

AUV 감시를 위한 해양 환경 적응형 수중 음향 통신
모뎀의 설계에 관한 연구

Design of Adaptively Operated Underwater Acoustic
Communication Modem in Ocean Environment for Autonomous
Underwater Vehicle Monitoring

2016.08.31

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “AUV 감시를 위한 해양 환경 적응형 수중 음향 통신 모뎀의 설계에 관한 연구”
과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. .

과제책임자 : 윤 종 락

참 여 연 구 원 : 박 지 현

“ : 설 단 단

“ : 배 민 자

“ : 김 종 주

보고서 초록

과제번호	PE99361	연구기간	2015. 06. 01 - 2016. 05. 31 (12개월)		
과제명	AUV 감시를 위한 해양 환경 적응형 수중 음향 통신 모뎀의 설계 Design of Adaptively Operated Underwater Acoustic Communication Modem in Ocean Environment for Autonomous Underwater Vehicle Monitoring				
과제책임자	윤종락	참여연구원수	총 : 5 명 내부: 1 명 외부: 4 명	연구비	75(백만원)
연구기관명 및 소속부서명	부경대학교 정보통신공학과				
국제공동연구					
요약				보고서 면수	86
<p>해양 조사, 자원탐사, 수중케이블 설치/감시 및 수중 구조물 수리를 위한 자율수중로봇 (Autonomous Underwater Vehicle: AUV)은 원격조종로봇(Remotely Operated Vehicle: ROV)에 비해 제어 케이블이 없어 운용범위가 넓다. 그러나 모선과 AUV 간의 정보 통신을 위한 음향통신 모뎀이 요구되고 모뎀의 성능은 수심, 거리, 해저 물성 및 해면상태 등의 시공간적인 해양 음향 통신 채널에 좌우된다.</p> <p>연구의 목적은 해양 환경 변화에 따른 음향통신 성능변화를 해석하여 AUV 감시를 위한 해양 환경 적응형 음향 통신 모뎀을 개발하는 것이다. 목표 성능은 비트 오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1kbps, 최대통신거리 5km, 해역수심50m이고 AUV 최대속도 3kts로 하였다.</p> <p>연구의 내용은 AUV 제어 정보 전송용량 해석, 최적 통신 방식 및 채널 코딩, 수중음향 채널 주파수 선택성/페이딩특성해석, 상시 접촉 적응형 모뎀 설계, LabVIEW기반 통신 모뎀 구현 및 수조/ 천해 성능평가 등의 내용으로 수행하였다.</p> <p>천해 음향통신 채널 변수와 모뎀 설계 변수의 상관성과 이론 및 실험에 의한 모뎀 오류율 평가하여 음향 채널 변화에 따른 오류율을 해석하였다. 이를 기반으로 반송주파수를 적응적으로 선택하는 5CH-4FSK/RS 모뎀 설계 알고리즘을 도출하고 구현하였다. 수심 50m 실 해역 성능 평가 결과 300m 이상에서 목표 성능을 달성하였다. 300m 거리 이하에서도 채널대역폭을 기준으로 전송율을 적응적으로 선택하면 목표 성능을 달성할 수 있을 것이다.</p>					
색인어	한 글	수중음향, Autonomous Underwater Vehicle(AUV), 수중음향 통신, 수중음향 통신 모뎀, 수중음향 통신 채널, 수중음향 채널 페이딩			
	영 어	Underwater acoustic, autonomous underwater vehicle, underwater acoustic communication, underwater acoustic communication modem, underwater acoustic communication channel, underwater acoustic communication channel fading			

요 약 문

I. 제목

AUV 감시를 위한 해양 환경 적응형 수중 음향 통신 모뎀의 설계
(Design of Adaptively Operated Underwater Acoustic Communication Modem in Ocean Environment for Autonomous Underwater Vehicle Monitoring)

II. 과제의 목적 및 필요성

수중 건설, 해양탐사, 해양 자원개발 및 해양환경 감시 등의 목적으로 수중 환경에서 임무를 수행할 수 있는 수중로봇이 필요하다. ROV와 달리 AUV는 케이블이 없어 소형 경량화가 가능하여 심해 등의 극한 환경에서 임무를 수행 가능하지만 수중에서 모선과의 정보통신은 음향을 이용한 수중음향 통신모뎀 기술이 필수적이다.

1990년대 후반부터 해양과학기술원의 해미래, 대우조선의 OKPO-600 등 ROV가 개발되었고 2013년에는 “수중건설로봇 사업단” 2013년 발족되어 ROV가 개발되고 있고 AUV로는 한국 해양과학 기술원의 천해용 이십이와 SAU가 개발되었다. 그러나 AUV에 필수적인 수중 음향 통신 모뎀에 관한 국내 전문가 집단은 해양과학기술원, LIG 넥스원 및 (주)한화에 불과하고 모선과 AUV간의 정보 전송에 국내에서 개발한 음향 통신모뎀의 적용은 여전히 이루어지지 않고 있다.

국외에서도 수중음향 통신 모뎀은 1990년대부터 수행되고 있고 다양한 상용 제품도 있으나 특정의 해양 환경에서만 제품의 사양을 충족하고 있어 수심, 거리, 해저 물성 및 해상상태 등의 시공간적인 수중 음향 통신 채널 환경 변화에 적응적으로 대처하지 못한다.

본 연구의 목표는 해양 음향 채널 변화에 따른 음향통신 모뎀 성능 변화를 해석하여 실시간 AUV 감시를 위한 해양 음향 채널 변화에 적응적으로 대처하는 수중 음향 통신 모뎀을 개발하는 것이다. 목표로 하는 모뎀의 비트 오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1kbps, 최대통신거리 5km, 해역수심50m이고 AUV 최대속도 3kts로 하였다.

III. 과제의 내용 및 범위

1. 모선/AUV 상태/위치 정보 전송용량 해석
2. 수중음향채널 다중경로 간섭, 주파수 선택성 및 페이딩 특성 해석
 - 지연확산, 도플러 확산 및 페이딩 등의 통신채널 매개변수들의 수조 및 실 해역 평가
3. 복잡도/강인성/신뢰성을 고려한 최적 통신방식 설계
 - 통신채널 매개변수 요소들의 모뎀 설계요소 및 오류율에 대한 영향 평가

- 통신채널 매개변수들의 유기적 관계 및 모뎀 설계요소와 오류율에 대한 영향 평가
- AUV용 해양환경 적응 음향모뎀 설계요소 도출
- 4. LabVIEW 기반 통신방식 구현 및 수조/천해 실험
- 5. 비트 오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1kbps, 최대통신거리 5km, 해역수심50m 운용 상시 접촉 적응형 모뎀 설계
- 6. 음향모뎀 성능 수조/천해 성능평가

IV. 과제결과

1. AUV 상태 및 감시 정보의 전송율은 1kbs
2. 지연확산과 채널대역폭 관계식 및 수조와 실 해역 평가에 의한 검정
3. 채널대역폭과 전송신호 전송율 및 ISI(Inter Symbol Interference) 오류율과의 관계 및 수조와 실 해역 평가에 의한 검정
4. Rayleigh 및 Rice 페이딩의 채널 환경과 수조와 실 해역 평가에 의한 검정
5. CC 및 RS 코딩의 Rayleigh 및 Rice 페이딩에 의한 오류율 수조와 실 해역 평가에 의한
6. CAZAC 코드를 위상 코드 (phase code)로 사용하여 시·공간적 변동성에 따른 CFO를 추정하는 기법 수조 실험 평가
7. QPSK, MFSK, OFDM 다중화 적용과 채널 코딩 적용 된 통신방식의 수조 및 해상실험을 통해 성능평가 통해 천해 수중 환경에 최적의 통신 방식 확인
8. 비트 오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1kbps, 최대통신거리 5km, 해역수심50m 운용 상시 접촉 적응형 비 동기식 5Ch-4FSK/RS 설계 및 성능평가
9. Labview 기반 모뎀 구현 기술 확립 및 수조/천해 실험 평가 방법 확립

V. 과제결과의 활용계획

1. 과제결과의 활용방안
 - 천해용 고가/고 기능 AUV의 상시 접촉 감시
 - 경/중 부하 수중 구조물 설치용 AUV 제어
 - 해양음향 탐사 장비산업의 경쟁력에 기여.
 - 상용 수중 음향 모뎀이 전무한 국내 이 분야 장비 산업 경쟁력 증진.
 - AUV를 포함한 이동형 무선 수중 로봇의 감시, 운항 및 회수에 필수적.
 - 해양 탐사 관측자료 실시간 전송에 활용가능.
 - 해저 고정 해양 수중 구조물의 감시 및 수중 머니플레이터의 제어에 적용.
 - 연근해 생태계 모니터링 관리에 적용.
 - LabVIEW 기반 SW 및 HW 기술은 상용의 다양한 수중 음향 모뎀 후속 연구 기대.

2. 과제결과의 기대효과

- 천해 50m이하 해역의 거리/주파수/해상상태/해저물성에 따른 통신채널 모델링
 - 해양 환경(해상 상태, 해저물성)에 따른 AUV와 모선의 거리/주파수 종속 다중경로 간섭 및 지연 확산 모델
 - 해양 환경(해상 상태, 해저물성)에 따른 AUV와 모선의 거리/주파수 종속 페이딩 모델
 - 음향통신 모델 성능을 결정하는 다양한 매개 변수들의 유기적 관련성 해석 기술

- 천해 통신 음영구역 해결을 위한 통신방식 최적화
 - 해양 환경에 따른 AUV와 모선의 거리/주파수 종속 통신 음영구역 해석 기술
 - 해양 환경에 따른 AUV와 모선간의 통신 음영 구역 해결을 위한 통신방식

- AUV/모선 상시 접촉 적응형 수중 음향 통신 모델 설계 변수 최적화
 - AUV와 모선의 거리/주파수 종속 통신 음영구역 제거를 위한 음향 모델 설계 변수 최적화
 - LabView 기반 SW/HW 구현 및 제작 개발 및 성능 평가 확립
 - FPGA 기반 해양환경 적응형 상용 음향모델 시작품 제작에 활용

- 기타
 - 수중 음향 모델의 SW/HW 기술은 해양 장비 산업 발전에 기여
 - 천해 시·공간 변화 음향 채널에 대응하는 모델 설계 요소 기술 및 국내외 학문적 수준 향상
 - 본 기술은 수중음향학, 통신, 로봇 기술 및 해양장비공학 등의 복합과학 분야.
 - 극소수 국내전문가 집단의 연구저변 확대, 기술력 기여 및 인력양성 효과.

SUMMARY

Operating range of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) which is used in ocean survey, resource survey, underwater cable installation or monitoring and underwater structure repair, is wider than Remotely Operated Vehicle (ROV) with a guided cable. However, AUV requires an acoustic modem for monitoring signal transmission from and to a mother ship. The performance of the acoustic modem depends on space and time variant ocean acoustic channel environment which is affected by water depth, range, sea bottom acoustical property and sea surface state. Therefore the operating range of AUV is also limited by ocean environment variation.

The aim of this study is to analyze the dependency of the performance of the acoustic modem on ocean environment variation and to develop a adaptively operated underwater acoustic communication modem for AUV which can be used in 50m depth water under less than 3 knots of AUV speed. Its bit-error-rate(BER), transmission rate, and communication range will be less than 10^{-4} , 1 kbps, and 5 km, respectively.

Contents of study consist of adaptive modem design, implementation using LabVIEW, and experimental evaluation which are based on analysis of AUV control and monitoring information capacity, optimum modem scheme, channel coding effectiveness, frequency selective fading of acoustic communication channel

5 channel-4FSK with Reed-Solomon channel code which select adaptively the carrier frequency, is designed and implemented. Its performance was examined in 50 m depth water and shown the objective performance in greater than 300 m but not in less than 300 m range. The objective performance in less than 300 m range can be also achieved by adaptive selection of transmission rate based on channel bandwidth.

KEY WORDS

수중음향, 수중 자율 잠수정, 수중음향 통신, 수중음향 통신 모델, 수중음향 통신 채널, 수중음향 채널 페이딩

underwater acoustic, autonomous underwater vehicle, underwater acoustic communication, underwater acoustic communication modem. underwater acoustic communication channel, underwater acoustic communication channel fading

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	10
Section 1 Purpose of study	10
Section 2 Necessity of study	11
Section 3 Contents and approach methods of study	12
Chapter 2 State of the art of study	16
Section 1 Foreign ROV/AUV development	16
Section 2 Domestic ROV/AUV development	16
Section 3 Scope of underwater acoustic communication modem development	18
Chapter 3 Contents and results of study	21
Section 1 Result I: Design parameters of modem	21
Section 2 Result II: Design of adaptive acoustic communication modem	65
Chapter 4 Achievements and contributions of study	80
Section 1 Achievements of study	80
Section 2 Contributions of study	81
Chapter 5 Field applications of study achievements	83
Chapter 6 References	88

목 차

제 1 장 서론	10
제 1 절 과제의 목적	10
제 2 절 과제의 필요성	11
1. AUV 및 음향 통신 모뎀의 필요성	11
2. 적응형 통신모뎀의 필요성	11
3. AUV용 음향 모뎀 국내 개발 필요성	12
제 3 절 과제내용 및 수행방법	12
1. 과제내용	12
2. 과제 수행방법	14
제 2 장 국내외 기술개발 현황	16
제 1 절 국외 ROV/AUV 개발 현황	16
제 2 절 국내 ROV/AUV 개발 현황	16
제 3 절 국내외 ROV/AUV 용 수중 음향 통신 모뎀 개발 현황	18
1. 국내외 수중 음향 통신 기술 수준	18
2. 현 기술의 한계와 과제의 기술 수준	19
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	21
제 1 절 과제 결과 I: 음향 통신 모뎀 설계 요소	21
1. AUV 정보 전송용량 해석	21
2. 수중 음향 통신 모뎀 설계 요소	22
3. 수중 음향 통신 채널 요소	29
4. 수중 음향 통신 채널 매개변수와 모뎀 성능 평가	39
제 2 절 과제 결과 II: 적응형 음향 통신 모뎀 설계	65
1. AUV 음향 통신 모뎀 제어반	65
2. 최적의 수중 음향 통신 방식 설계	68
3. 해양 환경 적응형 AUV 용 모뎀 성능 평가	73
제 4 장 과제목표 달성도 및 대외기여도	80
제 1 절 과제목표 및 달성도	80

제 2 절 과제 대외기여도	81
1. 수주로봇 기술과 해양산업발전	81
2. 수중 음향 통신 기술 발전	82
제 5 장 과제결과의 활용계획	83
1. 과제 결과의 활용방안	83
2. 과제 결과의 기대효과	83
제 6 장 참고문헌	85

제 1 장 서론

제1절 과제의 목적

전 세계적으로 국방, 수중 건설, 해양탐사, 해양 자원개발 및 해양환경 감시 등의 목적으로 수중 환경에서 임무를 수행할 수 있는 수중로봇이 개발·연구되고 있다. 해양 선진국은 미래의 수중로봇의 필요성을 미리 예측하고 20년 전부터 개발하여 현재 지구상의 거의 모든 해양에서 운용 가능한 수준이다. 수중로봇의 활동 다양화와 특수 잠수 한계에서 수중로봇 개발은 고도의 제어기술이 적용되어 원격조정로봇(Remotely Operated Vehicle:ROV)에서 자율운항이 가능한 자율수중로봇(Autonomous Underwater Vehicle: AUV)으로 발전하고 있다.

ROV는 모선과 케이블로 연결되어 제어 및 전원 공급 등이 이루어지므로 수중 건설 및 수중 등의 대용량 부하에는 적합하지만 강한 해류나 조류에 의해 운용범위가 제한된다. 이에 반해 AUV는 케이블이 없어 소형 경량화가 가능하여 심해 등의 극한 환경에서 임무를 수행할 수 있다. AUV는 자율 운항을 위한 최적의 선형설계기술이 부가적으로 요구되며 전파사용이 제한되는 수중에서 모선과의 정보통신을 위한 음향을 이용한 수중음향 통신모뎀 기술이 요구된다. 따라서 AUV의 주어진 공간적인 임무 범위에서 실시간 상시 접촉이 가능한 모뎀 개발 및 개발한 모뎀 소프트웨어를 하드웨어로 구현하는 상용 제품화 기술이 필요하다.

본 연구의 목표는 Fig. 1과 같이 해양 음향 채널 변화에 따른 음향통신 모뎀 성능 변화를 해석하여 실시간 AUV 감시를 위한 해양 음향 채널 변화에 적응적으로 대처하는 수중 음향 통신 모뎀을 개발하는 것이다. 목표로 하는 모뎀의 비트 오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1kbps, 최대통신거리 5km, 해역수심50m이고, AUV 최대속도 3kts로 하였다.



Fig. 1. Object and development procedure of adaptive underwater acoustic communication modem design

제2절 과제의 필요성

1. AUV 및 음향 통신 모뎀의 필요성

수중로봇 개발은 융합과학 기술로 선체설계 기술, 추진기 설계, 비선형 운동 방정식 도출 및 제어 기술, 항법 기술, 통신기술, 추진 에너지 기술, 자율/센서/조작 기술 등이 요구된다.

ROV의 경우는 선체설계나 추진 에너지 기술 등이 중요한 요소 기술이 아닐 수도 있지만 AUV의 경우는 모든 요소 기술이 요구된다. 모선과 AUV 간의 상태 정보, 임무 정보, 제어 및 위치 정보 통신기술은 AUV의 생존과 임무에 필수적이다.

전파와 GPS 정보는 수중에서 사용이 제한되어 수중 음향 통신 모뎀으로 모선과의 정보교환이 이루어진다. 수중 음향 통신 모뎀의 필요성은 아래와 같다.

- AUV의 진수, 회수 및 상태 감시를 위한 모선과의 정보 교환에는 음향통신 모뎀 필수적
- AUV는 ROV와 달리 무선 음향 통신으로 운용되어 케이블이 없어 운용범위가 넓음
- AUV용 음향모뎀에 관한 국내 전문가 집단이 극소수이고 기술 수준이 초기 단계
- 차세대 원천 AUV 기술의 핵심기술: AUV의 자율 기능은 해양환경/구조물 감시 및 경/중 부하 구조물 건설에 필수적
- 해양 장비 산업의 요소기술: 수중 음향, 수중 음향 통신 및 전자정보통신 융합 기술

2. 적응형 통신모뎀의 필요성

수중 음향 통신 채널은 시공간적인 해양 환경 변화에 따라 변한다. Fig. 2에서 보이는 현재까지 상용화 된 수중 음향 통신 모뎀은 특정의 수중 음향 채널 환경에서만 제시된 성능을 보인다. 수중 음향 통신 채널은 해면, 해저에 의한 시변 다중경로, 송수신기 지향성 및 송수신기 배열 등에 의해 결정되는 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading) 채널로 채널 특성을 기반으로 모뎀이 설계되고 그 성능이 결정된다.

AUV를 상시 접촉하여 감시하기 위해서는 AUV의 임무범위에서 수중 음향 채널의 변화에 적응적으로 대응하는 모뎀이 개발되어야 할 것이다. AUV의 전송정보량과 수중 음향 통신 채널 변화에 기초한 적응형 음향 통신 모뎀의 필요성은 아래와 같다.

- 수심, 거리, 해저 물성 및 해상상태 등의 시공간적인 수중 음향 통신 채널 환경 변화에 적응적으로 대처하여 음향 통신 모뎀 성능 변화 최소화
- AUV 감시 거리 범위에서 채널변화에도 통신 음영 구역이 없는 상시 접촉 통신 모뎀 개발 필요

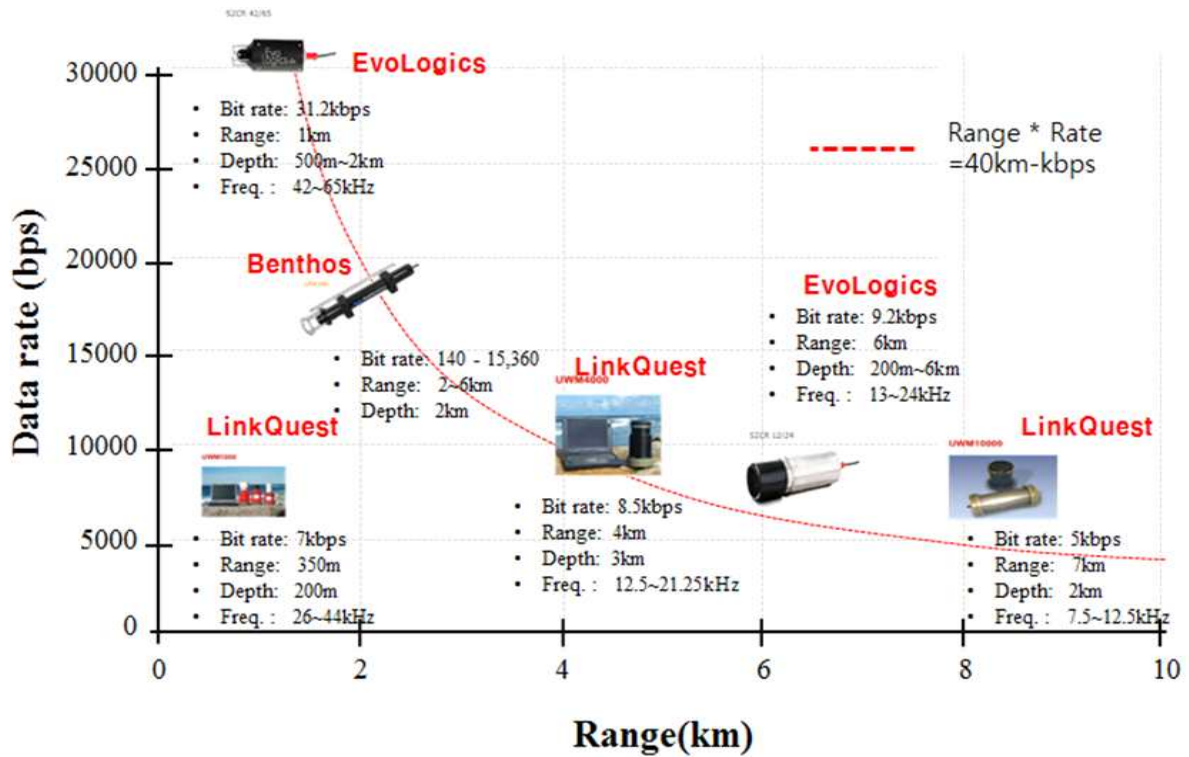


Fig. 2. Transmission rate of commercial underwater acoustic modem[1-4]

3. AUV용 음향 모뎀 국내 개발 필요성

20년 이상의 연구개발이 진행되고 있는 외국의 AUV용 수중 음향 통신 모뎀 개발 연구에 비하면 15년 이내의 국내의 수준은 여전히 미흡하고 연구그룹도 소수에 불과하다. 개별 요소 기술은 일부 연구팀에서 확보하고 있지만, 여전히 개별 요소 기술의 융합과 연구 저변확대 및 인력양성이 요구된다. 본 연구의 결과는 음향모뎀 제작 기술의 기업체 이전 및 다양한 목적의 상용 수중 음향 모뎀 개발의 후속 연구에 기여할 수 있다[1-5].

- 1990년대 후반부터 ROV인 한국해양과학기술원의 해미래, 대우조선의 OKPO-600 등이 개발
- 해양개발용 “수중건설로봇 사업단” 2013년 발족: ROV 기술 위주 유선 통신 방식 연구
- 천해용 이심이와 SAUV가 있으나 고기능, 완전 자율 측면에서는 제한적인 기능
- AUV용 음향모뎀 연구 주체는 한국해양과학기술원, LIG 넥스원 및 (주)한화에 불가함
- 모선과 AUV간의 정보 전송에 국내에서 개발한 음향 통신모뎀의 적용은 여전히 미완성

제3절 과제 내용 및 수행방법

1. 과제 내용

Table 1은 수심 50 m 이하의 천해에서 AUV의 상태 및 감시 정보를 전송하기 위한 음향 통신 모델의 설계를 위한 본 과제 내용이다. 해양 음향 환경 중속 음향 통신 모델 설계 요소를 도출하고 도출된 설계요소를 기반으로 해양 환경 변화에 성능이 독립적이고 강인하고 신뢰성 있는 모델을 개발하는 내용이다.

Table 1. Contents of study

세부연구 목표	연구내용
음향통신 모델 설계요소 도출	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모선/AUV 상태/위치 정보 전송용량 해석 - AUV 상태정보: 전원, 온도, 누수 등 - AUV 위치정보: 속도, 방향, 거리 등 모선 명령정보: GPS 정보, 귀환 명령 등
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 복잡도/강인성/신뢰성을 고려한 최적 통신방식 설계 - 비트 오류율 10^{-4}이하, 전송률 약 1 kbps, AUV 속도 최대 3kts - 비 동기식 및 동기식 통신 방식 등: MFSK, QPSK, OFDM 등 - 채널 코딩 방식: Convolution 및 Reed-Solomon
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수중음향채널 다중경로 간섭, 주파수 선택성 및 페이딩 성/페이딩 지표 해석 - AUV 임무해역 정의: 천해(50m 이하), 공간적 최대 범위 5 km - 임무해역 지연확산 다중경로 간섭 모델: 음선 궤적 모델링 - 해면/해저 거칠기의 시간확산 및 주파수 확산 모델: 페이딩 통계적 모델 - 거리/주파수 변화에 따른 페이딩 해석 모델
해양환경 적응형 음향통신 모델 설계/성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ Labview 기반 구현 및 수조/천해 실험 - 통신 방식 소프트웨어 구현 - 수조/천해 실험 - 통신 음영 구역 해석
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 통신방식과 음향채널을 연계한 상시 접촉 적응형 모델 설계 - 통신 성능변화(비트 오류율이 10^{-4}보다 큰 영역) 해결 방안: 확산 및 페이딩 예측, 선택적 반송주파수, 선택적 변조기법 변화, 대역 확산 방식 적용
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 다운링크/업 링크 전송 패킷설계 - 양방향 전이중 주파수 분할방식: 15kHz/30kHz - 전송 패킷 설계 ○ 적응형 음향모델 성능 수조/천해 성능평가 - 통신 성능변화, 오류율 및 통신거리 평가 - 주파수, 거리, 수심, 저질, 해상상태에 적응

2. 과제 수행방법

음향 통신 모뎀 기술은 전파 통신 모뎀 기술을 음향 통신 채널에 응용하는 기술로 음향 통신 채널의 특성에 기초하여야 한다. 해양 음향 통신 채널은 접근성의 어려움으로 국내외 많은 음향통신 모뎀 연구가 모의실험 환경으로 이루어진다. 따라서 연구결과를 실 해역에 적용하는 것은 제한성을 갖는다.

본 과제에서는 Fig. 3과 같이 수조 및 실 해역의 해양 음향 채널 환경으로 통신 채널 매개 변수를 해석하고 모뎀을 설계하였다. 아울러 모뎀 소프트웨어를 LabVIEW로 구현하여 설계된 시스템의 성능을 실 해역에서 실험하였다.

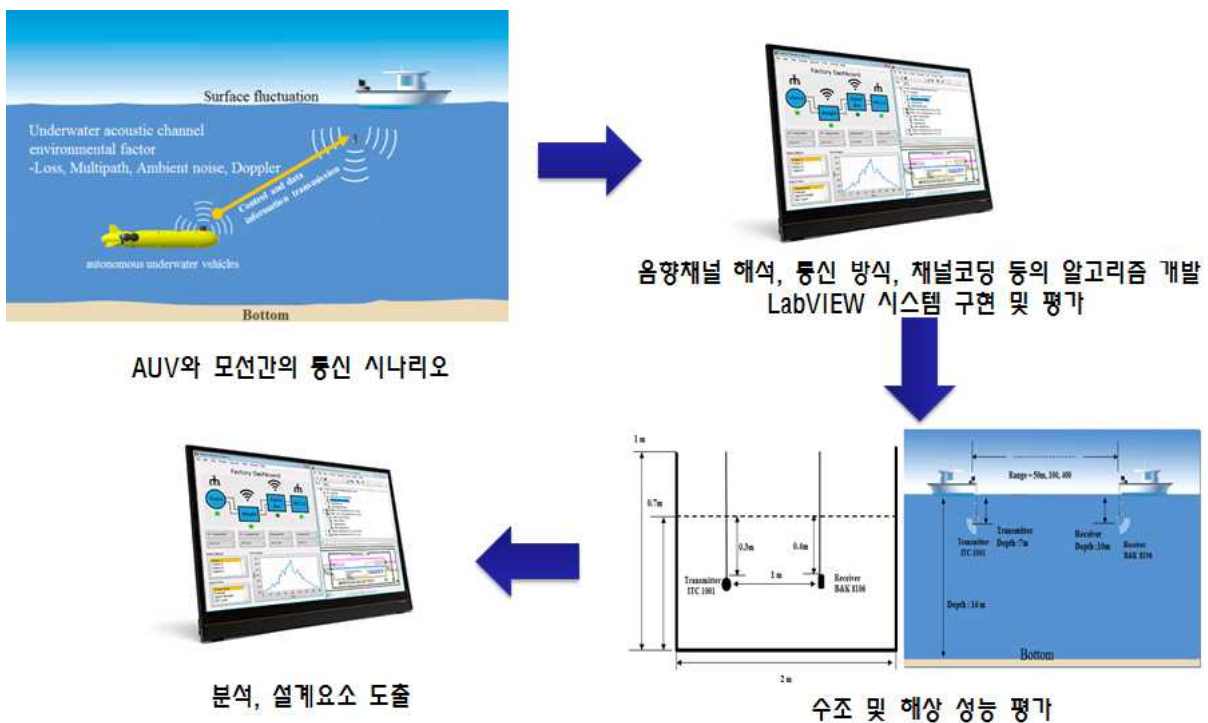


Fig. 3. Approach methods and adopted techniques of study

Fig. 4는 사용한 수조 및 LabVIEW로 구현한 실험 장치이다. Fig. 5는 해상 실험 해역으로 수심 약 16 m의 거제도 칠천도 연안과 수심 약 50 m의 부산 해운대 연안이다.

