



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](#) 

공학석사학위논문

수중 페이딩 변화 특성이 수중
통신성능에 미치는 영향



2014년 8월

부경대학교 대학원

정보통신공학과

박상현

공학석사학위논문

수중 페이딩 변화 특성이 수중
통신성능에 미치는 영향

지도교수 박규철

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2014년 8월

부경대학교 대학원

정보통신공학과

박상현

박상현의 공학석사 학위논문을 인준함.

2014년 8월 22일



◆ 목 차 ◆

Abstract

I. 서론	1
II. 수중 음향 채널의 환경과 페이딩 특성	3
2.1. 수중 음향 채널 환경	3
2.2. 수중 도플러 확산 페이딩 채널의 특성	11
III. 수중 다중경로 환경에서의 변복조 방식	16
IV. 실험 및 결과	23
4.1. 수중 다중경로 채널에서 변조방식의 성능평가	23
4.2. 수중 도플러 확산 페이딩 채널에서 변조방식의 성능평가 ..	28
V. 결론	39
참 고 문 헌	40

◆ 그림 목 차 ◆

그림 1. 수중 음향 모델 현황	1
그림 2. 수중 음향 통신에서 손실의 특징	4
그림 3. 심해와 천해의 배경잡음 특성	5
그림 4. 송·수신기 위치에 따른 다중경로 채널	6
그림 5. 수중 다중경로 채널	7
그림 6. 지연확산에 의한 주파수선택성	9
그림 7. 다중경로 지연확산과 페이딩 특성	10
그림 8. 도플러확산	11
그림 9. 도플러 효과	12
그림 10. 페이딩 형식	13
그림 11. 채널상관함수와 전력밀도함수 사이의 관계	14
그림 12. 수중음향통신시스템 구성도	18
그림 13. FSK 동기식 변·복조	20
그림 14. BPSK 송·수신기 블록 다이어그램	21
그림 15. QPSK 변·복조	22
그림 16. 실험 구성도	24
그림 17. 채널의 응답 특성	25
그림 18. 채널의 주파수 응답특성	25
그림 19. 전송 속도에 따른 BER	28
그림 20. 수조실험 구성도	29
그림 21. 송·수신기 이동거리에 따른 채널응답 특성	31
그림 22. 송·수신기 이동거리에 따른 페이딩	32
그림 23. 거리에 따른 오류률	33
그림 24. 다중경로 지연확산과 페이딩 특성	35
그림 25. 이동속도에 따른 변조방식의 BER	38

◆ 표 목 차 ◆

표 1. 수중 통신 시스템의 성능	17
표 2. 상용화 된 수중 음향 통신 모뎀의 성능	17
표 3. 고정 거리에서의 실험 파라메타	24
표 4. 수중 다중경로 채널에서 전송성능	27
표 5. 이동 실험 파라메타	30
표 6. 거리별 지연확산과 일관성 대역 특성	30
표 6. 이동속도에 따른 도플러 확산 특성	35
표 7. 도플러 확산 페이딩 채널에서 이동 속도에 따른 전송성능	36



Effect on Underwater Communication Performance by Underwater Fading Variation Characteristic

Sanghyun Park

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

Abstract

Underwater acoustic communication systems using acoustic wave is required modulation methods to enable high speed information transmission and to overcome environment of time-space variation. In the real sea, Doppler spread by surface fluctuation, multipath and movement of a transmitter-receiver by surface and bottom of the sea are affect on communication performance. In the real sea.

In this study, underwater acoustic communication performance are evaluated modulation methods, BFSK(Binary Frequency Shift Keying), BPSK(Binary Phase Shift Keying), and QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) according to fading variation by Doppler spread. In the experiment, fading characteristic of channel is analysed by using AWGN(Additive White Gaussian Noise) for dynamic and static statement of a receiver. The performance of three modulation methods is evaluated to dynamic and static statement of a receiver. And strong method for fading variation by a moving receiver is evaluated through the experiment.

As a result, QPSK method is confirmed very excellent for high-speed and lower error rate compared with other methods in underwater static channel. Also, performance is improved when FSK method is applied to system than PSK method in the dynamic channel.

I. 서론

해양 자원 탐사, 해양 생태계 모니터링, 해양 방위 분야에서 수중 음향 통신은 필수적이다. 해양 강대국은 미래의 해양산업 수요에 대비하여 수중 음향 통신을 적용한 수중 음향 무선 네트워크, 수중 무인 잠수정, 수중 작업 로봇 등의 음향 통신을 이용한 시스템 간의 상호 연동 통신망을 구축하고 있다.

수중 음향 모뎀 연구는 1980년대부터 활발히 이루어지고 있으며, 초기 아날로그 방식에서 현재에는 디지털 방식의 제품을 WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution), Evo Logics, Link Quest, Benthos 등이 상용화 하고 있으며, 그림 1과 같이 144 bps ~ 31 kbps의 전송속도의 성능을 보인다.

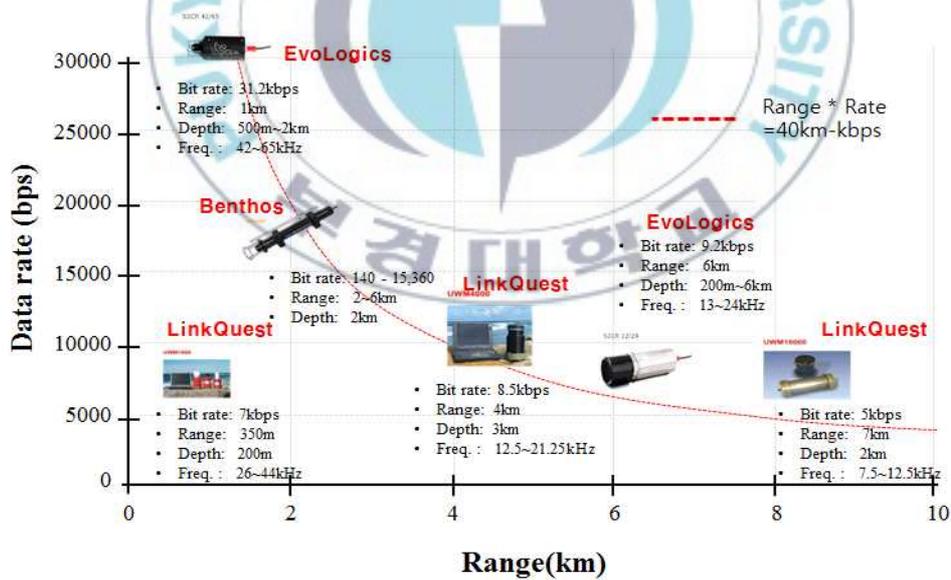


그림 1. 수중 음향 모뎀 현황[1]

국내의 연구 동향은 2004년 부터 2011년까지 한국해양과학기술원에서 “수중 무선통신 시스템 개발사업”으로 수중 음향 모뎀 개발을 수행하였으며, 전송거리 10 km에서 9.7 kbps의 전송속도로 지상통신 속도에 비해 상대적으로 아주 낮은 전송성능이다[1].

수중 음향 통신의 낮은 전송성능은 환경요인에 의한 것으로 대표적인 환경요인에는 반송파 및 전송 거리에 영향을 미치는 손실 (loss), 반송파와 SNR (Signal to Noise Ratio)에 영향을 미치는 배경잡음 (ambient noise), 송신신호의 지연확산과 심벌 간 간섭 (ISI : Inter Symbol Interference), 페이딩 변화에 따른 다중경로 (multipath)의 영향, 이동음원과 해면의 변동에 따른 도플러 (doppler)등이 있다[2].

이러한 수중 음향 통신 채널의 환경요인에 강인한 수중 음향 통신을 위해 변·복조 기법 (modulation and demodulation method), 채널 코딩 (channel coding), 적응 등화기 (adaptive equalizer), 다중화 방식 (multiplexing scheme) 등의 통신기법들이 연구되고 있다[3].

본 논문에서는 수중 페이딩 변화환경에서 BFSK (Binary Frequency Shift Keying), BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)방식의 수중 음향 통신 성능을 평가하였다. 실내 수조에서 송·수신기의 고정된 다중경로 채널과 이동에 따른 도플러 확산 페이딩 채널의 특성을 분석하고, 각 채널에서 변조방식의 성능을 평가하였다. 평가를 통해 수신기의 이동에 따른 페이딩 변화에 강인한 변조 방식을 제시하고, 채널의 변동요인과 수중 음향 통신의 전송성능에 대한 상관관계를 확인하였다.

II. 수중 음향 채널 환경과 페이딩 특성

2.1 수중 음향 채널 환경

수중 음향 통신에서 수중 환경 요인 중 손실은 주파수와 거리에 의존하는 요인으로 흡수손실과 전송손실이 있다. 흡수손실은 음파의 전파 중에 음파에너지가 수중에서 열에너지로 빼앗긴 손실이며, 주파수에 따라 좌우된다. 따라서 주파수가 높아질수록 흡수손실은 증가하게 된다. March 등에 의하면 수심 40 m, 등음속 구조인 천해에서 약 5 km 이내의 거리에서 총 손실 TL (Total Loss) 은 식 (1)로 주어진다[2].

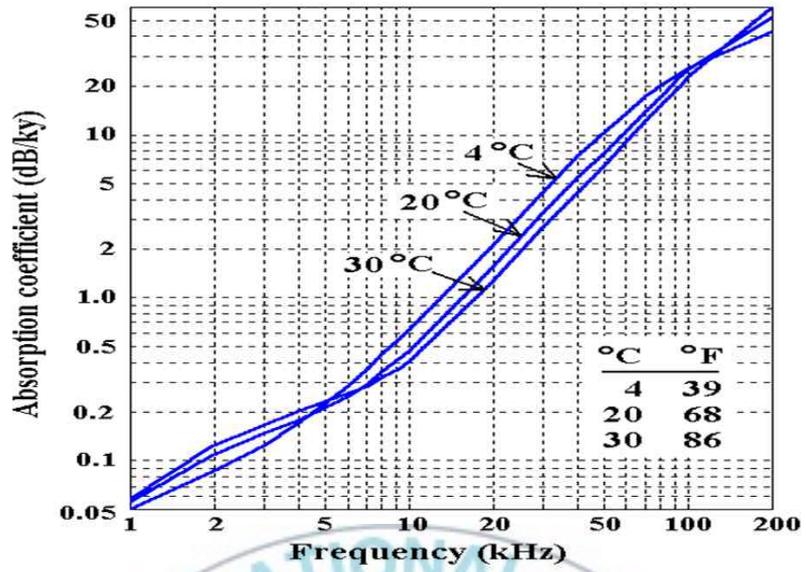
$$TL = 20 \log r + \alpha r \quad (1)$$

여기서 α 는 주파수에 따른 dB 당 흡수 손실이며, r 은 거리이다. 전송손실은 주파수와 거리에 따른 전송손실로 식 (2)와 같이 주어진다[2].

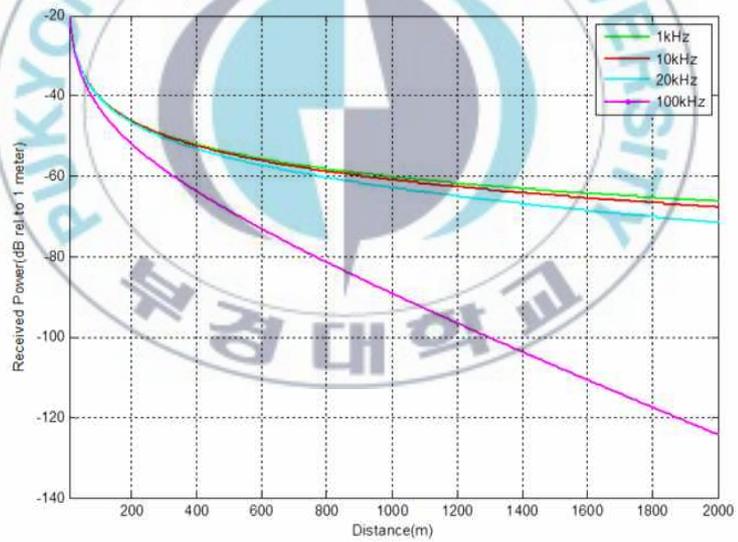
$$TL = 10 \log r \quad (2)$$

그림 2 (a)는 주파수 증가에 따른 흡수손실을 나타낸 것이다. 흡수손실은 식 (1)에 의해 주파수에 따라 흡수율이 변화하는 것을 보여주고 있다. 또한 전파를 사용할 경우 음향신호를 사용하는 것보다 흡수율이 증가하기 때문에 수중 음향통신에서는 음파를 사용한다. 그림 2 (b)는 주파수별 전송손실로 거리에 따라서 각 주파수의 손실형태를 나타내고 있다.

