파에 의한 복 반사는 무시하였다.

$$\begin{aligned} r(t) &= Re \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} D_k p(t - kT) \right] e^{j2\pi f_c t} \\ &= Re \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_0 D_k p(t - kT) \right] e^{j2\pi f_c t} \\ &\quad + Re \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} D_k p(t - kT) \right] e^{j2\pi f_c t} \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)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 II장에서 기술한 바와 같이 수면변동의 미소변화에 의한 수면 반사파에 의한 지연확산은 주파수 선택성과 코히어런스 대역폭에 영향을 주어 전송능력을 저하시키게 된다.

그림 10은 수조실험의 구성도로 수조(2mx1.5mx1m)에서 송, 수신기의 수심은 0.2m, 거리는 0.5m이다. BFSK방식의 Mark와 Space주파수는 각각 20kHz와 22kHz이며, 전송데이터는 랜덤이진데이터 10,000bit와 10,000개의 텍스트(80,000비트)를 송신하였다. 수조채널의 응답특성을 확인하기 위해 0.25ms의 20kHz의 tone burst 신호를 이용하였다. 수면상태는 잔잔한 수면과 교

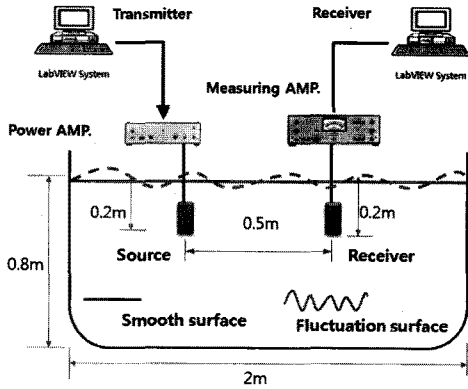


그림 10. 수조실험 구성도
Fig. 10. Water tank experiment configuration.

표 1. 수조의 지연확산 τ_{rms} 와 코히어런스 대역폭
Table 1. Delay spread τ_{rms} and coherence bandwidth of water tank.

Surface state	τ_{rms}	B_c
smooth	5ms	200Hz
fluctuation	4ms	250Hz

란하는 수면의 2가지 상태로 하였다. 플라스틱 구를 이용하여 만든 파고는 0.2m이며, 파도의 주기는 2Hz이다. 그림 11은 수조의 응답특성으로 11(a) 위로부터 잔잔한 수면상태와 교란하는 수면 상태의 응답특성이고, 11(b)는 각각에 대한 응답을 측정시각을 달리한 경우의 특성이다. 식 (2)와 식 (4)에 대한 지연확산 유효치 τ_{rms} 와 코히어런스 대역폭은 표 1과 같다. 수면의 상태가 잔잔한 수면의 경우 지연확산 유효치 τ_{rms} 는 5ms로 그에 대응하는 채널의 코히어런 대역폭은 200Hz이다. 교란하는 수면의 지연확산 유효치 τ_{rms} 는 4ms로 그에 대응하는 채널의 코히어런 대역폭은 250Hz이다. 각각의 수면 상태에 따른 전송률은 각각 200bps와 250bps로 제한됨을 수치해석을 통해 확인하였으며, 교란하는 수면인 경우 반사파의 진폭 감소로 짧은 지연확산 특성을 보였다.