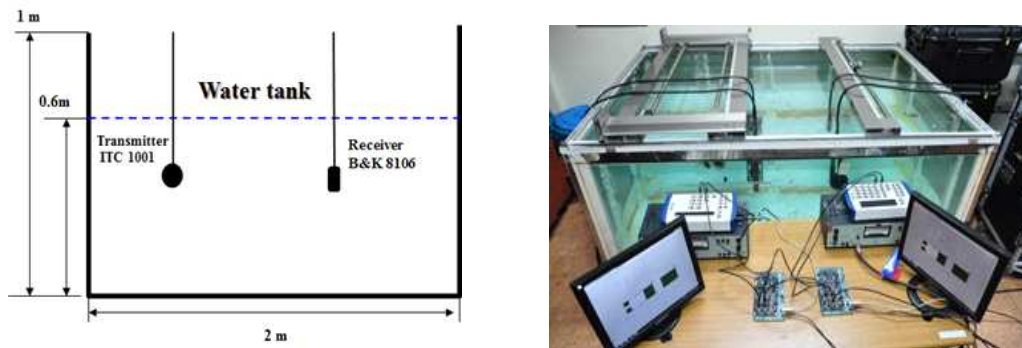


Fig. 4. Water tank experimental configuration



(a)



(b)

Fig. 5. Sea experimental sites, (a) Chilchon island of Geoje city, (b) Haeundae of Busan city

2 장 국내외 기술개발 현황

제1절 국외 ROV/AUV 개발 현황

미 해군의 잠수함 구조용 ROV인 CURV가 1958년 개발된 이래 1990년대 까지 수중 로봇은 대용량 특수 임무(침몰 잠수함 인양 등)를 수행하기 위한 ROV 위주로 개발되었다. 그러나 2000년대 들어 자원탐사 및 해양 환경 감시 등의 공간적 범위가 확장됨에 따라 AUV 개발이 본격적으로 진행되고 있다. 여전히 상용의 수중로봇은 특수 임무의 ROV 제작 위주로 진행되고 있으나 각국 해군, 대학 및 연구소에서는 고도의 기술을 요구하는 AUV 개발을 병행하고 있다.

국외의 AUV 분야에 대한 연구는 1990년 후반부터 시작된 미 해군의 무인잠수정 개발 사업을 위시하여 대학 및 연구소(MIT, FIT, FAU, Scripps, WHOI 등) 및 Fig. 6과 같이 기업체(Bluefin Robotics, Boeing, Ocean Sever Tech. 등)가 연구개발을 주도하고 있다. EU 국가 중에는 프랑스, 영국, 독일, 스웨덴 노르웨이가 군사 및 산업용의 AUV를 기업 및 연구소를 중심으로 개발하고 있고 실제 임무를 수행하는 것도 있다. 일본의 경우는 JAMSTEC 및 동경대학을 중심으로 1980년 대 부터 AUV를 개발하고 있는 것으로 알려져 있다[1-5].



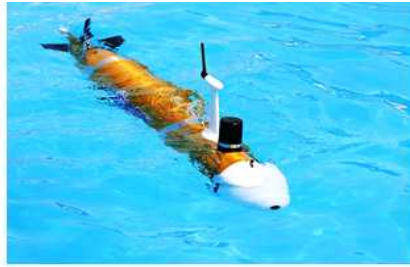
Fig. 6. Foreign ROV/AUV products

제2절 국내 ROV/AUV 개발 현황

국내의 수중 로봇 연구는 1990년대 후반부터 ROV를 중심으로 해양과학기술원의 해미래, 대우조선의 OKPO-600 등이 개발되었다. 아울러 한국과학기술기획 평가원(KISTEP)의 미래해양 개발을 위한 수중건설로봇 개발사업 예비타당성조사에 이어 한국해양과학기술원에 해양개발용 “수중건설로봇 사업단”이 발족하여 2013년부터 6년간, 총사업비 850억으로 사업이 진행되고 있다. Fig. 7은 국내의 ROV/AUV로 해양과학기술원의 천해용 이십이와 SAUV가 있으나 고기능, 완전 자율 측면에서는 여전히 제한적인 기능을 갖고 있고 모선과 AUV간의 정보 전송에 자체 개발한 수중 음향 통신모형을 적용하였다는 연구결과는 없다. Table 2과 Table 3는 각각 국내 ROV/AUV 연구방향과 국내 수중 로봇 관련 특허 현황이다.



옥포 6000



이심이100



해미래

Fig. 7. Domestic ROV/AUV products

Table 2. Domestic ROV/AUV studies

기술명	연구 주체	연구 방향	현재 기술수준
군용 ROV/AUV	국방과학연구소(방위사업청)	방어, 감시, 공격	연구 단계
ROV 기술	대학, 중소기업(해양로봇센터)	머니플레이터, 해양장비	유선 제어
ROV 기술	해양과학기술원	수중건설, 탐사/생태계 감시	유선 제어
AUV 기술	해양과학기술원, LIG넥스원, 한화	잠수정제어(민군 공동)	연구 단계

Table 3. Patents of domestic ROV/AUV

특허제목/등록년도	주요 기술 및 기능	수중음향 통신 모뎀기술 관련성
수중로봇의 위치 추정 장치 및 그 방법/2013	수중로봇의 롤 각속도, 피치 각속도, 요 각속도, 서지 선속도, 스웨이 선속도, 및 히브 선속도에 대한 정보를 통해 위치를 추정.	AUV 자신의 위치를 추정하는 기술로 모선과의 수중 음향 통신은 적용되지 않고 있음.
수중로봇과 제어방법/2013	주행방향, 심도, 장애물과의 거리, 목표지점과의 각도 등을 고려한 최적의 주행경로 추정 및 수중로봇과 그 제어방법.	"
복합이동이 가능한 다관절 해저로봇을 이용한 해저탐사 시스템/2013	유선(케이블)을 이용한 해저로봇 수중 상태 데이터 저장, 해저로봇의 이동방향 모니터링하고 제어하는 기술.	ROV로 케이블로 연결되어 있어 수중 음향 통신 모뎀이 불필요한 기술.
수중로봇 원격 제어 시스템 및 방법/2012	다수의 수중로봇을 원격으로 제어할 수 있는 수중로봇 원격 제어시스템 및 방법	다수 노드간의 제어 프로토콜관련으로 다수 수중로봇의 제어 방법만을 설명. 수중 음향 모뎀 개발과는 관련이 없음.

제3절 국내외 ROV/AUV용 수중 음향 통신 모뎀 개발 현황

일본의 잠수정 우라시마(작업수심 3500 m)와 모선 요코스카간의 음향통신은 JAMSTEC에서 개발한 것으로 영상정보의 전송은 최대 32 kbps로 알려져 있으며 잠수정의 제어신호와 관측 영상 자료의 전송은 주파수 대역을 달리하여 패킷으로 전송하고 있다. MIT와 FAU에서는 20년 전부터 AUV의 제어에 음향모뎀을 사용하고 있는 실정이다.

현재 상용화 된 수중 음향 모뎀의 전송능력 및 현황으로 전송속도는 140 bps ~ 31 kbps까지의 성능을 보인다. TELEDYNE, BENTHOS, LinkQuest, EvoLogics, Datum사에서 개발한 상용 모뎀의 성능 분석 결과 해양 환경 영향을 받는 수중 음향 채널 특성상 이들 제품은 수평 채널 및 수직채널용으로 구분하여 개발되고 운용되고 있다[4].

1. 국내외 수중 음향 통신 기술 수준

국내의 이 분야 연구는 Fig. 8과 같이 한국해양과학기술원의 “수중 무선통신 시스템 개발사업”으로 2004년~ 2011년까지 수행되어 전송거리 10 km에서 10 kbps의 전송속도를 달성하는 음향모뎀이 개발되어 LIG 넥스윈으로 기술이 이전되었다. 그러나 아직 AUV에 적용할 수 있는 모뎀에 개발기술이 적용되지 못하고 있다. 아울러 방위 사업청의 수중 통신 탐지 특화연구센터는 2007년부터 9년간 수중음향 통신시스템의 기초기술을 연구하고 있으나 인력양성사업 위주로 수중 음향 모뎀의 개발이나 운용과 관련한 상용 제품화된 결과물은 없다[1].

Table 4은 국내 수중 무선 통신 연구의 기술 수준이다. 한국해양과학기술원의 “수중 무선 통신 시스템 개발사업” 및 방위 사업청의 수중 통신 탐지 특화연구센터, 한국음향학회 수중통신 관련 학술지 게재 논문 현황을 기준으로 평가한 현재 기술이다. Table 5는 국외기술 수준이다.



Fig. 8. “Underwater wireless communication system development”-technology transferred from KIOST to LIG

Table 4. Present technology level of domestic underwater acoustic communication system

기술명	연구 주체	연구 방향	현재 기술수준
수중 무선통신 시스템 개발사업 2004년-2011년	한국해양 과학기술원	-전송거리 10km에서 10kbps의 전송속도 음향모뎀 개발. LIG 넥스원으로 기술 이전	-AUV에 개발기술 구현 되지 못하고 있음.
수중 통신 탐지 특화연구센터 2007년-2016년	방위 사업청	-수중음향 통신시스템의 기초기술을 연구	-인력양성사업위주 -수중음향통신 관련 개별 요소 기술 해석 -시스템 관련 연구 미흡.
수중통신 관련 학술지 게재 논문 현황 2003년-2016년	한국 음향학회	-2003년-2016년까지 30여 편 게재. -해상실험 논문이 모의실험 논문보다 적음. -고속(영상전송 등) 및 저속(AUV 제어 등)용 특정 시스템 관련 연구는 수편에 불가.	-음향통신 모뎀 성능을 결정하는 다양한 매개변수들의 유기적 관련성 해석 미흡.

Table 5. Present technology level of foreign underwater acoustic communication system

기술명	연구 주체	연구 방향	현재 기술수준
우라시마 (작업수심 3500m) 일본	JAMSTEC	-전송속도 최대 32kbps. 잠수정 제어신호와 관측 영상 자료의 전송	-주파수대역을 달리하여 패킷으로 전송.
AUV 개발	MIT와 FAU	-20년 전부터 AUV 용 음향모뎀 개발	-시스템 개발 적용
수중음향모뎀	TELEDYNE BENTHOS, LinkQuest, EvoLogics, Datum 등	-전송속도는 140 bps~31 kbps. -수평채널 및 수직채널용으로 구분하여 개발.	-음향통신 모뎀 성능을 결정하는 다양한 매개변수들의 유기적 관련성 해석 미흡.

2. 현 기술의 한계와 과제 기술 수준

현재 개발되어 있는 상용 모뎀의 사양 분석 결과 해양 음향 통신 채널을 수평채널 및 수직 채널용으로 구분하여 개발하고 있다. 또한 해양의 통신채널 특성을 고려하지 않고 전파통신 모뎀을 단순히 음향 통신 모뎀으로 변환한 시스템도 있다.

수심 5 km의 수직채널 음향환경을 고려하여 개발된 음향모뎀은 모선과 잠수정이 수직 방향으로 위치하는 경우의 모뎀이다. 따라서 수심 200 m의 수평채널 음향환경에서 모선이 잠수정을 수평 방향으로 감시하는 경우 수평거리 변화에 따라 통신 채널이 변화하여 성능을 전혀 발휘하지 못하게 된다.

특히 천해의 수평 음향 채널에서 음향 통신모뎀의 통신거리는 기하학적 거리와는 선형적인 관계를 보이지 못하고 통신 음영구역이 존재한다. 이를 해결하기 위해서 수심, 저질, 해면 상태

및 송수신기의 거리 등의 시공간적 채널 변화에 대응하는 다양한 기법들이 적용되고 있지만, 아직 통신 음영 구역 해결 기술은 미흡한 실정이다.

예를 들면 일본의 JAMSTEC에서 개발한 우라시마(작업수심 3500 m)의 수중 음향 통신은 심해용 수직채널용 모뎀으로 채널의 시공간 변화가 격심한 천해에서 설계 사양의 성능을 발휘할 수 없다.

따라서 본 연구 과제를 통해 AUV의 공간적 임무 범위에서 해양 환경 변화에 독립적으로 AUV를 실시간으로 상시 접촉하는 음향통신 모뎀 설계 기술을 개발한다. 개발되는 모뎀은 해양 환경 변화에 음향 모뎀의 통신방식이 적응적으로 변하는 시스템이다. 아울러 개발과정에서 확보하는 해양 음향 채널의 송·수신기 상대위치, 주파수 변화에 따른 시간 확산 및 페이딩에 따른 모뎀 설계 기술은 국내외 학문적 기술 수준을 향상시키고, 수중 음향 모뎀의 소프트웨어/하드웨어 기술은 국내 음향 모뎀 제작기술 및 해양 장비 산업을 발전시킬 수 있을 것이다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 과제 결과 I: 음향 통신 모뎀 설계 요소

1. AUV 정보 전송용량 해석

일반적으로 수중 음향 통신 모뎀의 전송률은 항해 및 수중장비 상태의 명령 및 감시에는 100 ~ 1000 bps, 수중청음기 및 지진계의 계측 자료 전송에는 1 ~ 10 kbps, 수중영상 정보의 전송에는 10 ~ 100 kbps가 요구되는 것으로 알려져 있다. AUV의 자체 운항 제어는 분산제어 방식을 취하므로 모선은 AUV의 상태만 감시하게 되며 AUV용 수중 음향 통신 모뎀을 설계는 AUV 상태 정보 용량 해석이 요구된다. Table 6는 AUV의 정보 용량을 분석한 결과로 추가적인 정보를 고려하더라도 최대 1 kbyte이다.

여기서 AUV의 자체 운항 제어는 분산제어 방식을 취하고 모선은 AUV의 상태만 감시하는 것으로 가정하였다. 따라서 AUV의 정보를 1초간에 전송한다고 하면 전송용량은 1 kbps가 된다. 이 경우 디지털 통신 방식 음향 통신 모뎀의 신호 대역폭은 1 kHz가 된다.

정보 전송용량에 의해 결정되는 신호대역폭은 수중 음향 채널의 대역폭과의 상대적인 크기

Table 6. AUV control and monitoring information capacity

순번	정보 종류		용량 byte(bit)	
			Parity bit 포함	
1	상태	동작상태	1(8)	
2		온도	3(24)	
3		진류	3(24)	
4		전압	3(24)	
5		누수	1(8)	
6		수심	3(24)	
7	운동 정보	GPS	위도(E)	7(56)
			경도(N)	7(56)
8		시간	6(48)	
9		방향 X	3(24)	
10		방향 Y	3(24)	
11		방향 Z	3(24)	
12		총 운행거리	3(24)	
13		운행 시간	6(48)	
14		운행 가능 시간	6(48)	
15		모터 속도 R	3(24)	
16	모터 속도 L	3(24)		
계			64(512)	

에 의해 전송 신호의 오류가 결정되므로 전송용량 해석은 필수적이다. 신호 대역폭과 채널 대역폭에 의해 결정되는 오류에 대해서는 3.2 및 3.3절에서 상술한다.

2. 수중 음향 통신 모델 설계 요소

가. 변복조 기술

AUV 감시 정보 전송을 위한 수중 음향 통신 모델의 구성은 Fig. 9와 같다. 입력 정보는 "0"과 "1"의 2진 정보 데이터이며, 채널의 잡음이나 페이딩에 의한 오류를 제거하기 위한 채널 코딩을 거쳐 각각의 이진수는 반송파 펄스로 변조된 후 송신용 변환기를 거쳐 전송된다. 코딩된 이진 데이터 신호 $D_k(t)$ 에 대한 송신신호의 기저 대역 신호 $s_l(t)$ 식(1)과 같다.

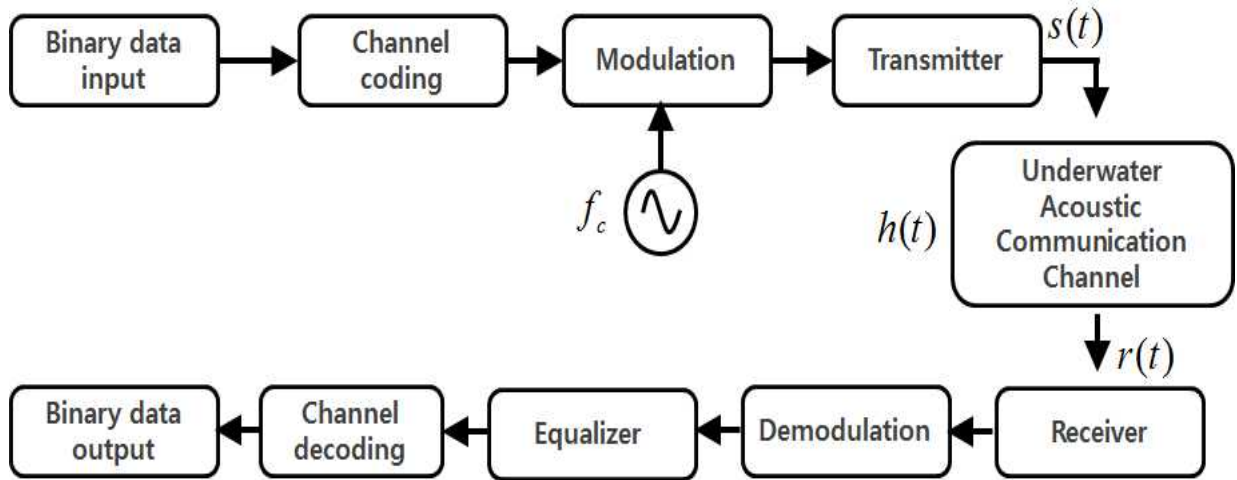


Fig. 9. Functional block diagram of underwater acoustic communication

$$s_l(t) = \sum_k D_k p(t - kT) \quad (1)$$

다양한 변복조 기술이 있으나 가장 간단한 비동기식 BFSK(Binary Frequency Shift Keying) 방식부터 기술한다. BFSK의 경우, "0" 일 때 $f_1(t) = A \cos(\omega_1 t)$ 이며, "1" 일 때 $f_2(t) = A \cos(\omega_2 t)$ 이다. $p(t)$ 는 성형 함수, T 는 비트 지속시간이다. 송신신호 $s(t)$ 는 식(2)와 같다.

$$s(t) = \text{Re}[s_l(t)e^{j2\pi f_c t}] \quad (2)$$

대역 효율을 최대화하기 위해 $f_1(t)$ 와 $f_2(t)$ 는 직교성을 갖는 최소의 주파수 차이($\Delta f = 1/T$)를 갖도록 한다. 수중 다중경로 채널이 시 불변인 경우를 가정하면 수신기로 수신되는 신호 $r(t)$ 는 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 r(t) &= \text{Re} \left(\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^N \alpha_i e^{-j2\pi f_c \tau_i} D_k p(t-kT) \right] e^{j2\pi f_c t} \right) \\
 &= \text{Re} \left(\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_0 D_k p(t-kT) \right] e^{j2\pi f_c t} \right) \\
 &\quad + \text{Re} \left(\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N \alpha_i e^{-j2\pi f_c \tau_i} D_k p(t-kT) \right] e^{j2\pi f_c t} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

식(13)의 1항은 직접파 성분이고, 2항은 다중경로에 의해 ISI를 야기하는 반사파 성분이다. 비트 지속시간 T 가 다중경로의 지연확산 보다 상대적으로 커지면 다중경로 영향은 상대적으로 작아진다. 그러나 이 경우에도 반송주파수가 큰 경우 τ_i 의 미소변화에 의해서도 위상은 크게 변화하게 되어 신호 비트 시간 내의 각 다중경로는 상호 보강 간섭 혹은 상쇄 간섭을 하게 되고 이에 수신신호의 전력은 크게 변화하게 된다.

FSK 시스템은 대역 효율이 낮지만 이러한 간섭과 페이딩에 덜 민감하여 강인한 시스템으로 알려져 있으며 전송률을 높이기 위해 M-ary FSK (MFSK) 시스템으로 사용되고 있다 [6-8]. k 비트 정보인 경우 $M = 2^k$ 이고 심벌 신호 길이 $T_s = kT_b$ 이며 직교하는 M 개 주파수의 정현파를 사용한다. 심벌이 2개 비트를 표시하므로 동일한 비트 주기 T 를 기준으로 하면 4FSK는 BFSK 보다 2배 속도로 비트를 전송할 수 있다. Fig. 10은 MFSK 변조방식의 구성도이며, Fig. 11은 복조기의 구성도이다.

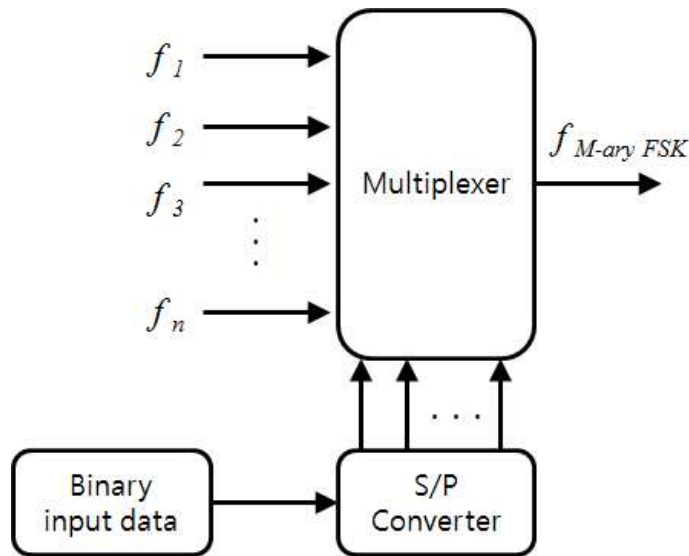


Fig. 10. Structure of MFSK modulator

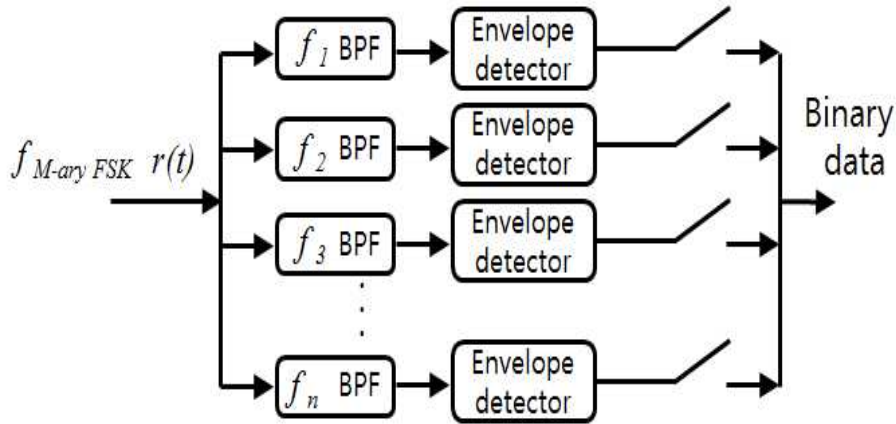


Fig. 11. Structure of MFSK demodulator

동기식인 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)는 동일 반송파의 위상변화를 $\pi/2$ (90°)씩 변화를 주어, 4개 종류의 디지털 정보 데이터(00, 01, 10, 11)를 각각의 위상에 대응하는 신호로 전송하는 방식이다. FSK 보다 대역폭이 1/2로 감소한다. 한 개의 심벌이 2개 비트를 표시하므로 동일한 비트 주기 T를 기준으로 하면 FSK 보다 2배 속도로 비트를 전송할 수 있다. 한 개의 심벌이 2개 비트를 표시하므로 I (In-phase) 채널과 Q (Quadrature) 채널의 2진 데이터의 조합에 의해 위상이 결정된다. 채널과 Q채널의 데이터 모두가 변하면 $\pm 180^\circ$ 의 위상 변화가 발생하여 두 개의 채널 중 한 개의 데이터가 변환하면 $\pm 90^\circ$ 의 위상 변화가 발생된다.

QPSK 신호는 $m_I(t)$ 에 $A \cos w_c t$ 를 $m_Q(t)$ 에 $-A \sin w_c t$ 를 곱하여 $m_I(t)$ 와 $m_Q(t)$ 의 합이 QPSK이다. $\phi_{QPSK}(t)$ 는 식(4)와 같다[9].

$$\begin{aligned} \phi_{QPSK}(t) &= A [m_I(t) \cos w_c t - m_Q(t) \sin w_c t] \\ &= A \sqrt{2} \cos(w_c t + \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $|m_I(t)| = |m_Q(t)| = 1$, $\theta = \tan^{-1} \frac{m_Q(t)}{m_I(t)}$, $\cos \theta$ 는 $\frac{1}{\sqrt{2}} m_I(t)$, $\sin \theta$ 는 $\frac{1}{\sqrt{2}} m_Q(t)$ 이다. Fig. 12는 정보 데이터에 대응되는 성상도(페이저도)이다.

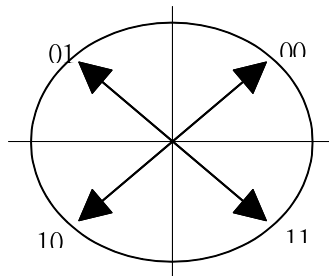


Fig. 12. Constellation of QPSK

Fig. 13은 QPSK 모뎀 변조기 구성도이다. 이진 데이터를 2개의 독립된 I 및 Q채널로 분리시키고, 서로 90도 위상차를 갖는 2개의 반송파 ($\cos\omega t$ 및 $\sin\omega t$)를 이용한다. Fig. 14는 QPSK 복조기 구성도이다. 수신신호는 반송파 신호를 곱하여, 필터를 통과한다. 통과된 신호를 I와 Q채널로 각각 분리하고, 복호기를 통해 2진 심벌로 변환하여 출력한다.

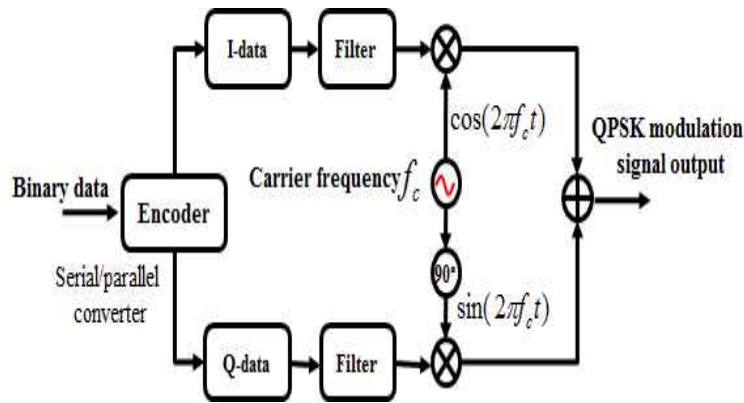


Fig. 13. Structure of QPSK modulator

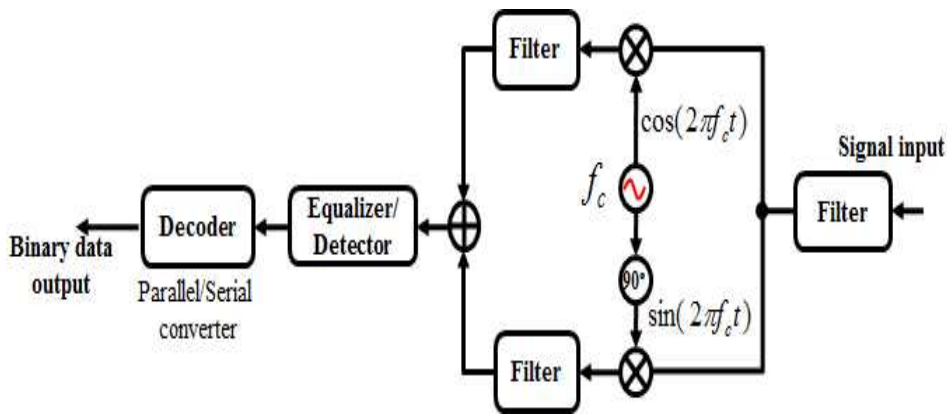


Fig. 14. Structure of QPSK demodulator

전송손실이나 배경잡음에 의해 수중 통신 음향 채널 대역은 제한적이다. 따라서 대역 효율이 좋은 QPSK 등의 동기식 위상 변조 방식이 수중 음향 통신 시스템에 적용되고 있다. 그러나 시·공간적 변동하는 다중 경로 페이딩 음향 채널에서 반송주파수의 위상정보를 추출하는 것은 어렵고 처리기법과 시스템구조의 복잡성 증가는 시스템 신뢰성 측면에서는 장애 요인이다 [10-13].

다중경로 지연확산에 의한 ISI에 대응하기 위해서는 등화기가 요구된다. 그러나 등화기를 적용하지 않는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식이 있다. Fig. 15는

OFDM 기법을 적용한 모뎀 구성도이다.

2진 정보신호는 직병렬 변환기를 이용하여 각 부반송파 신호로 분할한 후 각 부반송파를 QPSK로 변조한다. 각각의 변조된 신호는 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 거쳐 합쳐진 후 전송된다.

단일 반송파 전송방식과 달리 직교성을 갖는 다수의 부반송파를 이용하여 대역효율을 높이는 동시에 좁은 부반송파 각각의 신호대역폭은 채널 대역폭 보다 좁게 되므로 오류 없이 정보가 전송될 수 있는 기법이다. 따라서 다중경로 지연확산 보상을 위한 등화기가 불필요한 기법이다.

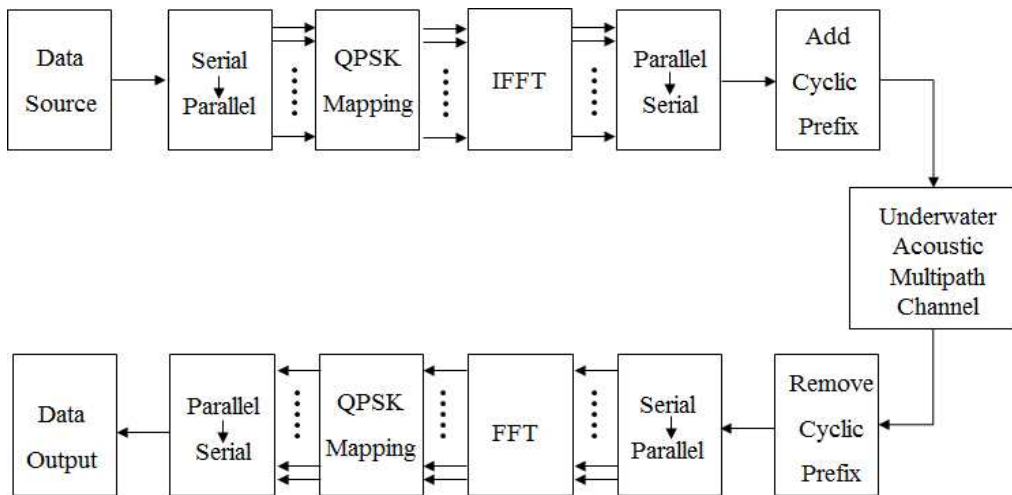


Fig. 15. Functional block diagram of OFDM

이외에도 FH(Frequency Hopping)이나 CDMA(Code Devision Multiple Access)등과 같은 확산스펙트럼 방식을 사용하여 다중경로 페이딩 채널에 대응하는 시스템 개발이 연구되고 있으나 AUV용의 실 해역 실용화는 달성되지 못하고 있다.