배경잡음은 인공적으로 만들어진 잡음과 배경잡음을 들 수 있다.



(a)



(b)

그림 2. 수중 음향 통신에서 손실의 특징

(a)흡수손실, (b)전송손실

그림 3은 수중의 배경잡음 특성을 보여주는 것으로 심해의 경우 배경잡음에 영향을 주는 주요요인은 통행 선박과 해상 상태에 의해 배경잡음 크기가 결정되며, 천해에서는 육상의 산업시설에 의한 수중 전파 음과 천해의 다양한 해양생물에 의한 소음에 의해서 배경잡음 크기가 결정된다[2]. 또한 낮은 주파수를 사용할 경우 높은 전송출력이 요구되며, 높은 주파수를 사용할 경우 손실에 대한 문제가 발생된다. 따라서 수중 음향 통신 시스템의 경우 배경잡음이 낮은 수 kHz ~ 수십 kHz의 주파수 대역이 선택된다.

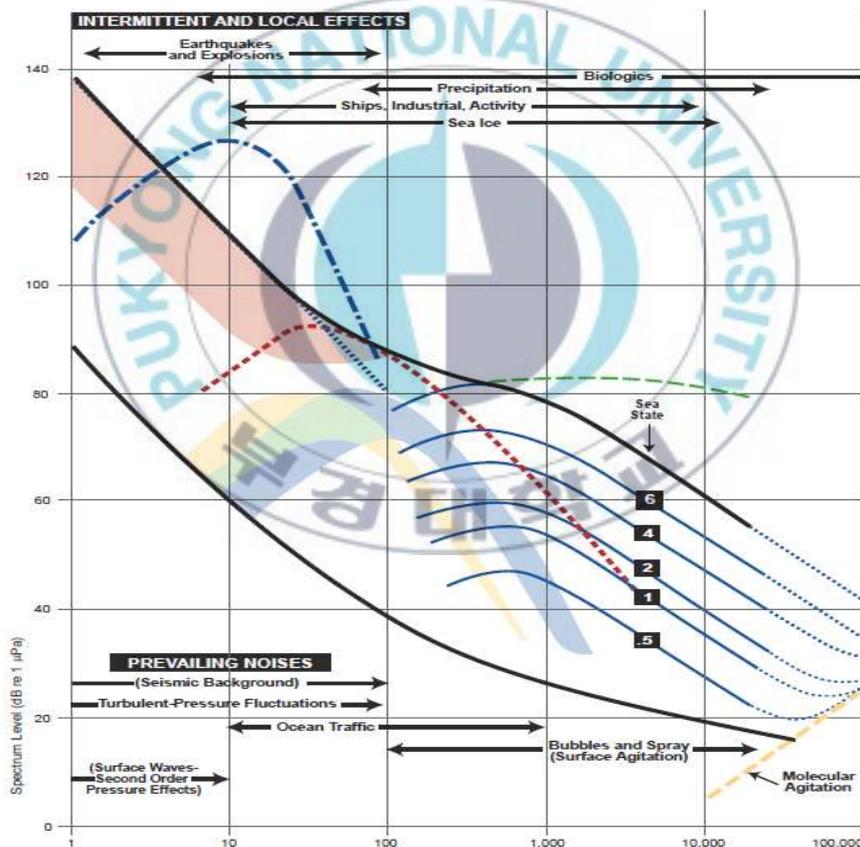


그림 3. 수중 배경잡음 특성

해면과 해저로 경계된 수중 다중경로 채널은 시공간적 변동성을 가진 채널로 송·수신기의 위치에 따라 그림 4와 같이 수평 채널과 수직 채널로 분류할 수 있다. 수평 채널은 송·수신기가 수평 방향으로 위치한 형태로 경계면 입사각이 작아 다중경로 영향이 커지게 되며, 상대적으로 긴 지연확산으로 채널 대역폭이 좁다. 이로 인해 각 수신신호는 다중경로 채널에 의해 지연확산에 되고, 전송채널 대역폭의 제한과 심벌 간 간섭 그리고 주파수 선택성이 증가되어 전송성능을 저하시킨다. 수직 채널은 송·수신기가 수직 방향으로 위치하는 채널로 해면과 해저의 경계면 반사파는 상대적으로 큰 입사각에 의해 직접파 보다 세기가 낮다. 그러므로 짧은 지연확산으로 넓은 채널 대역폭을 확보할 수 있기 때문에 수평 채널에 비해 상대적으로 고속 및 신뢰성 있는 전송성능을 확보할 수 있다[4][5].

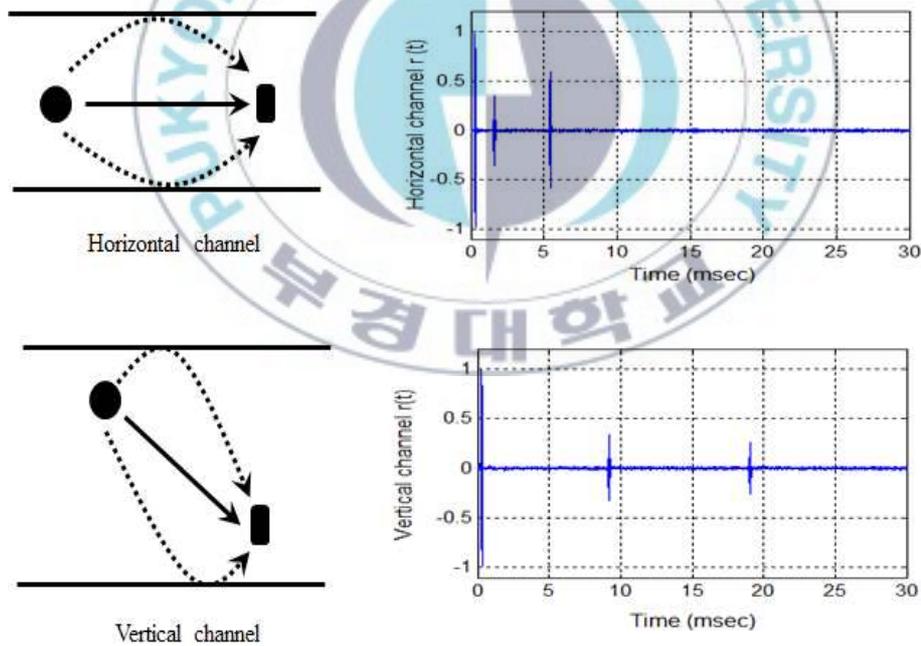


그림 4. 송·수신기 위치에 따른 다중경로 채널

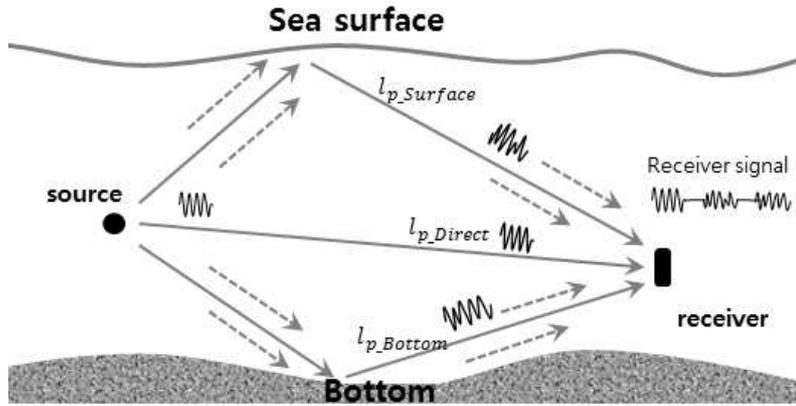


그림 5. 수중 다중경로 채널

그림 5는 수중 다중경로 채널을 나타낸 것으로 송신된 신호는 경계면 반사에 의해 각 경로의 지연시간이 달리 수신되며, 각 경로에서 수신되는 신호의 지연은 식 (3)과 같다[6].

$$\tau_p = l_p / c \quad (3)$$

여기서 l_p 는 p 번째 전파경로의 길이이며, c 는 수중에서의 음속 (1500 m/s)이다.

경계면의 특성에 따른 각 경로의 주파수 응답은 식 (4)와 같다.

$$H_p(f) = \frac{\Gamma_p}{\sqrt{A(l_p, f)}} \quad (4)$$

여기서 Γ_p 는 p 번째 전파경로의 반사계수이며, $\sqrt{A(l_p, f)}$ 는 각 경로길이에 따른 전파손실이다.

식 (3)과 식 (4)를 이용한 수중 다중경로 채널의 임펄스 응답은 식 (5)와 같다.

$$h(t) = \sum_p h_p(t - \tau_p) \quad (5)$$

여기서 $h_p(t)$ 는 역 푸리에 변환 (inverse fast fourier transform)이다.

수중 다중경로에 의한 RMS (Root Mean Square) 지연확산은 식 (6)와 같다[7].

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (6)$$

식 (6)의 평균 초과 지연 (mean excess delay) $\overline{\tau}$ 와 평균 제곱 지연 (mean square delay) $\overline{\tau^2}$ 는 식 (7), (8)에 의해 구해진다.

$$\overline{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (7)$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (8)$$

여기서 $P(\tau_n)$ 는 n 차 경로의 전력밀도이다.

식 (6)의 RMS 지연확산과 채널의 일관성 대역폭의 관계는 식 (9)와 같다[7].

$$B_c = \frac{1}{5\tau_{rms}} \quad (9)$$

다중경로에 의한 지연확산이 없는 그림 6(a)의 수신신호는 식 (9)의 관계에서 채널의 일관성 대역폭 B_c 가 송신 신호의 대역폭 B_s 보다 넓은 채널로 그림 6(c)와 같이 채널 대역의 선택성이 나타나지 않는다. 하지만 그림 6(b)와 같이 다중경로에 의한 지연확산이 존재하는 경우 채널의 일관성 대역폭 B_c 가 송신 신호의 대역폭 B_s 보다 좁게 되고, 채널의 대역은 주파수 선택성 증가와 ISI가 발생하여 오류가 증가한다.

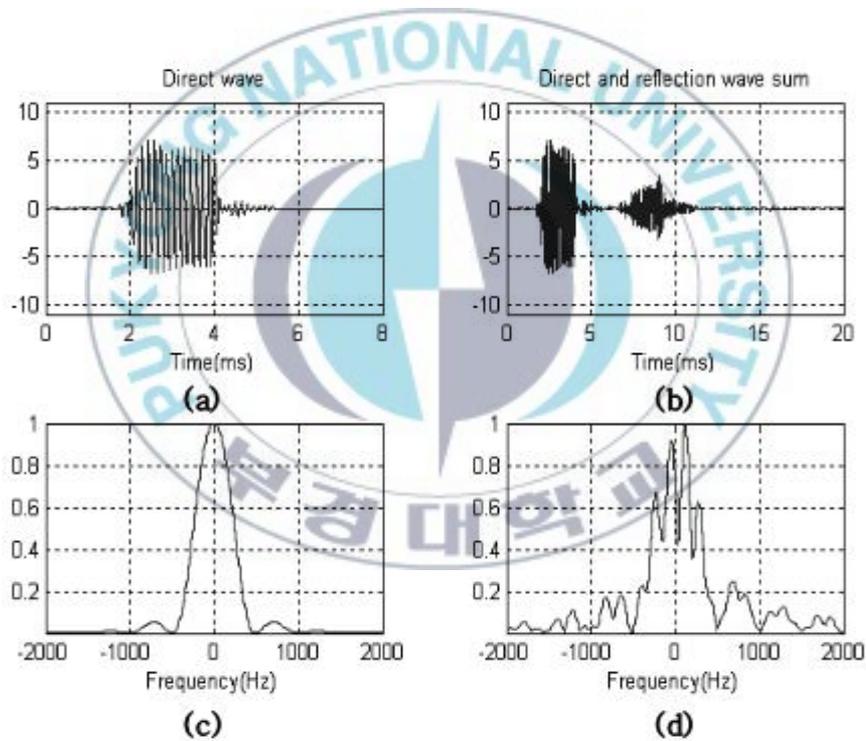


그림 6. 지연확산에 의한 주파수 선택성

(a)직접파, (b)직접파와 반사파, (c)직접파 스펙트럼, (d)직접파와 반사파 스펙트럼

그림 7(a)는 다중경로에 의한 지연확산 특성으로 식 (6)과 같이 RMS 지연확산, 평균 초과 지연, 평균 제곱 지연에 대한 기준 레벨을 보여주고 있다. 그림 7(b)는 large scale 페이딩과 small scale 페이딩이다. Large scale 페이딩은 송신기로부터 얼마 떨어진 기준 거리에서 평균 수신신호 세기를 예측하고, 일정한 거리에서 평균 신호세기를 예측할 수 있다. 또한 주변의 장애물에 의한 다중경로 전파, 수신기 이동속도, 수신기 주위 물체의 이동속도, 전송신호의 대역폭이 채널의 대역폭이 보다 좁은 경우 주파수 비 선택적 페이딩과 전송신호의 대역폭이 채널의 대역폭이 보다 넓은 경우 주파수 선택적 페이딩이 발생하는 채널이다[8].

