



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

수중통신 채널 변동특성 분석 및  
통신성능에 미치는 영향



2009년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

음 향 진 동 공 학 과

류 경 백

공 학 석 사 학 위 논 문

수중통신 채널 변동특성 분석 및  
통신성능에 미치는 영향

지도교수 윤 종 락

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2009년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

음 향 진 동 공 학 과

류 경 백

류경백의 공학석사 학위논문을 인준함.

2009년 2월 25일



주 심 공학박사 하 강 렬 (인)

위 원 공학박사 김 무 준 (인)

위 원 공학박사 윤 종 락 (인)

# ◆ 제 목 차 례 ◆

Abstract

I. 서 론 .....	1
II. 수중음향 통신채널의 변동특성 .....	4
2.1 수중음향 다중경로 통신채널의 특성 .....	4
2.2 수중음향 다중경로 채널에서 일관성 대역폭의 특성 .....	9
2.3 해면변동에 의한 일관성 특성 .....	11
III. 통신채널 변동이 수중통신 성능에 미치는 영향 .....	17
3.1 수중음향 다중경로 채널에서 일관성 대역폭에 따른 통신성능 .....	17
3.2 해면변동에 의한 일관성 실험 .....	27
IV. 결 론 .....	39
참고문헌 .....	40

Analysis of Channel Fluctuation in Underwater Communication and  
its Effect on Communication Performance

Kyeng Beak Ryu

Department of Interdisciplinary Program of Acoustics and Vibration  
Engineering, Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Underwater Acoustic(UWA) channel differ substantially from those in other media, such as radio channels, due to severe signal degradations caused by multipath propagation, Doppler spread and high temporal and spatial variability of channel conditions. So the available bandwidth in an UWA communication channel is severely limited. Within this limited bandwidth, the signal is subject to multipath propagation through a channel whose characteristics vary with time and highly depends on the location of transmitter and receiver. Therefore, in a underwater acoustic communication system, multipath propagation causes intersymbol interference (ISI), and an important figure of merit is multipath spread in terms of symbol intervals. In addition, temporal coherence of acoustic signals in the ocean has an effect on the performance of underwater communication systems.

This paper presents the effect of multipath variation on underwater acoustic communication. The analysis is based on coherence bandwidth variation due to multipath time spread. It is found that the ISI is a function of multipath spread and the temporal coherence variation of transmitting signal is consistent with the dominant frequency of surface wave.

# I. 서론

최근 해양자원 탐사 및 해양산업의 발전으로 해양개발에 대한 관심이 증가되고 있으며, 이에 따라 수중음향 통신시스템의 응용 및 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 수중에서는 산란 및 감쇄로 인한 영향으로 광파 및 전파는 원거리 정보전송에 제한점을 갖는다. 따라서 음향을 이용한 원거리 정보전송이 유일한 방법이며, 이 또한 여러 환경요인들로 인해 제한적인 전송성능을 가진다[1].

수중음향 통신성능에 영향을 미치는 환경요인은 손실, 배경잡음, 도플러 효과, 다중경로 등이 있다. 그러한 환경요인들 중 그림 1과 같이 해면과 해저로 경계되어진 다중경로 채널에서는 시간에 따라 변화하는 매질특성 및 경계면의 변동특성이 수중음향 통신시스템의 성능에 지대한 영향을 미친다.

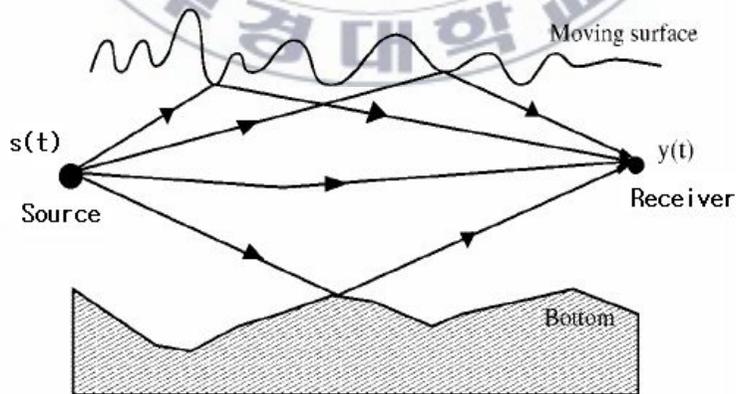


그림 1. 수중음향 다중경로 채널의 환경

그림 2는 다중경로 환경에서 수신된 신호의 일례로서 다중경로에 의해 시간지연된 신호를 나타내고 있다. 다중경로 환경에서 수신기가 상대적으로 송신기에 근접한 경우에는 직접파와 이산적인 다중경로 파가 우세하게 수신되고, 상대적으로 멀리 떨어져 있는 경우에는 매질 내에서의 연속적인 잔향파의 성분 또한 우세하게 혼입된다. 이러한 시변적 수중 다중경로 환경에서의 신호는 각 경로파의 시간확산(time spread), 채널의 일관성(coherence) 및 대역폭 제한에 의해 영향을 받게 된다. 채널의 일관성 대역폭( $B_c$ )보다 기저대역 신호 대역폭( $B_s$ )이 큰 송신신호( $B_c < B_s$ )는 비선형적 위상과 진폭이득이 변화하여 주파수 선택성의 증가와 심벌 간 간섭 (ISI : Inter Symbol Interference)의 증가로 수중음향 통신 시스템의 전송성을 저하시키게 된다[2].

또한 다중경로 환경에서 시변적 특성이 강한 해면 반사파는 송·수신기의 위치가 상대적으로 해면에 근접한 경우, 해저의 반사파 보다 통신성능에 더 많은 영향을 미친다. 해면변동은 파랑성 파도와 너울성 파도가 존

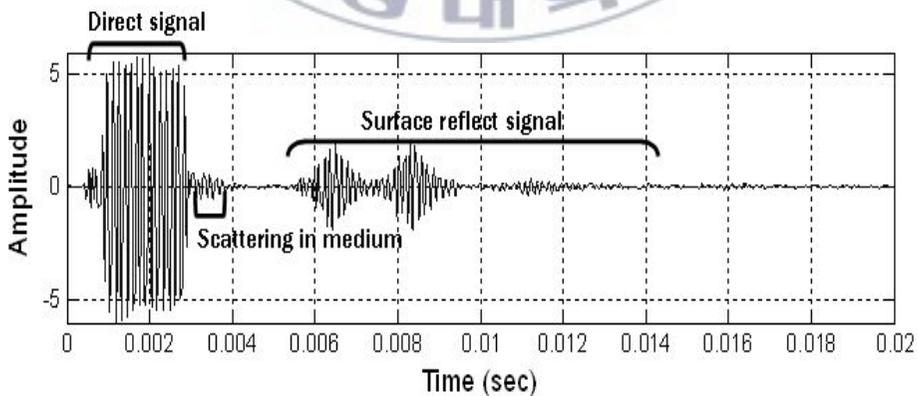


그림 2. 다중경로환경에서 수신된 수신신호

재하며, 해면의 변화가 작은 경우 랜덤하게 변화하는 산란표면으로 표현된다. 그러나 해면의 변화가 상대적으로 클 경우에는 해면에서 반사되는 신호는 진폭과 위상에 영향을 받게 되어 시간 및 주파수 일관성에 영향을 미치기 때문에 수중음향 통신시스템에 미치는 영향에 대한 분석이 요구된다.

본 논문에서는 먼저 BFSK(Binary Frequency Shift Keying)와 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 방식을 이용하여 수중음향 통신 다중경로 채널에서 일관성 대역폭 변화에 따른 전송성능을 수치모의 실험을 통해 평가하였다. 그리고 해상실험을 통해 해면변동이 송·수신신호에 미치는 영향과 일관성 특성을 분석하기 위해 송·수신기의 위치를 해저면 보다 상대적으로 해면에 근접시킨 상태에서 정현파 펄스신호를 전송하여 해면변동에 따른 시간 및 주파수 일관성 특성을 파악하였다.



면과 해저 및 수중의 매질특성에 따라 다중경로의 특성이 달라지며 복반사에 의한 잔향시간의 영향이 크다. 그림 3(b)는 수직채널로 해저의 매질특성과 해면의 상태에 따라 다중경로의 특성이 달라지고 수평채널에 비해 상대적으로 잔향시간이 짧은 특성을 보인다. 수중음향 통신시스템의 경우 복반사에 의한 심벌 간 간섭 영향을 해석하기 위해 다중경로와 산란에 의한 수신신호의 변동특성을 확률모델로 해석한 많은 연구가 있다[4-6].

이런 수중환경의 변동성을 모니터링 하기 위해 그림 4와 같이 구성하여 해면과의 시변특성을 Waverider, ULS(Upward Looking Sonar), ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 등으로 측정한다.

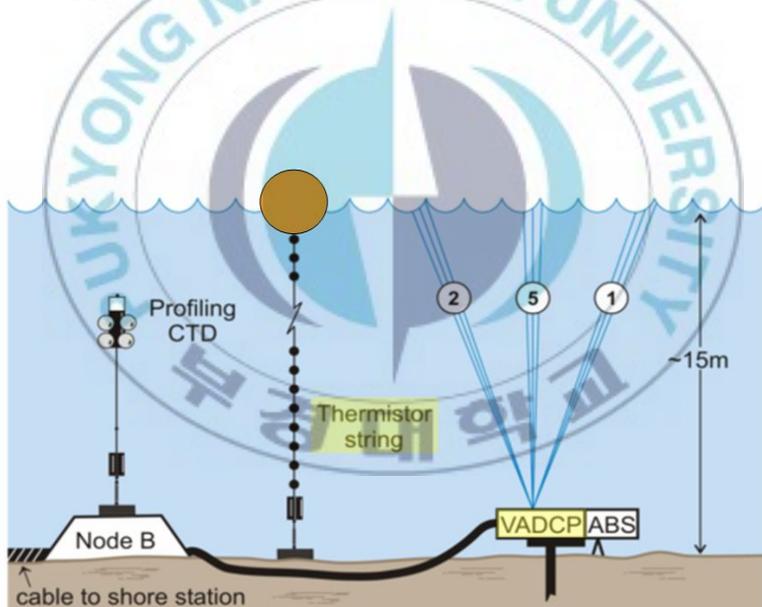
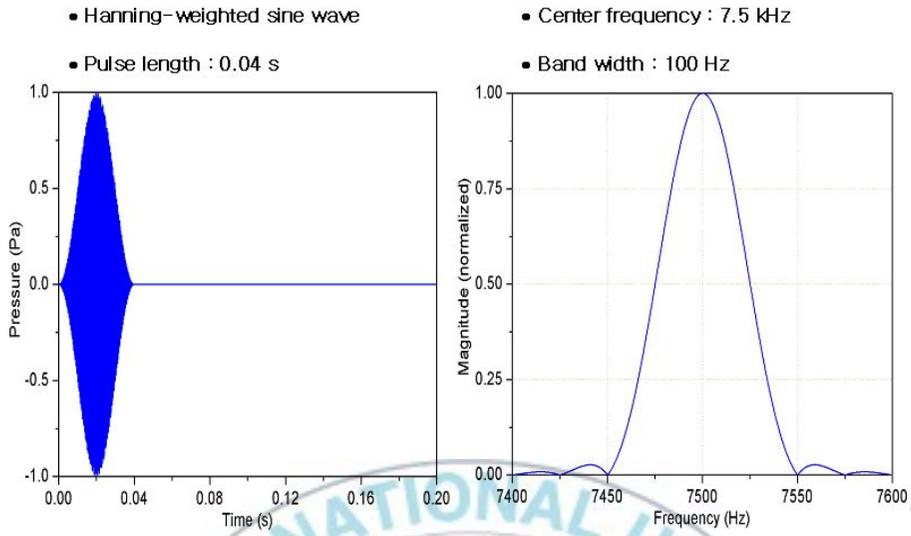