나. 채널 코딩

다중경로 지연확산에 의한 ISI를 없애기 위해 DFE(Decision Feedback Equalizer)나 OFDM이 적용된다. 이와 달리 채널 코딩은 잡음에 의한 오류를 제거하기 위해 정보 신호의 중복도를 높여 전송하는 기법이다. 채널 코드의 종류에는 다양한 종류가 있으나 본 연구에서는 RS 코드(Reed-Solomon Code)와 CC 코드(Convolution Code)를 적용하였다.

CC의 구조는 Fig. 16과 같다. 구속장 길이는 3이고 코드율 1/2이다. 구속장 길이는 현재 정보에 영향을 미치는 입력 정보의 비트 수를 의미하며 CC의 생성은 가산기와 시프트 레지스터를 통해 이루어진다. 출력 비트 수에 대한 입력 정보 비트 수의 비가 부호율이며, 부호율이 작으면 부호 이득이 높고 오류가 적어지나 전송해야 할 비트 수의 증가로 인해 정보 전송율이

떨어지게 된다.

RS 코드는 비 2진 순환코드로 랜덤 오류(Random Error) 뿐만 아니라 연집 오류(Burst Error)까지 정정할 수 있다. 현재 각종 디지털 시스템에서 광범위하게 사용되고 있는 채널부호화 방식이다. Fig. 17은 본 연구에서 적용한 RS 부호기의 구조이다.

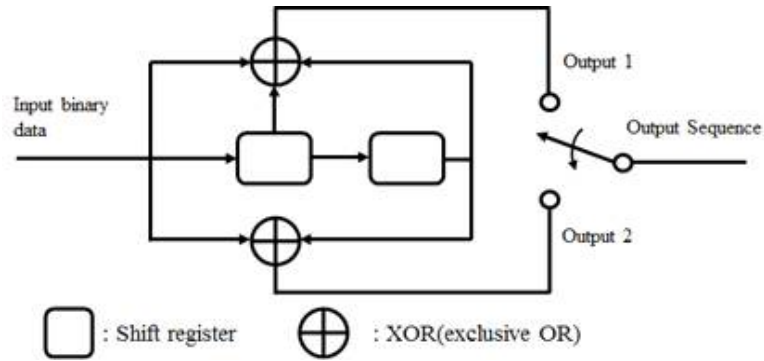


Fig. 16. Convolutional encoder (2,1, 3)

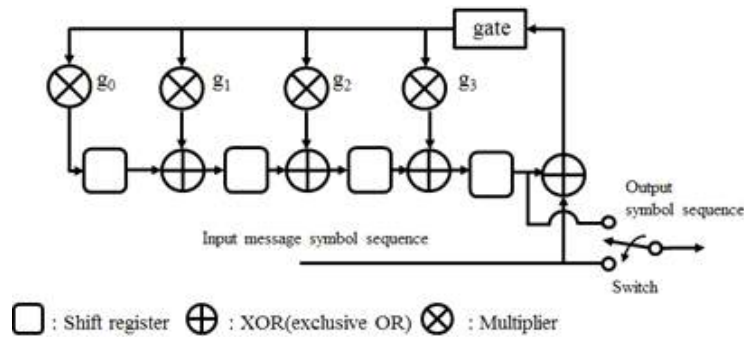


Fig. 17. Reed-Solomon encoder (7,3,2)

다. 심벌 및 반송주파수 동기

다중 경로 시변 환경에서 복조기의 출력은 송신 심벌 신호의 주기로 샘플링 되어야 하고 위상 변조방식 등의 동기식 통신 모뎀의 경우 Fig. 9를 참고하면 복조 신호 출력의 전력을 최대화하기 위해서는 수신 심벌 신호의 주파수와 위상이 추정되어야 한다. 전자를 심벌동기, 후자를 반송주파수 동기로 정의한다.

심벌 동기는 음향 채널의 시·공간적 변동성을 평가하는 지표인 채널의 상관시간 (coherence time)으로 결정된다. 동기신호 (clock signal)를 별도로 부가하여 전송할 수 있으나 이 경우 추가의 전력 및 통신 대역과 시스템의 복잡성을 요구하므로 본 연구에서는 상관시간 이내에서는 심벌 주기가 변화하지 않는다고 가정하고, 자기상관이 임펄스 특성을 갖는 LFM 신호 혹은

PN 신호를 전송 신호 앞에 부가하여 심벌 동기를 하였다.

반송주파수 동기는 수신신호 전력을 최대화하는데 필수적이다. 위상 변조방식의 수중음향 통신시스템은 수신 신호 처리 과정에서 가장 중요한 기술 중의 하나는 반송주파수의 주파수 변화 (CFO: carrier frequency offset) 혹은 위상정보를 추출하는 것이다. CFO 추정기법으로 위상고정루프 (PLL: Phase Locked Loop)등을 적용하는 다양한 기법이 있다. 본 연구에서는 CAZAC (constant amplitude zero autocorrelation) 코드를 위상 코드 (phase code) 신호로 전송신호에 삽입하여 시변 음향채널에 의한 CFO를 추정하였다[14-16]. CAZAC 코드 신호는 자기 상관 함수의 최대 피크를 제외한 주변의 자기상관 값에 의한 영향이 없어 시간 및 주파수 영역에서 동기화에 적용되며 PLL에 비해 구현이 상대적으로 간단하다.

라. 수중 음향 통신 모델 현황

천해 다중경로 채널은 시변이고 다중경로를 거쳐 수신되는 신호는 배경잡음, 흡수손실, 확산 손실 및 페이딩 등에 의해 열화 된다. 따라서 모델의 기능, 강인성, 신뢰성을 담보하기 위해서는 채널코딩 및 등화기 기술이 요구된다. 수중 음향 통신 네트워크 시스템에서는 대역 효율이 좋은 동기식 모델이 요구된다. 따라서 최근의 수중 음향 통신 모델은 대역 효율이 좋은 동기식 위상천이방식을 적용하며 QPSK, DPSK (Differential Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation)등이 있다. 다중경로 지연확산에 의한 ISI를 개선시키기 위해 위상 변조 방식과 함께 적응 빔포밍, 적응 등화기 (adaptive equalizer), 시 역전 신호처리 (time reversal signal processing)등의 기법이 적용되고 있다[14-18].

Table 7에서 Oki Elec사에서 개발한 시스템의 경우 수중 로봇과의 통신을 위해 송신기와 수신기의 거리가 60m인 근거리에서 16-QAM방식과 LMS (Least Mean Square)등화 기법을 적용하여, 500 kbps의 전송율을 갖는다. 또한 WHOI에서 개발한 시스템은 정보 전송을 목적으로 QPSK방식에 RLS (Recursive Least Square)등화 기법을 적용하여, 1 km 거리에서 5 kbps의 전송 성능을 보였다. 음향채널 환경변화 영향을 최소화하고 오류 감소를 위해 QPSK-OFDM이 연구·개발되고 있다[19,20]. Table 8은 상용화 제품이다.

Table 7을 요약하면 사용목적, 사용거리, 전송율, 강인성 및 신뢰성에 따라 다양한 음향 통신 모델이 개발되고 있고 따라서 천해 50m 해역의 AUV용 모델은 독자적으로 개발되어야 할 것이다.

Table 7. 최근 수중 음향 통신 시스템의 현황[18]

Developed by	Application	Channel	Modulation	ISI	Band	Data rate
Oki Elec Ind. Comp.	Robot comm.	60m, shallow	16-QAM	LE(LMS)	1MHz	500kbps
JAMSTEC	Image Tx	vertical (6500m)	4-DPSK	LE(LMS)	20kHz	16kbps
IFREMER/ ORCA	Image and data Tx	vertical (2000m)	2-DPSK	none	53kHz	19.2kbps
ENST-Br./ IFREMER	Digital speech Tx	test pool	4-DPSK	DFE(LMS)	not Rep.	6kbps
Micrilor	telemetry	medium(1km), shallow	2-DPSK	DS-SS	30kHz/ 100kHz	600bps
WHOI/ Datasonics	telemetry	vertical and horizontal	16*4 FSK	none	15kHz	1.2kbps
WHOI	telemetry	under-ice shallow	QPSK	DFE(RLS)	15kHz	5kbps

Table 8. Foreign commercialized products of underwater acoustic communication modem

Developed by	Modulation	Range	Frequency Band	Data rate
CDL. Inc	DS-SS/OFDM	3km	16~30kHz	100~480 bit/sec
University of California, Berkeley's System	frequency hopping	300~1000m	5-20 kHz	5~150 bit/sec
Teledyne Benthos	MFSK and PSK	2-6km	16-21 kHz	140-15,360 bit/sec
WHOI	5 PSK	1500m	3 to 30 kHz	80-5400 bit/sec

3. 수중 음향 통신 채널 요소

Fig. 18과 같이 시공간적으로 변화하는 수중 음향 통신 채널을 통해 모선과 AUV 간에 정보 통신을 하기 위해서는 음향 통신 모뎀이 필요하다. 전파에 비해 음파의 전파 속도가 낮아 전파 통신에 비해 아주 낮은 전송율을 갖는다. 다중경로, 전송손실, 배경잡음, 도플러 효과 및 해면 변동 등에 의해 모뎀의 성능이 결정된다. 시변 다중경로는 채널대역과 페이딩, 전송손실은 반송주파수 및 통신거리, 배경잡음은 송신전력 및 통신거리, 도플러 효과는 위상 및 주파수를 결정한다.

수중 다중경로 채널의 지연확산, 경계면 변동에 의한 채널의 시변성 및 도플러 효과 등에 의한 수중 음향 통신 시스템의 ISI 및 비트 오류율(BER: Bit Error Rate)에 다양한 연구가 발표되었다. 이들 중 해양 환경 중속 음향 통신 채널 특성에 대한 연구로는 다중경로 지연 확산

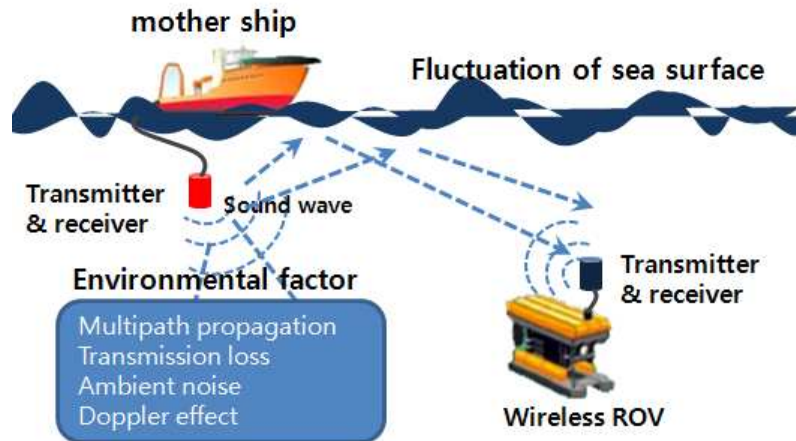


Fig. 18. Environmental parameters of underwater acoustic communication

모델링 및 페이딩의 통계적 특성 등에 대한 연구가 있고, 음향 통신 모델의 설계에 대한 연구로는 등화기, 대역 확산 기술 및 채널 코딩 등이 있다. 그러나 음향 통신 채널 특성과 설계된 모델의 성능을 연계한 연구는 모의실험이 대부분이며 실제 해양의 음향 통신 채널을 기반으로 한 모델의 설계 및 성능 평가에 대한 연구는 상대적으로 많지 않다.

본 연구에서 대상으로 해양 환경은 수심 50m이내의 천해로 해양 환경의 시변성에 송수신기 간의 거리가 변화하는 음향 통신 채널이다. 본 절에서는 음향 채널 환경과 음향 통신 모델 성능과의 관계를 문헌 자료를 기반으로 제시한다.

가. 전송손실 및 배경잡음

전송손실은 거리 증가에 따른 송신 신호 에너지 감소를 결정하며 기하학적 확산손실과 흡수손실로 구성된다. 확산손실(SL: Spreading Loss)은 해면이나 해저의 경계가 없다고 가정하면 전파거리 증가에 따라 증가하며 식(5)과 같이 주어진다[17].

$$SL = 20\log r \tag{5}$$

여기서, r 은 전파 거리[m]이다.

흡수손실은 음파의 전파 중에 음파에너지가 수중에서 열에너지로 빼앗긴 손실을 말하고 고주파수 일수록 흡수손실이 크다. 전파 거리에 따른 흡수손실(AL: Absorption Loss)은 식(6)로 주어진다.

$$AL = \alpha r \tag{6}$$

여기서, α 는 주파수에 따른 계수로 1m당 흡수 손실이며 고주파수 일수록 큰 값을 갖는다. 따라서 전송 손실(TL: Transmission Loss)은 식(7)으로 주어진다.

$$TL = 20 \log r + \alpha r \tag{7}$$

배경잡음(NL: Noise Level)은 수신기 신호의 신호 대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)를 결정한다. 송신기의 송신 신호(SL: Source Level)와 수신기의 수신 신호(RL: Receiver Level)와의 관계 및 수신기의 SNR은 각각 식(8)와 (9)로 주어진다.

$$RL = SL - TL \tag{8}$$

$$SNR = RL - NL \tag{9}$$

외해의 배경잡음은 통행 선박과 해상 상태에 좌우되고 천해에서는 이와 더불어 해양 생물 및 육상의 산업시설에 의해 크기가 결정된다[17]. 주파수 증가에 따라 배경잡음은 낮아진다.

Fig. 19는 주파수에 따른 상대적인 SNR의 특성으로 저주파수 영역에서는 배경잡음, 고주파수에서는 흡수손실 영향이 상대적으로 크다.

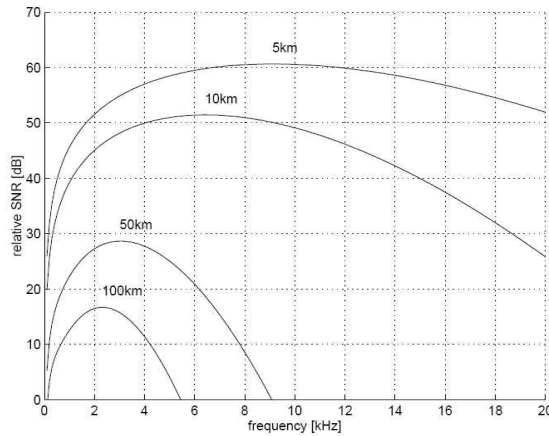


Fig. 19. Frequency and range dependent relative SNR[17]

Table 9는 전송손실과 배경잡음을 고려한 원거리, 중거리, 근거리 수중 음향 통신의 분류이다. 원거리 수중 음향 통신은 흡수손실이 낮은 10 Hz ~ 500 Hz의 저주파수 대역으로 20 km ~ 2000 km의 거리까지 통신이 가능하지만, 데이터 전송률 1 bps이하로 낮다. 높은 전송 출력을 요구하게 되어 송신용 저주파 음향변환기의 제작기술이 해결되어야 한다.

중거리시스템은 수평거리 1 km~20 km로 천해에서 운용되며, 배경잡음이 낮은 수 kHz ~ 100 kHz의 대역에서 전송된다. 수중 정보 전송에 가장 많이 사용하는 대역으로 저주파나 고주파에 비해 다중경로 영향을 제거하기 위한 등화기, 적응 신호처리, 채널 코딩 및 변조기법 등의 시스템 최적화 기술이 상대적으로 많이 요구되는 대역이다. 근거리시스템은 수평거리 100 m내에서 사용되는 시스템으로 100 kHz ~ 1 MHz 대역의 주파수를 사용하여 고지향성 통신으로 이미지 등의 전송에 사용된다. 본 연구의 AUV용 모뎀은 중거리 시스템으로 분류된다.

Table 9. Classification of underwater acoustic communication systems and applications[17]

system	Range	Frequency	Rate	Application
Long-range system	20 ~ 2000 km	10 ~ 500 Hz	below bps	High power acoustic tomography
Medium-range system	1 ~ 20 km	10 ~100 kHz	Kbps	Data transmission, Equipment control
Short-range system	1 ~ 100 m	100 ~1 MHz	Kbps~Mbps	underwater network, Image transmission

나. 다중경로 지연 확산과 채널 대역폭

다중 경로에 의한 지연 확산 및 경계면 변동에 의한 페이딩은 채널 대역폭, 진폭 및 위상변화를 야기하여 ISI나 CFO가 발생하여 모뎀의 전송 성능이 저하된다.

Fig. 20(a)-20(d)는 다중 경로 채널의 환경 요소 및 수신 신호 특성의 예를 보인다. 송신기의 송신신호는 해면과 해저 경계면 반사와 매질 음속 구조에 의해 고유 경로를 따라 수신기에 수신된다. Fig. 20(a)는 송수신기 거리와 수심 및 저질 등의 환경요소를 보이고 Fig. 20(b)는 실험 해역의 CTD자료로 구한 음속구조이며 Fig. 20(c)는 음속 구조를 이용하여 구한 수신기 도달 고유 경로이다. Fig. 20(d)와 20(e)는 각각 LFM 펄스 신호로 구한 지연 확산 및 MIP(Multipath Intensity Profile)이다. 본 연구의 실험 자료는 이와 같은 과정으로 분석되었다.

Fig. 20의 다중 경로 채널에서 채널의 시변 임펄스 응답 $h_c(\tau;t)$ 는 식 (10)으로 주어진다.

$$h_c(\tau;t) = \sum_{i=0}^N \alpha_i(t) e^{-j2\pi f_c \tau_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (10)$$

여기서 $\alpha_i(t)$ 와 $\tau_i(t)$ 는 각각 i 번째 다중경로 신호의 크기 및 지연 시간으로 전자는 시변 전송손실에 좌우된다. 특히 해면과 해저 반사파는 경계면의 거칠기, 송신 주파수, 입사각에 따라 크기 변동이 일어나고 경계면이 시변이거나 송수신기가 이동하는 경우 지연시간 변동이 일어

난다. Fig. 20(c)는 5개의 고유 경로를 보이거나 Fig. 20(d)에서 보는 바와 같이 직접파와 해면 반사파만 측정된다.

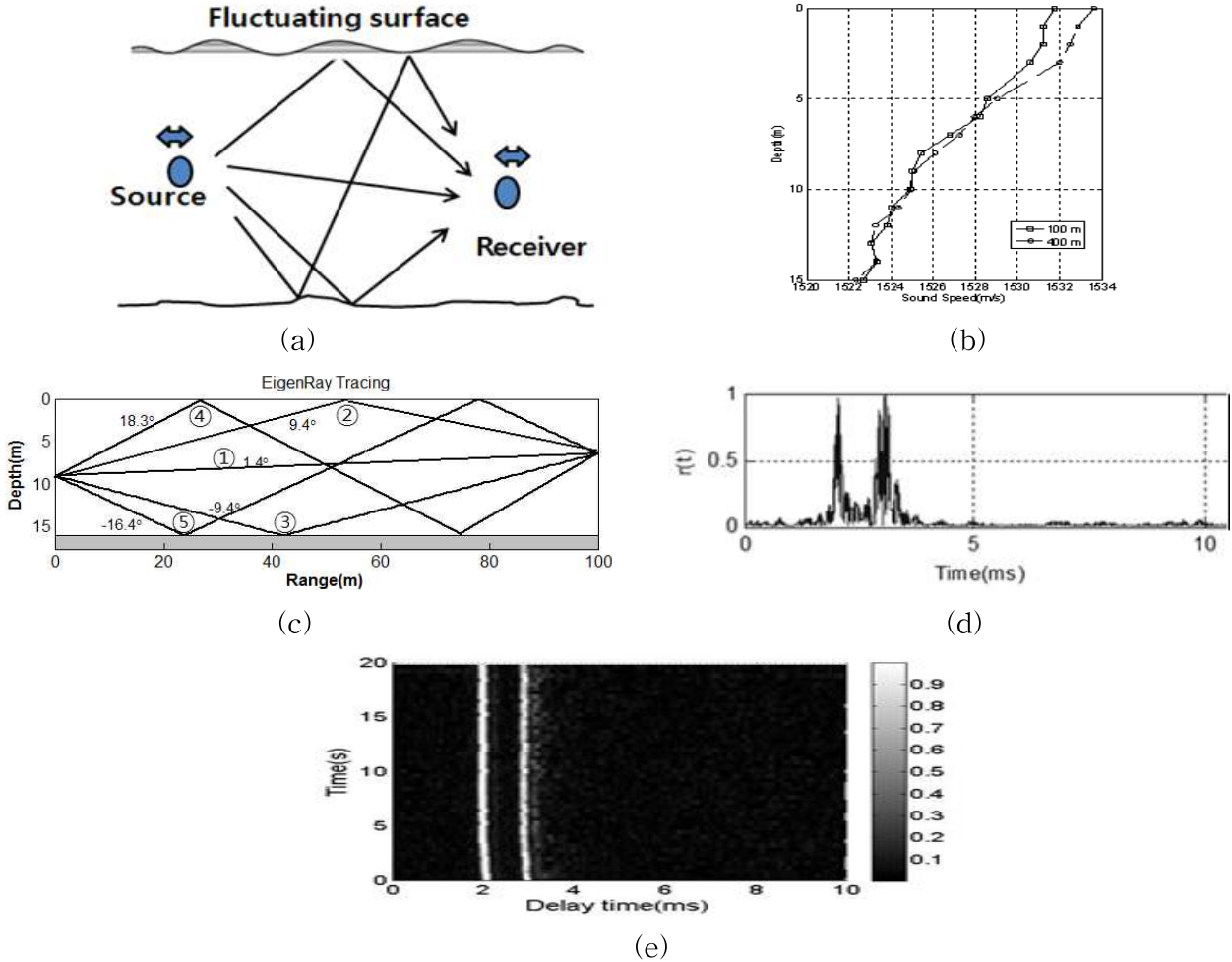


Fig. 20. Multipath characterization in underwater acoustic communication channel, (a) environmental parameters, (b) sound velocity profile, (c) eigen rays, (d) multipath delay spread (e) MIP

천해의 경우는 일반적으로 수온 약층이 없고 깊이에 따른 수온의 변화가 격심하지 않아 매질내의 굴절 경로는 수신되지 않는다. 아울러 연안의 퇴적 지반은 모래 혹은 펄로 구성되어 있어 송수신기가 근거리인 경우 입사각이 큰 해저 반사파는 수신되지 않는다. 완전 반사조건을 만족하는 원거리에서는 해저 반사파가 수신될 가능성이 있다.

음향 채널이 시 불변인 경우, Fig. 20(d)의 지연 확산으로부터 지연확산 유효치 τ_{rms} 는 식 (11)과 같다[21,22].

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (11)$$

여기서, $\overline{\tau}$ 와 $\overline{\tau^2}$ 는 평균 초과 지연 (mean excess delay) 과 평균 제곱 지연 (mean square delay)으로 식(12)과 같다.

$$\overline{\tau} = \frac{\sum_i P(\tau_i)\tau_i}{\sum_i P(\tau_i)}, \quad \overline{\tau^2} = \frac{\sum_i P(\tau_i)\tau_i^2}{\sum_i P(\tau_i)} \quad (12)$$

여기서, $P(\tau_i)$ 는 i 차 경로의 전력밀도이다.

지연확산 유효치 τ_{rms} 와 채널 대역폭 B_c 의 관계는 식(13)으로 정의된다[21,22].

$$B_c \approx \frac{1}{5\tau_{rms}} \quad (13)$$

채널 대역폭은 Fig. 20(e)의 다중경로 지연확산 신호 스펙트럼의 -3dB 대역폭으로도 구한다. Fig. 21과 같이 채널 대역폭 B_c 가 전송 신호의 대역폭 B_s 보다 넓다면, 송신 신호의 모든 주파수 성분은 ISI가 없어 왜곡 없이 수신된다. 반대로 채널 대역폭 B_c 가 전송 신호의 대역폭 B_s 보다 좁다면, 이로 인한 ISI가 발생된다. Fig. 22는 채널 대역폭이 신호대역폭 보다 작은 경우 송신 신호, 채널 응답 및 수신신호의 주파수 영역 관계를 보인다. 이와 같은 채널은 주파수 선택적 채널 (frequency selective channel)로 정의된다.

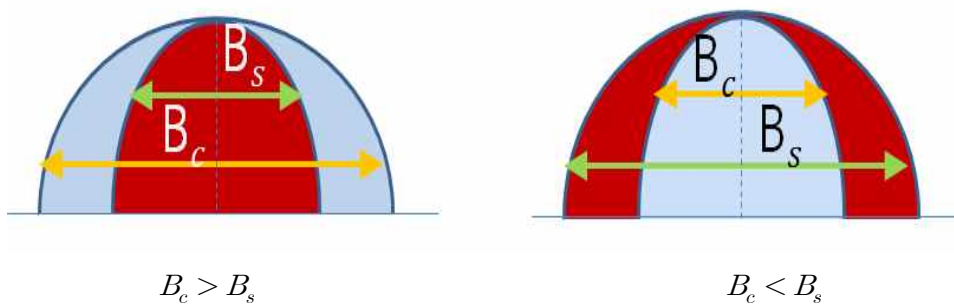


Fig. 21. Relationship of channel and signal bandwidth

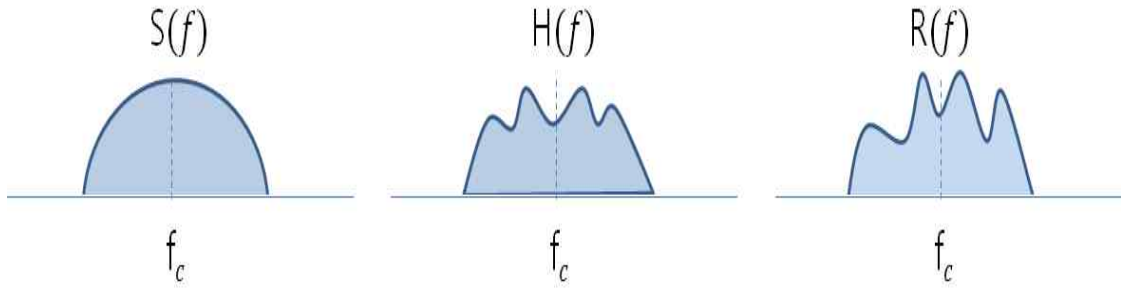


Fig. 22. Signal distortion in frequency selective channel

다중경로 수중 음향 채널을 송신기와 수신기의 상대적인 위치에 따라 Fig. 23 및 Fig. 24의 예와 같이 수직 수평채널로 구분한다. 각각을 주파수 선택적인 채널 특성을 구분한 것이다.

즉, Fig. 23의 수직채널의 경우는 경계면과의 입사각이 큰 다중경로 파는 직접파에 비해 세기가 작고 지연확산이 짧아 채널 대역폭이 넓게 되어 주파수 비 선택적인 채널, Fig. 24의 수평채널의 경우 경계면과의 입사각이 작아 수직채널에 비해 경계면 반사파의 세기가 상대적으로 크고 지연확산이 길어 채널 대역폭이 좁게 되어 주파수 선택적인 채널이 된다.

예를 들면 모선과 AUV의 통신채널이 수직 직하 방향에 위치한 수직 방향 수중음향 통신 채널로 해석할 경우 해면과 해저의 반사파의 영향을 무시할 수 있다. 또한 모선과 AUV간의 통신채널이 수평 방향에 위치한 수평방향 수중음향 통신 채널로 해석할 경우 천해에 해당하며 입사각, 송신 주파수, 해저/해면 거칠기 및 경계층의 음향임피던스의 함수로 채널이 해석하며 지연시간 유효치로 경계면 반사파의 영향을 고려해야 한다.

결론적으로 다중경로에 의한 채널 대역폭은 심벌 간 간섭의 정도를 결정하고 모델의 성능을 결정한다. 또한 위상동기방식의 통신에서는 채널 대역폭과 더불어 송·수신기의 운동과 경계면 변동에 의해 발생하는 위상 변화가 CFO를 야기하여 전송성능을 저하시킨다.