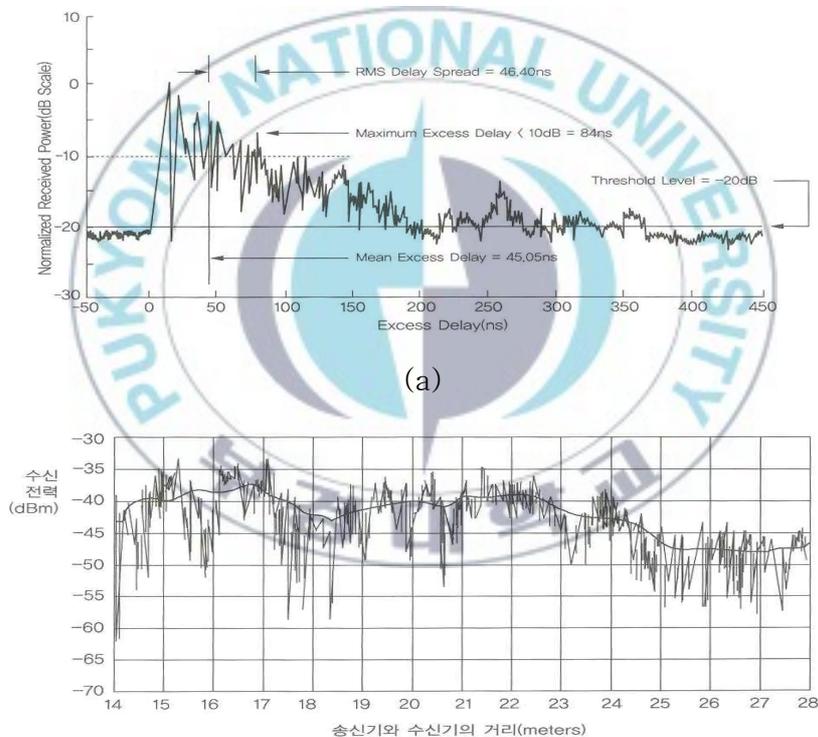


그림 7. 다중경로 지연확산과 페이딩 특성
 (a) 다중경로에 의한 지연확산 (b) 페이딩 특성

2.2 수중 도플러 확산 페이딩 채널의 특징

송신기 또는 수신기의 이동 속도에 따라 주파수의 변화가 발생하는 것을 도플러 효과 (doppler effect)라 하며, 이때의 주파수 천이 분포의 변화를 도플러확산 (doppler spread)이라 한다. 이동체가 그림 8과 같이 이동하면 경로 길이 차이에 의한 수신신호의 위상변화가 생기며 주파수변위를 야기하게 되는데 이러한 주파수 변위를 도플러 천이라 한다.

지연확산 및 일관성 대역폭은 채널의 시변특성 (time dispersive nature)을 나타내지만, 채널에서 물체의 움직임에 의한 채널의 시변특성을 나타내지 않는다. 이는 도플러 확산과 시간 일관성 (coherence time)에 의해 표현될 수 있다.

도플러 확산 f_d 는 이동체의 움직임에 의한 주파수 대역의 넓어진 정도를 나타낸다. 캐리어 주파수 f_c 의 순수 정현파 톤이 전송되었을 때 도플러 스펙트럼인 수신신호의 스펙트럼은 $f_c - f_d$ 에서 $f_c + f_d$ 범위에 분포하게 된다 [8].

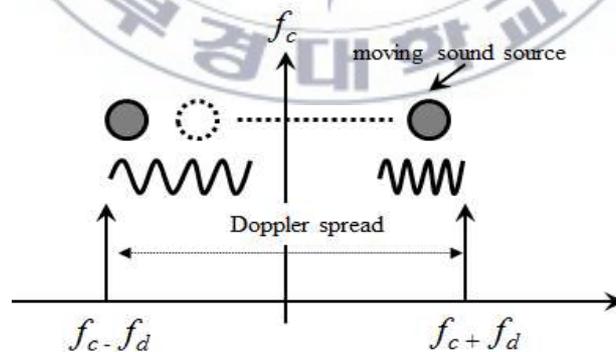


그림 8. 도플러 확산

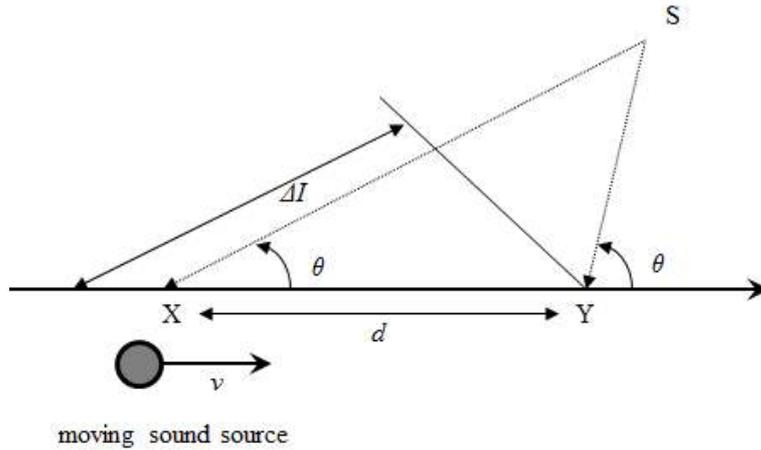


그림 9. 도플러 효과

도플러는 그림 9와 같이 이동체의 상대 속도의 함수인 도플러천이 그리고 이동체의 움직임의 방향 및 산란파의 도착 방향 사이의 각도에 의해 식 (10)과 같이 주어진다.

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos\theta \quad (10)$$

기저대역신호의 대역폭이 도플러 확산 대역폭인 B_D 보다 훨씬 크다면, 수신기에서 도플러 확산에 관한 영향은 무시할 수 있다. 이러한 채널을 느린 페이딩채널 (slow fading channel)이라 한다. 시간 일관성 T_c 는 도플러 확산 시간 대역에서의 특성을 나타낸다. 도플러 확산과 시간 일관성은 서로 역비례 관계를 가지며, 시간 일관성 보다 더 멀리 떨어진 두 신호는 채널에서 각각 다르게 영향을 받는다.

시간 일관성 T_c 과 도플러 확산 f_d 은 식 (11)과 같다.

$$T_c = \frac{1}{f_d} \quad (11)$$

여기서 f_d 는 최대 도플러 확산으로, $f_d = \frac{v}{\lambda}$ 로 표현할 수 있다.

다중경로 시간 지연확산에 의한 페이딩과 도플러 확산에 의한 페이딩을 분류하면 그림 10과 같다. 또한 채널상관함수와 전력밀도 함수의 관계를 나타내면 그림 11과 같다.

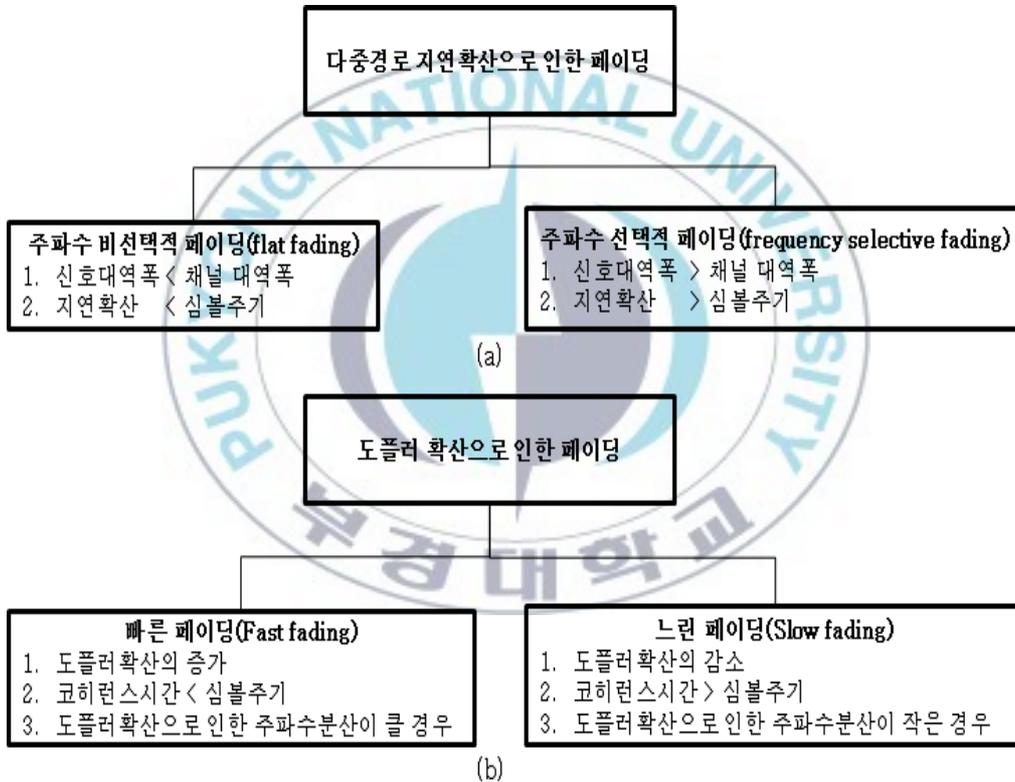


그림 10. 다중경로 페이딩과 도플러 확산 페이딩의 분류

(a) 다중경로 지연확산으로 인한 페이딩 (b) 도플러확산으로 인한 페이딩

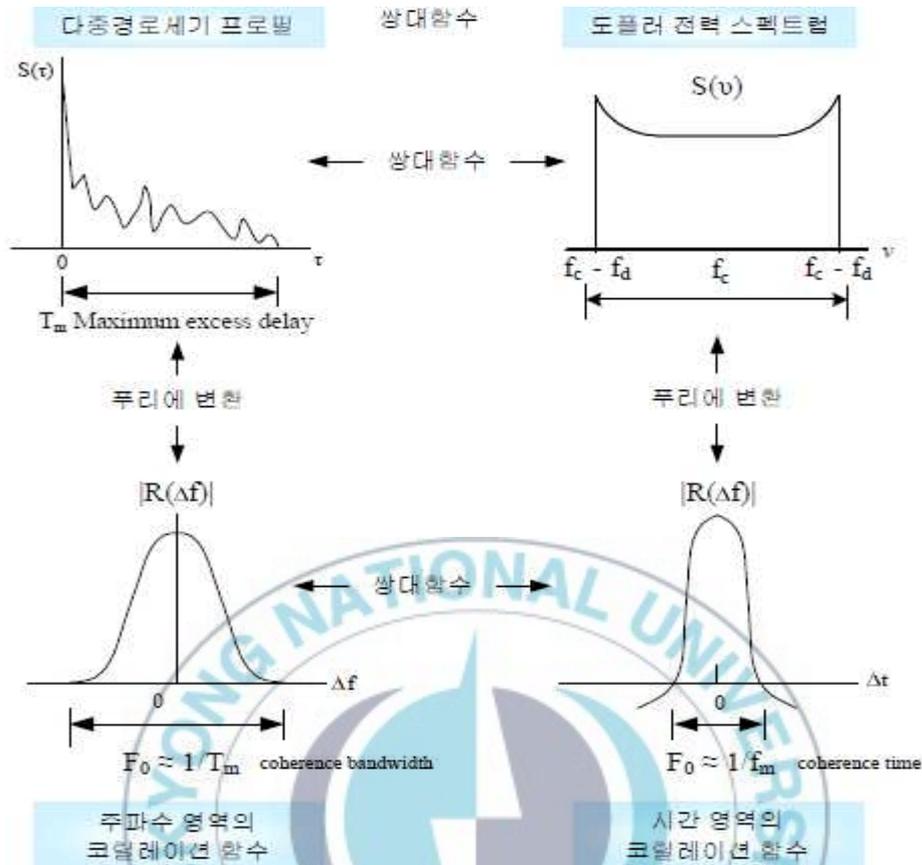


그림 11. 채널상관함수와 전력밀도함수 사이의 관계[8]

송신신호가 채널의 변화정도에 따라 빠른 페이딩 (fast fading)과 느린 페이딩 (slow fading)으로 구분한다.