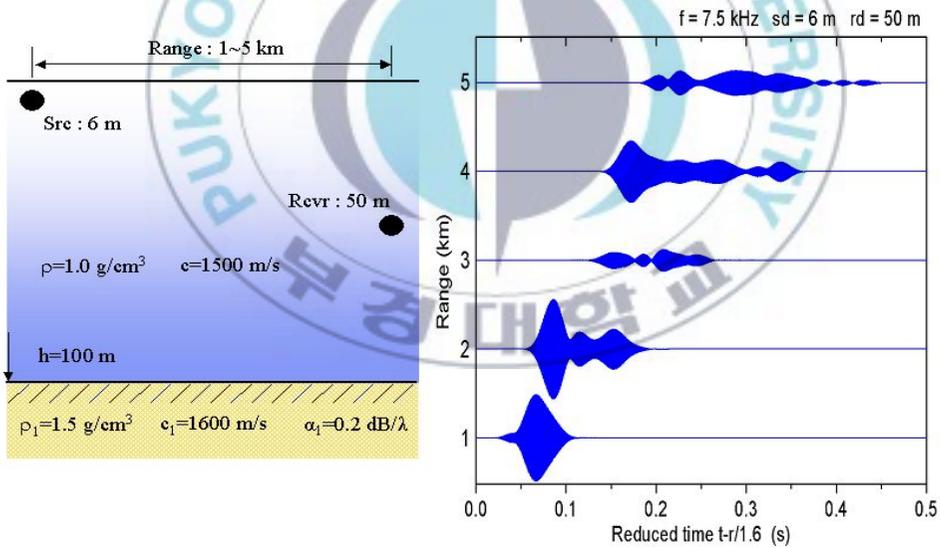
그림 4. 수중채널 환경 모니터링 시스템 구성

수중 다중경로 채널에서 음파의 전파경로를 해석하기 위해서는 Ray기법, Normal-mode, Bellhop 등이 사용되고 있다. 이러한 방법들 중 Normal-mode를 이용한 거리에 따른 다중경로 채널에서의 지연확산 된 수신신호의 특성을 그림 5에 나타내고 있다. 그림 5(a)는 송신신호 및 스펙트럼으로 송신신호는 7.5kHz의 Hanning-weighted 정현파 펄스이며 지속시간은 0.04초, 대역폭은 약 100Hz이다. 그림 5(b)는 수치모의 실험의 구성도 및 거리별 수신신호의 특성을 나타내고 있다. 송신기의 수심은 6m, 수신기의 수심은 50m로 각 거리별 수신신호는 거리가 증가함에 따라 지연확산 특성이 증가함을 볼 수 있다.

송·수신기 거리별 출력 응답 및 주파수 응답은 그림 6과 같다. 그림 6(a)에서 거리별 출력 응답특성은 송신신호의 대역 내에서 강한 주파수 선택성을 보이며, 그림 6(b)에서는 거리 증가에 따라 주파수 선택성이 증가함을 볼 수 있다. 이로 인해 일관성 대역폭의 제한과 심벌 간 간섭이 증가하여 수중음향 통신시스템에 영향을 줄 것이다.

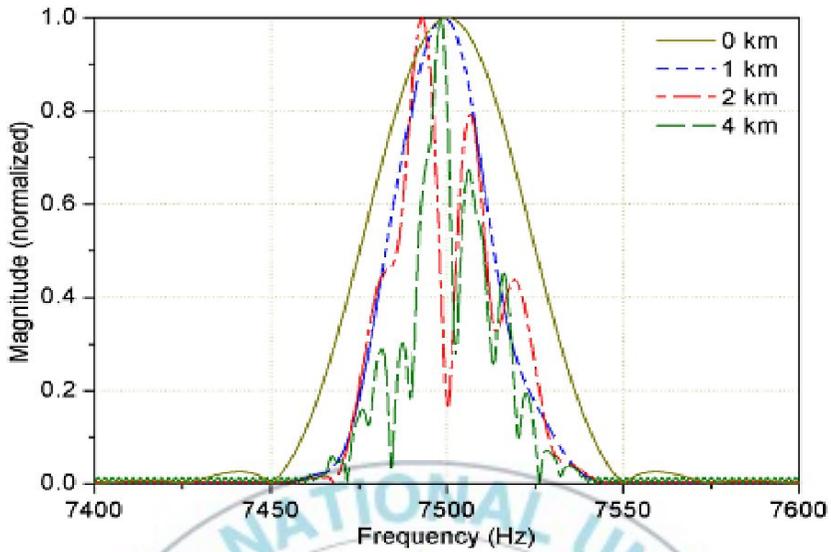


(a) 송신신호 및 스펙트럼

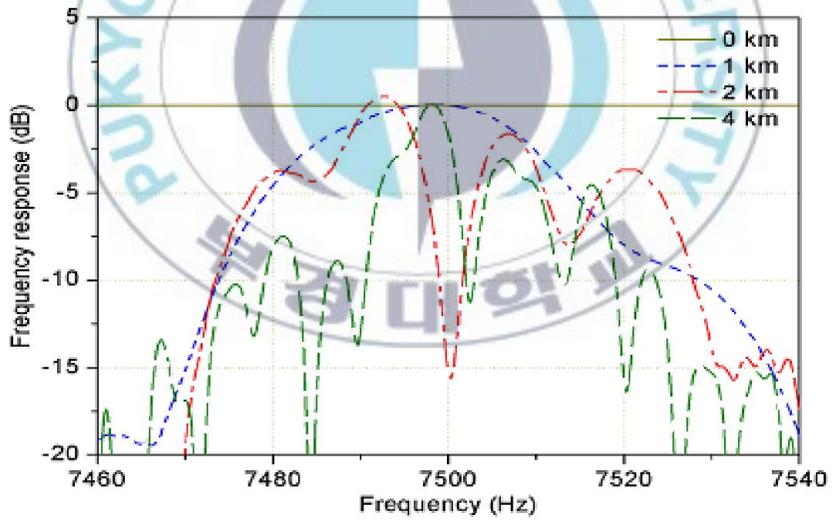


(b) 수치모의 실험의 구성도 및 거리별 수신신호의 특성

그림 5. Normal mode를 이용한 거리에 따른  
다중경로 채널에서의 수신신호의 특성



(a) 거리별 출력 응답



(b) 주파수 응답

그림 6. 송수신기 거리별 출력 응답 및 주파수 응답

## 2.2 수중음향 다중경로 채널에서 일관성 대역폭의 특성

수중음향 다중경로 채널에서 경계면에 반사된 송신신호는 거리에 따라 지연확산과 시변적 특성에 영향을 받게 될 것이다. 수중음향 통신시스템에서 수중으로 전파되는 송신신호가 이진 데이터의 신호  $D_n(t)$ 이면, 음향 주파수 대역으로 변조되어 수중음향 채널로 송신되는 신호  $s(t)$ 는 식(1)과 같다[7,8].

$$s(t) = \text{Re}[s_l(t)e^{j2\pi f_c t}] \quad (1)$$

여기서,  $s_l(t) = \sum_n D_n p(t - nT_b)$ 는 등가저역통과 신호이며,  $D_n(t)$ 는 0과 1의 이진데이터 신호,  $p(t)$ 는 펄스성형 함수,  $T_b$ 는 비트 지속시간이다. 다중경로채널에서 배경잡음이 없다고 가정할 경우, 채널의 임펄스 응답  $h_c(t)$ 는 식(2)와 같다.

$$h_c(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} \delta(t - \tau_n) + R(t) e^{-k_\alpha t} \quad (2)$$

여기서, 첫째 항은 직접파를 포함한 이산적인 복 반사로,  $\alpha_n$ 는  $n$ 차 다중경로 신호의 진폭으로 경계면에서의 반사손실, 경로손실 및 흡수손실에 의해 결정되며,  $\tau_n$ 은  $n$ 차 다중경로 지연시간이다. 두 번째 항은 연속적인

산란파에 의한 복반사를 나타내며 해면의 교란이나 수중 부유생물체에 기인된다.  $R(t)$ 는 랜덤진폭 및 위상이고  $k_a$ 는 지연시간을 결정하는 감쇠상수이다. 다중경로 채널에서 이산 다중경로에 의한 일관성 대역폭은 식(2)의  $\tau_n$ 에 대한 지연확산 유효치  $\tau_s$ 로 평가되며, 식(3)과 같다.

$$\tau_s = \sqrt{\overline{\tau_n^2} - (\overline{\tau_n})^2} \quad (3)$$

여기서, 평균초과지연  $\overline{\tau}$  와 평균제곱지연  $\overline{\tau^2}$  는 식(4)와 같다[9].

$$\overline{\tau} = \frac{\sum_n P(\tau_n) \tau_n}{\sum_n P(\tau_n)}, \quad \overline{\tau^2} = \frac{\sum_n P(\tau_n) \tau_n^2}{\sum_n P(\tau_n)} \quad (4)$$

여기서,  $P(\tau_n)$ 는  $n$ 차 경로에 대한 전력밀도이다.

유효치 지연확산  $\tau_s$ 와 채널의 일관성 대역폭  $B_c$ 의 관계는 식(5)로 정의된다.

$$B_c \approx \frac{1}{\tau_s} \quad (5)$$

만약, 채널의 일관성 대역폭  $B_c > B_s$ 인 경우, 오류 없이 안정적인 정보전송이 가능하지만, 채널의 일관성 대역폭  $B_c < B_s$ 인 경우 신호의 대역폭 내에서 왜곡이 발생되어 오류로 인한 안정적인 정보전송의 제한 및 전송 성능이 저하된다.

## 2.3 해면 변동에 의한 일관성 특성

해양환경 변동 중 해면파에 의한 통신신호의 변화는 송·수신기가 해저면에 비해 상대적으로 해면에 가까운 경우 해면에서 반사되는 다중경로파의 특성이 시변적으로 변화하기 때문에 더욱 현저하게 된다. 해면파의 변위, 수평방향 입자속도 및 수직방향 입자속도는 식(6), 식(7) 및 식(8)로 주어진다[10].

$$u(x,t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$v_x(x,z,t) = \omega A \exp(kz) \cos(kx - \omega t) \quad (7)$$

$$v_z(x,z,t) = \omega A \exp(kz) \sin(kx - \omega t) \quad (8)$$

여기서,  $\omega = 2\pi f$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\omega^2 = gk \tanh(kd)$ 이며  $g$ 는 중력가속도이다. 심해와 천해에 대해 각 주파수는 서로 다른 특성을 갖는다. 이에 따라 해면파의 전파속도(phase velocity)와 군속도(group velocity)는 다른 특성을 보인다. 심해와 천해의 조건은 심해 식(9), 천해 식(10)과 같다.

$$\omega^2 = gk \quad d \gg \lambda, kd \gg 1, \text{ and } \tanh(kd) = 1 \quad (9)$$

$$\omega^2 = gk^2 d \quad d \ll \lambda, kd \ll 1, \text{ and } \tanh(kd) = kd \quad (10)$$

심해와 천해의 전파속도는 심해 식(11), 천해 식(12)와 같다.

$$C = \sqrt{g/k} = g/w \quad (11)$$

$$C = \sqrt{gd} \quad (12)$$

심해와 천해의 군속도는 에너지 전파속도를 결정하는 것으로 심해 식 (13), 천해 식(14)와 같다.