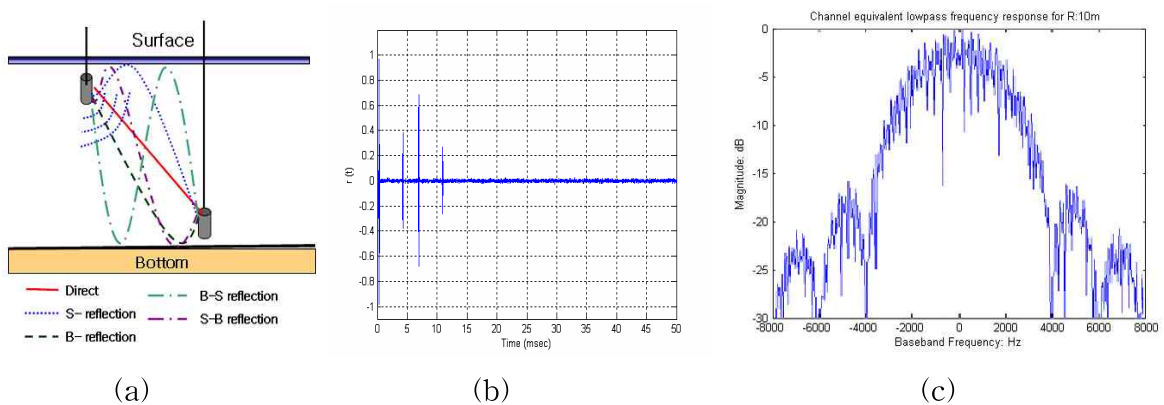


Fig. 23. Multipath delay spread in vertical channel (source-to-receiver range: 10m); (a) structure of vertical channel, (b) channel impulse response, (c) frequency response of pulse signal

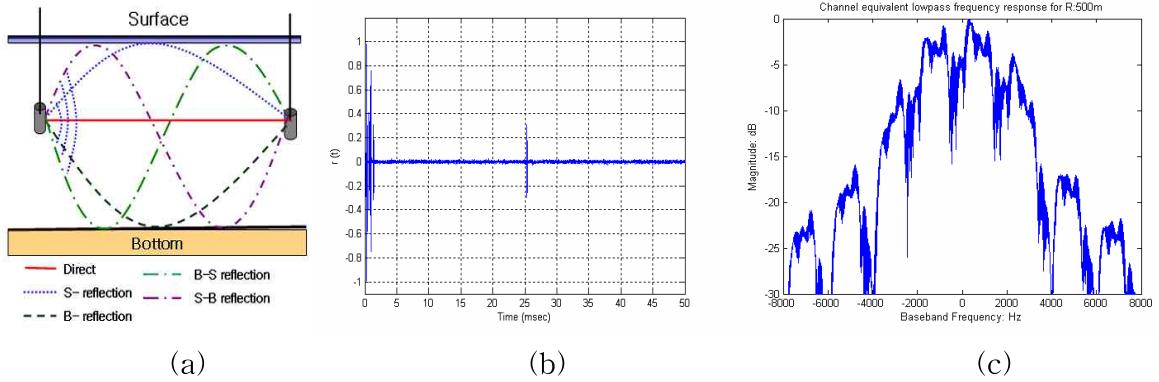


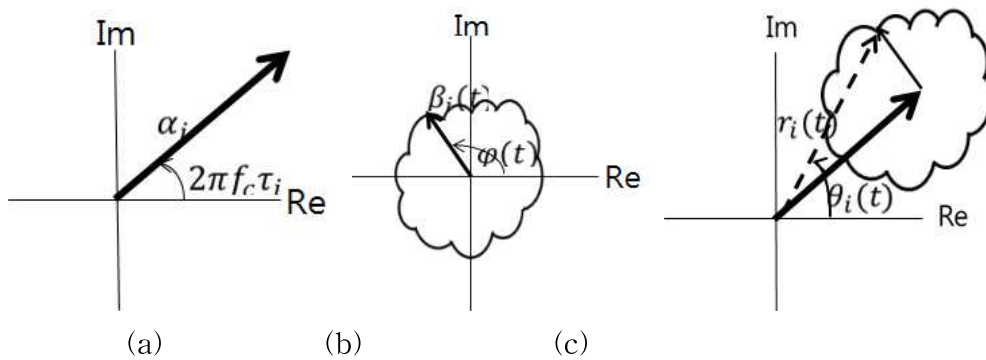
Fig. 23. Multipath delay spread in horizontal channel (source-to-receiver range: 500m); (a) structure of horizontal channel, (b) channel impulse response, (c) frequency response of pulse signal

다. 경계면 변동과 페이딩

Fig. 25에서 보이는 바와 같이 수신기에 도달하는 경로가 시변 해면에서 반사하는 경우, 해면 파도에 의해 산란이 일어나고 해면 반사파의 크기는 산란 변화에 따라 변화한다. 파고가 송신 신호의 파장에 비해 상대적으로 큰 경우, 수신기에 도달하는 반사파의 크기는 해면 거칠기의 시변에 따라 변화한다.

식(10)에서 각 개별 경로를 시 불변 성분과 시변 성분으로 분리하면 식 (14)로 주어진다.

$$h_i(t) = \alpha_i e^{j2\pi f_c \tau_i} + \beta_i(t) e^{j\phi(t)} = r_i(t) e^{j\theta_i(t)} \quad (14)$$



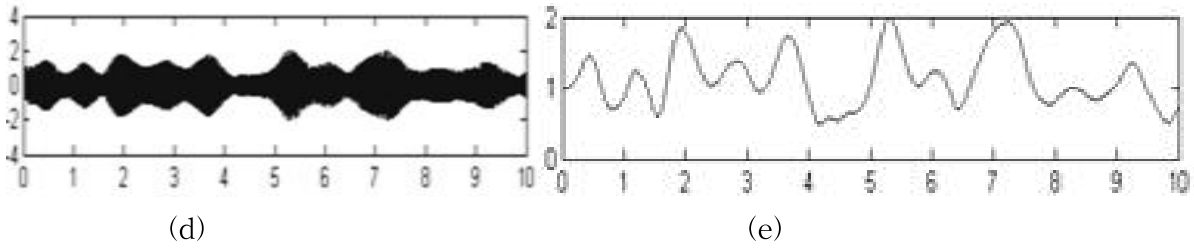


Fig. 25. Phasor analysis of time variant sea surface reflection path; (a) phasor of time invariant coherent specular component, (b) phasor of time variant incoherent scattering component, (c) phasor of time variant receiving signal, (d) time variant receiving signal waveform, (e) receiving signal fading ($|r_i(t)|$: envelope)

식 (14)를 페이저(Phasor)로 표현하면 Fig. 그림 25(a)~25(c)와 같다.

해면 거칠기가 증가하면 시불변 성분은 감소하게 되어 페이딩은 Rayleigh 분포 특성을 보이며 해면 거칠기가 감소하면 Rice 분포 특성을 보이게 된다.

시 불변 및 시변 성분의 상대적 크기를 결정하는 해면 거칠기는 Rayleigh 거칠기 R_{rgh} 로 식 (15)로 주어진다.

$$R_{rgh} = kh_s \sin(\theta) \quad (15)$$

여기서, k, h_s, θ 는 각각 파수, 해면의 유효파고 및 해면 입사각이다. 시 불변 성분의 크기 α_i 는 식 (16)로 주어진다.

$$\alpha_i = -\exp[-2(kh_s \sin\theta)^2] = -\exp[2R_{rgh}^2] \quad (16)$$

저주파수, 거울 해면 및 작은 입사각 조건에서 α_i 는 -1로 완전 반사 경계 조건이 된다.

Fig. 26은 경계면 변동과 다음절에서 기술하는 다중경로 간섭에 의한 채널 페이딩이 FDM(Frequency Division Multiplexing)과 OFDM에 미치는 영향을 주파수 영역에서 보인 것이다.

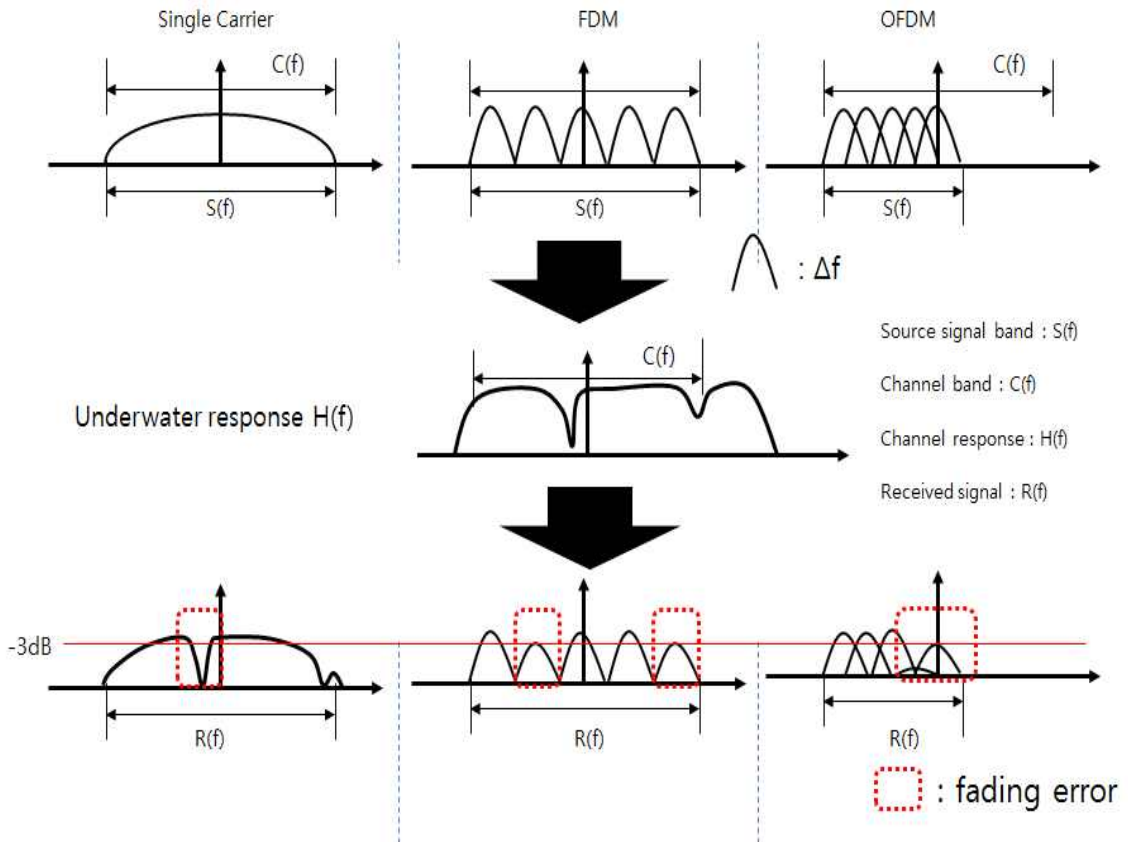


Fig. 26. Effects of multipath fading in FDM and OFDM

라. 반송주파수에 따른 다중경로 간섭

2개의 시 불변 다중경로를 수신한다고 가정하면 수신 신호의 페이저 h 는 각 경로 페이저의 합으로 식 (17)로 주어진다.

$$h = h_l + h_m = \alpha_l e^{j2\pi f_c \tau_l} + \alpha_m e^{j2\pi f_c \tau_m} \Rightarrow \alpha_l + \alpha_m e^{j2\pi f_c (\tau_m - \tau_l)} = \alpha_l + \alpha_m e^{j\theta} \quad (17)$$

$$\tau_m - \tau_l = (R_m - R_l)/c \quad (18)$$

여기서 R_l 과 R_m 은 각 다중 경로는 전파거리이다. 음향 모델의 주파수는 수 kHz 이상으로 고 주파수이므로 작은 시간차에서도 위상차 θ 는 크게 된다. 따라서 수신신호의 크기는 보강 간섭의 경우 $(\alpha_l + \alpha_m)$, 상쇄 간섭의 경우 $(\alpha_l - \alpha_m)$ 으로 된다. 따라서 그림 26과 같이 모델의 반송 주파수에 따라 수신신호의 크기가 달라진다. 따라서 주파수 비 선택적인 채널에서도 반송 주파수에 따라 신호 대 잡음비가 달라진다.

마. 상관 시간

상관시간(Coherence Time)은 채널의 임펄스 응답이 시간에 따라 변하는 특성이다. 다중경로 음향 채널의 경계면의 변동, 송수신기 상대거리 변화 등에 의해 특성이 결정되며 달리 표현하면 도플러 확산에 의한 신호의 변동율을 나타낸다. 상관시간 $\rho(t, \tau)$ 는 지연시간 τ 를 갖는 2개 신호의 상호 상관계수로 정의되고 식(19)으로 주어진다.

$$\rho(t, \tau) = \left\langle \frac{[p^*(t) \otimes p(t + \tau)]_{\max}}{\sqrt{[p^*(t) \otimes p(t)]_{\max} [p^*(t + \tau) \otimes p(t + \tau)]_{\max}}} \right\rangle \quad (19)$$

여기서 $[p^*(t) \otimes p(t)]_{\max}$ 는 2개 신호의 상호상관 최대치를 뜻하고 \otimes 는 컨벌류션을 뜻한다. 상관 시간과 최대 도플러 천이의 관계는 식(20)과 같다[22].

$$T_c = \frac{1}{B_D} \quad (20)$$

여기서, T_c 는 상관시간 $\rho(t, \tau)$ 가 기준 값으로 떨어지는 시간이며 B_D 는 최대 도플러 천이 주파수이다. 심벌 주기가 상관 시간보다 짧게 설정되어 전송되어야 오류가 없는 전송이 가능하다. 이러한 조건에서 송신되는 신호라 하더라도 QPSK와 같은 동기식 통신에서는 Fig. 14에서 보는 바와 같이 수신 측에서 반송주파수 및 위상 변화가 정확히 추정되어야만 수신 측의 출력을 최대화할 수 있다. 위상 고정루프(PLL)나 지연 고정루프(DLL)를 이용하여 송신 신호의 위상변화 및 CFO의 추정이 이루어지고 있다.

4. 음향 통신 채널 매개변수와 통신 성능 평가

가. 채널 대역폭과 전송신호의 전송률에 따른 ISI 오류

Fig. 27는 수조의 수중 음향 채널의 지연확산 종속 채널 대역폭이 QPSK 방식의 ISI 오류에 미치는 영향을 해석하기 위한 수조(2 x 1.5 x 1m) 실험 구성도이다. 지연 확산 측정을 위한 송신신호는 LFM (Liner Frequency Modulation) 신호이며, 주파수는 13 ~ 22 kHz, 주기는 0.5 sec로 총 200회를 송신하여 분석하였다. 수심은 0.7 m, 송신기 (ITC-1001)와 수신기 (B&K 8106)의 수심은 각각 0.3 m, 0.4 m이며, 거리는 1m이다.

지연확산은 Fig. 28과 같으며, -3dB 채널 대역폭은 약 95 Hz이다. 따라서 수중 음향 통신 채널에서 전송할 수 있는 최대 전송률은 약 200 bps 이하로 제한된다.

Table 10은 수조에서 QPSK의 전송률에 따른 오류 특성이다. 신호 대역폭이 채널 대역폭 이하를 만족하는 200 bps의 전송율에서는 오류가 발생하지 않고 신호대역폭이 상대적으로 큰 높은 전송율에서는 ISI에 의한 오류가 증가함을 보인다.

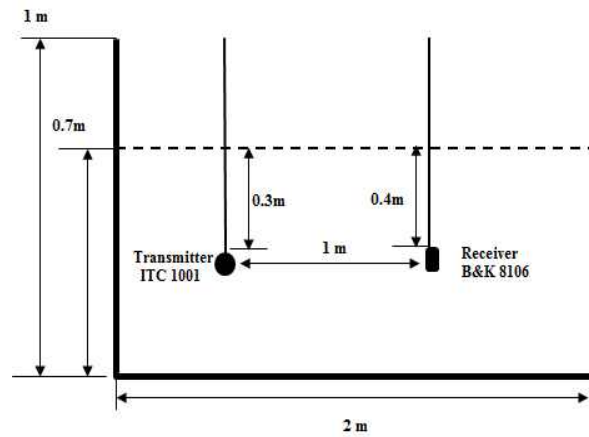


Fig. 27. Water tank experimental configuration for ISI on delay spread and transmission rate

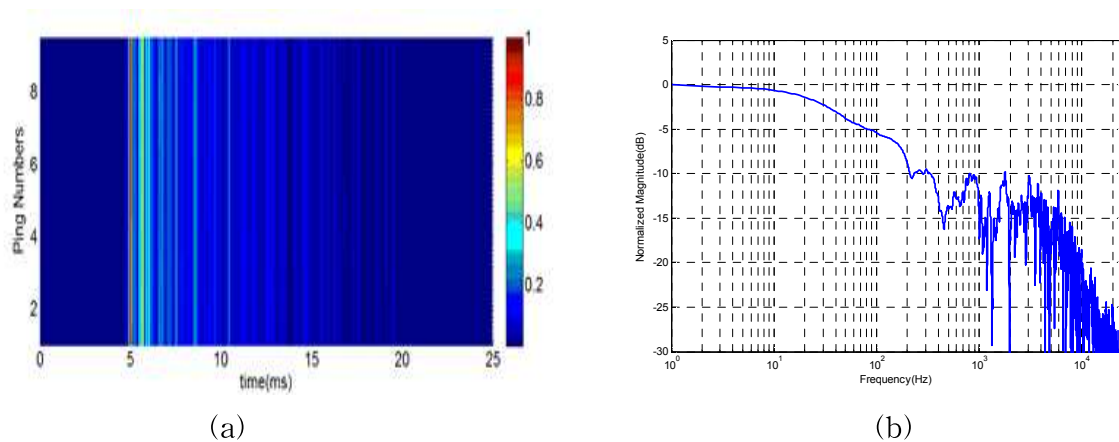


Fig. 28. Delay spread and channel bandwidth characteristics (a) delay spread, (b) channel bandwidth characteristics

Table 10. BER of QPSK on transmission rate

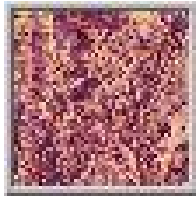
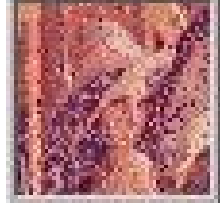


			
2000bps, 0.2967	1000bps, 0.0627	400bps, 0.0011	200bps, 0.0000

Fig. 29는 칠천도 연안 수중 음향 채널의 지연확산(채널 대역폭)이 4FSK 방식의 ISI 오류에 미치는 영향을 해석하기 위한 실험 구성도이다. 지연 확산 측정을 위한 송신 신호는 LFM

10ms 신호이며, 주파수는 12 ~ 18 kHz, 주기는 1 sec로 총 200회를 송신하여 분석하였다. 수심은 약 16 m이고, 송신기와 수신기의 수심은 각각 7 m, 10 m이며, 송수신기 수평거리리는 100m와 800m로 하였다.

지연확산 및 채널 대역 특성은 Fig. 30과 같으며 100m와 800m의 -3dB 채널 대역폭은 각각 약 70Hz와 150Hz이다. 4FSK의 신호 대역폭은 전송율(bps)의 약 1/4이므로 100m와 800m에서 오류 없이 전송할 수 있는 최대 전송율은 각각 약 280bps와 600bps이다.

Table 11은 4FSK의 전송률에 따른 오류 특성이다. 신호 대역폭이 낮을수록 오류가 적다. 페이딩의 추가적인 영향으로 정확히 일치하지는 않는다.

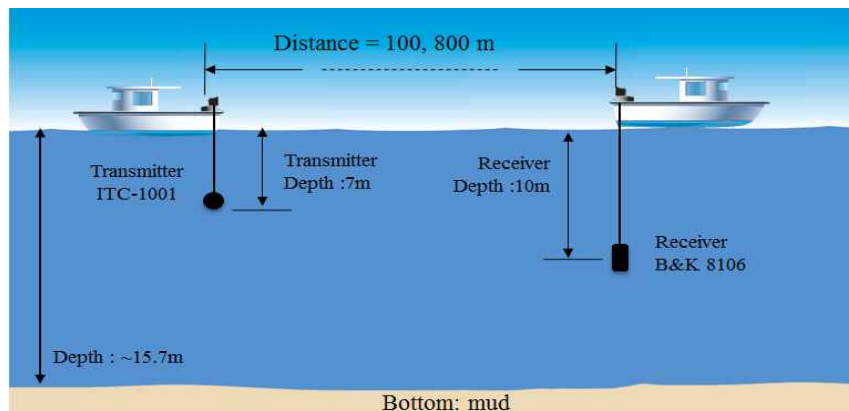


Fig. 29. Chilchon island experimental configuration for ISI on delay spread and transmission rate

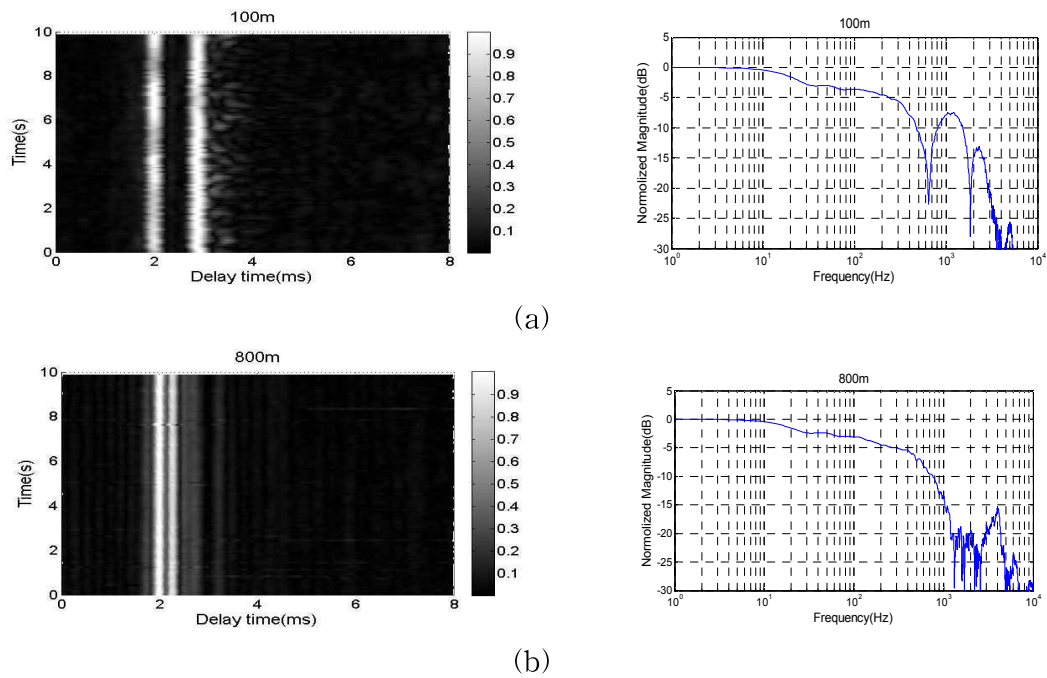







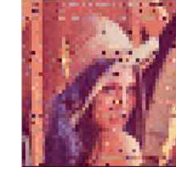


Fig. 30. Dealy spread and channel bandwidth characteristics, (a) 100 m, (b) 800 m.

Table 11. Received images and BERs on range and transmission rate.

	200 bps	400 bps	800 bps	1600 bps
100 m				
BER	0.007	0.007	0.027	0.043
800 m				
BER	0	0	0.021	0.029

나. 다중경로 간섭과 반송주파수에 따른 오류

(1) 수조실험

Fig. 31은 다중경로 간섭과 반송주파수에 따른 오류를 해석하기 위한 수조 실험 구성도이다. 송·수신기의 수심은 각각 0.2m로 하고 거리를 0.4m와 0.8m로 하였다. 변조방식은 QPSK이고 전송률은 100 sps(200bps)이다. Fig. 28에서 보는바와 같이 채널 대역폭은 약 100Hz이므로 주파수 비 선택적인 채널이다.

Fig. 32는 각각의 거리에서 LFM 신호를 이용하여 구한 다중경로 간섭 스펙트럼이다. 각 Fig.에서 반송주파수로 선택한 주파수는 0.4m거리에서 13 kHz와 16 kHz, 0.8m 거리에서 16 kHz와 19 kHz이다.

Table 12는 QPSK의 반송주파수 선택에 따른 비트오류를 보인다. 송수신기 거리 0.4m일 때 반송파 주파수 13 kHz와 16 kHz의 오류율은 각각 0과 0.38이고 거리 0.8m 일 때 반송주파수 16 kHz와 19 kHz의 오류율은 각각 0과 0.37이다.

결론적으로 주파수 비 선택적인 채널에서도 오류는 반송주파수에 따라 변화한다. 반송주파수가 다중경로에 의한 상쇄 간섭 주파수인 경우 오류가 증가한다. 이러한 오류 특성은 거리에 따라서도 다르다.

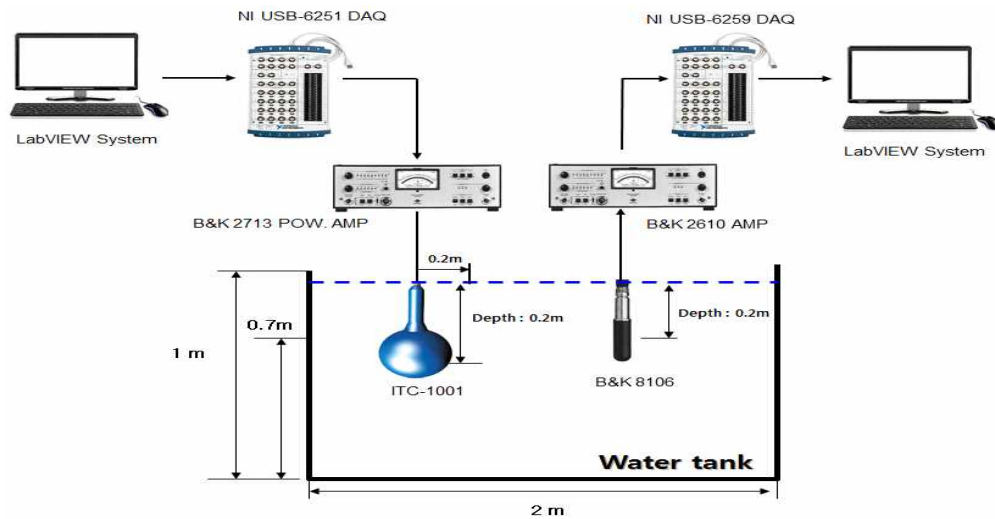
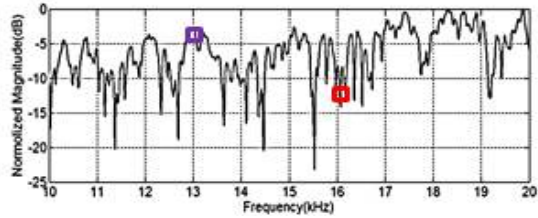
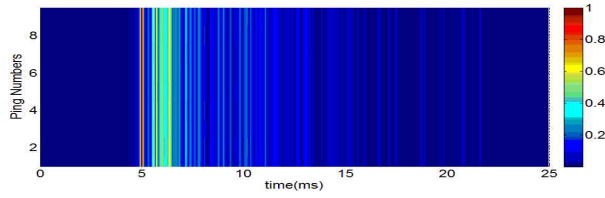
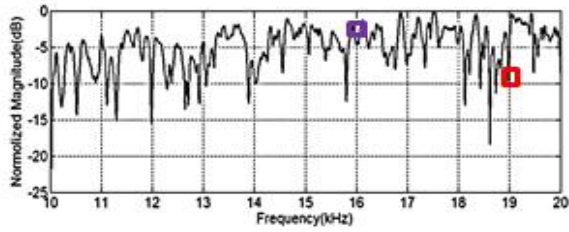
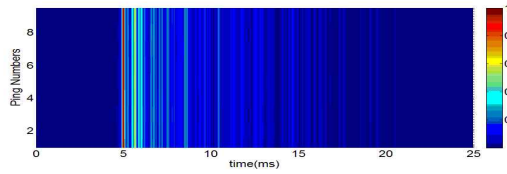


Fig. 31. Water tank experimental configuration for BER on delay spread and multipath interference






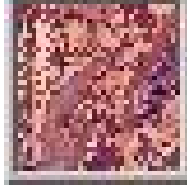
(a)



(b)

Fig. 32. Delay spreads and interference spectra, (a) 0.4m, (c)0.8m

Table 12. Range and carrier frequency dependency of BER

Range(m)	0.4m	0.8m
Freq.	13kHz	16kHz
Image		
BER	0	0
Freq.	16kHz	19kHz
Image		
BER	0.38	0.37

(2) 해상실험

실험구성도 및 실험 파라메타는 각각 Fig. 33과 Table 13과 같다. 송·수신기의 거리는 50 m, 100 m, 400 m이며, 송신기의 수심은 7 m, 수신기의 수심은 10 m이다. 수심은 약 16 m이며, 송신기는 ITC 1001, 수신기는 B&K 8106을 사용하였다. 변조방식은 4CH-4FSK이며, 해저 저질은 진흙이다. 해면의 파고 상태는 Fig. 34와 같이 직경 20cm 부이를 기준으로 측정하였고 0.5 m미만이였다.

Table 13. Sea experimental parameters

Modulation	4CH-4FSK
Channel number	4
Depth(m)	~ 16
Tx and Rx depth(m)	7, 10
Tx-to-Rx Distance(m)	50, 100, 400
Bottom	Mud
Carrier freq.(kHz)	13 ~ 23
Data rate(bps)	800
Channel guard band	symbol rate
Information data (bit)	20,000

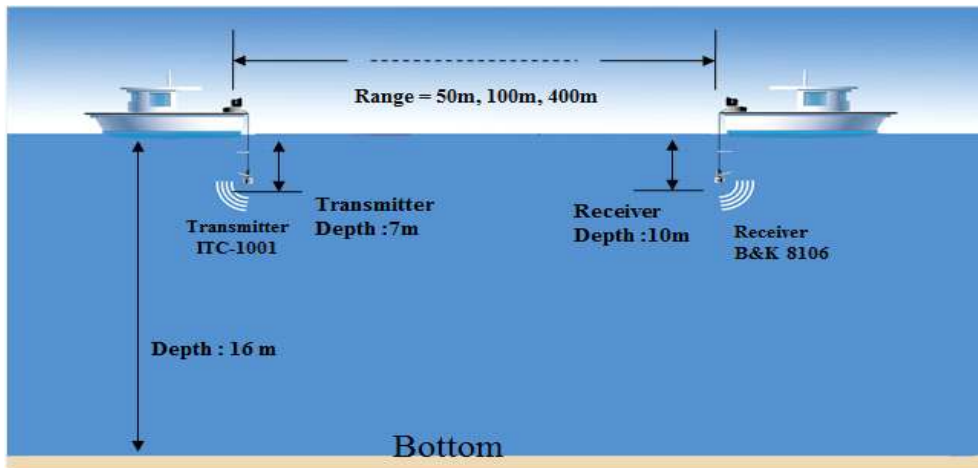


Fig. 33. Chilchon island experimental configuration for BER on delay spread and multipath interference

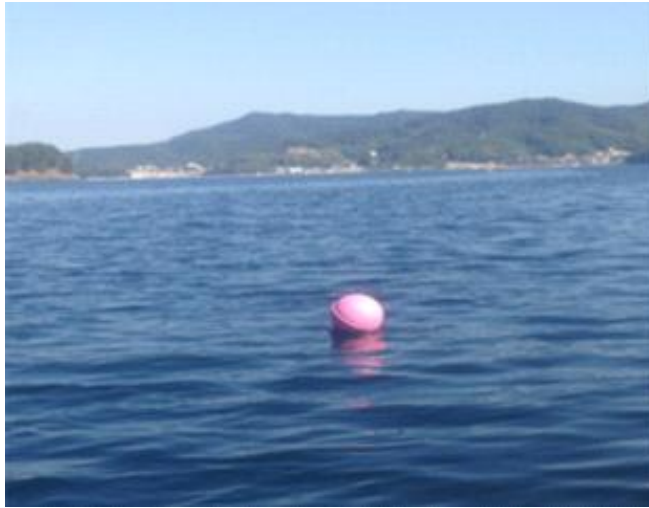


Fig. 34. Observed sea surface roughness

Table 14는 4CH-4FSK의 반송주파수이다. 전송률에 따른 대역폭을 각 반송주파수에 할당하고 채널과 채널 사이에 가드 밴드를 전송률 만큼 설정하여 채널 간 간섭을 제거하였다. 총 대역폭은 14 kHz ~ 15.8 kHz이다. Fig. 35는 4CH의 각 채널에 할당된 이미지 부분이다. 시변 영향을 최소화하기 위해 프레임 길이는 1초이다. 나. 에서 기술한 바와 같이 채널 응답, 프레임 동기 및 간섭 패턴, 주파수 선택적 페이딩은 LFM 신호로 추정되었다. Fig. 36은 해상실험 지역의 SVP (sound velocity profile)로 수면의 음속은 1533 m/s이며, 수심 16 m지점의 음속은 1522 m/s이다. Fig. 37은 SVP를 이용한 거리 100 m, 400 m에 대한 다중 경로 고유 경로이다.