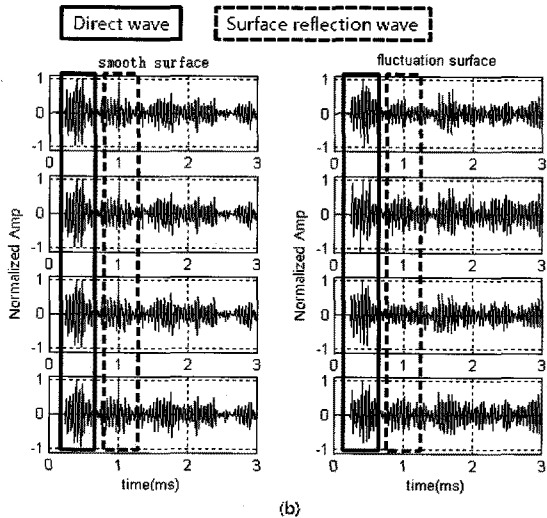
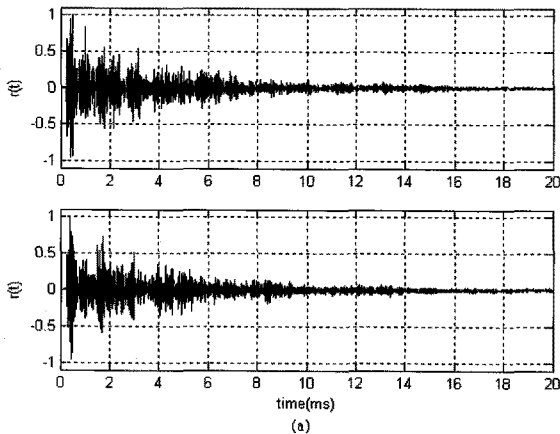
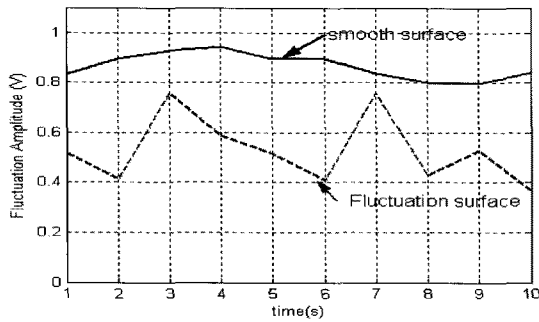


그림 11 수조의 응답특성
(a) 잔잔한 수면상태와 교란 수면상태,
(b) 수면상태에 대한 시간 응답특성
Fig. 11. Response characteristic of water tank.
(a) smooth surface and fluctuation surface,
(b) time response characteristic for water surface state.

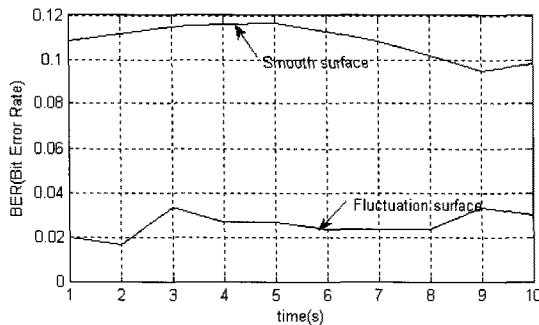
그림 11(b)에서 잔잔한 수면에서는 직접파와 수면 반사파의 진폭이 시간에 따라 변화가 없지만 교란하는 수면에서는 시간에 따라 수면 반사파의 진폭이 수면변동에 따라 시변적으로 변화함을 보인다.

그림 12(a)는 시간에 따른 수면 반사파 진폭변화 특성으로 잔잔한 수면의 시간에 따른 진폭변동 폭은 약 0.1V이다. 이는 외부 진동에 의한 수조의 진동 등에 의한 실험 오차로 판단되며, 교란수면의 진폭변동은 0.4V이다. 그림 12(b)는 전송률 300bps에 대한 10초 동안 전송된 3000bit의 시변적인 오류율이다. 수면변동에 따른 진폭변동과 오류율의 변화가 유사함을 확인하였으며, 이로 인해 수면의 시변적 변동이 전송성능에 시변적으로 영향을 주는 것을 확인하였다.

그림 13은 경계면이 잔잔한 수면과 교란하는 수면일 때의 전송률에 따른 10000개 비트 전송 시의 BER 특성으로 표 1의 결과에서 예측한 바와 같이 각각 경우 200bps, 250bps이하인 경우에는 비트 오류가 발생되지 않았다. 200bps, 250bps이상인 300bps에서는 잔잔한 수면 조건에서 오류율은 0.107이며, 교란하는 조건에서 비



(a)



(b)

그림 12. (a) 수면 변동에 의한 반사파 진폭의 시간 변화, (b) 수면 변동에 의한 오류율의 시간 변화
Fig. 12. (a) Amplitude time variation of reflection wave by surface state, (b) BER time variation by surface state.