$$C_g = g/2w = C/2 \quad (13)$$

$$C_g = \sqrt{gd} = C \quad (14)$$

해면파의 특성은 일정시간 관측된 파고 중에서 최대치로부터 1/3 범위의 빈도를 취하여 그 평균치를 우세파고  $H_{1/3}$ 로 정의한다. 최근에는 식(15)로 평가한다.

$$H_{1/3} = 4 \langle u^2 \rangle^{1/2} \quad (15)$$

여기서,  $\langle \rangle$ 는 시간평균이다. 통신채널의 시변특성과 관련되는 해면파의 스펙트럼은 이론과 측정치를 기준으로 제안된 Pierson-Moskowitz 스펙트럼[11]이 있으며 식(16)으로 주어진다.

$$S(w) = (\alpha g^2/w^5) \exp[-\beta(w_0/w)^4] \quad (16)$$

여기서,  $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$ ,  $\beta = 0.74$ ,  $w_0 = g/U_{19.5}$ 이다.  $U_{19.5}$ 는 해면으로부터

19.5m 위치의 풍속이다. 식(16)로부터 파고가 최대치를 보이는 주파수, 위상속도 및 우세파고는 식(17)로 주어진다.

$$w_p = 0.877g/U_{19.5} , \quad c_p = g/w_p = 1.14U_{19.5} \approx 1.17U_{10}$$

$$H_{1/3} = 0.21(U_{19.5}^2/g) \approx 0.22(U_{10}^2/g) \quad (17)$$

식(17)에 의한 Pierson-Moskowitz 해면파의 스펙트럼은 그림 7과 같이 풍속에 따라 해면의 우세한 파가 해면 반사파에 많은 영향을 주며, 이로 인해 지연확산 및 일관성 특성의 변화로 전송성능에 영향을 미치게 된다.

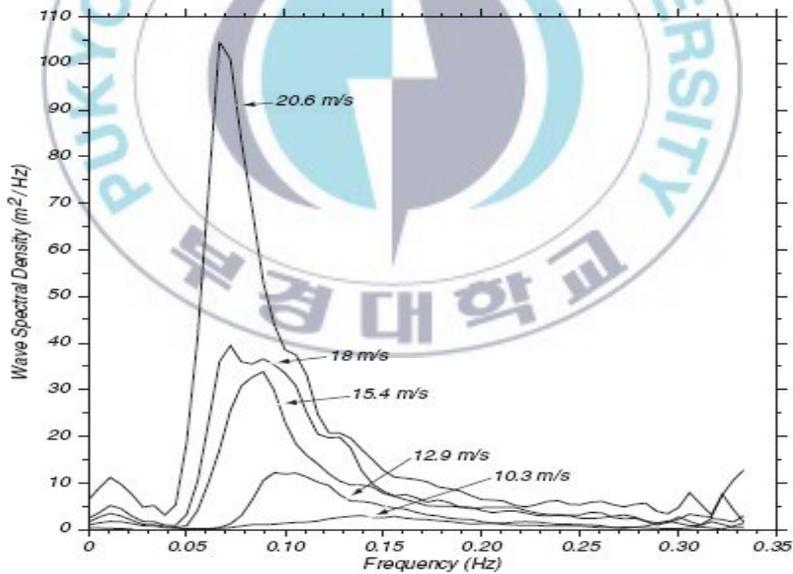


그림 7. Pierson-Moskowitz 해면파의 스펙트럼[11]

해면변동에 의한 수신신호의 특성은 그림8과 같다.

해면변동에 의한 시간영역의 직접전달 펄스신호와 해면반사 펄스신호간의 일관성  $C_{i,j}(\tau)$ , 상관계수  $\rho_{i,j}(\tau)$  및 상관계수 최대치  $\phi_{i,j}$ 는 식(18), 식(19) 및 식(20)와 같다. 여기서  $\Delta T_s$ 는 샘플링 주기,  $i$ 는 송신펄스열,  $R_{d_i}$ 는 직접전달 펄스신호,  $R_{s_j}$ 는 해면반사 펄스신호이다[12,13].

$$C_{i,j}(\tau) = \sum_{m=-M}^M R_{d_i}(\tau)R_{s_j}(m\Delta T_s + \tau) \quad (18)$$

$$\rho_{i,j}(\tau) = C_{i,j}(\tau) / \sqrt{C_{i,i}(0)C_{j,j}(0)} \quad (19)$$

$$\phi_{i,j} = |\rho_{i,j}(\tau)|_{\max} \quad (20)$$

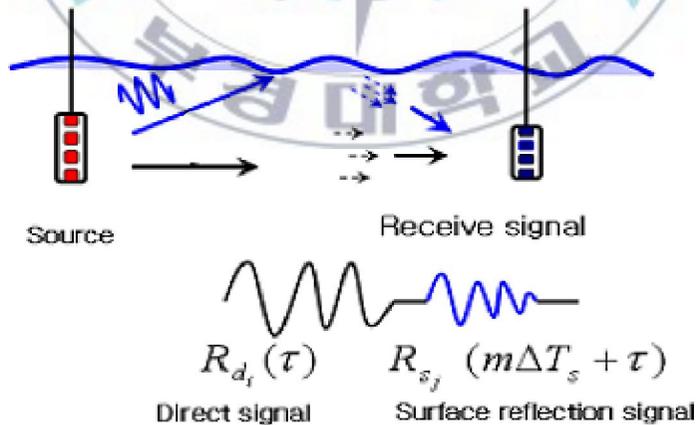


그림 8. 해면 변동에 의한 해면파의 수신특성

20개의 펄스신호간의 지연시간  $T_d$ 에 따른 일관성은 식(21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi(t_i, T_d) = |\rho_{i, i-n}(\tau)|_{\max} ; n = 1, 2, \dots, 20 \quad (21)$$

지연시간에 따른 각 배열센서의 일관성의 변화는 해면파의 시간변화와 일치하여 해면파의 시간과형을 보이게 된다. 평균치는 해면파의 평균치 즉, 가장 우세한 해면파형과 일치하게 된다.

그림 9는 1kHz-10kHz 대역을 갖는 4ms의 LFM(Linear Frequency Modulation)펄스를 초당 1회씩 수심 2.7m에서 무지향성 송신기로 송신하고 수심 1.75m에서 8개의 배열센서로 수신된 신호의 시간에 따른 일관성 특성이며, 그림 10은 시간지연에 따른 일관성 변화 평균 및 표준편차를 나타내고 있다. 그림 7의 풍속에 따른 Pierson-Moskowitz 파고 스펙트럼과 일관성 변화는 우세한 해면파의 변화와 일치하게 된다.

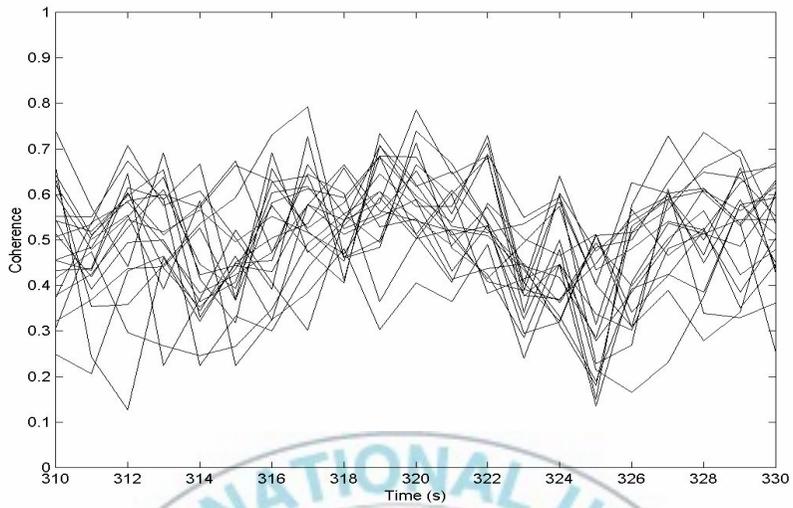


그림 9. 시간에 따른 일관성 특성

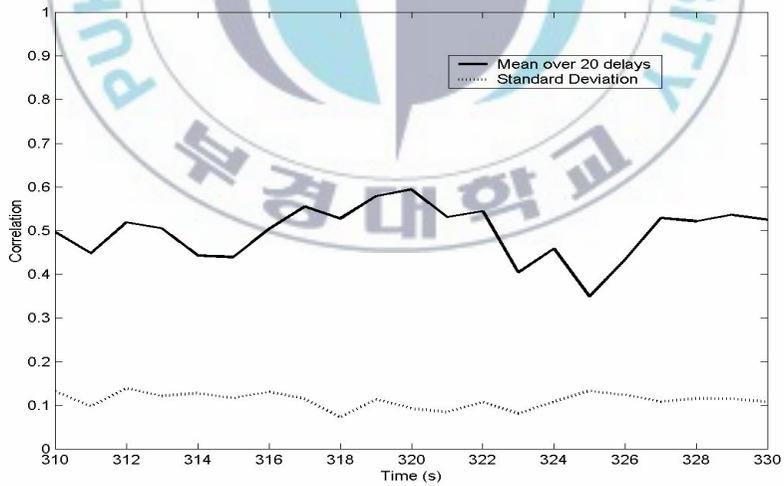


그림 10. 20개 신호에 대한 일관성 평균 및 표준편차

### Ⅲ. 통신채널 변동이 수중통신 성능에 미치는 영향

#### 3.1 수중음향 다중경로 채널에서 일관성 대역폭에 따른 통신성능

다중경로 채널에서 일관성 대역폭이 전송성능에 미치는 영향을 해석하기 위한 수치모의 실험의 조건은 표 1과 같으며, 그림 11은 수치모의 실험의 구성도이다. 송·수신기의 수평거리는 각각 10m와 1000m인 경우로, 송신 신호는 20kHz, 0.5ms 펄스신호를 사용하고 변조방식은 BFSK와 BPSK 방식을 사용하여 전송성능을 평가하였다. 경계면의 반사계수는 해저반사 계수의 모래에 적용되는 0.41, 해면반사 계수에 파고 0.05m에 적용되는

표 1. 수치모의 실험 변수

Modulation	BFSK, BPSK
Transmitter and Receiver depth	5m, 97m
Water depth	100m
Carrier frequency	BFSK: Mark-25kHz, Space-30kHz BPSK: 30kHz
bit rate	26kbps
Transmitter and receiver range	10m, 1000m
Multipath	Direct, Surface, bottom, surface-bottom, bottom-surface

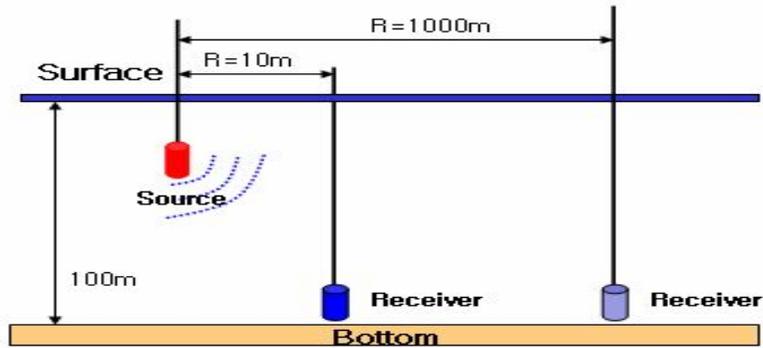


그림 11. 수치모의 실험의 구성도

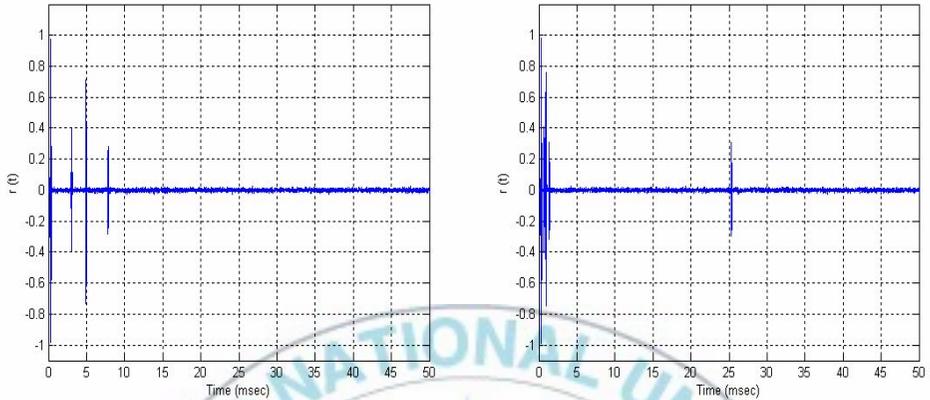
0.85이다. 다중경로는 직접파, 해면반사파, 해저반사파, 해면-해저반사파, 해저-해면반사파로 5개의 경로만 설정하였다.