Table 14. Orthogonal carrier frequency groups of 4CH-4FSK

Frequency (kHz)		100/800 (sps/bps)
CH1	F1	14.0
	F2	14.1
	F3	14.2
	F4	14.3
CH2	F1	14.5
	F2	14.6
	F3	14.7
	F4	14.8
CH3	F1	15.0
	F2	15.1
	F3	15.2
	F4	15.3
CH4	F1	15.5
	F2	15.6
	F3	15.7
	F4	15.8



Fig. 35. Allocated image segment of each channel

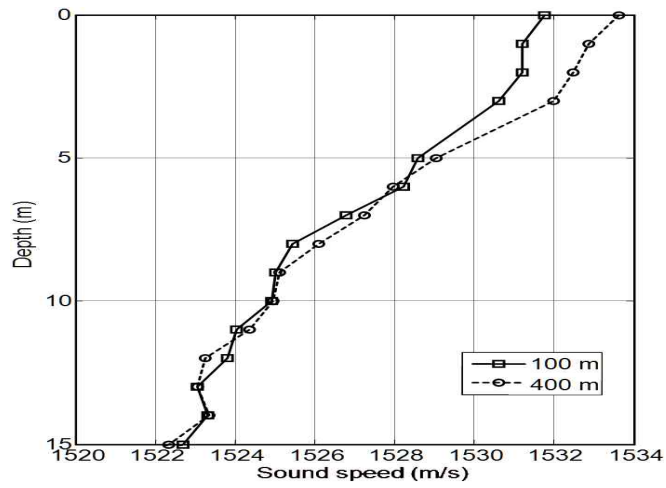


Fig. 36. Sound velocity profile of experimental site

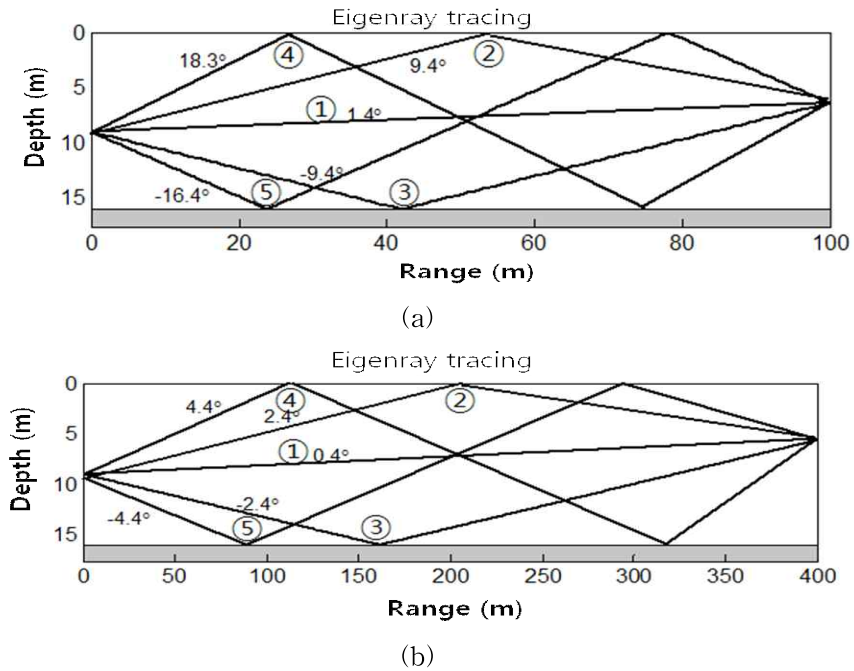


Fig. 37. Eigen rays of each range, (a) 100 m, (b) 400 m

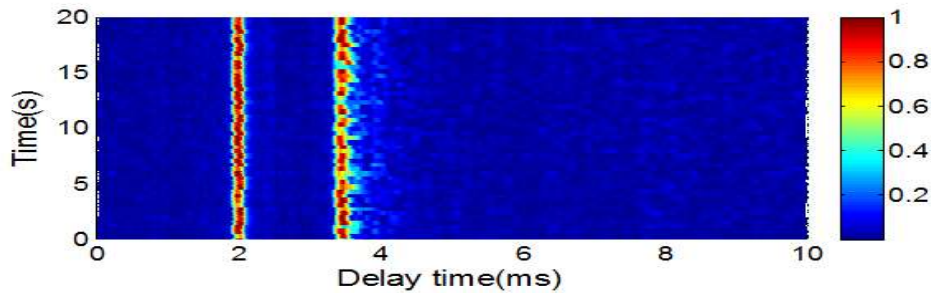
13 kHz ~ 23 kHz 대역의 LFM 신호를 이용한 거리별 다중경로 지연 확산 및 다중 경로 간섭 특성은 각각 Fig. 38, Fig. 39, Fig. 40과 같다. 제 1절 4. 에서 기술한 채널 대역폭 정의를 적용하면 거리 50 m, 100m 및 400m의 채널 대역폭은 각각 70Hz, 90Hz 및 150Hz이다.

4Ch-4FSK 각 채널의 심벌율(sps)과 데이터 전송률(bps)로 각각 100sps 및 200bps이므로 각 채널 신호대역폭은 50Hz이다. 각 채널은 주파수 비 선택적인 채널이다.

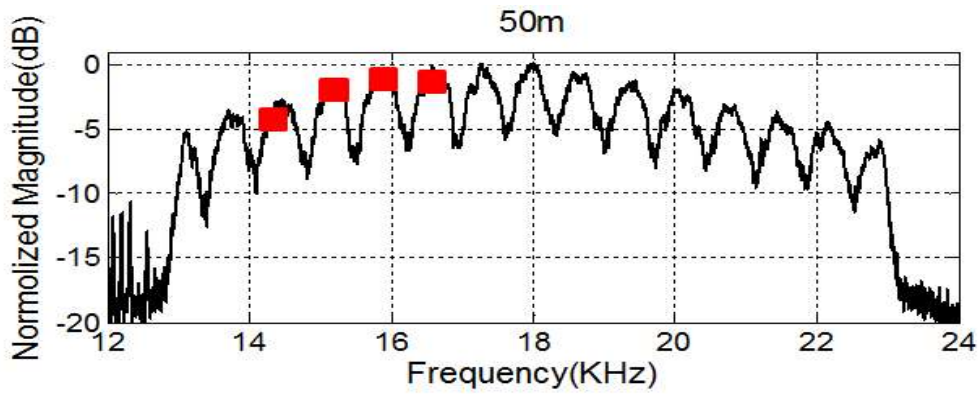
수조 실험에서와 같이 반송주파수에 따른 오류율 변화를 해석하기 위해 각 거리에서 채널 반송주파수 그룹을 2가지로 하여 실험하였다. 첫 번째 그룹은 14.0, 14.5, 15.0, 15.5 kHz로 동일하게 하고 두 번째 그룹은 각 채널의 다중경로 간섭 스펙트럼(Fig. *****)에서 “■”로 표시된 그룹이다. 각각 거리 50 m, 100 m, 400 m의 2번째 그룹 주파수는 각각 (14.3, 15.1, 15.7, 16.4 kHz), (14.8, 16.4, 17.3, 18.8), (14.4, 16.8, 17.2, 20.7)로 설정되었다.

Table 15는 각 거리에서 반송주파수 그룹별 오류 특성이다. 첫 번째 반송파 그룹에 비해 두 번째 그룹이 상대적으로 우수한 성능을 보인다. 수조 실험 결과와 일치하는 결과로 결론적으로 주파수 비 선택적인 채널에서도 오류는 반송주파수 및 거리에 따라 변화한다. 거리 100 m에서 CH1과 CH3 구간에서 페이딩에 의한 오류가 증가되고, 상대적으로 400 m에서는 채널 대역폭 이하의 전송률에서는 페이딩에 영향 없이 신뢰성 있는 전송이 가능함을 보인다.

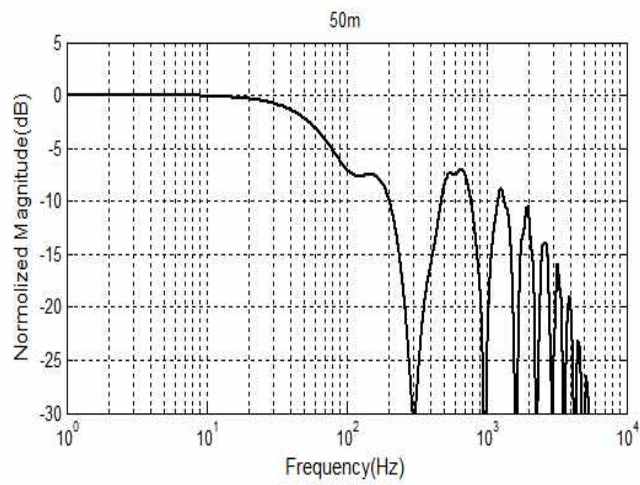
두 번째 반송파 그룹이 보강 간섭 주파수로 선택되었음에도 오류가 존재한다. 이는 정적인 수조 채널은 시 불변이지만 실 해역은 시변채널로 페이딩에 의한 오류가 존재하기 때문이다. 페이딩에 의한 오류를 감소하기 위한 채널코딩이 적용되면 오류는 감소할 것이다.



(a)

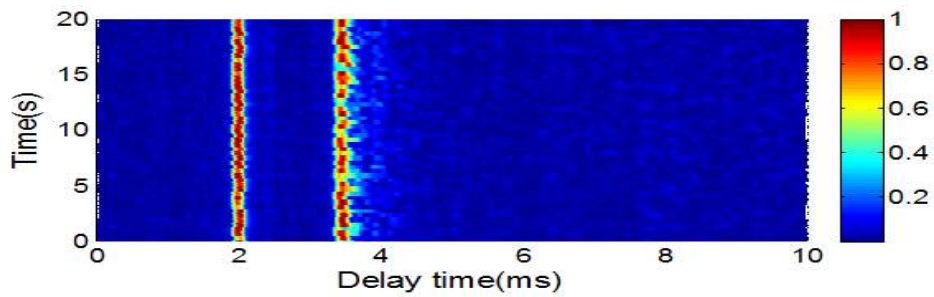


(b)

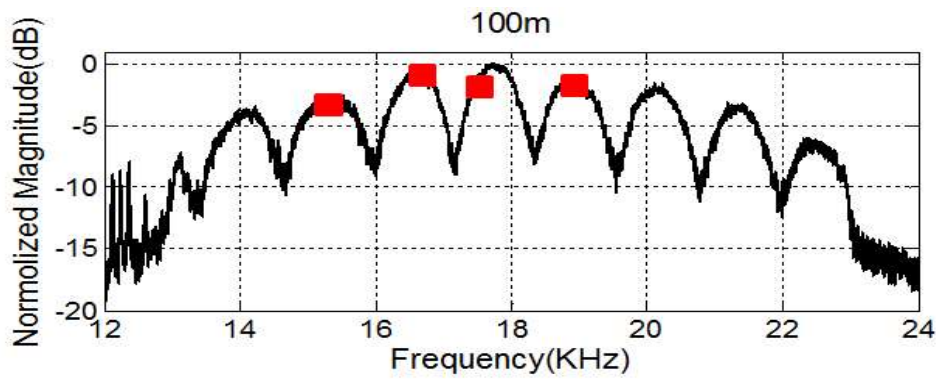


(c)

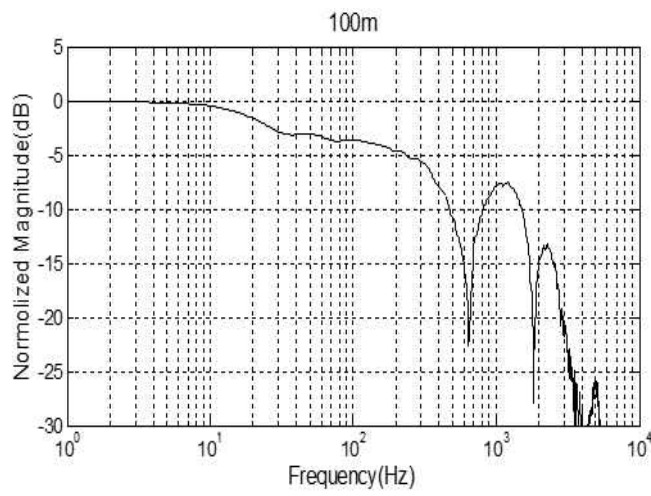
Fig. 38. Channel characteristics of 50 m, (a) delay spread, (b) interference pattern, (c) channel bandwidth characteristics



(a)

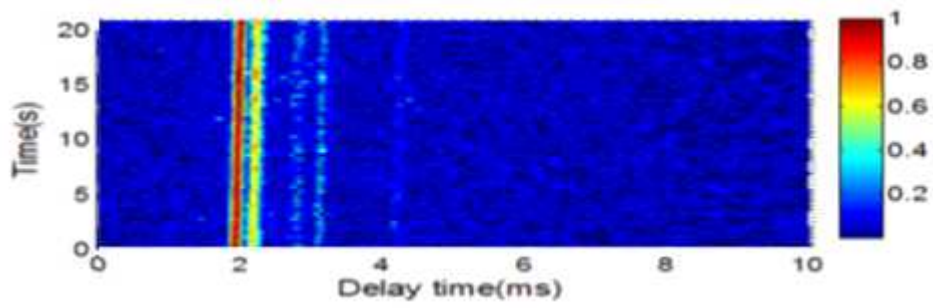


(b)

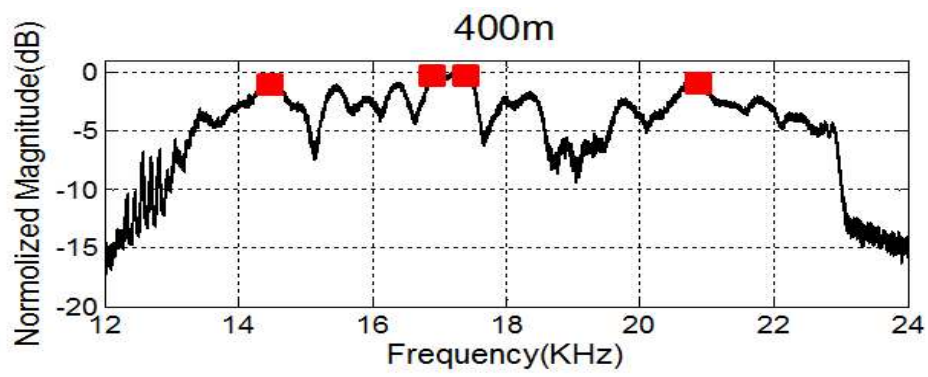


(c)

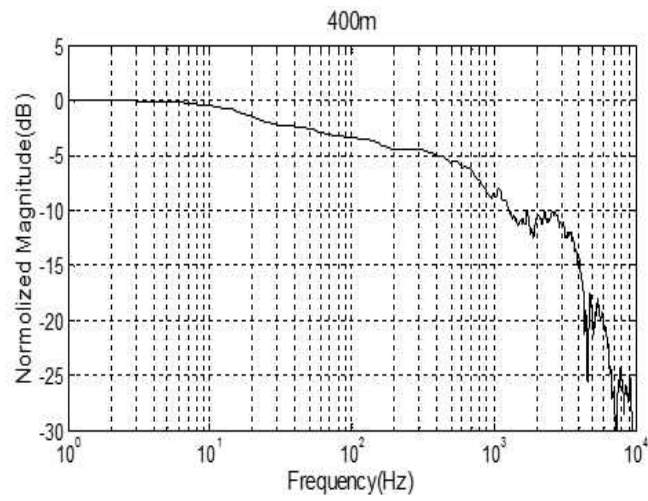
Fig. 39. Channel characteristics of 100 m, (a) delay spread, (b) interference pattern, (c) channel bandwidth characteristics



(a)



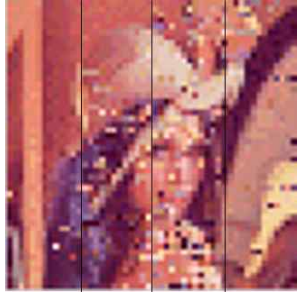


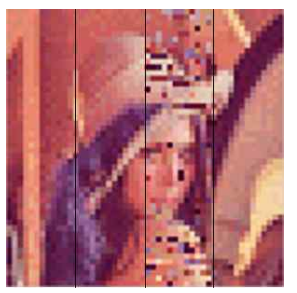

(b)



(c)

Fig. 40. Channel characteristics of 400 m, (a) delay spread, (b) interference pattern, (c) channel bandwidth characteristics

Table 15. BERs for carrier frequency groups

Range(m)	50	100	400
Carrier freq. group 1	14.0, 14.5, 15.0, 15.5	14.0, 14.5, 15.0, 15.5	14.0, 14.5, 15.0, 15.5
4CH-4FSK			
BER	0.04	0.06	0
Carrier freq. group 2	14.3, 15.1, 15.7, 16.4	14.8, 16.4, 17.3, 18.8	14.4, 16.8, 17.2, 20.7
4CH-4FSK			
BER	0.028	0.016	0

다. 다중경로 페이딩과 채널 코딩에 따른 오류

(1) 다중 경로 페이딩

실 해역 수중 다중경로 페이딩에 의한 오류를 저감하기 위한 채널 코딩 효율성 해석을 위해 칠천도 연안 해역에서 실험하였다. 실험 구성도 및 해상 상태는 앞의 Fig. 33, Fig. 34와 같다.

송신신호는 12 ~ 19 kHz 대역의 PN (Pseudorandom Noise)신호를 30s 전송하여 채널의 페이딩 특성을 분석하였다. 간섭패턴은 LFM 500 ms 사용하여 구하였다.

페이딩 해석 순서는 1)다중경로 지역 확산으로 부터 채널 대역 추정, 2)채널 대역보다 좁게 페이딩 해석 기준 대역 설정, 3)수신 PN신호를 분석대상 주파수중심으로 대역통과한 후 HT 변환하여 포락선 진폭, 4)히스토그램 분석, 5)통계적 특성과 비교이다. 분석기준 대역은 50Hz이고 Fig. 41은 분석 대상 중심주파수이다. Fig. 42는 포락선 진폭 예이다.

Fig. 43(a) ~ 43(f)는 Fig. 41에 표시된 각 중심주파수의 페이딩 특성이다. Fig. 43에서 보는 바와 같이 간섭 스펙트럼에서 보강간섭을 보이는 16.2 와 16.4 kHz는 Rice 분포, 간섭 스펙트럼에서 상쇄 간섭을 보이는 16.8 과 17.0 kHz는 Rayleigh 분포 특성을 보인다. 그러나 16.0 and 16.6 kHz는 Rice 분포 혹은 Rayleigh 분포 특성을 보이지 않는다. 이는 간섭 스펙트럼에

서 상대적으로 큰 기울기 변화를 보이는 주파수 대역으로 이 영역의 대역은 협대역으로 간주할 수 없는 이유로 해석된다. Table 16은 각 주파수의 통계지표로 표에서 s^2 과 σ^2 은 각각 신호의 시 불변 성분 전력과 시변 성분 전력이다.

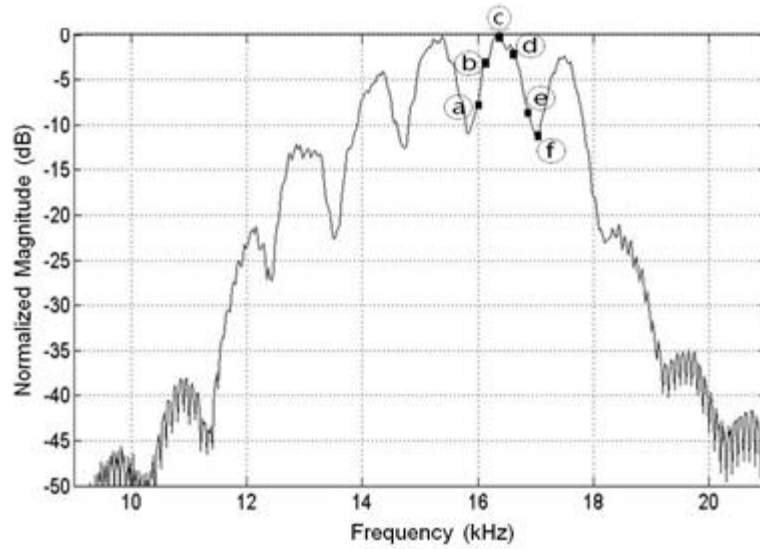


Fig. 41. Channel interference pattern, (a) 100 m (■: frequencies of fading statistics analysis- (a)16.0, (b)16.2, (c)16.4, (d)16.6, (e)16.8, and (f)17.0 kHz)

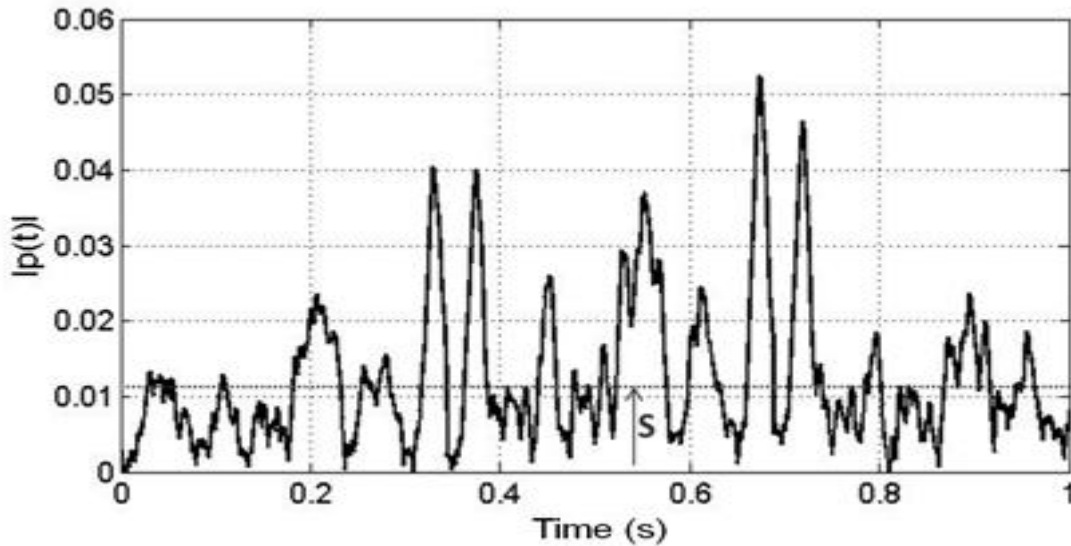
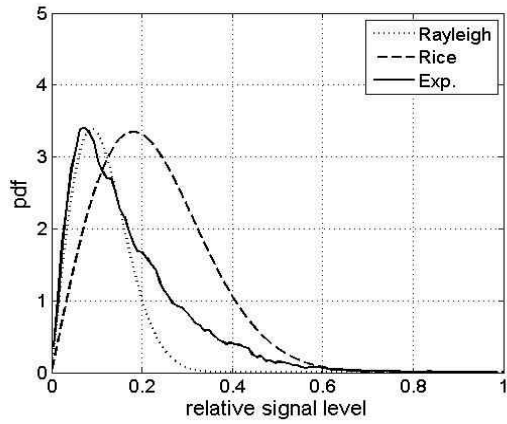
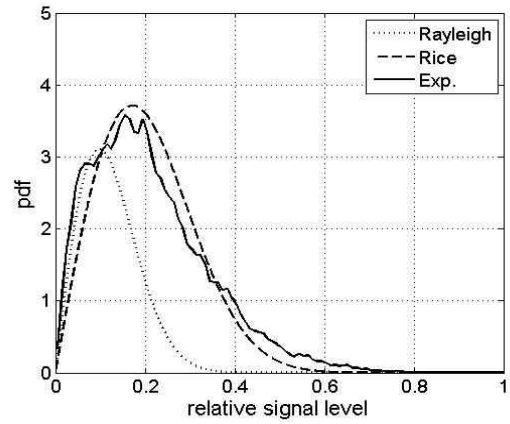


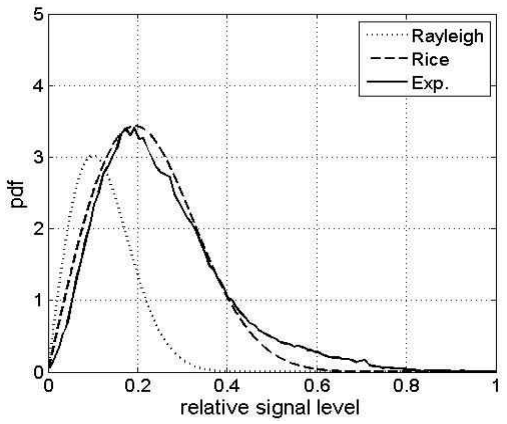
Fig. 42. Sample envelope of center frequency of 16.0 kHz at 100m



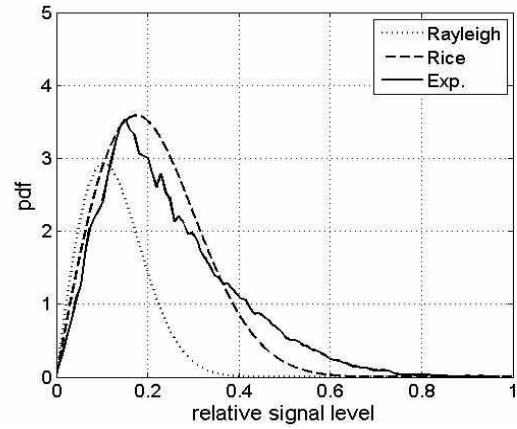
(a)



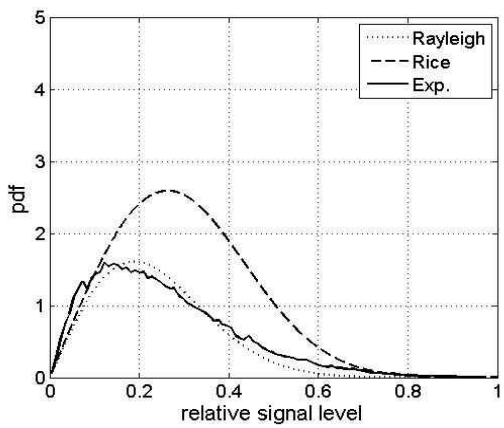
(b)



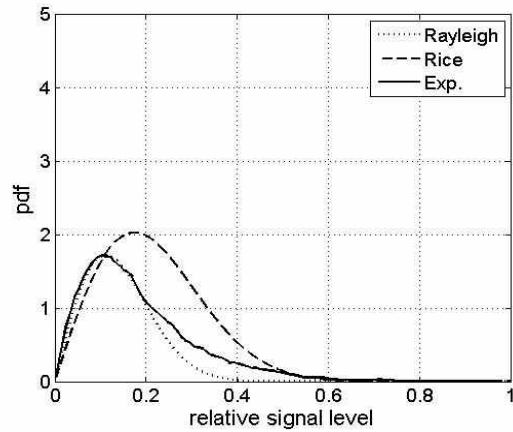
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 43. Fading statistics of different center frequencies in 100 m range: (a) 16.0, (b) 16.2, (c) 16.4, (d) 16.6, (e) 16.8, and (f) 17.0 kHz

Table 16. Frequency- and range-dependent fading statistics at 100 m.

	16.0 kHz	16.2 kHz	16.4 kHz	16.6 kHz	16.8 kHz	17.0 kHz
s^2	1.46×10^{-4}	4.80×10^{-4}	6.50×10^{-4}	6.10×10^{-4}	2.10×10^{-4}	0.60×10^{-4}
σ^2	0.82×10^{-4}	1.90×10^{-4}	2.01×10^{-4}	2.14×10^{-4}	0.85×10^{-4}	0.28×10^{-4}

(2) 다중 경로 페이딩 오류 저감을 위한 채널 코딩

(가) 수조실험 결과

CC 및 RS 코드를 QPSK에 적용하여 성능을 평가하였다. Fig. 44는 통신 모뎀의 구성도 및 실험 구성도이다. Fig. 44에서 보는 바와 같이 잡음 발생기(ITC1001)를 이용하여 신호 대 잡음비 E_b/N_0 을 변화시켰다. E_b/N_0 에 대한 각 코드의 BER은 Fig. 45와 같다. 약 100Hz 채널 대역폭에 대해 심벌 전송율을 달리하여 채널의 주파수 선택도를 100, 200 및 400 sps로 달리하여 실험하였다. 다중 경로의 영향이 증가하여 주파수 선택도가 커지는 높은 전송률에서 RS의 성능이 보다 우수하고 주파수 선택도가 낮아지면 CC가 보다 우수하다. 주파수 선택도가 낮아지면 수신신호는 배경잡음에만 좌우되므로 오류는 랜덤하게 발생하고 주파수 선택도가 높아지면 다중 경로의 간섭에 의해 페이딩이 커지는 이유로 해석된다. 다중 경로 간섭에 의한 ISI는 특정 시간 영역에서 상쇄 간섭을 야기하여 그 영역에서 군집오류를 야기하는 것으로 해석된다. 결론적으로 채널 코딩의 이득은 약 6dB이고 수중 다중경로 음향채널에서 RS코드가 보다 우수하다.