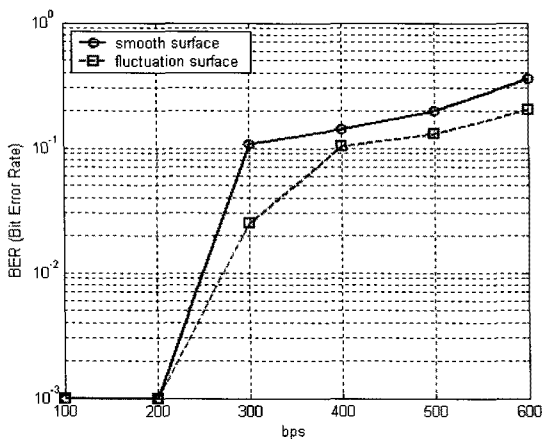


그림 13. 전송률에 따른 BER 특성
Fig. 13. BER characteristic for 10,000bits of random data as a function transmission rate.

트 오류율은 0.025로 상대적으로 낮게 나타났다.
그림 14는 각각의 수면 상태에 대해 전송률에 따른 텍스트 정보 오류율 (TER:Text Error Rate)이다. 텍스트 전송은 7bit의 ASCII 코드 중 하나의 bit가 오류발생이 될 경우 전체가 예러로 판정되기 때문에 그림 13에

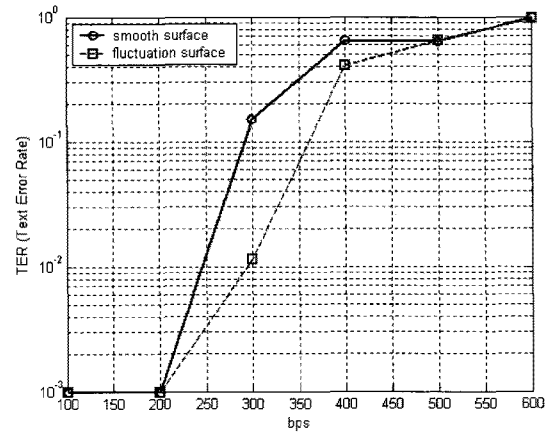


그림 14. 전송률에 따른 텍스트 오류율
Fig. 14. Text Error Rate for Transmission rate.

입력 텍스트
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz

출력 텍스트
 c#dff'hioclingp1r3twv7xyz c#dff'hioclingp1r3twv7x9Z
 c#d4f'hioclingp1r345v7xyZ c#d4f'hioclingp1r3twv7xyZ
 c#dff'hioclingp1r3twv7xyz c#d6f'h)Oclngp1r347v7x9Z
 c#d4g'hiOalKnpw1r345v7xyZ c#d6g'loallingp1r3twv7xyz
 c#dff'hioclingp1r3t7v7x9z c#d6f'hioclingp1r3t7v7x9Z
 c#dff'hioclingp1r3twv7xyz c#dff'hioclingp1r3t7v7x9Z
 c#d4f'hioclingp1r345v7x9Z c#d4f'hioclingp1r345v7xyZ
 c#dff'hioclingp1r3twv7xyz c#dff'hioclingp1r3twv7x9Z
 c#dff'hioclingp1r3t7v7x9Z c#d4f'hioclingp1r345v7xyZ
 c#d5f'hioclingp1r3twv7xyZ c#dff'hioclingp1r3twv7xyz

(a)

입력 텍스트
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz
 abcdefghijklmnopqrstuvwxyzabcdefghijklmnopqrstuvwxyz

출력 텍스트
 abcddefghijl_inpprstruvwxzabcddefghijklmnopprstruvwx8z
 a'adeefgh)klnnopqrstruvwxzabcddefgh)kl_npprstruvwx9z
 abcdefghijklmnopqrstruvwx8zabcddefghijklmnopprstruvwx8z
 'a'ebgh)klnnopqrstruvwxzabcddefgh)ijl_npp0pctuvwx8z
 abcdefghijklmnopqrstruvwx8z' a'ebgh)klnnopqrstruvwxz
 abcdefgh)kl_npp0patuvwx9zabcddefghijklmnopqrstruvwx8z
 a' a'ebgh)klnnopqrstruvwxzabcddefgh)kl_npp0patuvwx9z
 abcdefghijklmnopqrstruvwx8z' a'ebgh)klnnopqrstruvwxz
 abcdefgh)kl_npp0patuvwx9zabcddefghijklmnopprstruvwx8z
 a' a'eban)klnnopqrstruvwxzabcddefghijklmnop0patuvwx9z

(b)

그림 15. LabVIEW 시스템을 이용한 텍스트 전송 출력, 전송률 300bps,
(a) smooth surface, (b) fluctuation surface
Fig. 15. Text transmission output using LabVIEW system, transmission rate 300bps,
(a) smooth surface, (b) fluctuation surface.