그림 12는 송·수신기의 수평거리 10m와 1000m인 경우 거리에 따른 지연확산 특성을 나타내고 있다. 그림 12(a)에서 지연확산은 약 20ms이며, 그림 12(b)의 지연확산은 약 90ms이다. 그림 12에서 보는 바와 같이 거리가 증가함에 따라 지연확산이 증가함을 알 수 있다.

그림 13은 그림 12(a)와 12(b)에 대응되는 주파수 응답특성으로 거리가 증가함에 따라 주파수 선택성이 증가됨을 알 수 있으며, 이로 인해 심벌간 간섭이 증가되어 수중음향통신 시스템의 전송성능이 저하될 것이다.

그림 12의 시간응답 특성을 송·수신기의 거리 10m와 1000m에 대해 식 (3)을 적용하면, 각각의 시간지연 유효치  $\tau_{rms}$ 는 10m에서는 3.1ms, 1000m에서는 7.2ms이다. 이에 대응되는 일관성 대역폭은 식 (5)로부터 각각 330Hz와 130Hz이다. 따라서 오류 없이 전송할 수 있는 신호의 전송률은 각각 약 165bps이하와 약 65bps이하이다. 수치모의 실험에서 도플러 주파수 확산과 잡음은 없는 것으로 가정하여 ISI는 이산다중경로에 의해

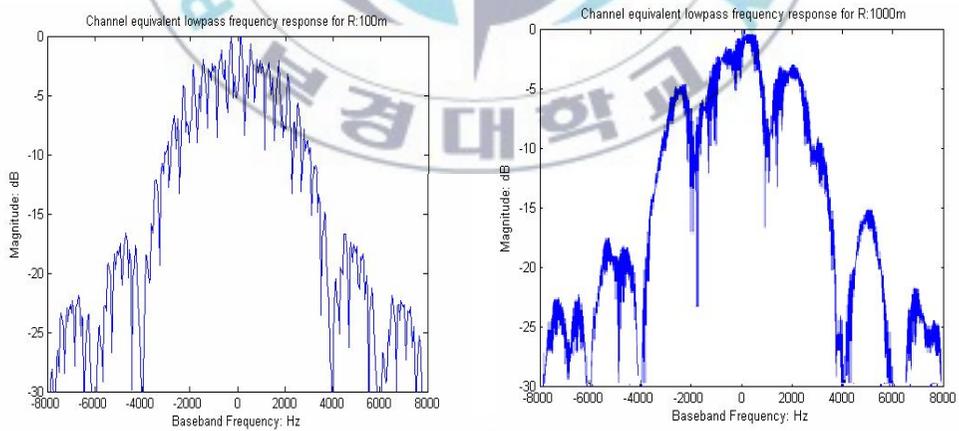
서만 발생하는 것으로 하였다.



(a) 송 · 수신기 거리 10m

(b) 송 · 수신기 거리 1000m

그림 12. 송 · 수신기 거리에 따른 지연확산 특성



(a) 송 · 수신기 거리 10m

(b) 송 · 수신기 거리 1000m

그림 13. 송 · 수신기 거리에 따른 주파수 응답 특성

그림 14는 표 1의 환경에 대한 Bellhop 모델에 의한 송·수신기 거리별 지연확산 특성으로 지연확산의 폭이 거리 증가에 따라 커지므로 일관성 대역폭  $B_c$ 는 감소하는 특성을 보인다.

그림 15는 송·수신기 거리 10m에서 BFSK와 BPSK의 일관성 대역폭에 따른 비트오류 특성으로, 채널의 지연확산 특성을 통해 계산된 일관성 대역폭 330Hz(전송률:165bps)보다 신호대역폭이 작은 경우에는 오류 없는 정보전송이 가능하다. 그림 15(a)는 BFSK 방식이며, 15(b)는 BPSK 방식으로 일관성 대역폭 165bps보다 작은 신호 전송률 100bps에서는 BFSK와 BPSK 방식 모두 오류없는 정보전송이 가능함을 확인하였다. 그러나 일관성 대역폭 330Hz(전송률:165bps)보다 큰 신호 전송률 300bps를 가진 그림 15(c)와 15(d)는 일관성 대역폭에 의해 오류가 증가되어 전송성능이 제한됨을 확인하였다.

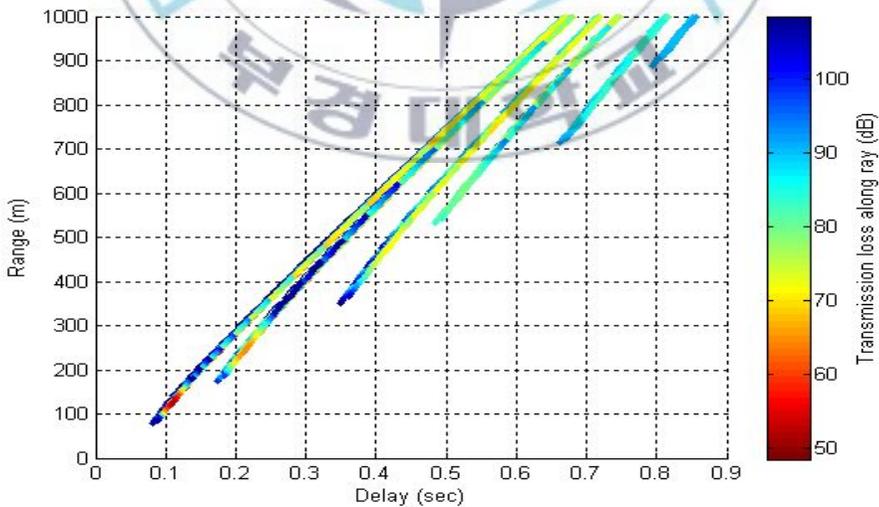
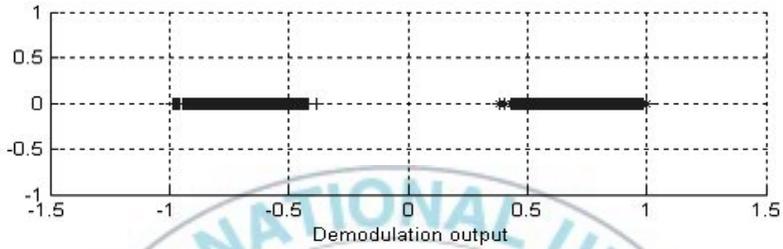
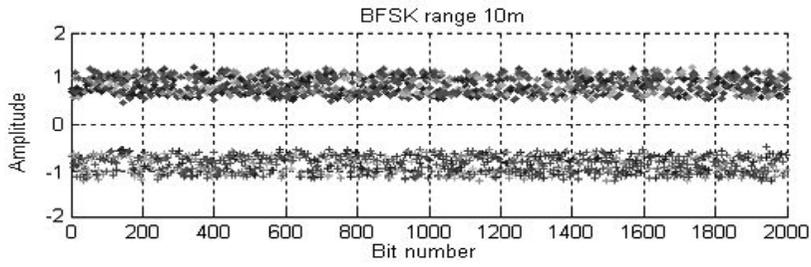
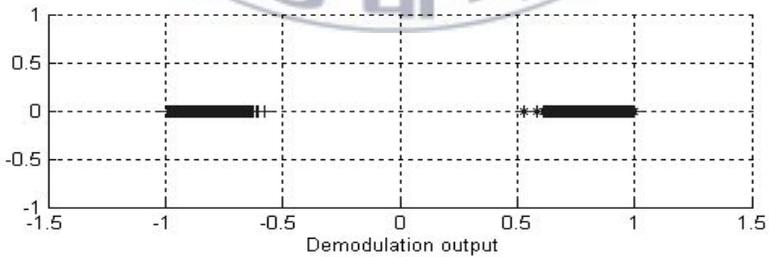
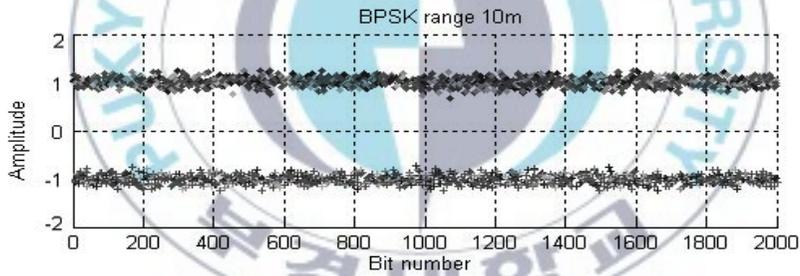


그림 14. Bellhop 모델에 의한 거리별 지연확산 특성

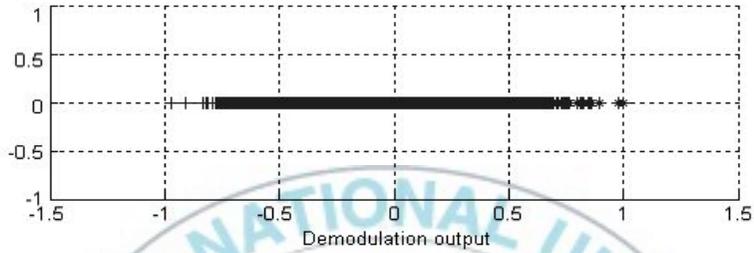
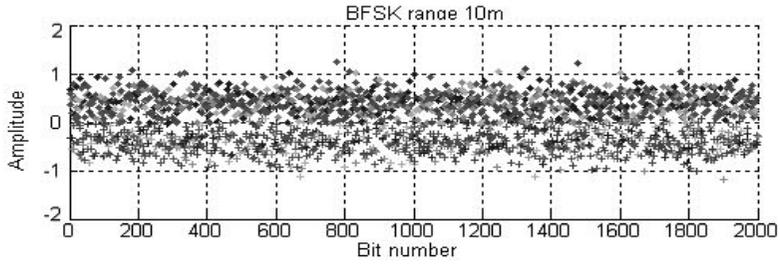