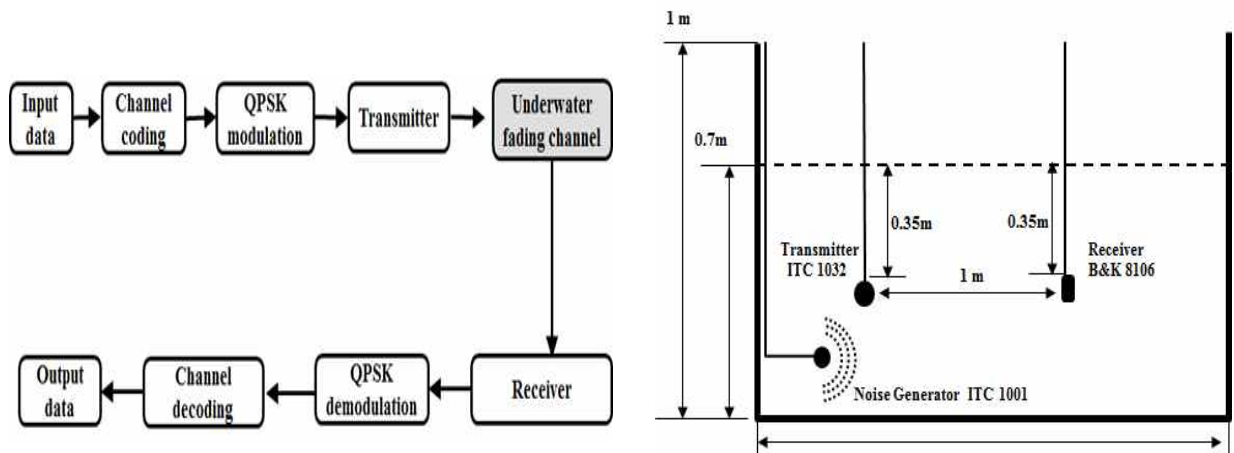
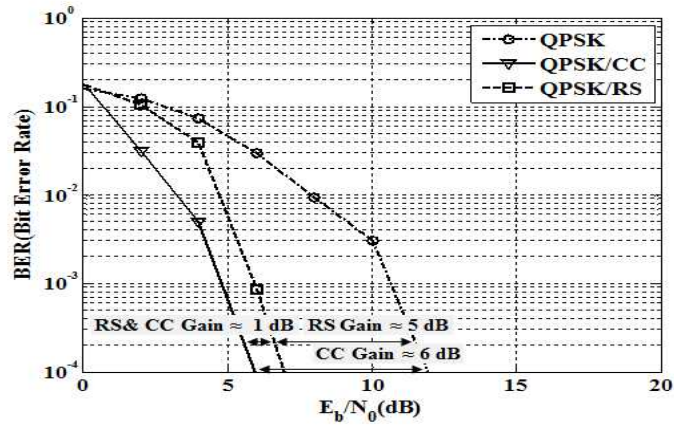
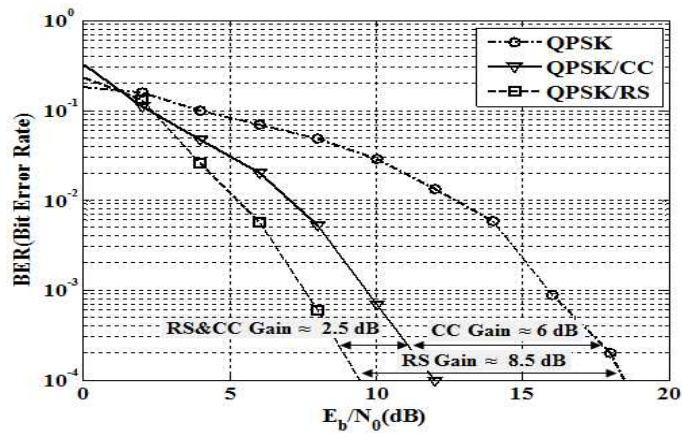


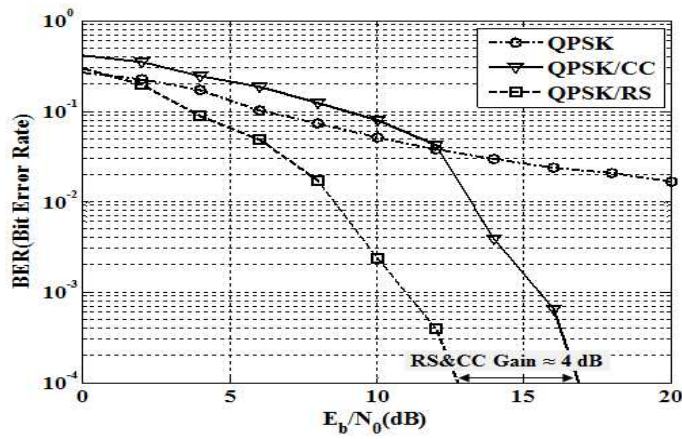
Fig. 44. Channel coding adopted modem structure and experimental configuration



(a)



(b)








(c)

Fig. 45. BER to E_b/N_0 of QPSK, QPSK/CC, and QPSK/RC for three different frequency selective channels: (a) 100, (b) 200, and (c) 400 sps

(나) 해상실험 결과

송수신기 100m와 400m이고 채널 특성은 Fig. 39와 40과 같다. Table 17은 거리에 따른 200bps, QPSK 및 4FSK의 채널코딩의 이미지 전송성능이다. 전체적으로 RS 코드의 성능이 상대적으로 우수하고 비동기식 4FSK에서 상대적으로 우수하다. 동기식 QPSK는 음향채널 변화에 의한 CFO 영향으로 오류가 증가함을 보인다.

Table 17. Performance of QPSK and 4FSK with CC and RS channel coding

거리	QPSK	QPSK-CC	QPSK-RS	4FSK	4FSK-CC	4FSK-RS
100m						
BER	0.04	0.046	0.015	0.06	0.025	0.01
400m						
BER	0.025	0.014	0.012	0	0	0

(다) 페이딩의 분류

Fig. 46은 동일한 채널에서 나타날 수 있는 페이딩의 종류이다. Fig. 46(a)와 Fig. 46(b)는 주파수 비 선택적인 채널에서 나타나는 출력신호로 페이딩과 출력신호 전력은 반송주파수에 좌우됨을 보인다. 이에 반해 Fig. 46(c)와 Fig. 46(d)는 주파수 선택적인 채널에서 나타나는 출력신호로 페이딩과 출력신호 전력은 반송주파수와 ISI에 좌우됨을 보인다,

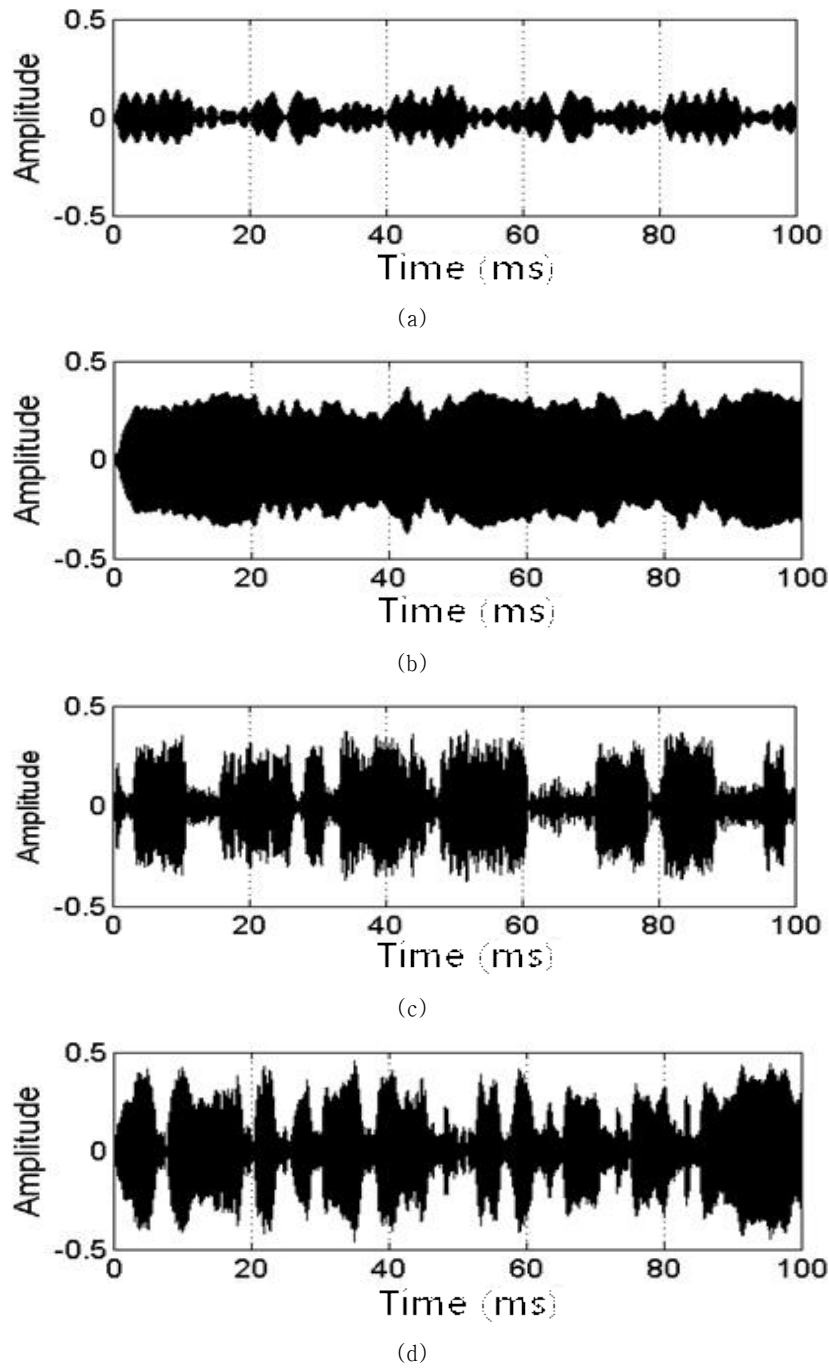


Fig. 46. Received fading signal waveforms at 100 m, (a) destructive interference frequency ($B_s < B_c$), (b) constructive interference frequency ($B_s < B_c$), (c) destructive interference frequency ($B_s > B_c$), (d) constructive interference frequency ($B_s > B_c$)

라. 다중경로 페이딩 채널의 상관시간과 심벌 주기

Fig. 47은 식 (19)를 이용하여 구한 100m와 400m의 상관시간(Coherence Time) 특성이다.

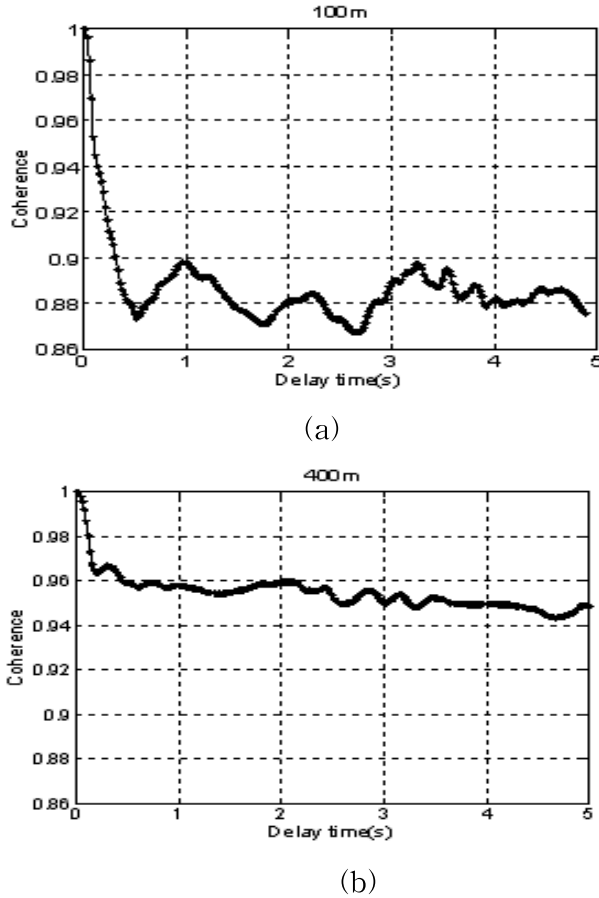


Fig. 47. Temporal coherence. (a) 100 m; (b) 400 m

100 m 경우 상관계수가 약 0.9로 되기까지 약 0.2 s, 400 m 경우는 5 s 이상이다. 식 (20)을 적용하면 100 m 경우 도플러 확산은 5 Hz 이고 400 m 경우는 0.2 Hz 이하이다. 따라서 100 m 경우 심벌 주기는 0.2 s 이하, 400 m 경우는 5 s 이하이면 해면변동에 의한 도플러 확산은 무시할 수 있다.

송수신기가 상대 운동하는 경우를 가정하고, AUV가 3 kts로 이동한다면, 최대 도플러 확산은 $f \times 10^{-3}$ 이다. 이 경우 심벌 주기는 $1/(f \times 10^{-3})$ 이하 이어야 한다. 20 kHz를 반송주파수로 가정하면 심벌주기는 1/20s 이하가 된다.

마. 반송 주파수 CFO와 오류

반송 주파수의 CFO에 의한 오류를 평가하고 동기식 모뎀의 BER을 수조실험으로 해석하였다. Fig. 48은 실험 구성도이며 수면을 교란시켜 시변 채널을 모의하였다. 수면파의 주기는 송

신 프레임 보다 짧은 0.5 Hz로 하였으며, 파고는 0.2 m이다. 변조방식은 QPSK, 반송파 주파수

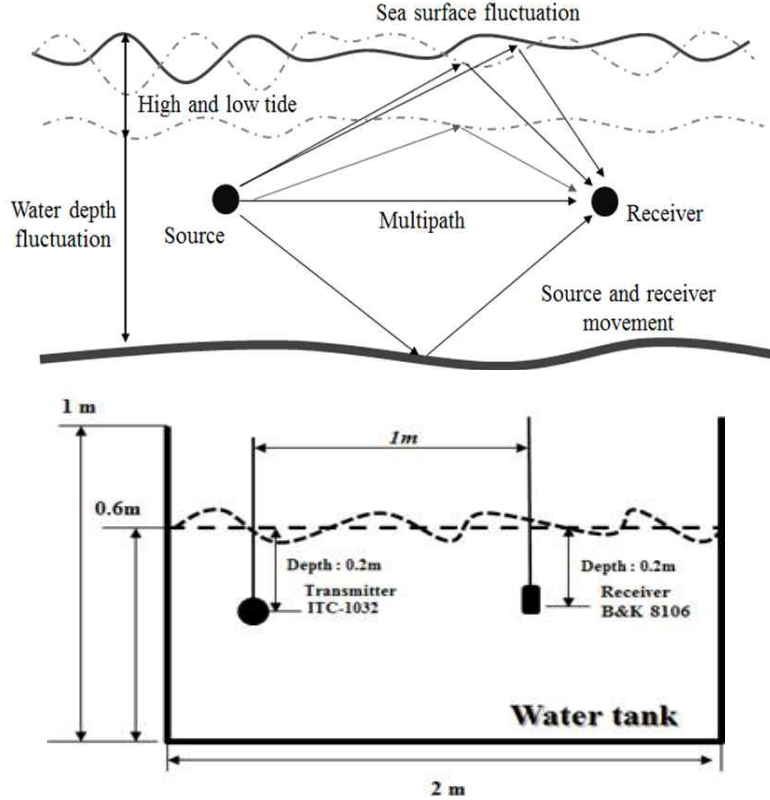


Fig. 48. Experimental configuration for BER on CFO

는 30 kHz이다. 총 전송된 이미지의 비트 수는 9800 비트이다.

Table 18은 CAZAC 코드 기반의 4-위상 심벌의 위상 코드이며 시작 위상 코드와 종료 위상 코드로 사용하고 QPSK의 I 채널과 Q채널의 위상 코드 정보를 추정하였다. QPSK변조 방식에 적용된 위상 코드는 식(21)과 같다.

$$\begin{aligned} r_I(t) &= \cos(2\pi f_c t + \phi \pm \Delta\phi_{pcI}) \\ r_Q(t) &= -\sin(2\pi f_c t + \phi \pm \Delta\phi_{pcQ}) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, $r_I(t)$ 와 $r_Q(t)$ 는 QPSK 수신 신호의 I 채널과 Q채널의 신호이며, $\Delta\phi_{pcI}$ 와 $\Delta\phi_{pcQ}$ 는 각 채널의 시작 위상 코드와 종료 위상 코드의 위상변화량이다.

Fig. 49는 CAZAC 코드의 주파수 특성과 4-위상에 대응하는 시간 신호이다. Fig. 49(a)는 반송파 주파수 30 kHz로 대역폭은 1 kHz이며, Fig. 49(b)은 QPSK의 I 채널과 Q 채널 (0,0)에 대응되는 CAZAC 코드(-1, -j)의 시간 신호이다. Fig. 49(c)는 I 채널과 Q 채널 (0,1)에 대응되는 CAZAC 코드(-1, +j), Fig. 56(d)는 I 채널과 Q 채널 (1,1)에 대응되는 CAZAC 코드(1, +j), 그리고 Fig. 49(e)는 I 채널과 Q 채널 (1,0)에 대응되는 CAZAC 코드(1, -j)의 시간 신호이다. 4가지의 CAZAC 코드는 위상 코드를 0.64초간 전송 프레임의 앞단과 뒷단에 삽입하여 1초 프

레이 전송 시 위상변화량을 추정하였다.

Fig. 50은 CFO의 영향을 감소시키기 위해 위상코드 보상 방법의 구성도이다. 시작과 종료 위상 코드의 변동위상에 대한 변화량을 추출하고, 각 채널에서 변화한 위상변동 값을 QPSK 복조 시 위상정보를 보상한다.

Table 18. CAZAC 코드 기반의 4-위상 심벌의 위상 코드

CAZAC code elements $c(m)$	I channel	Q channel
C(0)	+1	+j
C(1)	+1	+j
C(2)	+1	+j
C(3)	+1	+j
C(4)	-1	+j
C(5)	-1	-j
C(6)	+1	+j
C(7)	+1	-j
C(8)	-1	-j
C(9)	+1	+j
C(10)	-1	-j
C(11)	+1	+j
C(12)	+1	-j
C(13)	-1	-j
C(14)	-1	+j
C(15)	+1	+j

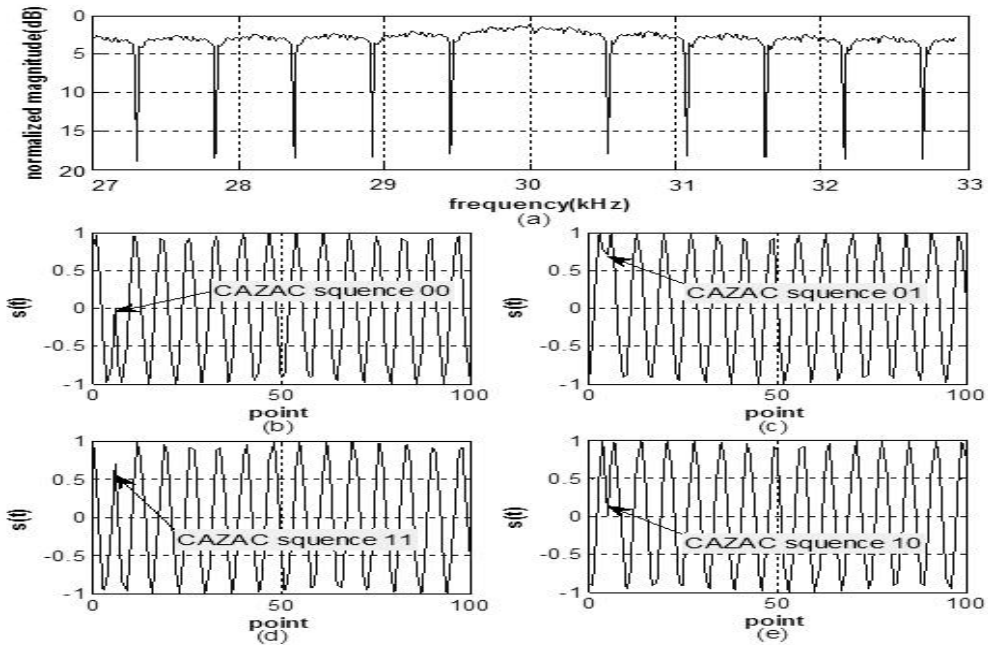


Fig. 49. 4-phase code (CAZAC) sequence, (a) frequency response, (b) bit signal (00), (c)

bit signal (01), (d) bit signal (11), (e) bit signal (10).

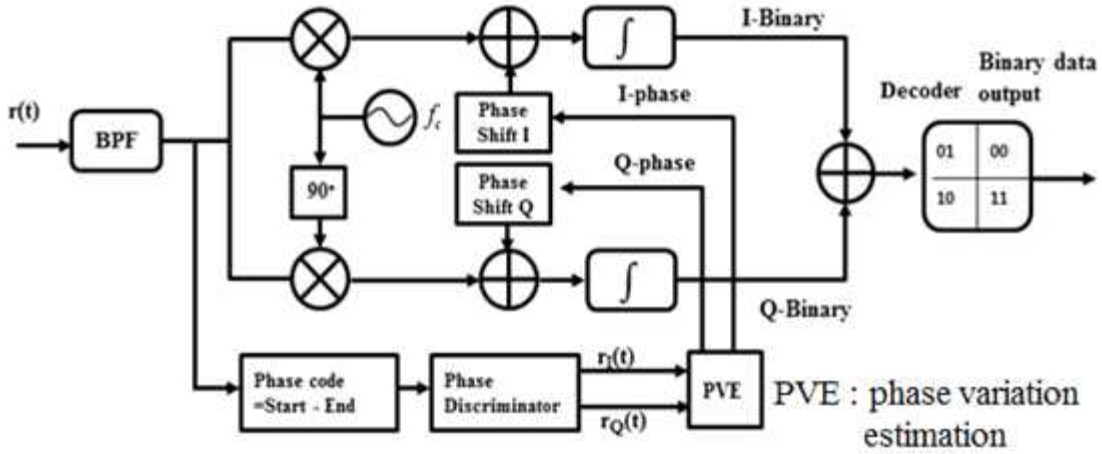


Fig. 50. Block diagram of CFO compensation using phase code in QPSK demodulation.

Fig. 51은 다중경로 채널에 전송된 송신 신호의 수신 시간 파형으로 Fig. 51(a)는 수면 변동에 의한 시작 위상 코드와 종료 위상 코드의 샘플 포인트에 따른 위상차와 도플러 천이에 대한 시간파형이다. Fig. 51(b)는 도플러 발생구간의 주파수 특성으로 도플러 천이 주파수는 약 100 Hz로 나타났다. 이러한 수면변동은 송신 신호의 위상 및 주파수 변화를 야기하고 이에 따른 CFO 증가로 수중음향 통신 시스템의 성능은 저하된다.

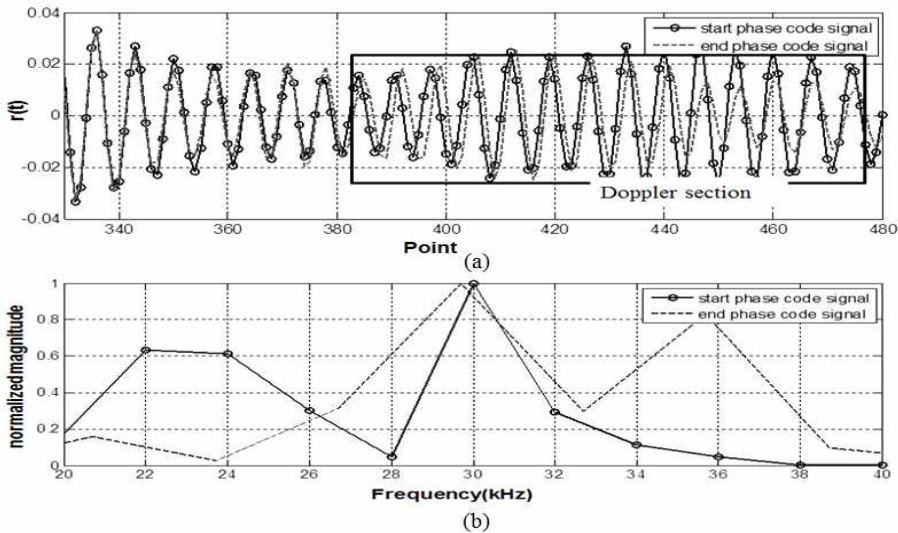


Fig. 51. Amplitude and phase variation and doppler shift in fluctuated water surface, (a) envelope and phase of start and end phase code signal, (b) Doppler shift.

Fig. 52(a)는 시작 위상 코드와 종료 위상 코드의 진폭 및 위상 변화이며, 1초 프레임 전송 시 수면 변동이 신호의 진폭과 위상에 영향을 주고 있다. Fig. 52(b)는 시작과 종료 위상 코드의 위상변화량을 보이는 것으로 최소 10° 에서 최대 100° 의 위상변화를 확인하였다. 이러한 위상변화는 CFO에 의한 오류를 야기한다.

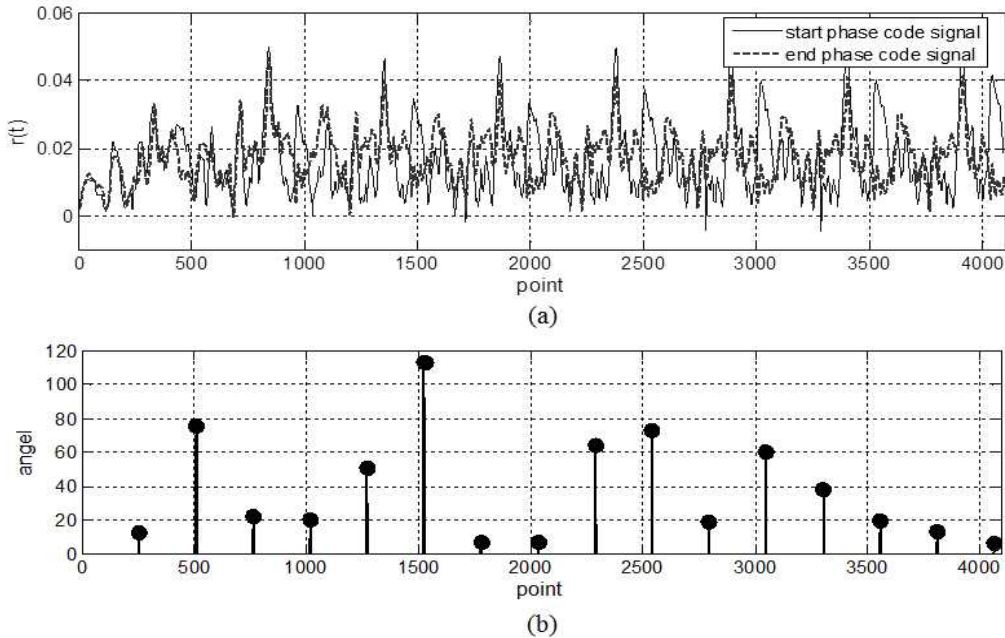


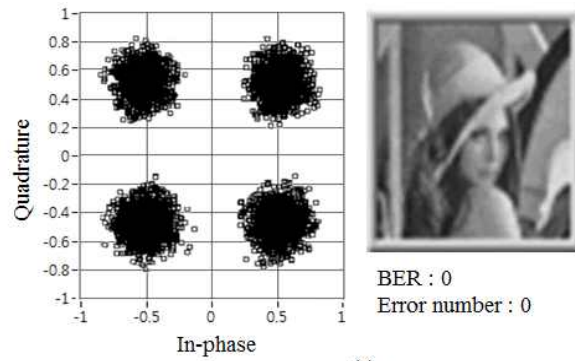
Fig. 52. Amplitude and phase variation of phase code signal in fluctuated water surface, (a) envelope of start and end phase code signal, (b) phase difference of start and end phase code signal.

Fig. 53은 PN 신호를 이용한 프레임 동기만 한 경우의 거울 및 변동하는 수면 상태의 수신 이미지 대한 성장도와 복원 이미지이다. Fig. 53(a)는 거울 상태의 전송성능으로 오류는 없다. Fig. 53(b)는 수면 변동이 있는 상태의 전송성능으로 BER은 0.13으로, CFO의 영향으로 오류가 증가함을 보인다.

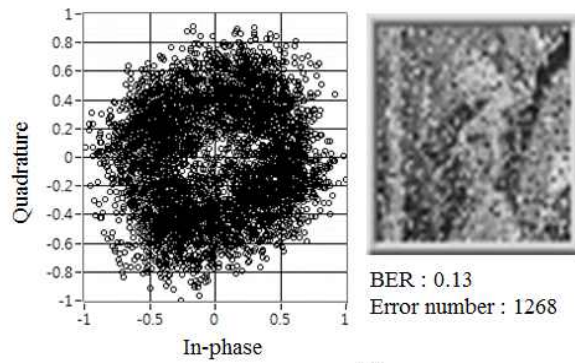
Fig. 54와 Table 19는 수면 변동 상태에서 위상 코드의 CFO보상기법의 성능평가 결과이다. Exp. 1은 CFO추정 및 보상을 하지 않은 경우로 총 전송비트 9800 비트에서 오류비트 수는 1268개, 오류율은 0.13으로 나타났다. Exp. 2는 CFO추정을 위한 위상 코드 보상 값을 I 채널 $\pi/4$, Q채널 $3\pi/4$ 로 보상한 결과이며, 오류 비트 수 327개, 오류율은 0.033으로 Exp. 1에 비해 약 4배의 성능 개선을 보인다.

Exp. 3과 Exp. 4는 CFO추정을 위한 위상코드 보상 값을 I 채널 $\pi/2$, $3\pi/4$, Q채널 $\pi/4$, $3\pi/4$ 로 보상한 결과이다. 각각의 오류율은 0.029, 0.013으로 보상을 하지 않은 Exp. 1에 비해 각각 약 4배와 10배의 성능 개선을 보인다.

실험 결과로부터 위상변조 방식의 수중 음향 통신 시스템의 CFO 추정 및 보상을 위해 CAZAC 코드로 위상 코드를 적용하면 비트 오류율은 약 4~10배 개선된다고 할 수 있다.

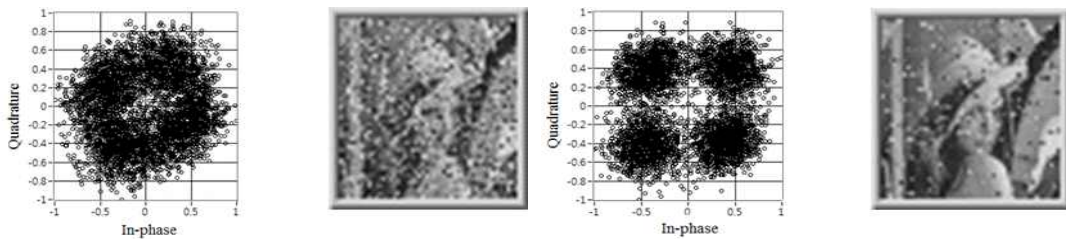


(a)



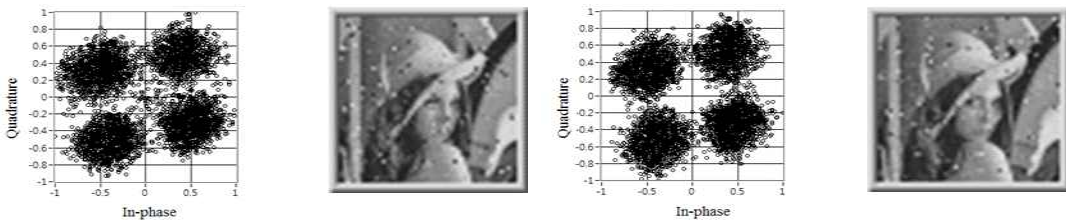
(b)

Fig. 53. Image transmission performance in water tank channel, (a) mirror state, (b) fluctuation state.