비해 높은 오류율 특성을 보인다. 텍스트 오류율에서도 각각의 수면변동에 따라 오류 없는 전송률은 각각

200bps, 250bps이하이며, 그림 13과 같은 300bps에서는 잔잔한 수면인 경우 텍스트 오류율은 0.152이며, 교란하는 수면인 경우 텍스트 오류율은 0.0114로 낮게 나타났다. 400bps 이상인 경우 비트 오류율 보다 텍스트 오류율이 증가함을 확인하였다.

그림 15(a)는 LabVIEW 시스템을 이용한 수중음향 통신 시스템의 잔잔한 수면상태의 전송률 300bps에서의 텍스트 출력 결과이며, 그림 15(b)는 교란하는 수면상태의 텍스트 출력 결과이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 수조 실험을 통해 수중 다중경로 채널에서 수면변동에 의한 지연확산이 텍스트 전송성능에 미치는 영향을 확인하였다. 수면변동에 의한 수면 반사파의 진폭변동 특성이 지연확산 유효치에 영향을 주었으며, 이로 인해 채널의 코히어런스 대역폭을 제한하였다. BFSK방식을 적용한 수중 텍스트 전송성능에서도 전송률은 수면변동에 따른 채널의 코히어런스 대역폭 제한으로 인해 텍스트 전송성능 또한 제한됨을 확인하였다.

결론적으로 수면변동은 채널의 코히어런스 대역폭을 제한하며, 수중음향 통신의 전송성능을 결정하는 중요한 요인임을 확인하였다. 추후의 연구로는 수면변동의 시변성과 비트오류율의 상관성을 채널의 통계적인 모델인 Rayleigh와 Rice 모델을 적용하여 해석하는 것이다.

참 고 문 헌

[1] Robert S. H. Stepanian, Milica Stojanovic, *Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems*, Kluwer Academic Publishers, pp. 1-7, 2002.

[2] Herman Medwin, Clarence S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press Company, pp. 41-51, 1998.

[3] R. S. Andrews, L. F. Turner, "Amplitude fluctuation of underwater signals and its effect on the bit-error probability of underwater data-transmission systems" *IEEE Electrical Engineers*, Vol. 124, pp. 115-119, 1977.

[4] 박용완, 홍인기, 최정희, *이동통신공학*, 제2판, 생능출판사, pp. 175-189, 2007.

[5] Jihyun Park, Jong Rak Yoon and Joung-Soo Park, "Frequency and Temporal Coherence

Variation for Sea Surface Fluctuation", *JJAP*, Vol. 48, no. 7, pp. 07GL03-1-07GL03-3, July 2008.

[6] Robert J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 141-143, 1983.

[7] Lawrence E. Kinsler, Alan B. Cooppens, *Fundamentals of Acoustics*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 446-448, 2000.

[8] John G. Proakis, *Digital Communications*, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 185-200 2000.

저 자 소 개



박 지 현(정회원)
2000년 밀양대학교 정보통신 공학과 학사졸업.
2002년 부경대학교 정보통신 공학과 석사졸업.
2008년 부경대학교 정보통신 공학과 박사졸업.

2008년~현재 부경대학교 음향진동공학연구소 선임연구원

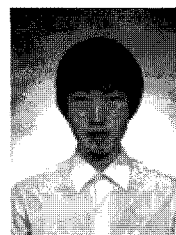
<주관심분야 : 수중음향통신, 음향신호처리, 수중로봇제어>



윤 종 락(정회원)-교신저자
1977년 부경대학교 어업학과 학사졸업.
1980년 부경대학교 수산물리학과 석사졸업.
1987년 미국 Florida Atlantic Univ. 해양공학과 석사졸업.

1990년 미국 Florida Atlantic Univ. 해양공학과 박사졸업.

2002년~현재 부경대학교 정보통신공학과 교수
<주관심분야 : 수중음향, 수중음향통신, 음향신호처리>



김 종 옥(정회원)
2010년 부경대학교 정보통신 공학과 학사졸업.
2010년 3월~현재 부경대학교 정보통신공학과 석사과정.

<주관심분야 : 수중음향통신, 디지털신호처리>