빠른 페이딩 채널에서 임펄스 응답은 심벌 구간 내에 빠르게 변하게 된다. 식 (12)과 같이 채널의 시간 일관성이 송신 신호의 심벌 주기보다 더 작게 되며, 이로 인해 도플러 확산에 의한 주파수분산 (dispersion) 혹은 시간 선택적 페이딩이 일어나 신호의 왜곡이 생기게 된다. 빠른 페이딩의 경우 저속 데이터 전송 시 발생한다.

$$T_s > T_C, \quad B_s < B_D \quad (12)$$

여기서 T_s 는 심벌율이며 B_s 는 전송신호의 대역폭이다. 느린 페이딩 채널에서 임펄스 응답은 송신 신호보다 천천히 변하게 된다. 식 (13)와 같이 주파수 영역에서 채널의 도플러확산이 전송 신호의 대역폭보다 매우 적음을 뜻한다.

$$T_s = T_C, \quad B_s \gg B_D \quad (13)$$



Ⅲ. 수중 다중경로 환경에서의 변조방식

수중 음향 통신의 전송성능에 영향을 미치는 주된 환경적 요인은 다중경로로 채널의 시공간적 변동, 경계면의 반사특성과 송·수신기의 위치변동에 의해 영향을 받는다. 이러한 다중경로의 변동은 송신신호의 진폭, 위상, 주파수, 지연확산 등에 영향을 준다. 이런 수중 다중경로 채널의 변동성과 성능의 관계에 대해 M. Chitre 등은 수중 다중경로 채널에서 지연확산(delay spread)에 의한 대역폭 제한과 경계면 변동 등이 수중 음향 통신 시스템의 전송성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다[9].

표 1은 연구보고 되고 있는 수중 음향 통신 시스템의 성능으로 변조방식은 MFSK (M-ary Frequency shift keying), QPSK, DPSK (Differential Phase Shift Keying)방식을 적용하고 있다. 전송속도는 4 kbps ~ 10 kbps의 성능을 보이며, 전송거리는 700 m ~ 5 km, 그리고 반송파 주파수 10 kHz ~ 20 kHz로 지상통신에 비해 상대적으로 낮은 전송성능을 보인다. 표 2는 현재 상용화 된 제품으로 link-quest사는 변조방식을 BFSK와 BPSK를 적용하여 1 km 이내 14 kbps의 성능을 보이고 있으며, 보상 신호처리기법은 미 사용하였다. 그리고 Benthos 사는 MFSK 및 PSK 방식을 적용하고 있으며 2 ~ 6 km에서 140 ~ 15.3 kbps의 성능을 보인다. KORDI는 QPSK 방식에 9.7 km에서 10 kbps의 성능을 보이며, 1/2 convolutional coding와 적응등화기가 적용되었다[10~15].

그림 12는 수중 음향 통신 시스템의 구성도를 보여 주고 있다. 수중 음향통신시스템의 정보신호는 디지털의 “0”또는 “1”의 이진신호로 디지털 변조방식을 이용하게 되며, 변조방식에 따라 반송주파수로 변조되어, 전기음향변환기 (transducer)를 통해 음파로 변환되어 수중 음향채널로 출력되게 된다. 수중 음향채널로 출력되는 송신신호 $s(t)$ 는 식 (14)과 같이 주어진다.

표 1. 수중 통신 시스템의 성능

Developers	Data Rate (bps)	Range (km)	Carrier Frequency (Hz)	Modulation
L.F. Yeung et al.	10k	1	OFDM	MFSK
J.A. Catipovic et al.	10k	0.75	20k	128-FSK
M. Stojanovic et al.	10k	3	25k	QPSK
M. Chitre et al.	5.3k	0.35	OFDM	DPSK
L.E. Freitag et al.	5k	0.7	25k	MFSK
H.K. Yeo et al.	4k	5	10k	QPSK

표 2. 상용화 된 수중 음향 통신 모뎀의 성능

제조사	변조방식 / 전송속도 / 거리	운용주파수 / 보상 신호처리 기법	소비전력 / 운용수심
link-quest	BFSK, BPSK / 14kbps / 1km	53~89kHz / 미사용	6 Watts / 2000 m /
Benthos	MFSK 및 PSK / 140~15.36kbps / 2~6km	16~21kHz / 1/2 rate convolutional coding	6 Watts / 2000 m /
KORDI	QPSK / 10kbps / 9.7km	25kHz / 1/2 rate convolutional coding/ 적응등화기	? Watts / 15 m /

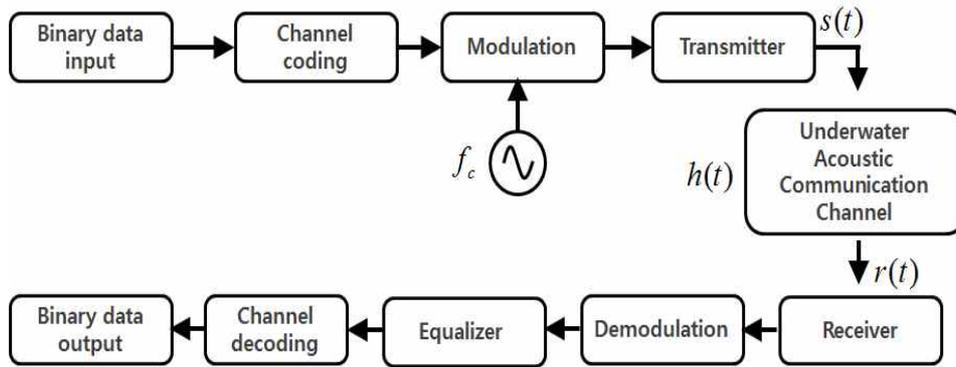


그림 12. 수중 음향 통신 시스템 구성도

$$s(t) = \text{Re}(s_l(t)e^{j2\pi f_c t}) \quad (14)$$

여기서 $s_l(t)$ 는 송신신호의 등가 저역 신호로 이진 데이터의 기저대역신호이다.

송신된 신호는 해면과 해저로 경계 지어져 있는 해양에서 수중 환경요인을 포함하여 수신기에 수신된다. 수신신호 $r(t)$ 는 채널의 임펄스 응답에 의해 식 (15)와 같다.[5]

$$\begin{aligned} r(t) &= \text{Re}(h(t)*s(t)) \\ &= \text{Re}\left(\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)s(t-\tau)d\tau\right) \\ &= \text{Re}\left(\left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)s_l(t-\tau)e^{-j2\pi f_c \tau}d\tau\right]e^{j2\pi f_c t}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

채널의 배경잡음을 무시하면 이산적인 복·반사와 연속적인 복·반사에 의해 채널의 임펄스 응답 $h(t)$ 는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$h(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n \delta(t - \tau_n) + R(t)e^{-kt} \quad (16)$$

여기서 τ_n 은 n 차 다중경로 지연시간이다. 두 번째 항은 연속적인 반사를 나타내며 초기 이산 반사에 비해 일정시간 지연 후 도달하며, $R(t)$ 는 랜덤 진폭 및 위상을 갖고 k 는 잔향시간을 결정하는 감쇠상수이다. 식 (16)에 의해 식 (15)을 다시 나타내면 식 (17)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r(t) &= Re \left(\int_{t_0}^{\infty} \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} s_l(t - \tau_n) + R(t) s_l(t - \tau) e^{-k\tau} e^{-j2\pi f_c \tau} d\tau e^{j2\pi f_c t} \right) \\ &= Re \left(h_l(t) * s_l(t) e^{j2\pi f_c t} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $h_l(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} \delta(t - \tau_n) + R(t) e^{-kt} e^{-j2\pi f_c \tau}$ 는 다중경로에 의한 채널의 등가 저역 통과 임펄스 응답이다. 식 (17)에서 보는 바와 등가 저역 통과 임펄스 응답은 다중경로의 진폭, 다중경로 지연시간 및 연속적인 복·반사의 잔향시간의 함수이다. 등가 저역 신호 $s_l(t)$ 가 왜곡 없이 전송되기 위해서는 등가 저역 통과 임펄스 응답 $h_l(t)$ 의 대역이 $s_l(t)$ 의 대역보다 커야하고 대역 내에서 선형 위상 특성이 되어야 한다. 수신된 신호는 필터를 통해 복조하여 신호를 복원하게 된다.

수중 음향 통신에서 적용되는 변조방식은 BFSK, BPSK, QPSK이다. 그림 13은 BFSK의 변조와 복조의 구성도로 변조는 2개의 반송파를 주파수는 데이터 신호에 따라 순간적으로 두 값 중 하나의 값으로 변한다. 2진 데이터 신호 “1”은 캐리어 주파수로 마크 주파수 f_m 을 선택한다[16].

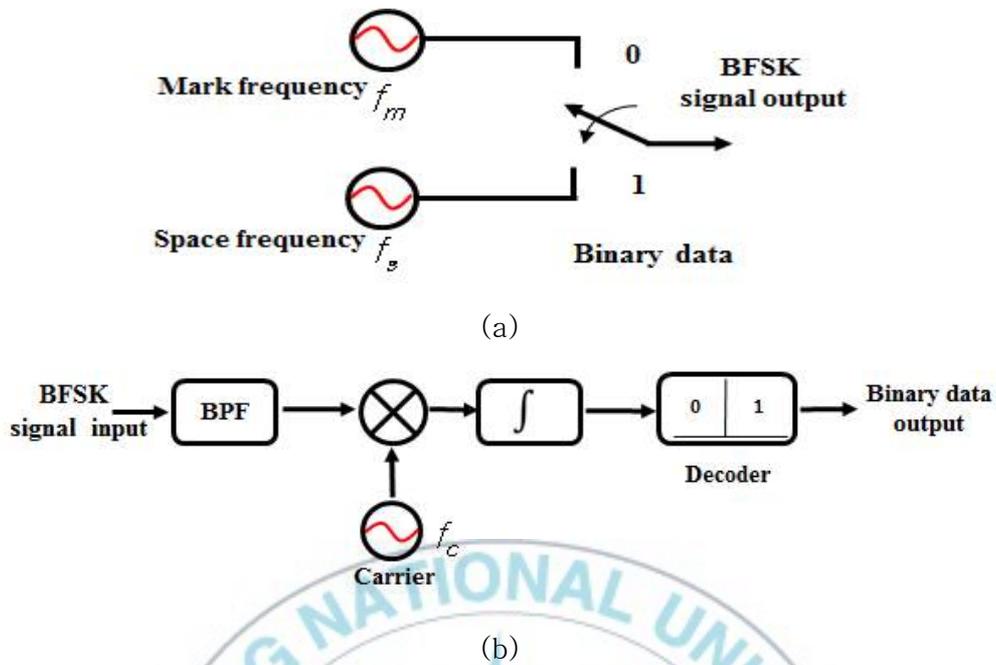


그림 13. BFSK 송·수신기 블록 다이어그램

(a) 송신기 (b) 수신기

2진수 “0”은 스페이스 주파수 f_s 로 선택한다. 데이터 신호가 “0”과 “1”로 바뀔 때, 변조 신호 $s(t)$ 는 식 (18)과 같이 f_m 의 $s_1(t)$ 와 f_s 의 $s_2(t)$ 가 된다.