(a) 전송률 100bps의 BFSK 전송성능

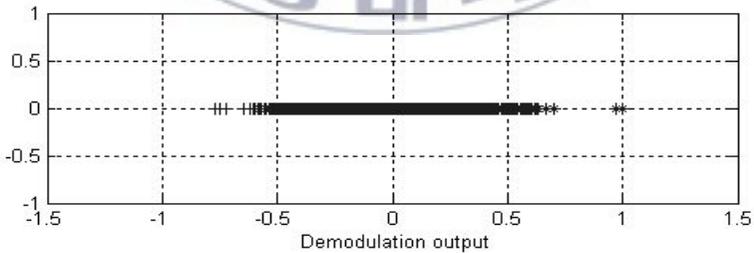
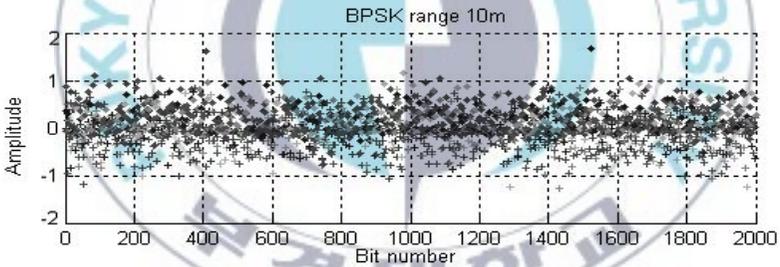


(b) 전송률 100bps의 BPSK 전송성능

그림 15. 송·수신기 거리 10m에서 일관성 대역폭에 따른 BFSK와 BPSK의 전송성능

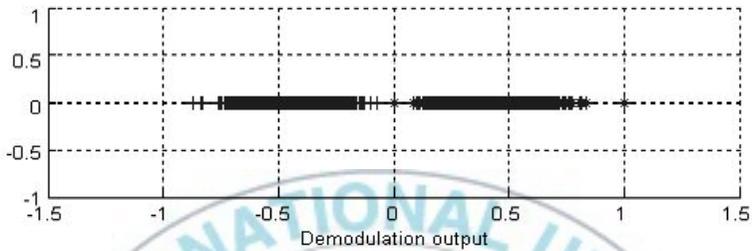
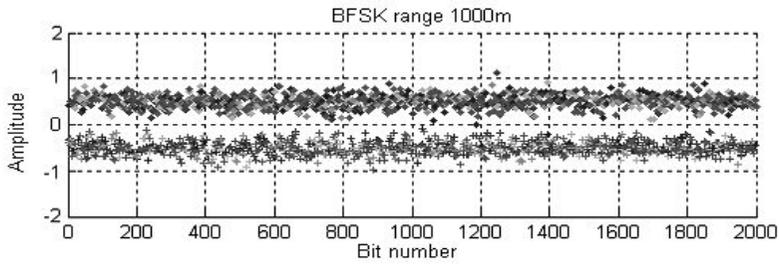


(c) 전송률 300bps의 BFSK 전송성능

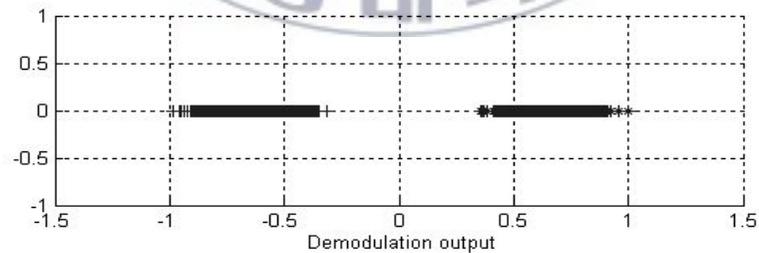
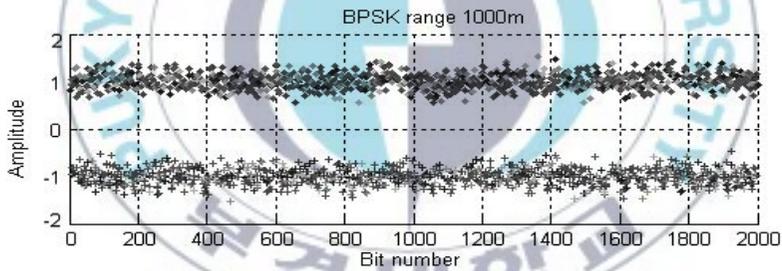


(d) 전송률 300bps의 BPSK 전송성능

그림 15. 송·수신기 거리 10m에서 일관성 대역폭에 따른 BFSK와 BPSK의 전송성능

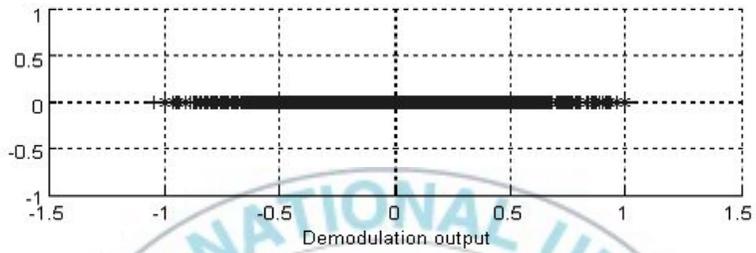
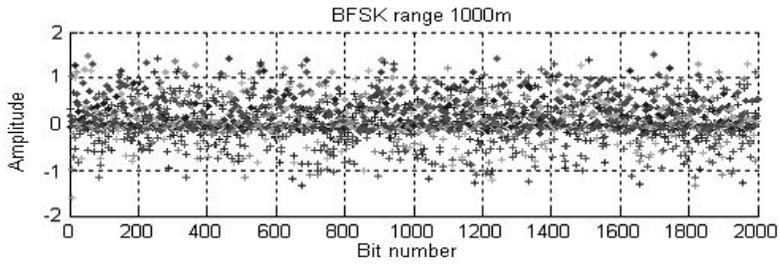


(a) 전송률 50bps의 BFSK 전송성능

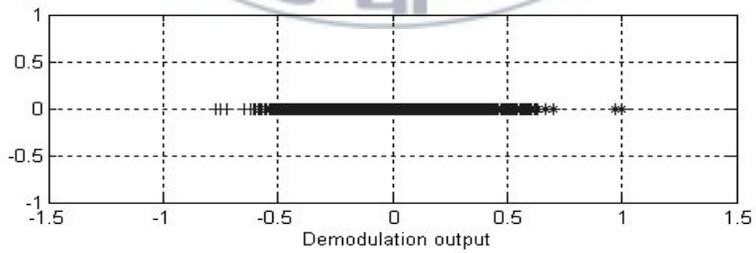
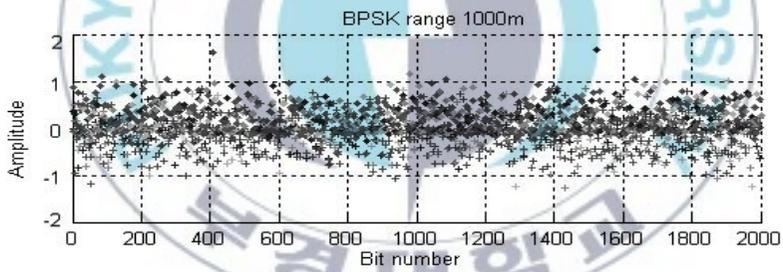


(b) 전송률 50bps의 BPSK 전송성능

그림 16. 송·수신기 거리 1000m에서 일관성 대역폭에 따른 BFSK와 BPSK의 전송성능



(c) 전송률 100bps의 BFSK 전송성능



(d) 전송률 100bps의 BPSK 전송성능

그림 16. 송·수신기 거리 1000m에서 일관성 대역폭에 따른 BFSK와 BPSK의 전송성능

그림 16은 송·수신기 거리 1000m에서 BFSK와 BPSK의 일관성 대역폭에 따른 비트오류 특성이다. 계산된 거리 1000m에서의 일관성 대역폭은 130Hz(전송률:65bps)로, 신호 대역폭은 일관성 대역폭 보다 작아야 오류 없는 정보전송이 가능하다. 그림 16(a)는 전송률 50bps의 BFSK 전송성능을 나타내고 있으며, 그림 16(b)는 동일한 전송률의 BPSK이다. 전송률 50bps에서는 BFSK와 BPSK방식 모두 일관성 대역폭 보다 작아 오류 없는 정보전송이 가능함을 확인하였다. 그림 16(c)와 16(d)의 경우 그림 15(c)와 15(d)처럼 일관성 대역폭 보다 큰 경우 오류가 증가됨을 나타낸다.

따라서 그림 15와 그림 16의 결과에서 일관성 대역폭이 신호대역폭 보다 큰 경우 오류 없이 전송됨을 보였으며, 일관성 대역폭이 신호대역폭 보다 작은 경우 오류가 증가되어 신뢰성 있는 정보전송이 불가능함을 확인하였다. 수치모의 실험에서 BFSK의 경우가 BPSK보다 분산이 크며, 아울러 바이어스 오차가 포함되어 있음을 보인다.

일관성 대역폭과 전송률에 따른 비트오류 특성은 그림 17과 같다. 전송 거리 10m에서는 150bps이하에서 BFSK와 BPSK방식 모두 오류 없는 전송이 가능하며, 거리 1000m에서는 50bps이하에서 BFSK와 BPSK방식 모두 오류 없는 전송이 가능함을 보인다.

결론적으로 다중경로에 의한 지연확산은 주파수 선택성을 야기하여 일관성 대역폭이 좁아져 심벌 간 간섭이 증가되어 수중음향 통신시스템의 설계에서 전송성능에 영향을 주는 일관성 대역폭이 고려되어야 함을 확인하였다.

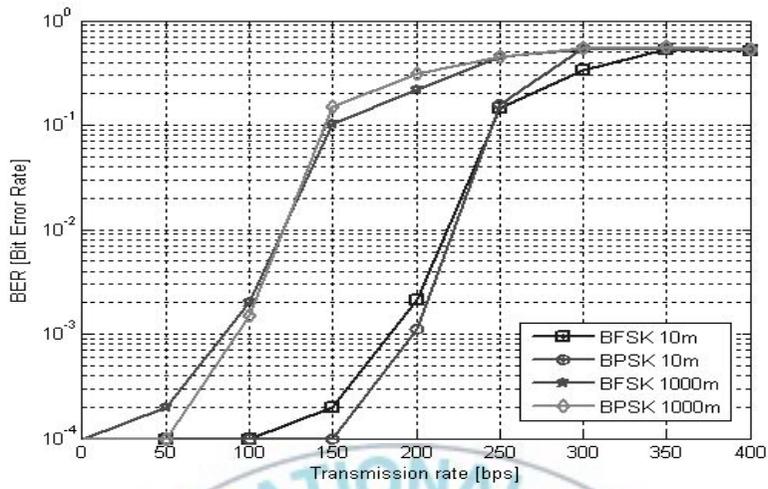


그림 17. 전송률에 따른 비트오류 특성



### 3.2 해면변동에 의한 일관성 실험

3.1절에서 다중경로에 의한 지연확산이 일관성 대역폭을 제한시켜, 전송 성능을 저하시키는 주요 요인임을 확인하였다. 본 절에서는 다중경로 환경 중에서 시변적 영향이 많은 해면변동에 의한 시간확산과 주파수 일관성 특성을 해상 실험을 통해 분석하였다. 표 2는 해상실험의 요소를 나타내고 있으며, 그림 18은 해상실험의 구성을 보여주고 있다. 그림 19(a)는 실험에서 사용한 송신기이며, 송신기 수심은 11m, 21개의 센서를 배열하고 지향성 송신기이다. 그림 19(b)는 실험에서 사용한 수신기이며, 수신기의 수심은 46m, 센서간격은 10.7cm, 10개의 배열센서로 구성된 수신기를 사용하였다. 송·수신기간의 거리는 200m, 수심은 170m이다.