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 54. Constellations and received images for three different phase weight, (a) Exp1; $I=0, Q=0$, (b) Exp2; $I=\pi/4, Q=3\pi/4$, (c) Exp3; $I=\pi/2, Q=3\pi/4$, (d) Exp4; $I=\pi/4, Q=3\pi/4$.

Table 19. Performance of carrier frequency offset estimation.

Exp. no	CFO estimation weight	BER and Error number
Exp.1	I channel : 0	BER : 0.13, Error number :1268
	Q channel : 0	
Exp.2	I channel : $\pi/4$	BER : 0.033, Error number :327
	Q channel : $3\pi/4$	
Exp.3	I channel : $\pi/2$	BER : 0.029, Error number :273
	Q channel : $3\pi/4$	
Exp.4	I channel : $\pi/4$	BER : 0.013, Error number :128
	Q channel : $3\pi/4$	

제 2 절 과제 결과 II: 적응형 음향통신 모뎀 설계

1. AUV 음향 통신 모뎀 제어판

본장의 제1절에서 해석한바와 같이 AUV 제어 및 감시 정보 신호는 64 byte (512 bit)이며 최대 1 kb이다. Fig. 55는 모선의 AUV 제어 정보 제어판 화면이다. 각 ASCII코드 제어 정보는 음향 통신 모뎀을 거쳐 AUV로 송신되며 AUV에서는 상태 정보가 음향 통신 모뎀을 거쳐 모선으로 전송된다.

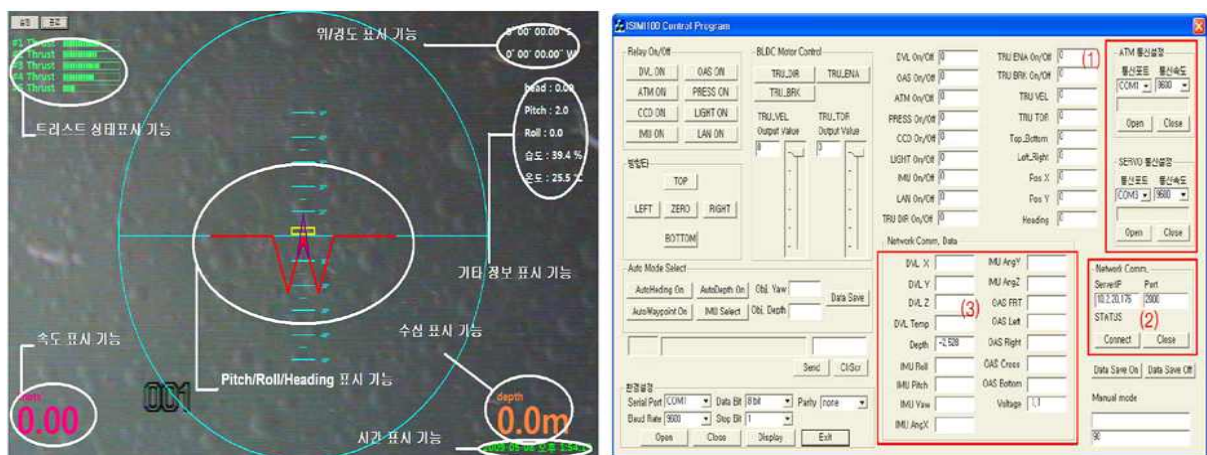
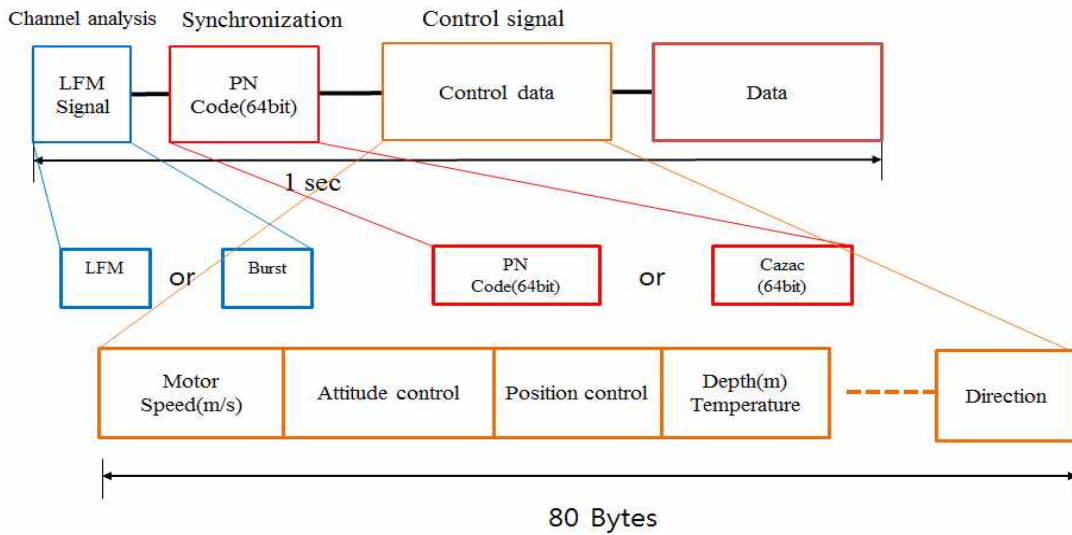
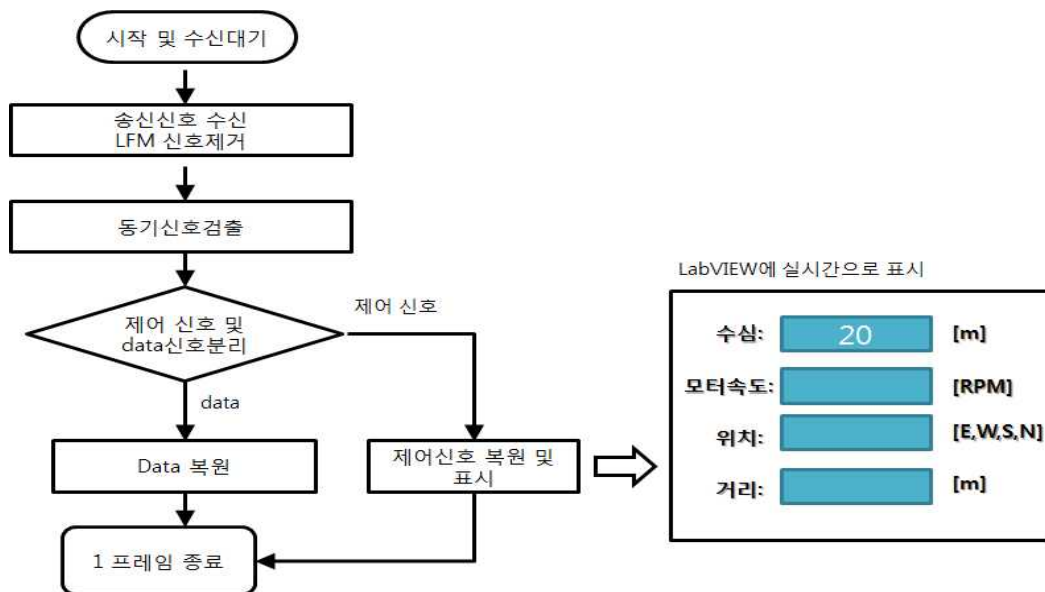


Fig. 55. Input panel configuration of AUV control and monitoring informations

Fig. 56(a)는 전송 신호 프레임 구조이다. 제어 및 감시 정보에 부가하여 음향 통신 채널 추정 및 프레임 동기용 LFM 펄스 신호, CFO 검출용 CAZAC 코드 신호가 1개 프레임 신호로 전송된다. 56(b)는 수신 신호에서 제어 및 감시 정보를 추출하여, 정보 표시 창에 입력하는 알고리즘이다. Fig. 57은 AUV의 제어 및 감시 정보 표시 창이다.



(a)



(b)

Fig. 56. Transmission frame structure and output extraction algorithm of control and monitoring informations output, (a) Transmission frame structure, (b) output extraction algorithm

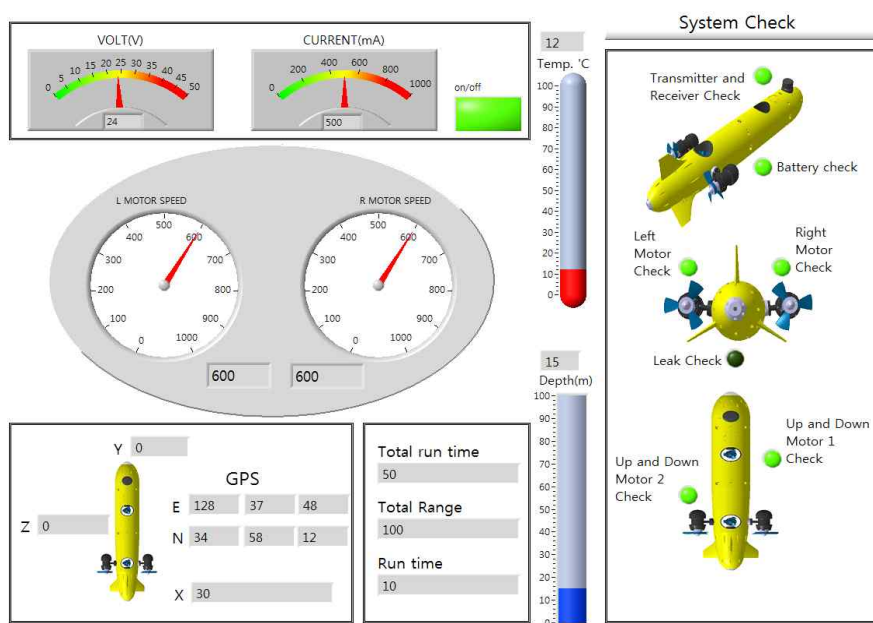


Fig. 57. Display of AUV control and monitoring informations

Fig. 58은 거제도 칠천도 해역에서 송수신기 거리를 100m로 하여 설계된 AUV의 제어 및 감시 정보 입출력 상태를 평가한 결과이다. 4CH-4FSK로 실험한 결과이며 시변 음향 통신 채널이 최적화 되지 않은 상태의 결과이다. 주파수 선택적인 채널로 총 512 비트의 제어 및 감시 정보 중에서 14개 비트의 오류가 발생되었다.

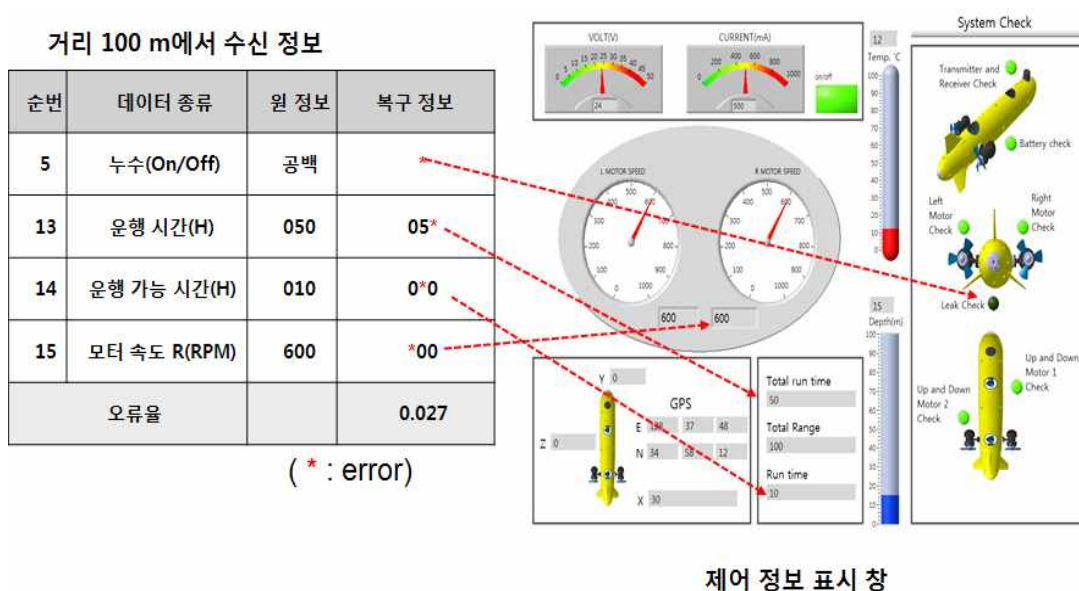


Fig. 58. Example of AUV control and monitoring information display at 100 m

2. 최적의 수중 음향 통신 방식 설계

가. 설계 변수별 기술 개념

제1절에서 보는 바와 같이 시공간적으로 변화하는 수중 음향 통신 채널에서 음향 통신 모뎀의 성능은 AUV 정보 및 채널 변수와 모뎀 설계 변수에 의해 결정된다. 채널 변수들은 복합적으로 결합되어 성능을 결정하므로 모뎀 설계는 채널 변수들의 유기적 관련성을 바탕으로 설계되어야 한다.

Table 20은 제1절 수조 실험 및 해상 실험 결과를 바탕으로 채널 변수와 모뎀 설계 변수와의 관련성을 요약한 내용이다. 목표로 하는 모뎀의 비트 오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1 kbps, 최대 통신거리 5 km, 해역수심 50 m, AUV 최대속도 3 kts이다. 아울러 시변 통신 채널 환경에 강인하고 설계 및 제작이 단순한 시스템이 요구된다. Table 21은 최종적인 모뎀의 설계 개념이다.

Table 20. Relationship of AUV information, channel parameters and modem design parameters

입력정보 및 채널 변수		모뎀 설계 변수		변조기법 (동기,비 동기)	전송율	등화기	채널 코딩	송신기 감도
		변조기법 (동기,비 동기)	전송율					
AUV 정보	1 kb	○	○					
배경잡음(10kHz-30kHz) 전송손실(5km, 30kHz)	60dB 이하 89dB(15dB+74dB)						○	○
다중경로/지연확산 /채널대역폭 (~5km, 수심 50m)	경로: 2-4개 지연확산/대역폭:200Hz 이하	○	○	○				
다중경로 간섭 (보강간섭준위-상쇄간 섭)	최대 12dB	○	○				○	
페이딩	보강간섭주파수: Rice 상쇄간섭주파수: Rayleigh	○	○				○	
도플러 확산	10Hz 이하(해면변동) $f \times 10^{-3}$ (AUV 3kts)	○	○					

Table 21. Design concept of adaptive underwater acoustic communication modem for AUV monitoring

모뎀 설계 변수	내용	비고
변조기법	5CH-4FSK 비동기식	시변 채널의 CFO에 강인함
반송주파수	최적 반송주파수 적응적 선택	-AUV 이동에 따라 주기적으로 LFM 신호 전송 -다중경로 간섭 패턴 측정 -보강간섭주파수를 반송주파수로 선택
등화기	적용하지 않음	적용 시 시공간 변화에 탭수 적응 등 시스템 복잡도 증가, 신뢰성 감소
채널코딩	RS(7,3,2)	시변채널의 페이딩에 의한 군집오류 감소
송신기 감도	159dB/uPa 이상	송수신기 거리 5km에서 SNR 10dB 이상
심벌주기	0.1s 이하(해면변동) 0.03s 이하(AUV 3kts, 30kHz)	
전송율	1kbps, 2kbps(RS 코드 적용 시)	

나. 설계 변수별 구현 알고리즘

(1) 반송주파수 최적화

Fig. 59는 최적 반송주파수의 적응적 선택 및 전송 알고리즘으로 Fig. 38, Fig. 39, Fig. 40에서 보는 바와 같이 다중경로에 의한 간섭 패턴 해석은 채널감시 신호인 LFM신호를 사용한다. 시공간 변화에 의한 페이딩은 우세한 다중 경로가 있는 경우 주파수에 따른 보강 혹은 상쇄 간섭으로 채널 응답이 나타나며 따라서 간섭 패턴으로부터 최적 반송주파수(보강 간섭주파수)가 선택된다. 이것은 이동통신에서 사용되는 핸드오버 방식과 유사하며, 수중 음향 통신에서는 다양한 환경변화에 대한 명확한 해석이 없어 구현·개발된 논문을 찾기 힘들다. 특히 핸드오버 방식은 양방향 통신을 통해 채널의 변화와 그에 따른 변동 주파수를 실시간으로 알려주어야 한다. AUV와 같은 수중 이동체의 경우 이동속도에 따라 채널의 변동이 많아 실시간 최적 주파수 추정은 필수적이다.

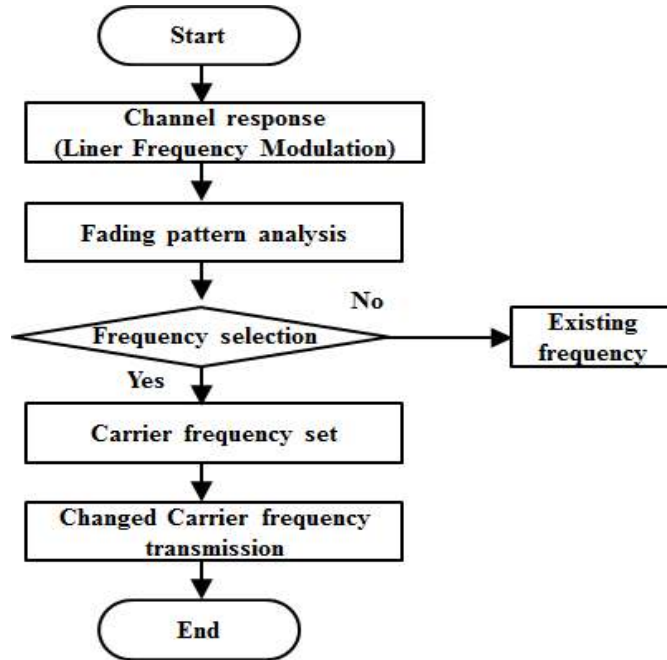


Fig. 59. Adaptive optimization algorithm of carrier frequency and 및 신호 전송 알고리즘

(2) 송신 프레임

제안하는 수중 음향 모뎀의 송신 프레임의 구성도는 Fig. 60과 같다. 채널감시, 채널변동, 채널정보, 전송프레임 번호, 동기신호 및 전송 데이터 신호로 구성되고 시변 채널을 고려하여 전송 프레임 시간은 0.5초 이다.

채널감시 신호는 15 kHz ~ 22 kHz의 LFM 신호이다. Fig. 59의 알고리즘으로 다중경로 지연확산(채널 대역)과 최적 반송주파수 추정에 사용된다. 채널변동 신호는 5개 채널의 채널변동에 대한 알림 신호로 “1” 혹은 “0”으로 설정된다. 채널정보 신호는 5개 채널 중 변경채널의 중심 주파수와 대역폭에 대한 신호이며, 전송 프레임 번호는 채널 변경 송신 전 마지막으로 전송된 프레임의 번호를 삽입한다. 동기 신호는 PN코드 32bit를 송신하여 복조 시 프레임 동기신호로 사용한다.



Fig. 60. Transmission frame structure of adaptive AUV acoustic communication modem

Fig. 61은 전송 프레임의 예로 채널 변동 발생 “1”, 채널 정보 “반송파 32kHz, 전송률 200 bps이며, 최종 전송 프레임”15“ 그리고 정보 신호는 모두 “0”으로 세팅되어 채널의 정보를 인식하게 한다.



Fig. 61. Transmission frame structure of adaptive AUV acoustic communication modem

(3) 채널정보 분석

Fig. 62는 채널감시를 이용하여 채널 정보를 추출하는 알고리즘이다. 감시신호의 주파수 분석으로 채널 재사용 및 채널 변경으로 채널을 음향통신 채널에 적응시키는 과정이다.

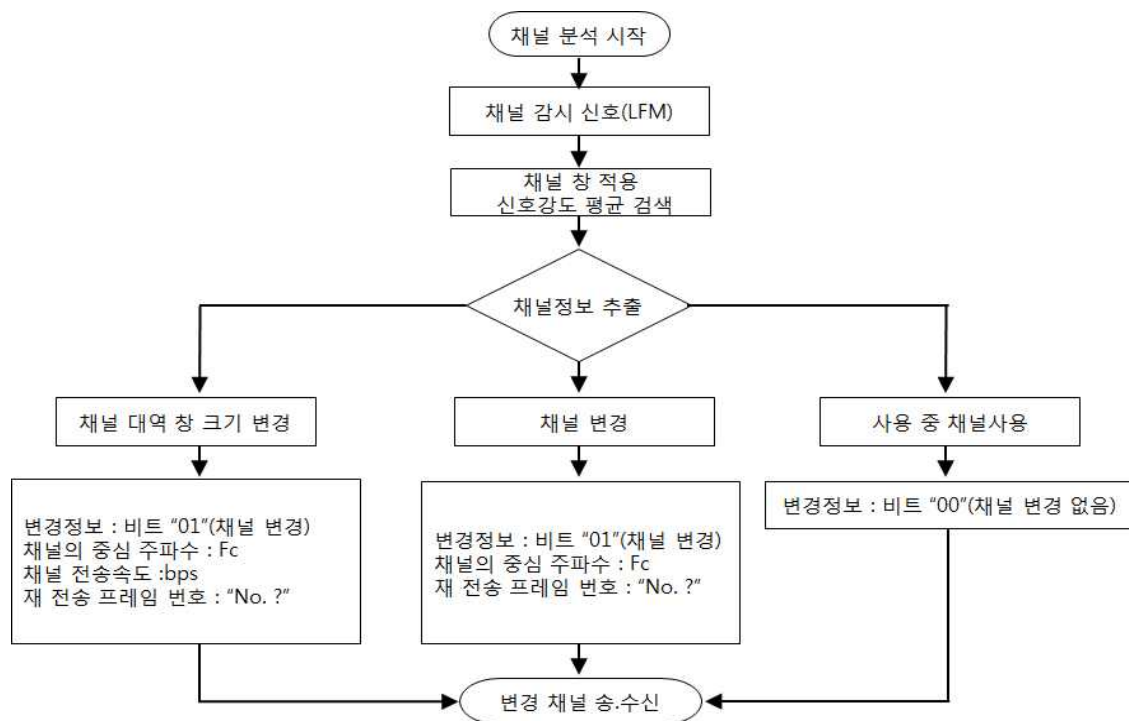


Fig. 62. Algorithm of channel information extraction

감시신호를 평균값 추출 과정은 Fig. 63과 같다. 각 채널 주파수 대역의 스펙트럼을 정규화시킨다. 시작 주파수에서 끝 주파수까지 신호의 강도의 평균값을 추출한다. 평균값 보다 큰 주파수 영역에서 각 채널의 주파수를 선정하고 대역폭, 전송속도와 함께 채널 정보 프레임에 삽입한다. 채널의 대역폭은 감시신호를 정합필터 처리한 MIP를 푸리에 변환하여 구한다.

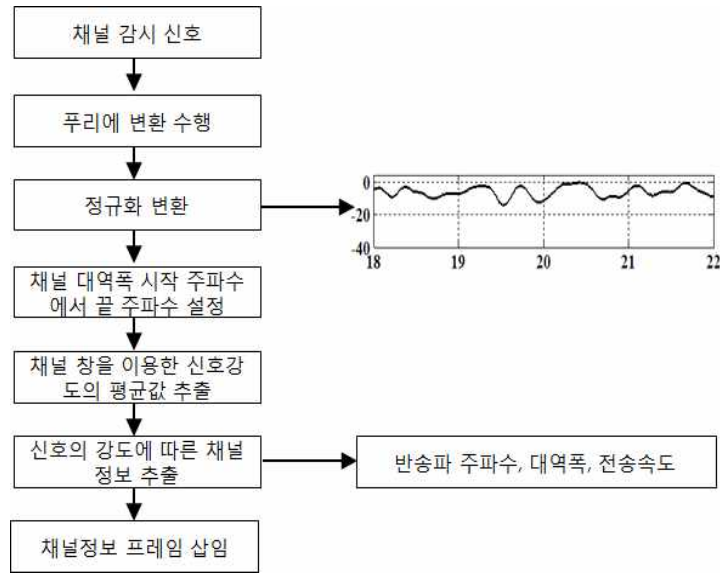


Fig. 63. Carrier frequency optimization using channel probe signal

(4) 송수신 정보 제어

적응형 수중 음향 통신 모델의 송신측과 수신측의 정보 제어 흐름도는 Fig. 64와 같다. 송신측은 초기 채널 분석 신호를 송신하고, 수신측은 채널 분석 신호를 받아 채널 변동 감지를 위한 감시신호 분석을 수행한다. 송신측에서 송신한 채널감시 신호에 채널 변동이 감지되면, 수신측은 채널 변동감지 신호를 송신하여 송신 대기 상태로 설정된다. 수신측에서 전송된 채널 변동 감지 신호를 이용하여, 송신측에서는 채널 감시 신호를 분석 후 채널 정보를 추출한다. 추출된 채널 정보는 수신측에 송신하고 수신측은 채널정보, 전송프레임, 정보 등을 수신하여 적응형 모델의 채널을 수정하여 수신준비 신호를 송신한다. 수신 준비완료 신호를 수신 받은 송신측은 변경된 채널로 송신을 시작하는 단계로 적응형 수중 음향 모델의 통신이 수행된다.

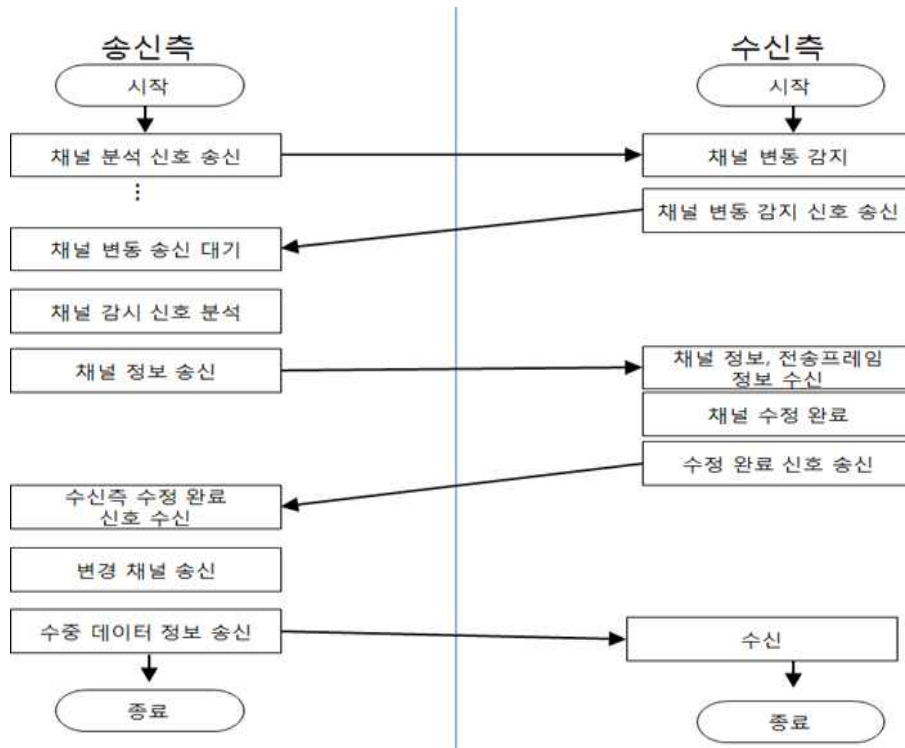


Fig. 64. Communication control information flow of source and receiver sides

3. 해양 환경 적응형 AUV 용 모델 성능 평가

가. 칠천도 해역 실험 평가

설계된 모델의 성능 평가는 2015년 10월 17일 칠천도 해역에서 기초실험을 수행하였다. 칠천도 해역의 실험은 각각의 음향통신 채널 변수가 모델 설계 변수에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험으로 제1절에서 이들의 상관성에 대해 이미 분석하였다. 여기서는 기 분석한 결과 중에서 대표적인 결과만 기술한다.

AUV로 가정한 송신기의 수심은 각각 7 m이며, 모선으로 가정한 수신기의 수심은 10 m, 송·수신 전송거리는 50m, 100 m, 400 m이다. .

Table 22는 RS 코드를 적용한 4CH-4FSK방식의 성능이다. 4CH-4FSK의 반송파 주파수는 13 ~ 22 kHz, 전송률은 채널 대역폭을 고려해 800 bps로 전송하였으며, 전송되는 이미지의 비트 수는 20,000 비트이다.

거리 50 m에서 오류율이 0.04, RS 코딩 적용된 경우 0.015, 거리 100 m에서 오류율이 0.06, RS 코딩 적용된 경우 0.01, 거리 400 m에서 오류율이 0.00이다. 50m와 100m는 반송주파수가 최적화되지 않은 상태로 채널코딩의 유효성만 확인된다. Fig. 40에서 보는바와 같이 채널대역

폭이 넓고 상쇄 간섭 페이딩이 상대적으로 작은 400m는 최적화가 필요한 주파수 대역이 좁다.

Table 22. Performance of 4CH-4FSK with and without RS code

거리	4FSK	4FSK/RS
	800 bps	800 bps
50m		
BER	0.04	0.015
100m		
BER	0.06	0.01
400m		
BER	0	0

나. 부산 해역 실험 평가

적응형 음향 통신 모뎀의 목표 전송성능은 1) 비트 오류율 10^{-4} 이하, 2) 전송률 1 kbps, 3) 최대통신거리 5 km, 4) 해역수심 50 m 이하, 5) AUV 최대속도 3 kts이하에서 운용 가능한 시스템이다.

앞 절의 적응형 AUV 용 모뎀 설계 알고리즘을 구현한 최종적인 모뎀의 성능 실험은 부산 해운대 앞 수심 약 50m 해역에서 2016년 4월 17일 수행되었다. 해상실험의 구성도와 파라메타는 Fig. 67과 Table 23과 같다.

송·수신기의 거리는 300 m, 600 m, 1200 m, 2400 m이며, 모선과 AUV의 가상 시나리오를 기준으로 AUV에 해당하는 송신기(ITC-1001)는 수심 20 m, 모선에 해당하는 수신기(B&K 8106)는 수심은 10 m로 설정하였다. 실험 해역의 거리에 따른 수심은 40 m ~ 50 m이다.