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = A \cos(2\pi f_m t), & (\text{for binary } 1) \\ s_2(t) = A \cos(2\pi f_s t), & (\text{for binary } 0) \end{cases} \quad (18)$$

그림 14는 BPSK는 위상이 다른 두 정현파 중 하나로 전송하는 통신 시스템이다. 식 (19)과 같이 “1”인 신호를 0° 위상을 갖는 신호로 보내면, “0”은 180° 위상이 반전된 신호로 전송하는 방식이다.

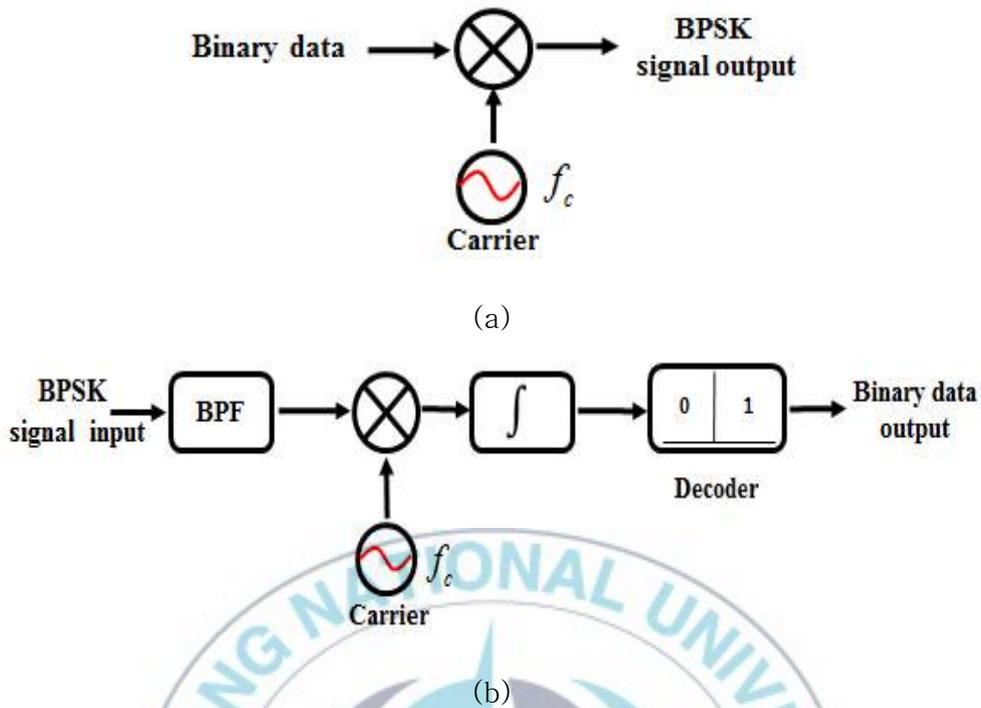


그림 14. BPSK 송·수신기 블록 다이어그램
(a) 송신기, (b) 수신기

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = A \sin(\omega t + \theta), & (\text{for binary } 1) \\ s_2(t) = A \sin(\omega t + \theta + \pi), & (\text{for binary } 0) \end{cases} \quad (19)$$

QPSK 방식은 식 (20)과 같이 동일한 주파수의 $\cos \omega_c t$ 와 $\sin \omega_c t$ 가 서로 직교 하는 위상을 가지는 변조 기법이다.

$$QPSK(t) = \begin{cases} -A \cos \omega_c t - A \sin \omega_c t \leftrightarrow (b_i, b_Q) = (00) (\text{for binary } 00) \\ -A \cos \omega_c t + A \sin \omega_c t \leftrightarrow (b_i, b_Q) = (01) (\text{for binary } 01) \\ +A \cos \omega_c t - A \sin \omega_c t \leftrightarrow (b_i, b_Q) = (10) (\text{for binary } 10) \\ +A \cos \omega_c t + A \sin \omega_c t \leftrightarrow (b_i, b_Q) = (11) (\text{for binary } 11) \end{cases} \quad (20)$$

따라서 전송 신호는 동일한 진폭과 주파수를 가지며, 위상은 90° 간격으로 직교하게 위치한 네 가지 형태가 되며, 두 직교 반송파 $\cos\omega_c t$ 와 $\sin\omega_c t$ 를 사용하여 다중화시킴으로써 전송 속도를 두 배로 증가시킬 수 있어 수중음향 통신의 고속 전송에 효과적인 변조방식이다[17].

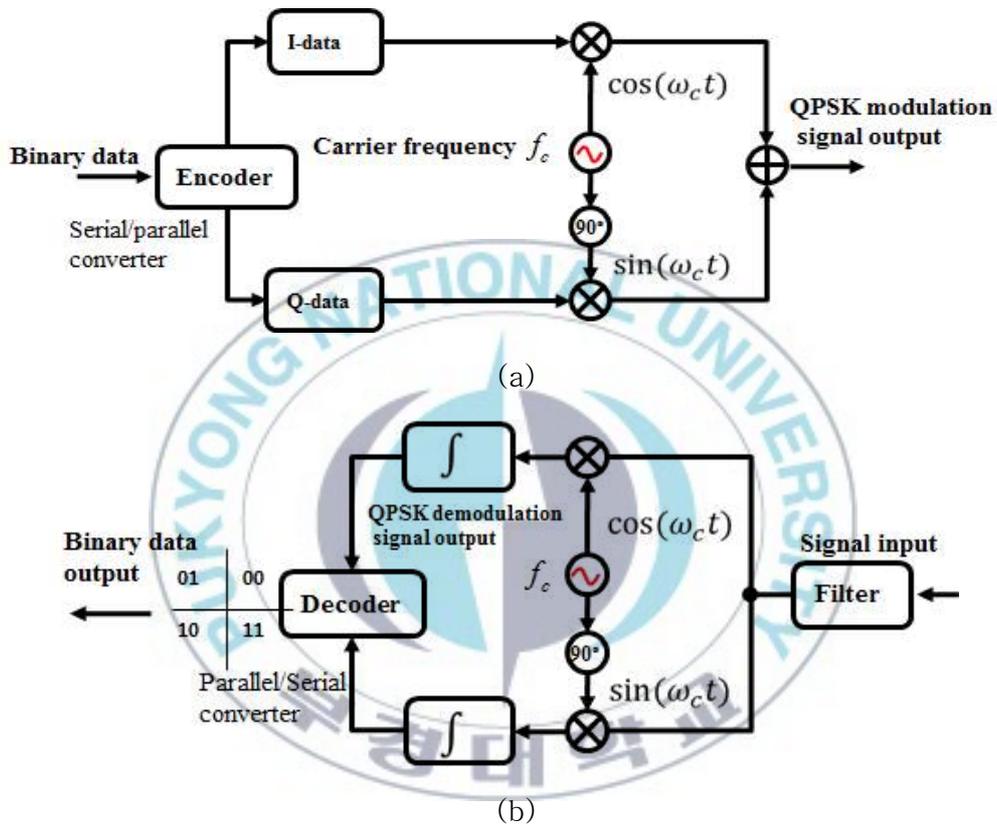


그림 15. QPSK 송·수신기 블록 다이어그램

(a) 송신기 (b) 수신기

IV. 실험 및 결과

4-1. 수중 다중경로 채널에서 변조방식의 성능평가

실험에서는 송·수신기의 움직임이 없는 상태에서 지연확산에 따른 대역폭 제한이 전송률에 미치는 영향을 BFSK, BPSK, QPSK을 통해 성능을 확인하였다.

그림 16은 성능평가를 위한 수조 실험의 구성도이며, 표 3은 실험 파라메타이다. 송신기는 ITC-1032, 수신기는 B&K 8106을 사용하였으며, 송신기의 수심은 0.35 m, 수신기의 수심은 0.15 m이며, 송·수신기의 전송거리는 0.7 m로 고정하였다. 실내 수조의 수심은 0.6 m로 배경잡음은 무시하였다. 변조방식은 BFSK, BPSK, QPSK로, BFSK의 마크 주파수는 19 kHz, 스페이스 주파수는 20 kHz이다. BPSK와 QPSK의 반송파 주파수는 20 kHz로 설정하였다. 전송속도는 100, 200, 400, 500, 800, 1000 bps이며, 전송 데이터는 50 x 50 (8 bit) 이미지로 총 20,000 비트를 전송하였다.

그림 17는 수조 채널의 다중경로에 의한 지연확산에 대한 채널 응답특성으로 최대 지연확산 시간은 약 15 ms이며, 식 (6)를 이용한 RMS 지연확산은 1.8 ms이며, 식 6의 RMS 지연확산에 의한 채널의 일관성 대역폭 B_c 는 약 111 Hz로 최대 전송속도는 222 bps 이하로 제한된다.

그림 18는 수조의 주파수 응답특성으로 각 변조방식의 반송파 주파수에 대역에서는 깊은 페이딩에 대한 영향이 없으며, 깊은 페이딩에 따른 연립 오류가 발생될 것으로 판단되는 주파수는 18.6 kHz, 19.8 kHz, 20.5 kHz이다. 이러한 주파수 응답특성을 통해 수조 다중경로 채널은 주파수 선택적 채널임을 확인하였다.

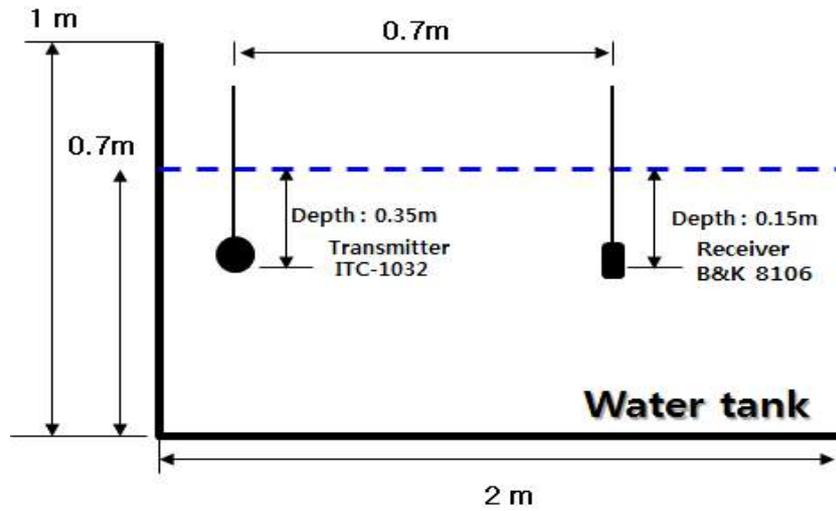


그림 16. 실험 구성도

표 3. 실험 파라메타

Modulation	BFSK, BPSK, QPSK
BFSK Carrier Frequency	Mark : 19 kHz , Space : 20 kHz
BPSK Carrier Frequency	20 kHz
QPSK Carrier Frequency	20 kHz
transmission rate (bps)	100, 200, 400, 500, 800, 1000
Transmitter and Receiver range	0.7 m
Transmitter and Receiver depth	0.35 m and 0.15 m
Data	Image size(50 x 50)pixel 8 bit total bit : 20,000 bit
System	LabVIEW
Water Tank	2 m x 1.5 m x 1 m