표 2. 해상실험 요소

Source ping signal	2ms tone burst signal
Source and Receiver depth	11m, 47m
Water depth	170m
Source and Receiver range	200m
Wind speed	15~16knot at 15.5m
Ping interval	2sec

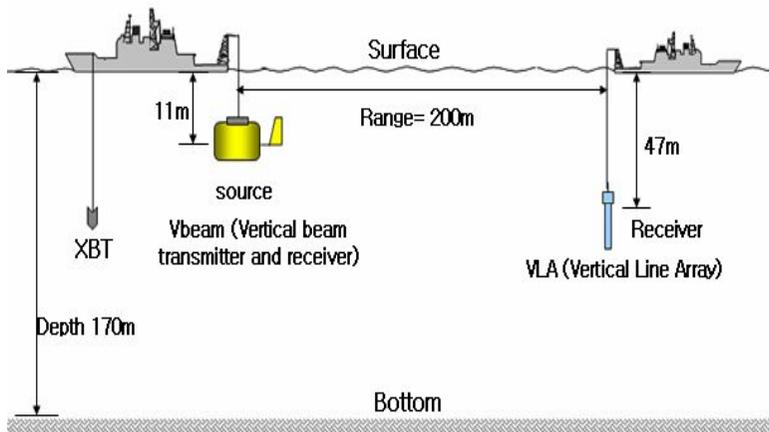


그림 18. 해상실험의 구성



(a) 송신기



(b) 수신기

그림 19. 실험에 사용된 송·수신기

그림 20은 실험해역에서의 5시간 동안의 음속구조로 음속의 변화가 거의 없음을 나타내고 있다. 그림 21(a)는 송신기에서 수신기까지 고정된 음속 1500m/s에서 해저 매질은 진흙으로 가정한 상태의 Ray tracing이며 그림 21(b)는 직접파와 해면 반사파 그리고 해저 반사파만을 고려한 각각의 시간지연 특성이다. 직접파와 해면 반사파의 시간지연은 3.2ms이며, 직접파와 해저 반사파의 시간지연은 95.6ms이다. 실험의 분석에서는 해저면이 진흙으로 흡수율이 높다고 가정하여, 해저 반사를 무시하였다.

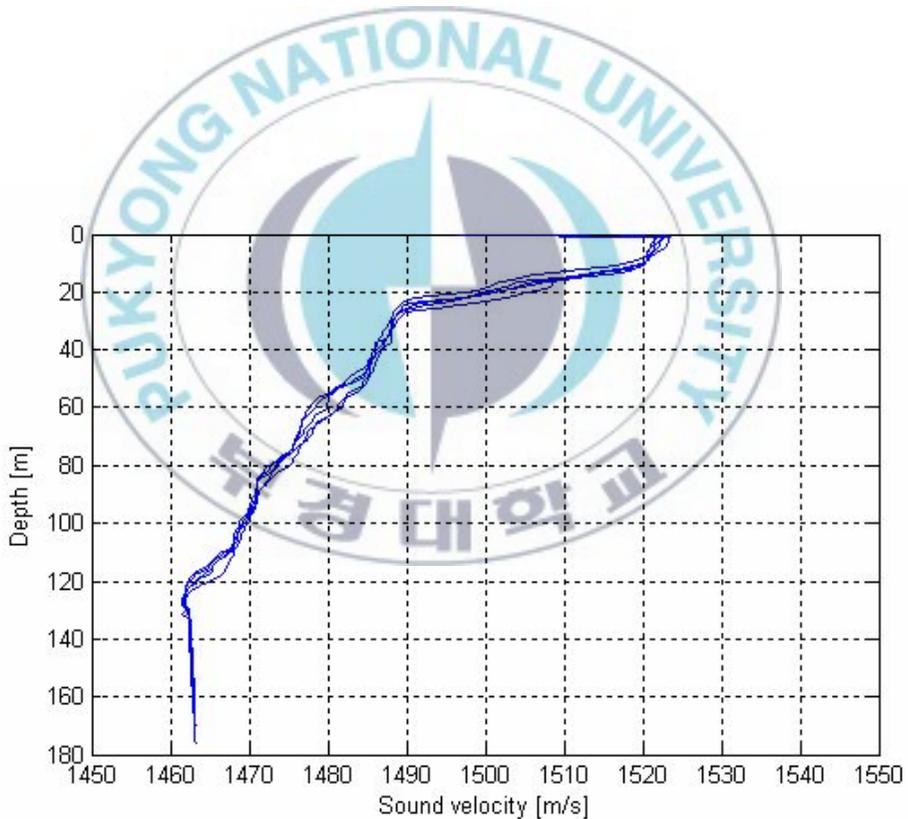
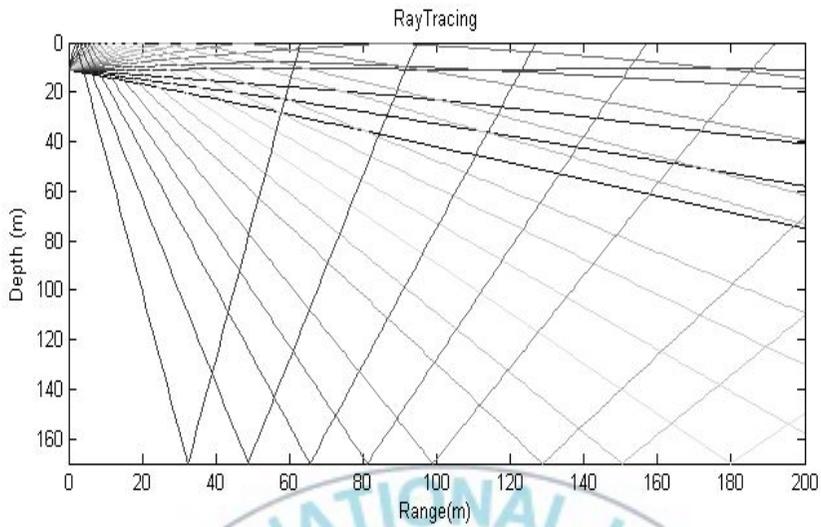
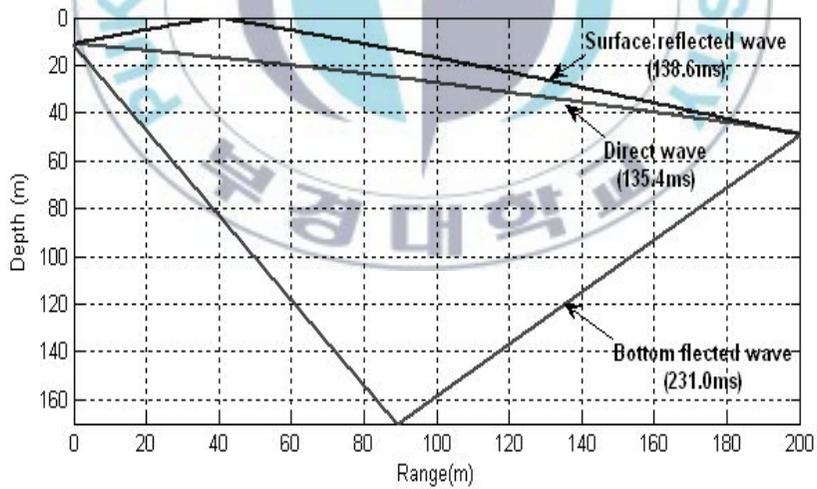


그림 20. 실험해역의 SVP (Sound Velocity Profile)



(a) 송 · 수신간의 Ray tracing



(b) 송 · 수신간의 직접파, 해면반사파, 해저반사파의 시간지연 특성

그림 21. 송 · 수신간의 Ray tracing과 반사파의 시간지연 특성

실험의 분석은 그림 22에서 보는 바와 같이 각 배열센서로 5분간 수신되는 신호를 식(18)~(21)을 적용해 해면변동에 따른 일관성을 분석하였다. 그림 23은 2초 간격으로 수신된 신호 중 5개를 나타내었다. 수신신호는 시간에 따라 해면변동에 의해 진폭의 변화와 지연확산특성이 시간적으로 변화되어 수신됨을 확인할 수 있다.



그림 22. 수신신호에 대한 일관성 분석기법

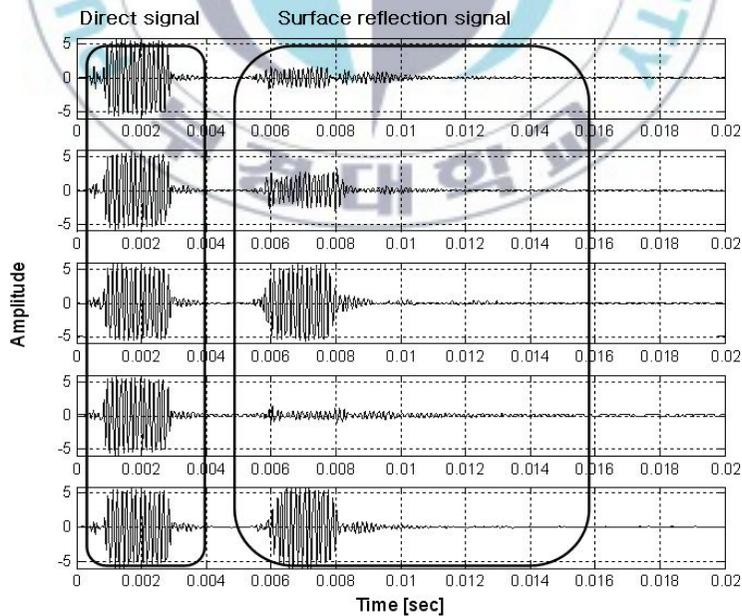


그림 23. 2초 간격으로 수신된 5개의 수신신호

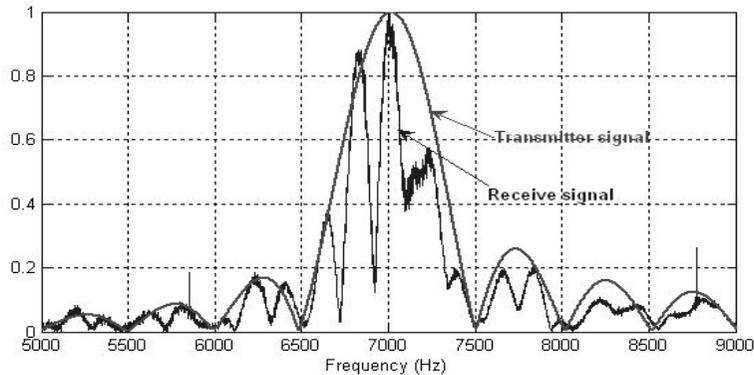
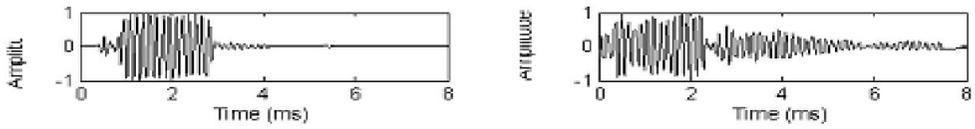


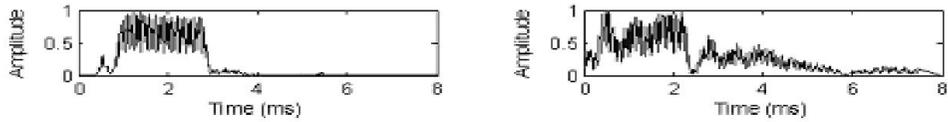
그림 24. 송신신호와 수신신호의 스펙트럼

그림 24는 송신신호와 수신신호의 스펙트럼으로 해면반사파의 영향이 우세한 다중경로 환경에서 수신신호는 주파수선택성이 증가함을 확인할 수 있다.