1 kbps 정보 전송을 성능 평가를 위해 5CH-4FSK(5CH * 400 bps=2 kbps)로 적응형 음향 통신 모뎀의 성능평가를 실시하였다. 채널 코딩으로 모뎀의 실제 전송률은 2 kbps이다.

송신측은 고정되어 있고, 수신측은 표류상태로 하여 각각의 송수신기 거리는 시작시점의 거리이다. 종료시점의 거리는 시작시점 거리와 약 50-100m 오차를 보인다. 송신기의 출력 감도가 낮아 5km 실험은 수행할 수 없었다.

실험 해역의 수심에 따른 음속은 AML Oceanographic Base X를 이용하여 측정하였으며, 각 지점별 음속은 Fig.68과 같이 해면에서 수심 ~ 50 m까지 6 m/s의 음속 변화를 보인다. Fig. 69는 해상실험 장비로 송신측은 B&K 2713, LabVIEW시스템, 송신기(ITC-1001)로 구성되어 있으며, 수신측은 B&K 2610, LabVIEW시스템, 수신기(B&K 8106)로 구성된다.

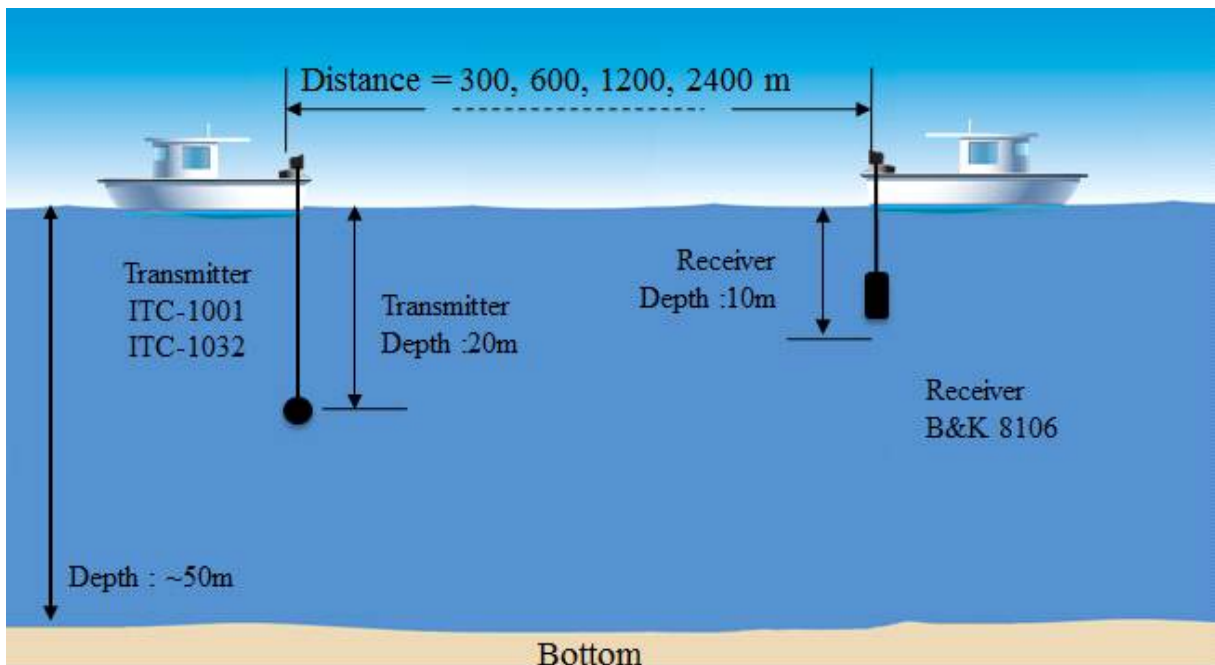


Fig. 65. Experimental configuration for adaptive acoustic communication modem performance in Haeundae

Table 23. Sea experimental parameters for adaptive acoustic communication modem performance in Haeundae

Modulation	5CH-4FSK, Adaptive 5CH-4FSK/RS
Channel coding	Reed-Solomon
Channel number	5
Sea depth(m)	~50
Tx and Rx depth(m)	20, 10
Tx-Rx Distance(m)	300, 600, 1200, 2400
Bottom property	Mud, sand
Carrier frequency(kHz)	13 ~ 23
AUV data rate(bps)	200 bps/Ch
Information data (bit)	20000

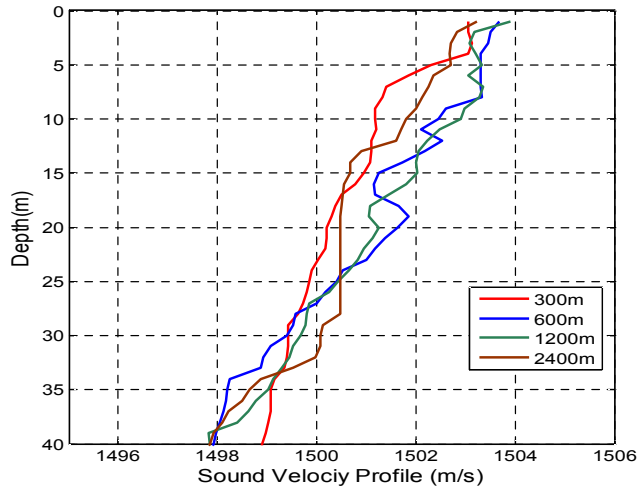


Fig. 66. Sound velocity profile at each range

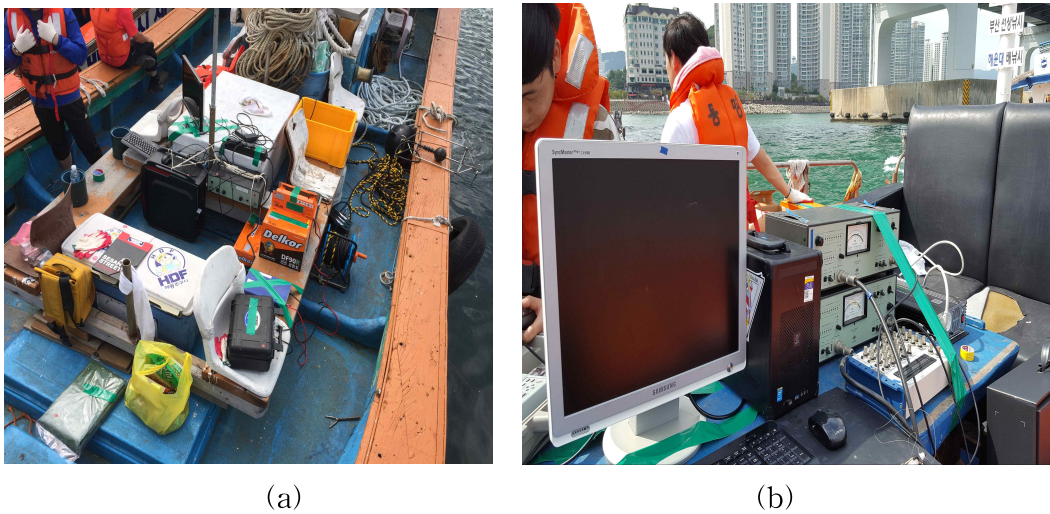


Fig. 67. Photos of sea experiment ,(a) source side, (b) receiver side

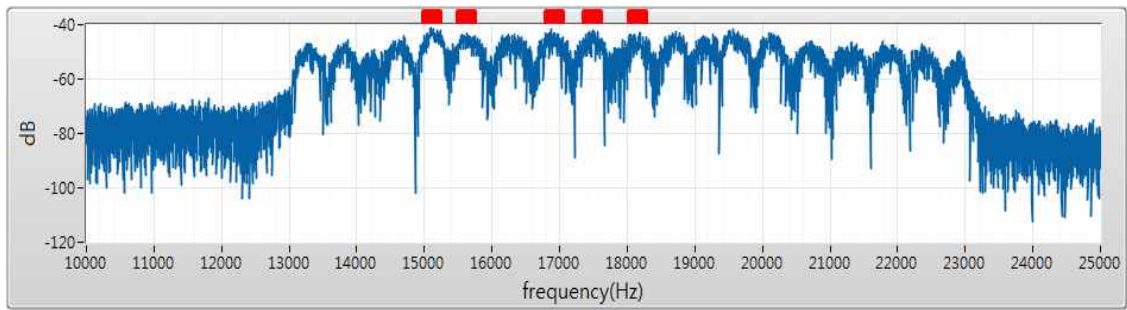
LFM 신호를 이용한 각 거리별 주파수 응답 특성은 Fig. 70이다. Fig. 70에서 ■로 표시된 각 채널 반송주파수 그룹은 Fig.59의 알고리즘으로 구한 것이다. 각 거리별로 간섭 패턴이 다르므로 서로 다른 반송주파수 그룹을 보이고 실제 시스템은 실시간으로 변화하여 적응적으로 선택된다.

Fig. 70(a)는 거리 300 m로 각 채널 반송파 시작주파수는 15kHz, 15.5kHz, 19kHz, 19.5kHz, 20kHz로 간섭 패턴에서 보강간섭 주파수 대역이 선택되어 있다. 지연확산 분석에 의한 -3 dB 대역폭은 약 75Hz로 전송율이 150 bps 이하에서 주파수 비 선택적인 채널이다. Fig. 70(b)는 600 m로 각 채널 반송파 시작주파수는 14.5kHz, 16.5kHz, 18kHz, 19kHz, 20kHz로 간섭 패턴

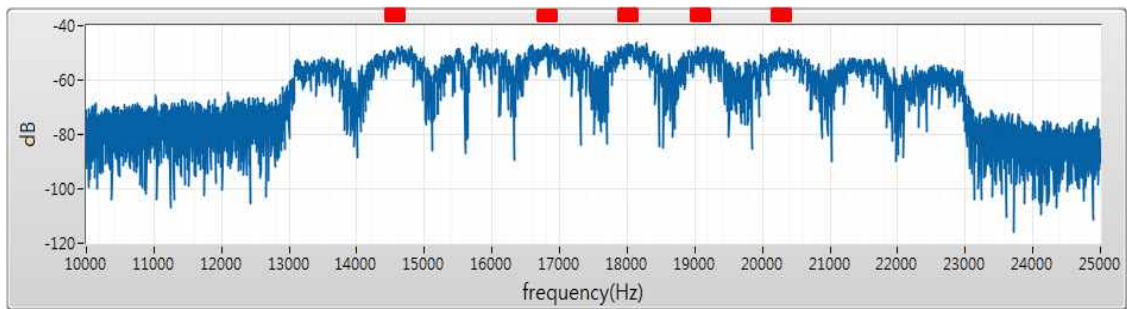
에서 보강간섭 주파수 대역이 선택되어 있다. 지연확산 분석에 의한 -3 dB 대역폭은 약 100Hz로 전송율이 200 bps 이하에서 주파수 비 선택적인 채널이다. Fig. 70(c)는 1200 m로 각 채널 반송파 시작주파수는 15kHz, 15.5kHz, 17.5kHz, 18kHz 18.5kHz이며 간섭 패턴에서 보강간섭 주파수 대역이 선택되어 있다. 지연확산 분석에 의한 -3 dB 대역폭은 약 140Hz로 전송율이 280 bps 이하에서 주파수 비 선택적인 채널이다. Fig. 70(d)는 2400 m로 각 채널 반송파 시작주파수는 15kHz, 15.5kHz, 16kHz, 16.5kHz, 17.5kHz이며 간섭 패턴에서 보강간섭 주파수 대역이 선택되어 있다. 지연확산 분석에 의한 -3 dB 대역폭은 약 180Hz로 전송율이 360 bps 이하에서 주파수 비 선택적인 채널이다.

Table 24는 거리 별 5CH-4FSK방식과 적응형 5CH-4FSK/RS의 성능을 비교한 것이다. 전자는 각 채널 시작 반송주파수가 16kHz, 16.5kHz, 17kHz, 17.5kHz 및 18kHz로 고정되어 있고 후자는 각 채널 반송주파수가 적응적으로 선택된다. 5CH-4FSK 방식에서 300m, 600m, 1200m 및 2400m의 각 거리의 오류율은 0.175, 0.07, 0.038, 및 0.0027을 보인다. 그러나 본 연구에서 제안하는 적응형 5CH-4FSK/RS 모델의 오류율은 각각 0.053, 0.00035, 0.00025, 및 0.0000이다. 600m, 1200m 및 2400m의 오류율은 목표치 10^{-4} 을 달성한다.

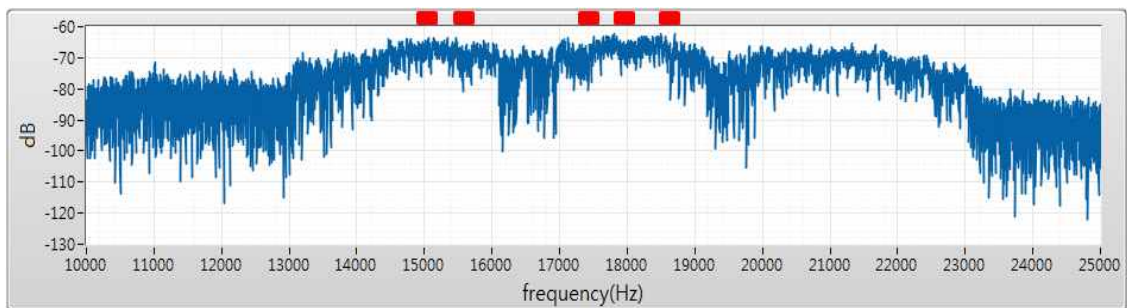
그러나 300m 거리에서는 적응형에서도 요구하는 비트 오류율을 만족하지 못한다. 300m는 채널대역폭이 75Hz로 주파수 선택적인 채널이다. 해결방안은 채널대역폭에 따른 전송율의 적응적 변화를 추가하여 해결할 수 있을 것이다.



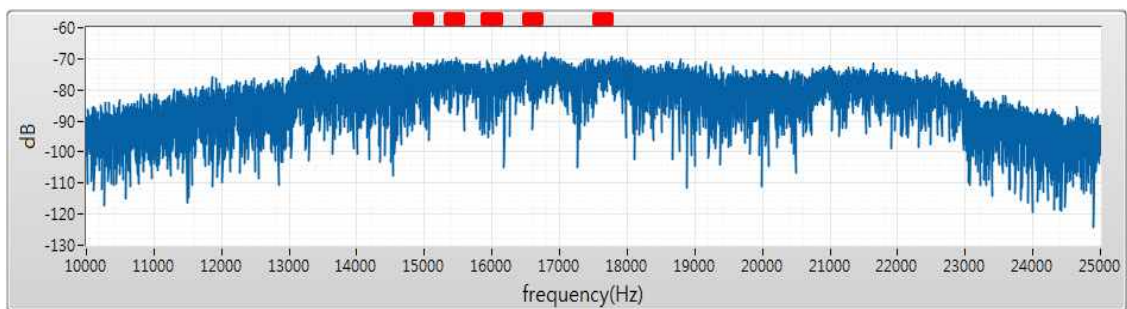
(a)



(b)










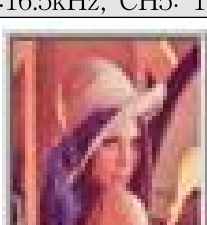
(c)



(d)

Fig.68. Channel frequency response and carrier frequency group of adaptive 5CH-4FSK/RS at each range, (a) 300 m, (b) 600 m, (c) 1200 m, (d) 2400 m

Table 24. Performance of 5CH-4FSK and adaptive 5CH-4FSK/RS at each range

Range (m)	5CH-4FSK	Adaptive 5CH-4FSK/RS
	Start Frequency	Start Frequency
	CH1: 16kHz, CH2: 16.5kHz, CH3: 17kHz, CH4: 17.5kHz, CH5: 18kHz	CH1: 15kHz, CH2: 15.5kHz, CH3: 19kHz, CH4: 19.5kHz, CH5: 20kHz
300		
BER	0.175	0.053
	CH1: 16kHz, CH2: 16.5kHz, CH3: 17kHz, CH4: 17.5kHz, CH5: 18kHz	CH1: 14.5kHz, CH2: 16.5kHz, CH3: 18kHz, CH4: 19kHz, CH5: 20kHz
600		
BER	0.07	0.00035
	CH1: 16kHz, CH2: 16.5kHz, CH3: 17kHz, CH4: 17.5kHz, CH5: 18kHz	CH1: 15kHz, CH2: 15.5kHz, CH3: 17.5kHz, CH4: 18kHz, CH5: 18.5kHz
1200		
BER	0.038	0.00025
	CH1: 16kHz, CH2: 16.5kHz, CH3: 17kHz, CH4: 17.5kHz, CH5: 18kHz	CH1: 15kHz, CH2: 15.5kHz, CH3: 16kHz, CH4: 16.5kHz, CH5: 17.5kHz
2400		
BER	0.0027	0.0000

4장 과제목표 달성도 및 대외기여도

제1절 과제목표 및 달성도

해양 조사, 자원탐사, 수중케이블 설치/감시 및 수중 구조물 수리를 위한 자율수중로봇(AUV)은 원격조정로봇(ROV)에 비해 제어 케이블이 없어 운용범위가 넓다. 그러나 모선과 AUV 간의 감시정보 송수신을 담당하는 음향통신 모뎀이 요구되고 모뎀의 성능은 수심, 거리, 해저 물성 및 해면상태 등의 시공간적인 해양 음향 통신 채널 환경 변화에 좌우된다. 따라서 AUV의 운용 범위도 해양환경 변화에 제한을 받게 된다. 본 연구의 목적은 해양 환경 변화에 따른 음향통신 음영구역 변화 즉 음향통신 모뎀 성능 변화를 해석하여 AUV 감시를 위한 해양 환경 적응형 수중 음향 통신 모뎀을 개발하는 것이다.

정량적 목표는 적응형 음향모뎀 설계/구현 및 수조/천해 성능평가 비트오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1kbps, 최대통신거리 5km, 해역수심50m, AUV 최대속도 3kts에서 신뢰성 있는 모뎀을 설계하는 것이다.

수중음향 통신망 등에서 요구되는 대역효율이 높은 동기식 위상변조 방식이나 페이딩을 고려한 다이버시티 기법이 음향통신 모뎀으로 연구 개발되고 있으나 이러한 방식에서 요구되는 반송주파수 옵션, 등화기 탭 수의 적응적 변화 등의 추정은 시스템의 복잡성을 증가시키고 강인성이나 신뢰성이 떨어진다. 시·공간적으로 변화하는 천해 통신채널에서, 단일 사용자 및 정보량이 적은 AUV의 운동/제어 정보만 전송하는 경우를 가정하여 본 연구에서는 비동기식 FSK 방식의 음향모뎀을 연구하였다.

1년의 연구 결과 시공간적인 해양환경변화가 있는 50m 이하의 천해 음향 통신 채널의 거리/주파수 종속 채널대역과 페이딩 등에 의한 음향 통신모뎀의 성능 변화를 해결하는 해양 환경 적응형 수중 음향 통신 모뎀은 5CH-4FSK/RS 방식으로 제안된다. 50m해역에서 2400m까지 목표하는 비트 오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1kbps의 성능을 달성하였다. 송신기 출력이 해결되면 5km 까지 목표를 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 300m 이하에서는 비트 오류율 10^{-4} 이하를 충족하지 못한다. 근거리에서는 채널대역의 최적화가 추가적으로 요구됨을 확인하였고 3장의 채널 대역 해석 결과를 적용하면 해결 가능한 기술이다. Table 25는 과제 내용별 달성도이다.

학술적인 성과목표(SCI 논문 3편, 국내논문 3편)에는 달성하지 못하였으나 1편의 SCI논문과 2편의 국내논문 게재 성과를 달성하였다[23-25]. 1년간의 연구 종료시점에 국내외 6편의 논문 발표 성과를 달성하는 것은 시간적으로 부족하였다.

Table 25 Achievements of study

과제내용	달성 내용	달성도 (%)
모선/AUV 상태/위치 정보 전송용량 해석	-AUV 명령/제어 신호 용량: 최대 1kbps -명령/제어 신호 패킷 구조 설계	100
복잡도/강인성/신뢰성을 고려한 최적 통신방식 설계	-MFSK, QPSK, OFDM의 전송률, 주파수 선택성, 페이딩에 따른 오류율 평가 -전송률과 페이딩에 따른 RS채널 코딩 성능 평가	90
수중음향채널 다중경로 간섭, 주파수 선택성 및 페이딩 특성 해석	-다중경로 채널의 주파수 선택성 이론 해석 -다중경로 시·공간 변화 채널의 Rayleigh/Rice 페이딩 이론 해석 -실 해역 실험 평가/검정	100
LabVIEW 기반 통신방식 구현 및 구조/전해 실험	-DAQ 설계, Frame 동기, Carrier 추정 기술 확립 -LabView 기반 통신시스템 구현 기술 확립	90
통신방식과 음향채널을 연계한 상시 접촉 적응형 모델 설계	-다중경로 시·공간 변화 채널의 MFSK 오류율 평가 -다중경로 시·공간 변화 채널의 통신 성능변화 해석 -통신 성능변화 해결을 위한 MFSK/QPSK 최적화 및 상시 접촉 적응형 모델 설계	90
다운링크/업 링크 전송 패킷설계	-주파수 종속 송수신기 응답, 손실 및 배경잡음에 따른 SNR 및 양방향 링크 거리 해석 -양방향 전이중 주파수 분할방식: 15kHz/30kHz -시간 일관성에 따른 패킷 설계	90
적응형 음향모델 성능 구조/전해 성능평가	비트오류율 10^{-4} 이하, 전송률 1kbps, 최대통신거리 5km, 해역수심 50m, AUV 최대속도 3kts의 모델 설계 및 성능평가	90

제2절 과제 대외기여도

1. 수중로봇 기술과 해양산업발전

수중 로봇을 이용한 원격 해양 조사, 감시, 관측 및 수중 건설에 필수적인 장치로 해양장비 산업과 국토해양부의 2013년 연구개발 사업인 '미래 해양개발을 위한 수중건설로봇' 개발 사업에 부응하여 파급효과가 크다고 판단된다. 아울러 140개 국가 아젠다 중 3.해양 신성장 동력 창출 및 체계적 해양관리, 24.국가 과학기술 혁신역량 강화 93.항공, 해양 등 교통안전 선진화 안전과 통합의 사회 및 구현에 부합하는 연구이다. 아울러 경제적으로 2019년의 6조원에 이르는 해양로봇시장에 대응하는 기술이다.

- 천해용 고가/고 기능 AUV의 상시 접촉 감시
- 경/중 부하 수중 구조물 설치용 AUV 제어
- AUV를 포함한 이동형 무선 수중 로봇의 감시, 운항 및 회수에 필수적.
- 해양 탐사 관측자료 실시간 전송에 활용가능.
- 해저 고정 해양 수중 구조물의 감시 및 수중 머니플레이터의 제어에 적용.
- 연근해 생태계 모니터링 관리에 적용.
- 해양음향 탐사 장비산업의 경쟁력에 기여.
- 상용 수중 음향 모뎀이 전무한 국내 이 분야 장비 산업 경쟁력 증진.

2. 수중 음향 통신 기술 발전

수중 음향 통신 채널 요소와 모뎀 설계 요소들 간의 상관성에 대한 이론 및 실험 결과, 다중 경로 페이딩에 대응하는 RS 채널 코딩 유효성 평가 결과, FSK/QPSK등의 수조 및 실 해역 성능 평가 결과들은 국내 수중 음향 통신 기술의 수준 향상과 소수의 관련 연구자들의 비교 기초 연구, 음향통신 모뎀의 설계/구현/실험 평가 및 연구저변 확대에 기여할 것이다.

- 해양환경 적응형 음향통신 모뎀 설계/성능평가
 - 음향 채널 변수와 모뎀 설계 변수들의 상관성 해석
 - 해양 환경 적응형 다채널 MFSK 모뎀 설계
(전송률, 패킷구조, 프레임동기, 반송파/동기, 반송파 최적화 등)
- 통신채널 매개변수의 유기적 관련성 및 통신모뎀 설계의 기술적 접근 방법
- LabVIEW 기반 SW 및 HW 수중 음향 모뎀 구현 기술

제 5장 과제 결과의 활용계획

1. 과제결과의 활용방안

- 천해용 고가/고 기능 AUV의 상시 접촉 감시
- 경/중 부하 수중 구조물 설치용 AUV 제어
- AUV를 포함한 이동형 무선 수중 로봇의 감시, 운항 및 회수
- 해양 탐사 관측자료 실시간 전송에 활용
- 해저 고정 해양 수중 구조물의 감시 및 수중 머니플레이터의 제어에 적용
- 연근해 생태계 모니터링 관리에 적용
- LabVIEW 기반 SW 및 HW 기술은 상용의 다양한 수중 음향 모뎀 후속 연구

2. 과제결과의 기대효과

- 천해 50m이하 해역의 거리/주파수/해상상태/해저물성에 따른 통신채널 모델링
 - 해양 환경(해상 상태, 해저물성)에 따른 AUV와 모선의 거리/주파수 종속 다중경로 간섭 및 지연 확산 모델
 - 해양 환경(해상 상태, 해저물성)에 따른 AUV와 모선의 거리/주파수 종속 페이딩 모델
 - 음향통신 모뎀 성능을 결정하는 다양한 매개변수들의 유기적 관련성 해석 기술
- 천해 통신 성능변화 해결을 위한 통신방식 최적화
 - 해양 환경(해상 상태, 해저물성)에 따른 AUV와 모선의 거리/주파수 종속 통신 성능변화 해석 기술
 - 해양 환경(해상 상태, 해저물성)에 따른 AUV와 모선간의 통신 음영 구역 해결을 위한 통신방식
- AUV/모선 상시 접촉 적응형 수중 음향 통신 모뎀 설계 변수 최적화
 - AUV와 모선의 거리/주파수 종속 통신 음영구역 제거를 위한 음향 모뎀 설계 변수 최적화
 - LabVIEW 기반 SW/HW 구현 및 제작 개발 및 성능 평가 기술 보급
 - FPGA 기반 해양환경 적응형 상용 음향모뎀 시제품 제작에 활용
- 상용 수중 음향 모뎀이 전무한 국내 이 분야 장비 산업 경쟁력 증진
- 기타
 - 수중 음향 모뎀의 SW/HW 기술은 해양 장비 산업 발전에 기여

- 천해 시·공간 변화 음향 채널에 대응하는 모델 설계 요소 기술 및 국내외 학문적 수준 향상
- 본 기술은 수중음향학, 통신, 로봇 기술 및 해양장비공학 등의 복합과학 분야 극소수 국내전문가 집단의 연구저변 확대, 기술력 기여 및 인력양성 효과

제 6 장 참고문헌

- [1] <http://www.kiost.ac/>
- [2] <http://www.teledynebenthos.com>
- [3] <http://www.link-quest.com>.
- [4] <https://www.evologics.de>
- [5] <http://www.jamstec.go.jp/>
- [6] J. Park, K. Park, and J. R. Yoon, "Underwater acoustic communication channel simulator for flat fading," *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, pp.07HG05, 2010.
- [7] P. A. van Walree, "Propagation and scattering effects in underwater acoustic communication channels," *IEEE J. Oceanic Eng.* 38, pp.614-631, 2013.
- [8] K. Park, J. Park, S. W. Lee, J. W. Jung, J. Shin and J. R. Yoon, "Performance evaluation of underwater acoustic communication in frequency selective shallow water" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* 32, pp.95-103, 2013.
- [9] A. Bruce Carlson, Paul B. Crilly, Janet C. Rutledge, *Communication Systems*, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 2002.
- [10] H. Fang, X. Hu and Ru Xu, "An Implementation of time and frequency synchronization for Carrier Interferometry OFDM in and Underwater Acoustic Channel", *Circuits, Communications and Systems*, 2009. PACCS '09. Pacific-Asia Conference, Chengdu, pp.23-26, 2009.
- [11] X. Hu, R. Xu, W. Wei, J. Liu and Y. Xie, "A novel scheme of Timing Synchronization For OFDM Underwater Communication System", *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, pp.1-5, 2008.
- [12] J. Tao, Zheng, Y.R., C. Xiao, Yang, T.C. and W. Yang, "Channel Estimation, Equalization and Phase Correction for Single Carrier Underwater Acoustic Communications ", *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, pp.1-6, 2008.
- [13] Yahong R. Z., "Channel Estimation and Phase-Correction for Robust Underwater Acoustic Communications", *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, pp.1-6, 2007.
- [14] 박종원, 임용근, 최영철, 김승근, 변성훈, 김시문, "수중 음향 데이터 통신 시스템 구현 및 실험", *선박해양기술학회*, 제41호, pp.45-52, 2006.
- [15] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2th ed. New Hersey, NJ:Prentice-Hall, 2002.
- [16] J. Meng and G. Kang, "A novel OFDM synchronization algorithm based on CAZAC sequence," *Proc. Int. Confer. Comput. App. Sys. Modeling (ICCA SM)*, pp.634-637, 2010.

- [17] Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound, Third Edition, McGraw -Hill Book Company, 1983.
- [18] Milica Stojanovic, "Recent Advance in High Speed Underwater Acoustic Communications," IEEE Journal of Oceanic engineering, Vol. 21, No. 2, pp.125-136, 1996.
- [19] M. Stojanovic and J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization," IEEE Communication Magazine Vol. 47, pp. 84-89, 2009.
- [20] M Chitre, S Shahabudeen, M Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges", Marine technology society, Vol. 42 (1), pp.103-116, 2008.
- [21] 박용완, 홍인기, 최정희, "이동통신공학", 생능출판사, 제2판, 2007.
- [22] John G. Proakis, Digital Communications, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 2000.
- [23] M. Bae, J. Park, J. Kim, D. Xue, K. Park, and J. R. Yoon, "Frequency-selective fading statistics of shallow-water acoustic communication channel with a few multipaths," Jpn. J. Appl. Phys. 55, pp.07KG03, 2016.
- [24] J. Kim, J. Park, M. Bae, K. Park, and J. R. Yoon, "Effects of frequency dependent multipath fading on non-coherent underwater communication system", J. Acoust. Soc. Kr. 35, pp.293-302, 2016.
- [25] J. Park, M. Bae, J. Kim, and J. R. Yoon, "Performance of carrier frequency offset compensation using CAZAC code in time and spatial variant underwater acoustic channel" , J. Korea Inst. Inf. Comm. Eng. 20, pp.1229-1236, 2016.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구 결과 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.