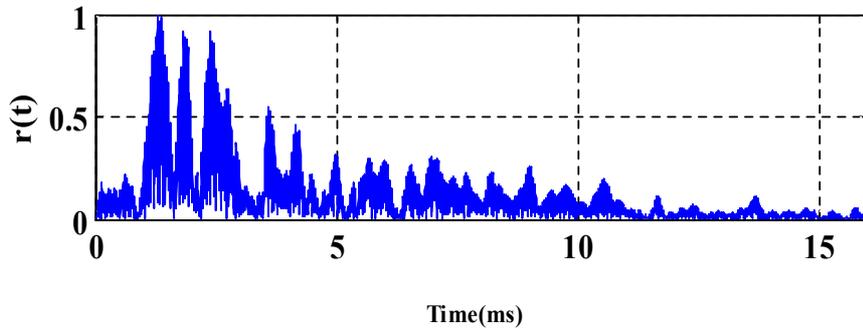


그림 17. 채널의 지연확산 특성

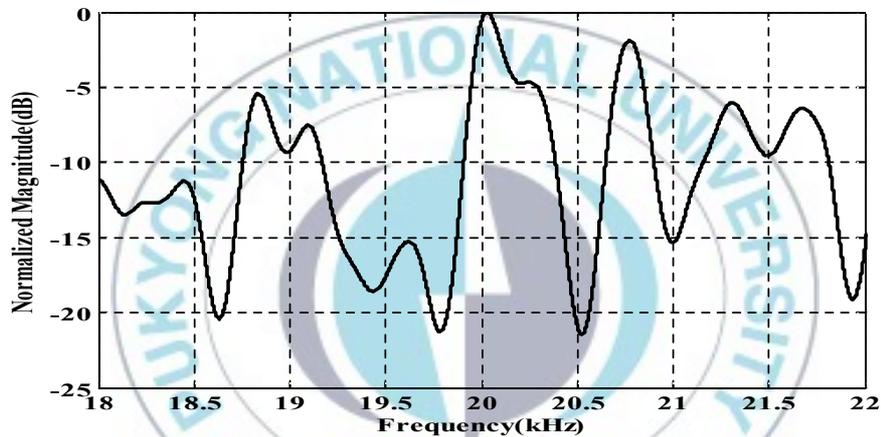


그림 18. 채널의 주파수 응답특성

표 4는 송·수신기 고정 상태에서에서 각 변조방식을 적용하여 이미지 전송 성능을 확인한 결과이다. 식 (9)를 통해 수치실험에서 지연확산에 따른 채널의 대역폭은 111 Hz로 전송속도는 222 bps 이다. 따라서 채널의 일관성 대역을 고려하여 100, 200, 400, 500, 800, 1000 bps로 전송하였다. BFSK는 200 bps 이하에서 오류가 발생하지 않았으며 400 bps에서부터 오류가 증가하였다. 400 bps에서 BER은 0.026, 500 bps에서는

0.157, 800 bps에서는 0.238, 그리고 1000 bps에서는 0.306으로 전송속도 증가에 따라 채널의 대역 제한으로 인해 오류가 급속히 증가하였다. BPSK와 QPSK는 BFSK와 같이 200 bps 이하에서 오류가 발생하지 않았으며, BPSK 400 bps에서 BER은 0.0389, 500 bps에서는 0.043, 800 bps에서는 0.11, 그리고 1000 bps에서는 0.17으로 전송속도 증가에 따라 채널의 대역 제한과 주파수 선택성의 영향으로 오류가 증가하였다. 상대적으로 오류가 낮은 QPSK는 400 bps에서 BER은 0.016, 500 bps에서는 0.032, 800 bps에서는 0.05, 그리고 1000 bps에서는 0.09로 QPSK, BPSK 그리고 BFSK 순으로 전송성능이 우수함을 확인하였다.

그림 19은 전송속도에 따른 BER 특성으로 3가지 변조방식 모두 채널의 일관성 대역 제한에 의해 200 bps 이상의 전송속도에서는 오류가 발생하였다. 그림같이 QPSK가 가장 좋은 성능을 보였으며, BPSK, BFSK 순으로 나타났다.

따라서 본 실험의 결과에서 수중 다중경로 채널에서 고속 전송과 낮은 오류율을 가진 신뢰성 있는 통신을 위해서는 QPSK 방식이 우수함을 확인하였다.

표 4. 수중 다중경로 채널에서 전송성능

변조방식 전송속도(bps)	BFSK	BPSK	QPSK
100			
	Error : 0	Error : 0	Error : 0
	BER : 0	BER : 0	BER : 0
200			
	Error : 0	Error : 0	Error : 0
	BER : 0	BER : 0	BER : 0
400			
	Error : 524	Error : 774	Error : 315
	BER : 0.026	BER : 0.0387	BER : 0.016
500			
	Error : 3113	Error : 852	Error : 651
	BER : 0.15565	BER : 0.0426	0.03255
800			
	Error : 4768	Error : 2122	Error : 1015
	BER : 0.2384	BER : 0.1061	BER : 0.05
1000			
	Error : 6115	Error : 3428	Error : 1876
	BER : 0.30575	BER : 0.1714	BER : 0.0938

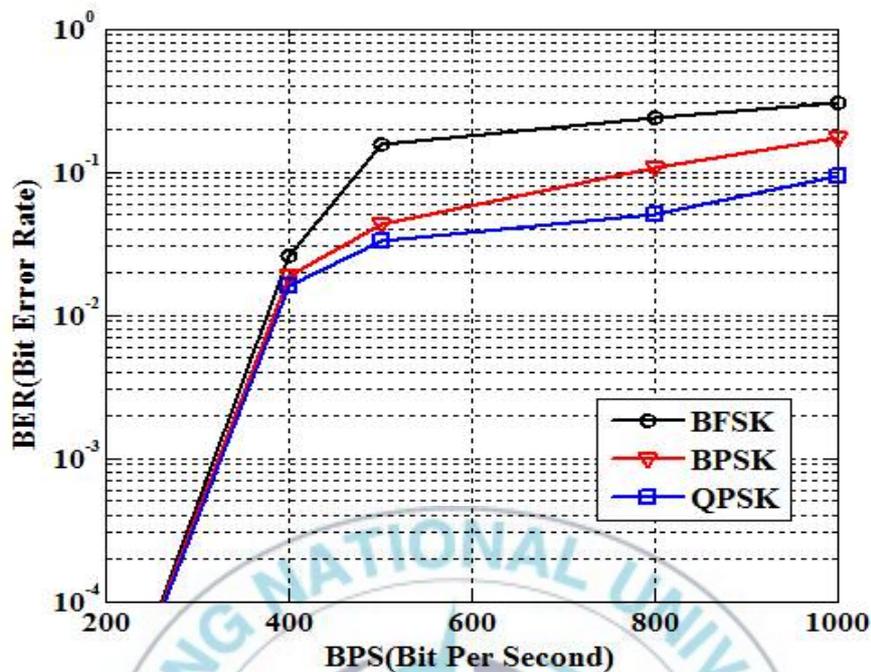


그림 19 전송속도에 따른 변조방식의 BER

4.2. 수중 도플러 확산 페이딩 채널에서 변조방식의 성능평가

수중 자율무인 잠수정, 로봇, 해상의 부위 (buoy)와 수중의 센서 등의 통신에서 송·수신기의 이동 및 다중경로 환경의 변동은 통신성능 저하를 가져온다. 이러한 변동성을 가진 채널은 도플러 확산 페이딩 채널을 형성하고, 이동 체 및 해면의 변동에 따른 도플러 확산의 변화, 위상 및 진폭의 변동으로 정확한 위상동기를 요구하는 위상 동기식 변조에 많은 영향을 준다.

그림 20은 수신기의 이동 속도에 따른 도플러 확산 페이딩 채널에서 QPSK, BPSK, BFSK의 성능 확인을 위한 구성도이며, 표 5는 실험 결과

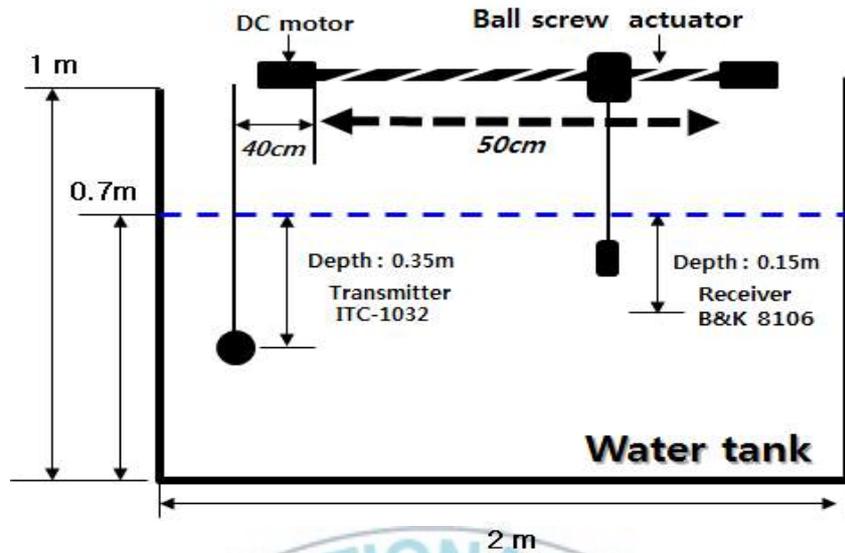


그림 20. 수조실험의 구성도

메타이다. 송신기는 ITC-1032, 수신기는 B&K 8106을 사용하였으며, 송신기의 수심은 0.35 m이다. 수신기의 수심은 0.15 m로 그림 20과 같이 볼 스크루 액츄레이터를 이용하여 속도는 0.7 cm/s ~ 28 cm/s로 이동하였다. 송·수신기의 전송거리는 0.2 ~ 0.7 m 그리고 0.7 ~ 0.2 m로 왕복 이동하였다. 실내 수조의 수심은 0.6 m로 배경잡음은 무시하였다. 전송속도는 실험 4.1의 결과를 바탕으로 200 bps로 하였다.

그림 21은 각 거리별 채널의 응답특성이며, 표 5는 각 거리별 지연확산 시간과 일관성 대역폭 그리고 전송속도이다. 송·수신기의 거리 0.5 m에서 지연확산은 2.4 ms이며, 일관성 대역폭 83 Hz 이었다. 또한 각 거리별 다중경로의 변동에 따른 지연확산 특성 확인 결과 최소 166 bps에서 최대 363 bps까지 전송되며, 다중경로에 의한 대역 제한 특성이 송·수신기의 위치에 따라 변동됨을 확인하였다. 그림 22는 각 거리별 주파수 응답 특성이다.

표 5. 이동 실험 파라메타

Modulation	BFSK, BPSK, QPSK
BFSK Carrier Frequency	Mark : 19 kHz , Space : 20 kHz
BPSK Carrier Frequency	20 kHz
QPSK Carrier Frequency	20 kHz
transmission rate (bps)	200
Transmitter and receiver range	0.2 → 0.7 m, 0.7 → 0.2 m
Transmitter and receiver depth	0.35 m and 0.15 m
Data	Image size(50 x 50)pixel 8 bit total bit : 20,000 bit
Speed (cm/s)	0.7, 1.0, 1.3, 1.6, 1.9, 2.2, 2.5, 2.8
System	LabVIEW
Water Tank	2 m x 1.5 m x 1 m

표 6. 거리별 지연확산과 일관성 대역특성

transmitter and receiver range(m)	delay spread(ms)	coherence bandwidth(Hz)	transmission rate (bps)
0.5	2.4	83	167
0.6	2.2	90	181
0.7	1.8	111	222
0.8	1.1	181	363
0.9	1.2	166	333