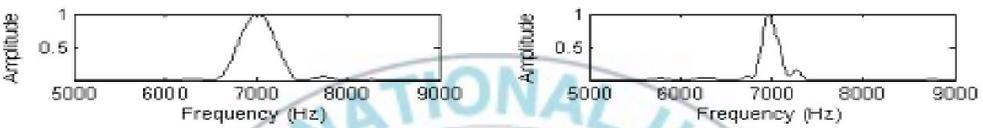
직접파, 해면반사파의 수신신호, 직접파, 해면반사파의 포락선, 신호대역폭, 자기상관 및 일관성 대역폭은 그림 25와 같다. 그림 25(a)는 직접파와 해면반사파의 지연확산 특성으로 해면변동에 의한 반사파는 지연 확산되는 특성을 볼 수 있으며, 그림 25(b)의 포락선에서도 해면반사파가 지연 확산되는 특성을 확인하였다. 이런 지연확산에 의해 그림 25(c)에서 직접파의 경우 신호 대역폭이 1kHz, 해면반사파의 경우 500Hz로 대역폭이 좁아짐을 확인할 수 있었다. 그림 25(d)의 자기상관함수를 통해, 그림 25(e)의 일관성 대역폭을 확인한 결과, 직접파인 경우 일관성 대역폭이 1kHz, 해면반사파의 경우 500Hz로 나타났다. 따라서 해면파의 지연확산에 의해 일관성 대역에 영향을 받는 것을 알 수 있으며 주파수 선택성이 증가함을 확인하였다.



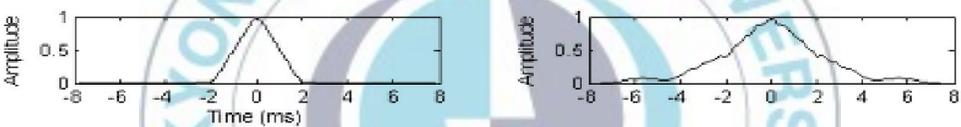
(a) 직접파, 해면반사파의 수신신호



(b) 직접파, 해면반사파의 포락선



(c) 신호대역폭



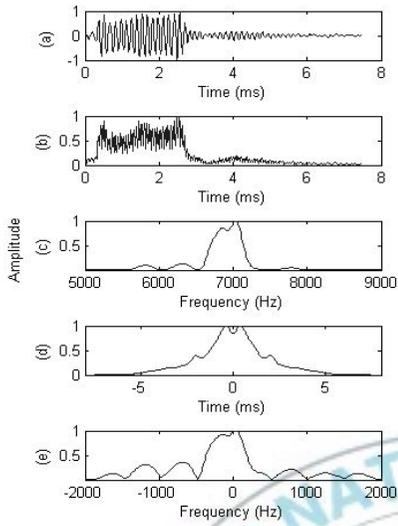
(d) 자기상관



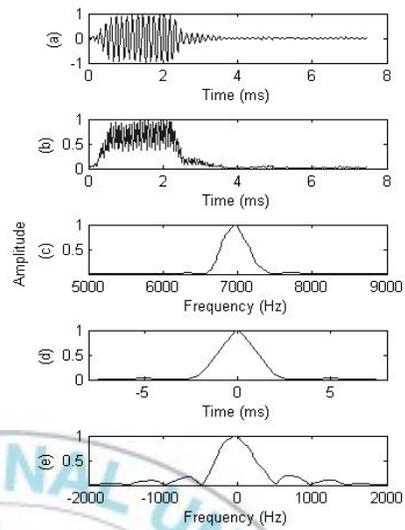
(e) 일관성 대역폭

그림 25. 직접파와 해면반사파의 비교

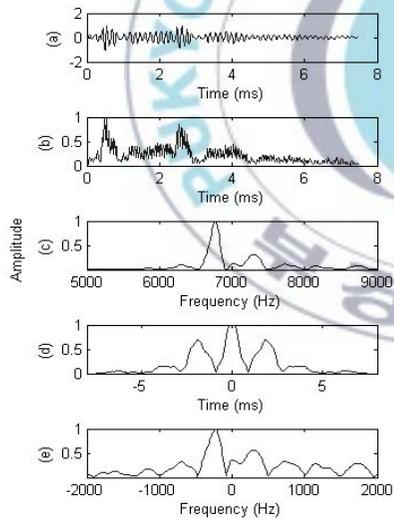
그림 26은 4개의 송신펄스열에 대한 직접파와 해면반사파의 특성 비교로 해면변동에 의해 시간적으로 각기 다른 시간지연특성을 보이며, 이로 인해 일관성 대역폭과 주파수 선택성이 시간에 따라 변화함을 확인하였다.



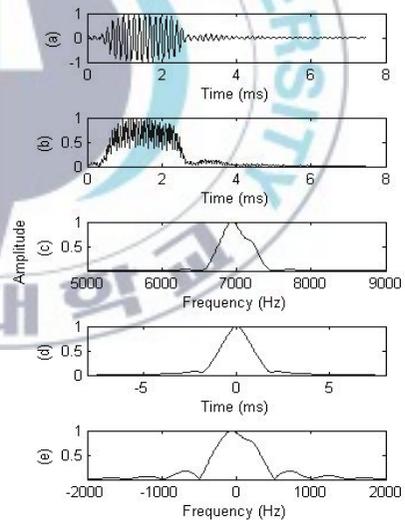
첫 번째 펄스



두 번째 펄스



세 번째 펄스



네 번째 펄스

그림 26. 4개의 송신펄스열에 대한 직접파와 해면반사파의 특성비교  
 (a) 직접파, 해면반사파의 수신신호 (b) 직접파, 해면반사파의 포락선  
 (c) 신호대역폭 (d) 자기상관 (e) 일관성 대역폭

그림 27은 직접파와 해면반사파의 세기와 주파수 대역 특성을 나타내고 있다. 그림 27(a)는 직접파와 해면반사파의 세기로 직접파의 경우 약 2ms, 해면반사파의 경우 약 6ms의 지연확산 특성을 확인할 수 있다. 그림 27(b)는 직접파와 해면반사파의 주파수 대역 특성으로 해면반사파의 경우 직접파의 절반의 대역폭을 가지며, 3dB 지점에서 직접파와 해면반사파의 대역폭 차이는 500Hz로 나타났다. 지연확산으로 인해 일관성 대역폭이 감소함을 알 수 있다.

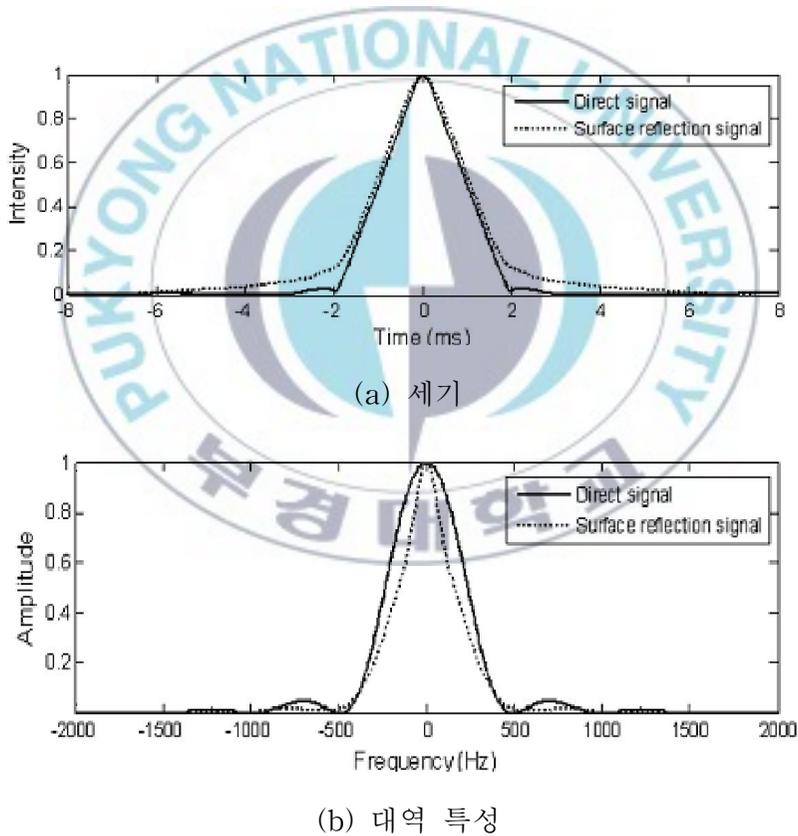


그림 27. 직접파와 해면반사파의 세기와 대역폭

그림 28은 150개의 수신된 해면반사파들의 확률밀도이다. 그 결과는 Rice, Rayleigh 확률밀도와 유사함을 알 수 있다. 그림 29는 시간지연 함수인 모든 수신기의 평균 일관성을 보여준다. 5분의 150개 delay에 대한 평균은 0.9이다. 시간지연과 함께 일관성의 변동은 해면의 변동과 일치할 것이다.

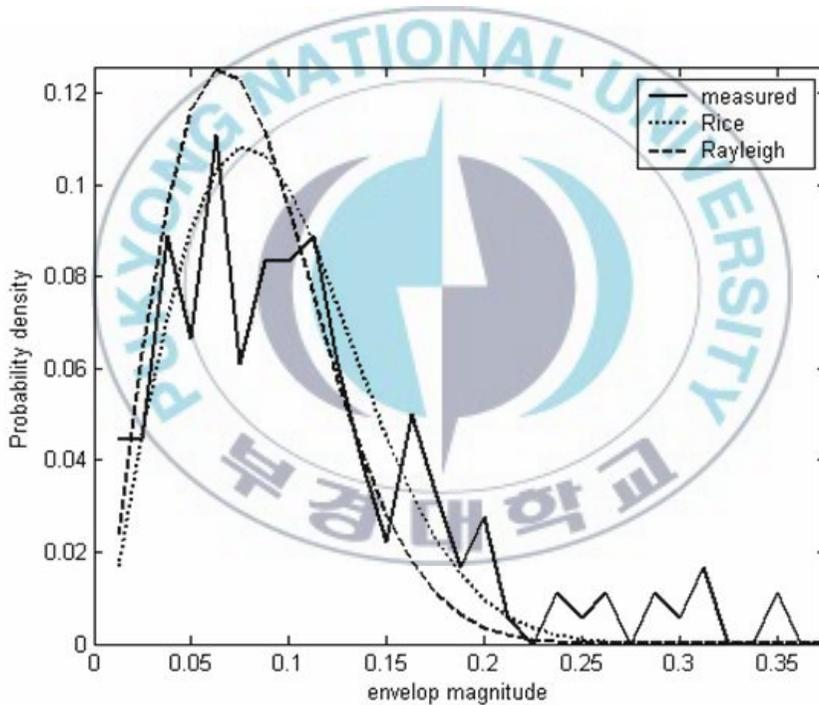
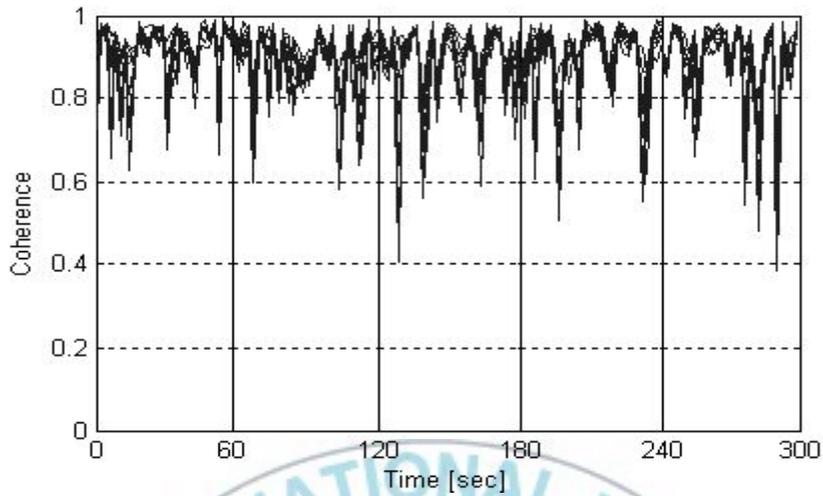
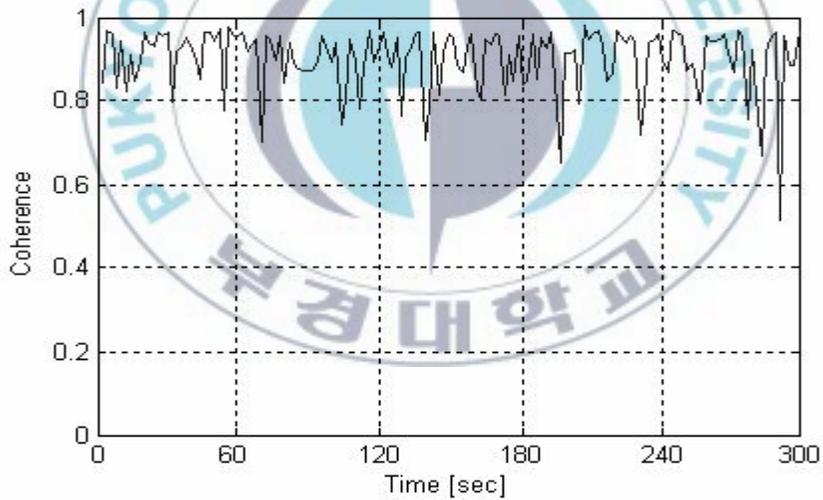


그림 28. 150개의 수신된 신호의 확률밀도



(a) 배열센서 10개에 수신된 신호에 대한 일관성 특성



(b) 5분간의 일관성 특성

그림 29. 배열센서 10개에 수신된 신호에 대한 일관성 특성과 5분간의 일관성 특성

Pierson-Moskowitz의 해면변동에 따른 일관성에서 바다의 표면 스펙트럼의 주요 해면파의 높이와 주파수는 15.5m 위에서 측정한 풍속(15~16knot)에 대해 1.34m, 0.177Hz로 그림 30의 약 0.175Hz와 근사함을 확인하였다. 해면 변동에 의한 수신신호의 스펙트럼에서 해면파에 의한 송신신호의 주파수 선택성이 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 해면의 평균 일관성은 grazing angle  $16^\circ$ , 풍속 15~16knot에서 0.9로 해면파의 주요 주파수와 근사함을 알 수 있었다.

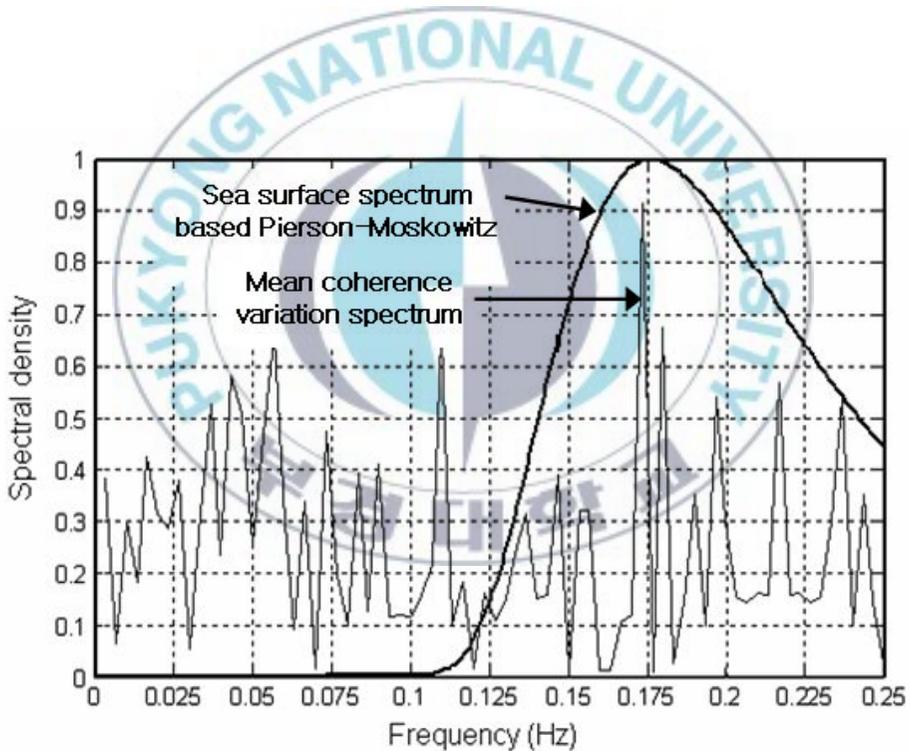


그림 30. Pierson-Moskowitz 해면파 스펙트럼과  
해면변동에 따른 일관성변화 스펙트럼

## IV. 결론

본 논문에서는 수중통신 다중경로 채널에서 일관성 대역폭에 따른 전송 성능을 평가하였다. 이를 위해 먼저 일관성 대역폭이 BFSK와 BPSK방식의 전송성능에 미치는 영향을 수치모의 실험을 통해 평가하였다. 또한 해상실험을 통해 송·수신기의 위치를 상대적으로 해저면 보다 해면에 근접한 상황에서 해면의 시변적 특성이 포함된 수신신호의 해면변동에 의한 시간 및 주파수 일관성 특성을 해석하였다.

BFSK와 BPSK의 전송성능을 수치모의 실험을 통해 다중경로 채널에서 신호 대역폭이 일관성 대역폭 보다 적어야 되며, 신호 대역폭이 일관성 대역폭 보다 큰 경우 비트오류가 급속히 증가되어 전송성능이 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

해상실험에서는 Pierson-Moskowitz의 해면변동에 따른 일관성에서 바다의 표면 스펙트럼의 주요 해면파의 높이와 주파수는 15.5m 위에서 측정된 풍속(15~16knot)에 대해 1.34m, 0.177Hz로 약 0.175Hz와 근사함을 확인하였다.

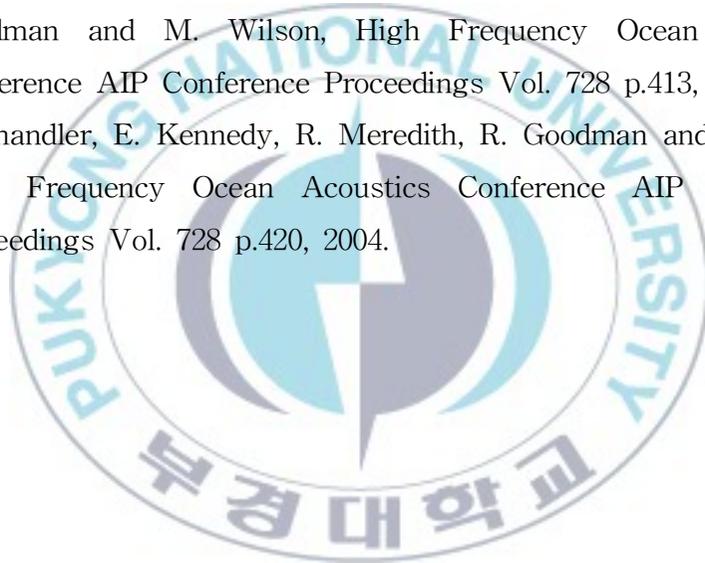
결론적으로 수중음향 통신채널의 다중경로를 통해 수신된 신호는 경로차이에 의한 지연확산이 채널의 일관성 대역폭에 영향을 주며 주파수 선택성을 증가시켜 전송성능을 제한시킴을 알 수 있었다. 아울러 해면의 시간적 변동에 의해 일관성 및 일관성 대역폭은 시간에 따라 변화하고 변동특성은 해면파의 스펙트럼 특성과 일치한다.

## 참고문헌

- [1] Milica Stojanovic, "Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communication", Journal of Oceanic engineering, Vol. 21, No.2, pp.125-130, April 1996.
- [2] H. Cox, "Navy Applications of High Frequency Acoustics", High Frequency Ocean Acoustics Conferences, Vol.728, pp.449-455, March 2004.
- [3] 박지현, 배종우, 류경백, 이성욱, 윤종락, "해면교란에 의한 도플러 확산 및 간섭", 한국음향학회 추계학술발표대회, pp.137-138, 2007.
- [4] James C. Preisig and Grant B. Deane, "Surface wave focusing and acoustic communications in the surf zone", J. Acoust. Soc. Am., 116(4), pp.2067-2080, 2004.
- [5] John A. Fawcett, "A scattering-chamber approach for solving finite rough surface scattering problems", J. Acoust. Soc. Am., 118(3), pp.1348-1357, 2005.
- [6] Daniel Rouseff, John R. Apel, Mohsen Badiey and Ching-sang Chiu, "Coherence of acoustic modes propagating through shallow water internal waves", J. Acoust. Soc. Am., 111(4), pp.1655-1670, 2002.
- [7] John G. Proakis, *Digital Communications*, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 2000.
- [8] Chun-Dan Lin, Ji-Hyun Park and Jong Rak Yoon, "Multipath Compensation for BPSK Underwater Acoustic Communication",

Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol.24(3E), pp.99-108, 2004.

- [9] 박용완, 홍인기, 최정희 : 이동통신공학, 생능출판사, 2005.
- [10] H. Medwin and Clarence S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, 1998.
- [11] Dominic Reeve, Andrew Chadwick, Christopher Fleming, "Coastal Engineering: Process, Theory and Design Practice", Taylor & Francis, 2004.
- [12] T. Ruppel, S. Stanic, G. Norton, R. Meredith, E. Kennedy, R. Goodman and M. Wilson, High Frequency Ocean Acoustics Conference AIP Conference Proceedings Vol. 728 p.413, 2004.
- [13] H. Chandler, E. Kennedy, R. Meredith, R. Goodman and S. Stanic, High Frequency Ocean Acoustics Conference AIP Conference Proceedings Vol. 728 p.420, 2004.



# 감사의 글

사람의 도리를 우선으로 모든 것을 가르쳐 주신 영원한 스승님 윤종락 지도교수님께 먼저 가슴 깊이 감사드립니다.

또한 부족한 논문의 심사를 맡아주신 하강렬 교수님, 김무준 교수님께 감사드립니다.

모든 일을 묵묵히 옆에서 자신의 일처럼 함께하고 우연에서 인연으로 남게 해주신 이성욱 박사님, 춘단선배, 지현선배, 정원선배, 종우, 광윤, 유정 그리고 마지막까지 도와준 영상이 모두에게 고마운 마음을 전하고 싶습니다.

그리고 부족한 저를 항상 믿고 응원해주신 부모님, 동생, 장모님께 직접 하지 못했었던 사랑한다는 말을 전하고 싶고 가끔 말없이 찾아와 휴식이 되어 주었던 친구들에게도 감사드립니다.

마지막으로 10년 동안 부족한 나에 옆에서 힘이 되어주고 이제는 아내가 되어준 김세나에게 어떤 단어로도 형용할 수 없을 만큼 사랑한다고 전하고 싶습니다.

어떠한 선물보다 값진 생일선물이 되게 해주신 모든 분들께 다시 한 번 감사드립니다.

2009년 1월 2일

류 경 백 드림