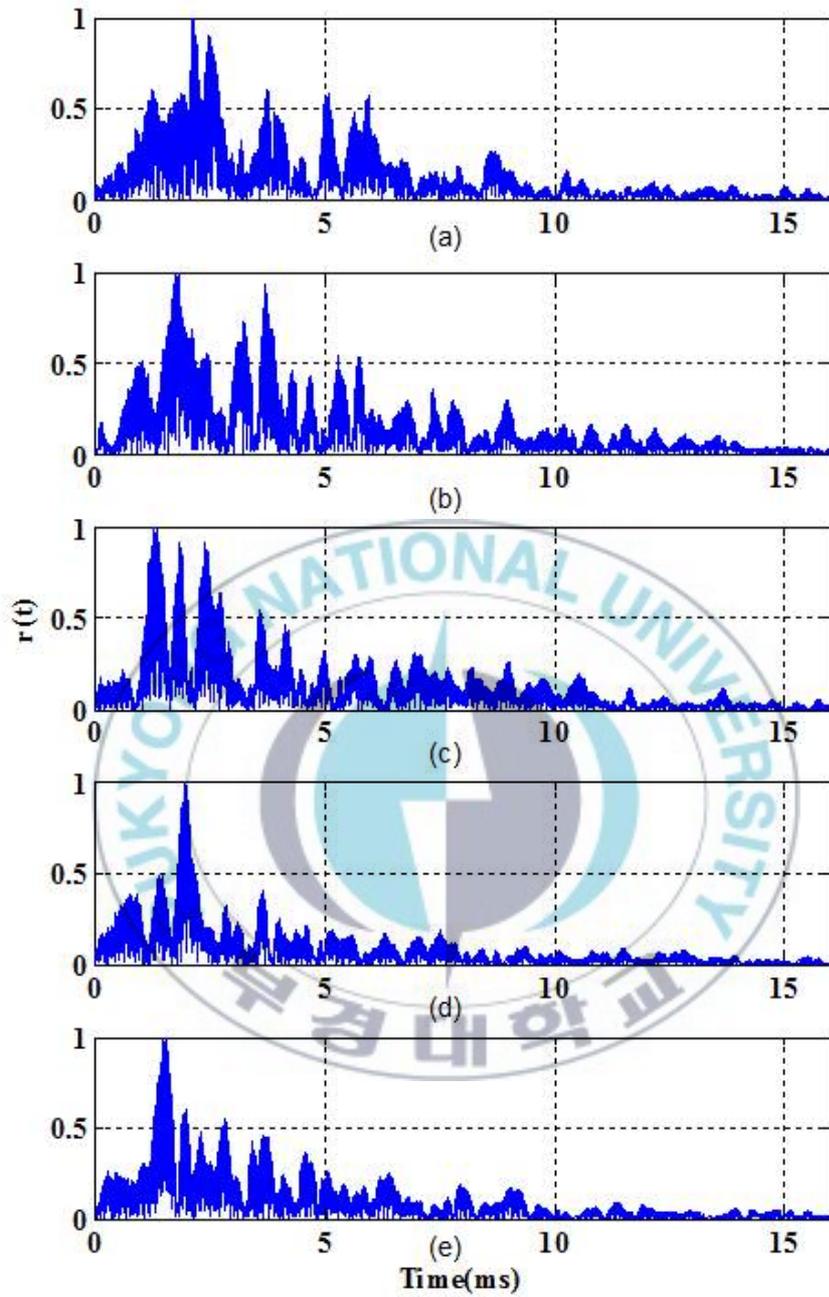


그림 21. 송·수신기 거리에 따른 채널의 지연확산 특성
 (a) 0.5 m, (b) 0.6 m, (c) 0.7 m, (d) 0.8 m, (e) 0.9 m

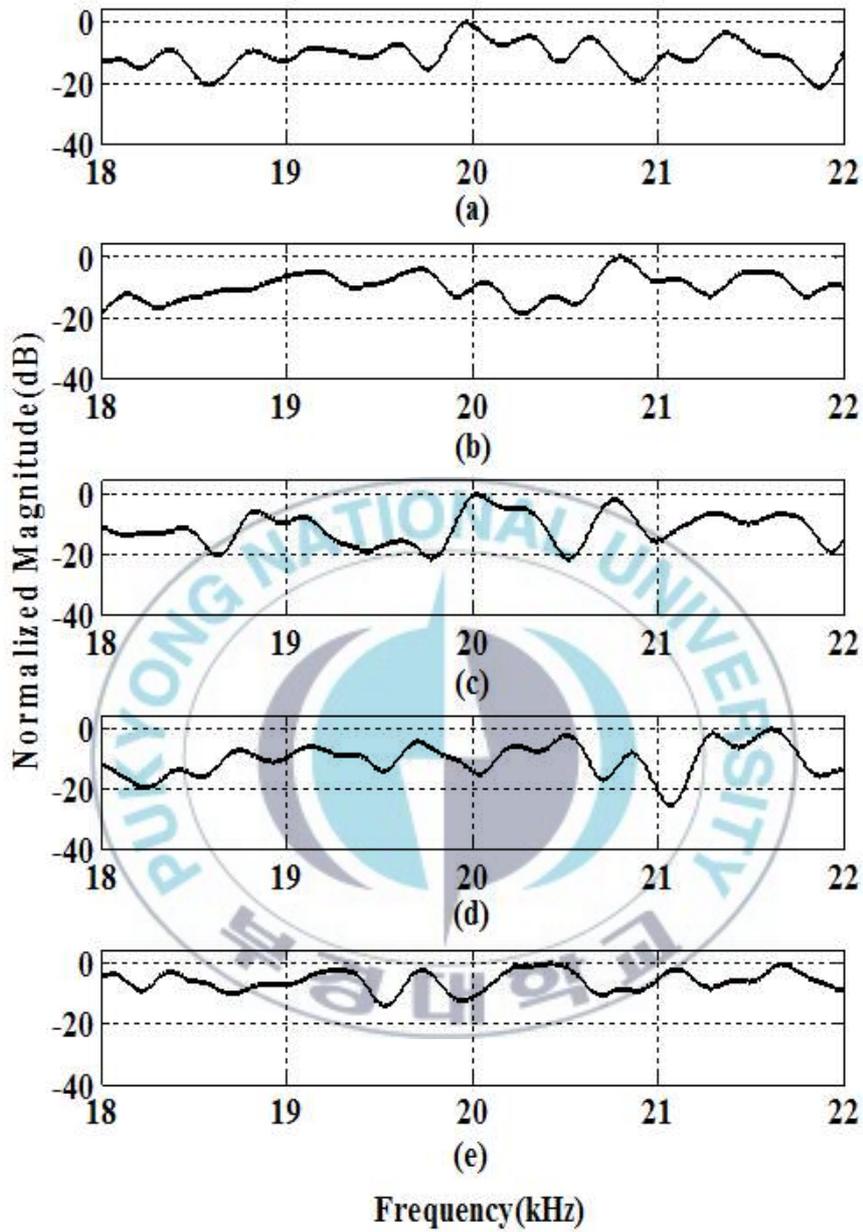


그림 22. 송·수신기 거리에 따른 주파수 응답 특성
 (a) 0.5 m, (b) 0.6 m, (c) 0.7 m, (d) 0.8 m, (e) 0.9 m

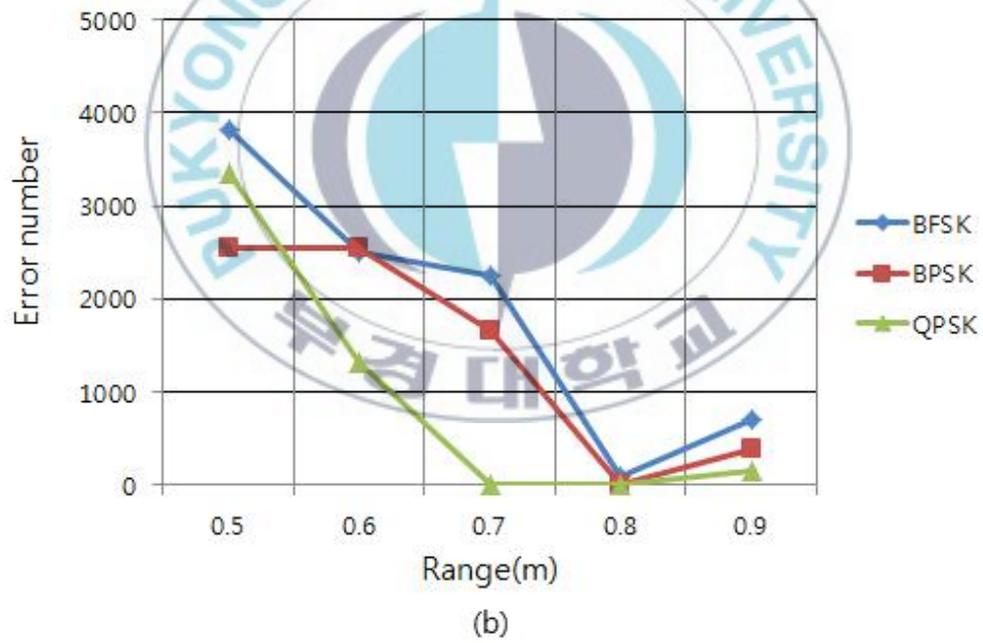


그림 23. 송·수신기 이동 거리에 따른 오류률
 (a) 200 bps (b) 400 bps

그림 23은 수신기의 이동에 따른 성능평가 이전 각 거리별 전송속도에 따른 각 변조방식의 오류 특성을 분석하여, 도플러 페이딩과의 연관성을 확인하기 위한 실험이다. 그림 21의 지연확산에 의한 일관성 대역폭 변화에 대응하는 오류특성으로 그림 23 (a)의 전송속도 200 bps에서 거리 0.5 m의 경우 대역폭 제한에 의해 3가지 변조방식에 오류가 발생되었으며, 이 중 BPSK가 오류율 0.0916으로 가장 낮은 성능을 보였다. 표 6에서 보는 바와 같이 0.7 m에서 부터 0.9 m까지는 200 bps 보다 높은 채널 대역으로 실험에서도 오류가 발생되지 않았다. 그림 23의 (b)의 전송속도 400인 경우 거리 0.7 m와 0.8 m를 제외한 전 구간에서 오류가 발생하였다.

따라서 각 거리별 전송속도에 따른 실험에서 지연확산으로 인한 채널의 제한이 성능을 저하시키는 원인이며, 또한 이동으로 인해 발생하는 도플러 확산과 함께 수중 음향 통신 시스템의 성능을 저하시키는 요인이 될 것이다.

그림 24는 수신기의 이동 속도에 따른 도플러 확산 스펙트럼이다. 송신 주파수는 반송파 주파수 20 kHz 정현파이며, 각 속도에 따른 도플러 확산 대역폭은 -80 dB를 기준으로 확산 특성을 확인하였다. 표 6에서 수신기의 이동 속도 0.7 cm/s로 도플러 확산 대역폭은 7.2 Hz로 분석되었으며, 각 변조방식의 오류율은 BFSK의 오류율은 0, BPSK의 오류율은 0.002, QPSK의 오류율은 0.03865로 이동 시 위상변조 방식에서 오류가 발생하였다. 표 6에서 이동 속도 2.8 cm/s에서 도플러 확산 대역폭은 16 Hz로 분석되었으며, 각 변조방식의 오류율은 BFSK의 오류율은 0.00105, BPSK의 오류율은 0.0817, QPSK의 오류율은 0.17375로 QPSK의 오류율이 가장 높게 나왔으며, 상대적으로 BFSK의 오류율이 가장 낮았다.

표 6. 이동속도에 따른 도플러 확산 특성

Speed (cm/s)	Doppler spread bandwidth(Hz)
0.7	7.2
1.0	8.4
1.3	10
1.6	12
1.9	13.2
2.2	14
2.5	14
2.8	16

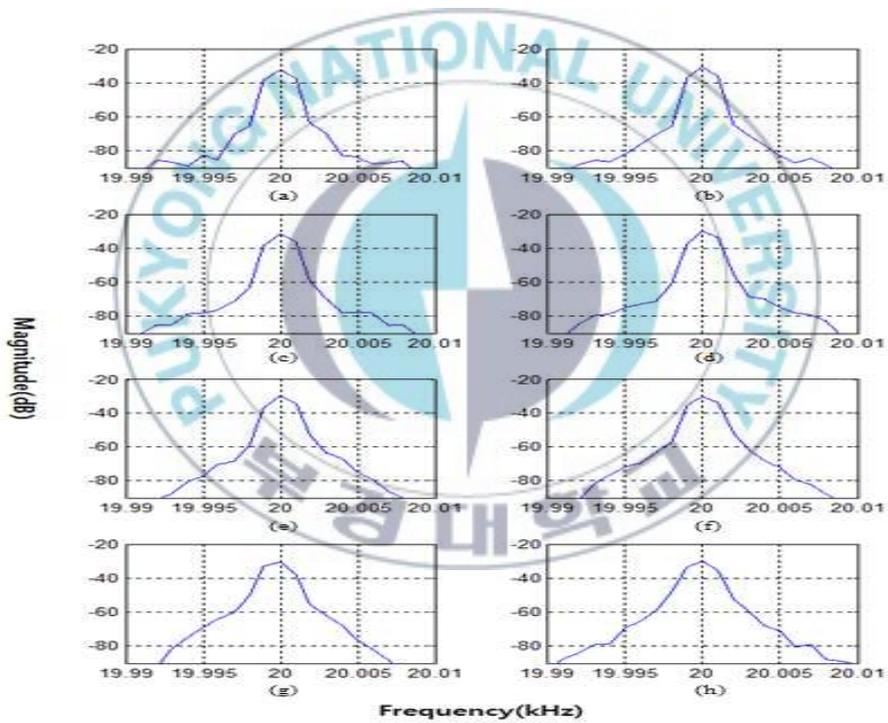


그림 24. 수신기의 이동 속도에 따른 도플러 확산 특성
 (a) 0.7 cm/s, (b) 1.0 cm/s, (c) 1.3 cm/s, (d) 1.6 cm/s, (e) 1.9 cm/s, (f) 2.2 cm/s, (g) 2.5 cm/s, (g) 2.8 cm/s

표 7. 도플러 확산 페이딩 채널에서 이동 속도에 따른 전송성능

변조방식 이동 속도(cm/s)	BFSK	BPSK	QPSK
0.7			
	Error : 0	Error : 40	Error : 773
	BER : 0	BER : 0.002	BER : 0.03865
1.0			
	Error : 0	Error : 61	Error : 1004
	BER : 0	BER : 0.00305	BER : 0.0502
1.3			
	Error : 0	Error : 168	Error : 1552
	BER : 0	BER : 0.0084	BER : 0.0776
1.6			
	Error : 0	Error : 340	Error : 1913
	BER : 0	BER : 0.017	BER : 0.09565
1.9			
	Error : 0	Error : 613	Error : 2008
	BER : 0	BER : 0.03065	BER : 0.1004

변조방식 이동 속도(cm/s)	BFSK	BPSK	QPSK
2.2			
	Error : 0	Error : 789	Error : 2906
	BER : 0	BER : 0.03945	BER : 0.1453
2.5			
	Error : 0	Error : 871	Error : 3084
	BER : 0	BER : 0.04355	BER : 0.1542
2.8			
	Error : 21	Error : 1634	Error : 3475
	BER : 0.00105	BER : 0.0817	BER : 0.17375

PSK방식은 위상정보를 이용하여 복하는 방식으로 도플러 확산 페이딩에 민감한 특성을 보였으며, 위상 정보의 수가 많아지면 상대적으로 많은 영향을 받는 것을 확인하였다. 도플러 확산 페이딩 채널에서 수신기 및 이동체의 속도에 따른 성능 평가 결과 도플러 확산 변동에 상대적으로 BFSK방식의 비동기 복조 방식이 우수함을 확인하였다.

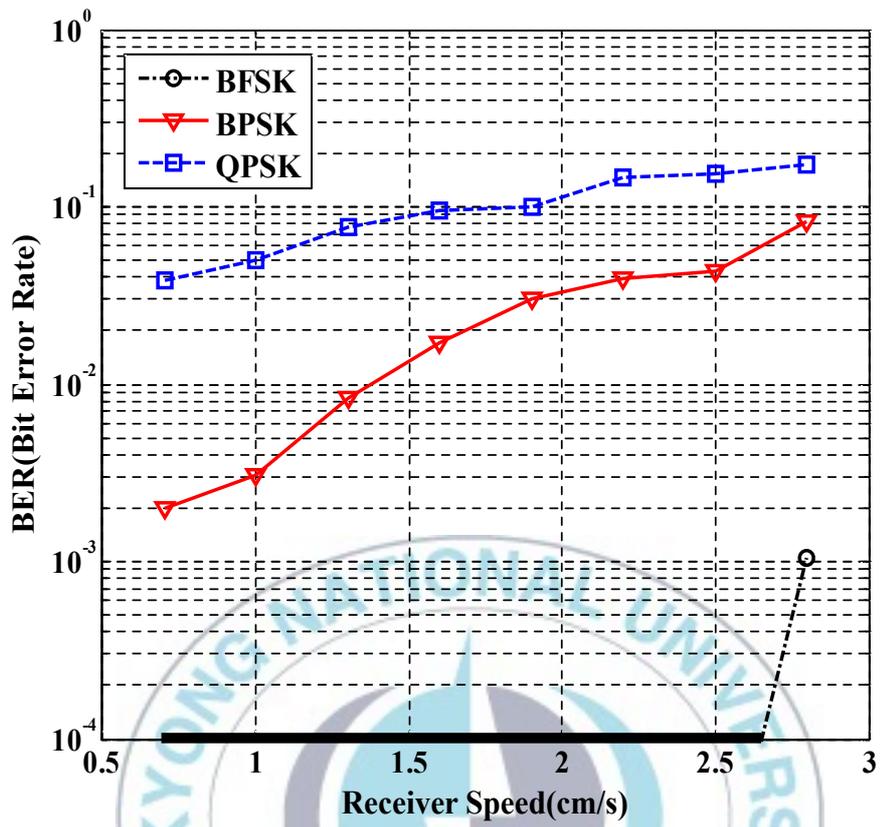


그림 25. 이동속도에 따른 변조방식의 BER

V. 결 론

본 논문에서는 수중 다중경로 및 도플러 확산 페이딩 채널에서 BFSK, BPSK, QPSK의 세 가지 변조 방식으로 통신 성능을 평가하였다. 수중 다중경로 환경에서 전송속도에 따른 성능평가에서 지연확산에 의한 채널의 대역제한으로 인해 3가지 변조방식 모두 채널의 일관성 대역 제한에 의해 200 bps 이상의 전송속도에서는 오류가 발생하였다. 다중경로에 강인한 변조방식은 상대적으로 QPSK가 가장 좋은 성능을 보였으며, BPSK, BFSK순으로 나타났다.

수중 도플러 확산 페이딩 채널에서 이동속도에 따른 도플러 확산과 전송 성능과의 관계에서 수신기의 이동에 따라 실험을 하였다.

저속의 이동속도에서 위상변조방식인 BPSK, QPSK에서는 오류가 발생하였지만, BFSK에서 오류가 발생하지 않았다. 이동 속도의 증가 시 위상 변조방식에 비해 BFSK방식이 낮은 오류 특성을 보였다. 수중 도플러 확산 페이딩 환경에서 도플러 확산 폭이 넓어짐에 따라 전송성능은 저하되며, 특히 위상변조 방식의 경우 동기 검출에 확산 특성이 포함되어 정확한 동기 추출이 어려워 높은 오류특성을 보였다. 이와 달리 BFSK의 비동기 검출의 경우 대역통과 필터의 대역 내에서 확산이 발생할 경우 정보복구 판단에 어려움 없이 정보를 복구하였다.

따라서 본 실험의 결과에서 수중 다중경로 채널에서 고속 전송과 낮은 오류율을 가진 신뢰성 있는 통신을 위해서는 QPSK방식이 우수함을 확인하였다. 하지만 이동성이 존재하는 해양 시스템 통신에서는 PSK방식보다 FSK방식을 적용하는 것이 성능향상에 도움이 된다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 박중원, 임용곤, 최영철, 김승근, 변성훈, 김시문 (2006), “수중 음향 데이터 통신 시스템 구현 및 실험”, 선박해양기술학회, 제41호, pp.45-52.
- [2] Robert J. Urick (1983), *Principles of Underwater Sound*, 3rd Ed, McGraw-Hill Book Company.
- [3] Milica Stojanovic (1996), "Recent Advance in High Speed Underwater Acoustic Communications", IEEE Oceanic engineering, 21, pp.125-136.
- [4] Lawrence E. Kinsler, Alan B. Cooppens (1982), *Fundamentals of Acoustics*, 3rd Ed, John Wiley & Sons, Inc.
- [5] 박지현 (2008), “수중 다중경로 시간확산채널에서 적응등화기와 직교주파수분할 다중화기법의 성능해석”, 부경대학교 정보통신공학과 박사학위논문.
- [6] M. Stojanovic and J. C. Preisig (2009), "Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization", Communications Magazine, IEEE, 47, pp.84-89.
- [7] J. Kim, K. Park, J. Park, and J. R. Yoon (2011), “Coherence bandwidth effects on underwater image transmission in multipath channel,” Jpn. J. Appl. Phys. 50, pp.07HG05-1-07HG05-5.
- [8] 박용완, 홍인기, 최정희 (2010), *이동통신공학*, 3rd, 생능출판사.
- [9] M. Chitre, S. Shahabudeen and M. Stojanovic (2008), "Underwater acoustic communications and networking recent advances and

- future challenges", J. Marine Tech. Soc., 42, pp.103-116.
- [10] L.F. Yeung, R.S. Bradbeer, E.T.M. Law, A. Wu, B. Li and Z.G. Gu (2003), "Underwater Acoustic Modem Using Multi-Carrier Modulation". Oceans 2003, 3, pp.1368-1375.
- [11] J.A. Catipovic and L.E. Freitag (1990), "High Data Rate Acoustic Telemetry for Moving ROVS in a Fading Multipath Shallow Water Environment. Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology", pp.296-303.
- [12] M. Stojanovic, L.E. Freitag and M. Johnson (1999), "Channel-Estimation-Based Adaptive Equalization of Underwater Acoustic Signals". OCEANS' 99, Riding the Crest into the 21st Century, 2, pp.985-990.
- [13] M. Chitre, S.H. Ong and J. Potter (2005), "Performance of Coded OFDM in very Shallow Water Channels and Snapping Shrimp Noise". Oceans 2005, vol.2, pp.996-1001, September.
- [14] L.E. Freitag and J.A. Catipovic (1989), "A Signal Processing System for Underwater Acoustic ROV Communication. Proceedings of the 61th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology", pp.34-41.
- [15] H.K. Yeo, B.S. Sharif (2000), A.E. Adam and O.R. Hinton, "Multiuser Detection for Time-Variant Multipath Environment". Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology, pp.399-404.
- [16] A. Bruce Carlson, Paul B. Crilly, Janet C. Rutledge (2002),

Communication Systems, 4th Ed, McGraw-Hill Book Company.

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



감사의 글

논문이 완성되는 2년이라는 시간동안 아낌없는 조언과 지도해 주신 박규철 교수님께 감사드립니다. 보다 좋은 논문을 위하여 많은 조언을 해주신 윤종락 교수님과 김석태 교수님께도 감사드립니다. 2년이라는 석사 생활 동안 전공의 대한 가르침을 주신 정신일 교수님, 하덕호 교수님, 김성운 교수님, 정연호 교수님, 주문갑 교수님, 류지열 교수님께도 감사드립니다.

2년이라는 연구실 생활을 하면서 많은 조언과 도움을 주신 류수아 박사님과 박지현 박사님께도 깊은 감사드립니다. 또한 석사 시절에 많은 힘이 되주었던 먼저 연구실을 졸업한 박효진, 김대건, 장민규, 조승우, 최선학과 실원으로서 제가 논문연구에 집중할 수 있도록 많은 도움을 준 연구실 실원인 성병수, 김성기, 김보미, 김아현에게 감사드립니다. 그리고 같이 연구를 하면서 함께 실험을 도와주었던 서철원 석사에게 감사드리며, 같이 석사 생활을 했던 신동협, 선기현 석사에게도 감사드립니다. 그리고 동기인 최성규에게도 감사드립니다. 힘들 때 많은 힘이 되어주고 많은 도움을 준 강경호, 김희중, 성명우, 배설봉, 김민지, 학사 조교인 김수정, 김현정에게도 감사드립니다.

또한 학교 밖에서 저에게 버팀목이 되어준 조경화 누나와 석재혁 형님 그리고 제 친구 들인 정주용, 윤성민, 박경호, 김종재, 김동원과 아끼는 동생들인 박인철, 박기현, 이장우에게 감사드립니다.

그리고 제가 2년 석사과정동안 항상 저를 믿어주시고 큰 힘을 주시고 걱정해주신 부모님과 누나 가족들에게 머리 숙여 감사드립니다.

짧으면 짧고 길면 길다고 생각할 수 있는 2년 동안같이 웃고 힘이 되어주신 모든 분들에게 감사의 인사를 드립니다.