

## 부산인근 해역의 수중음향통신 채널특성과 다중반송파 시스템의 성능

김종주 · 박지현 · 배민자 · 윤종락\*

### Characteristics of Underwater Acoustic Channel and Performance of Multi-Carrier System in Littoral Ocean near Busan City

Jongjoo Kim · Jihyun Park · Minja Bae · Jong Rak Yoon\*

Dept. of Information and Communications Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

#### 요 약

수심이 얇은 연안에서는 다중경로에 의한 주파수 선택적인 페이딩이 수중음향통신시스템의 성능을 결정한다. 본 연구에서는 수심 약 50m이고 유효파고 0.5m, 사니질 저질인 부산인근 해역의 수중음향통신 채널의 특성과 다중반송파 음향통신시스템의 성능을 평가하였다. 송수신기 수평거리에 따른 다중경로 지연 확산과 시간영역 및 주파수 영역 페이딩 특성을 제시하고 전송률 1kbps인 5ch-4FSK 시스템의 비트 오류율을 평가하였다. 시간영역 페이딩 오류를 제거하기 위해 리드 솔로몬 코드를 적용하였다. 다중경로는 4개 이하로 구성되며 송수신기 거리가 증가하면 시간 및 주파수 영역 페이딩은 작아지며 시스템의 비트 오류율은 감소하고 600m 이상의 거리에서 비트 오류율은 약 10<sup>-4</sup> 이었다.

#### ABSTRACT

The frequency selective fading by multipaths determines a performance of underwater acoustic communication system in shallow littoral ocean. In this study, a characteristics of underwater acoustic channel and performance of multi-carrier system is evaluated in littoral ocean with a 50m deep water, an effective wave height of 0.5m and sandy mud bottom near Busan city. A multipath delay spread and time and frequency domain are presented as a function of a transmitter-to-receiver range. A bit-error-rate of a 5 channel 4FSK(Frequency Shift Keying) with a transmission rate of 1kbps, is examined and RS(Reed-Solomon) code is also adopted to remove a burst error due to time domain fading. A number of multipath are less than four and a bit-error-rate is decreased as an increase of a transmitter-to-receiver range which gives a congestion of multi-paths resulting in a decrease of time and frequency domain fading. The measured bit-error-rate is about 10<sup>-4</sup> at greater than 600m of transmitter-to-receiver range.

**키워드** : 수중 음향 통신 시스템, 수중 다중경로, 지연확산, 다중경로 페이딩, 채널코딩

**Key word** : Underwater acoustic communication system, Underwater multipath, Delay spread, Multipath fading, Channel coding

Received 28 July 2017, Revised 08 August 2017, Accepted 21 August 2017

\* Corresponding Author Jong Rak Yoon (E-mail: jryoon@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-6233)

Department of Information and Communications Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.12.2394>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

국방, 수중건설, 해양탐사 및 해양자원개발이나 해양 환경 감시 등에서 요구되는 수중통신시스템의 성능은 송수신기의 거리, 운용해역의 수심, 해면과 해저 경계면 및 해수 매질의 음향물성 등의 수중음향통신 채널의 시공간적 변화에 좌우된다.

채널의 시공간적 변화는 신호의 시간 및 주파수 영역 페이딩, 도플러 확산, 다중경로 간섭, 다중경로 확산 및 채널 대역폭의 크기를 변화시켜 전송신호의 심벌 간 간섭이나 심벌 내 간섭으로 위상 변화와 신호 대 잡음비 감쇄를 야기하여 비트 오류율 증가를 야기한다[1].

수직채널로 정의되는 수중음향채널은 지향성 송수신기가 수직방향으로 위치하여 해면과 해저의 경계면 반사 경로를 무시할 수 있는 직접파만의 경로가 있는 채널로 채널 대역이 넓어 고속전송이 가능한 채널이다. 반면 수평채널은 수심에 비해 상대적으로 먼 거리에 송수신기가 위치하여 직접파와 더불어 경계면 반사경로와 매질내의 굴절파로 구성되는 다중경로 확산이 크게 되어 채널 대역이 좁아 심벌 간 간섭으로 고속전송이 어렵다.

수온 약층이 없는 천해는 깊이에 따른 수온의 변화가 심하지 않아 매질내의 굴절 경로는 수신되지 않고 연안의 퇴적 지반은 모래 혹은 펄로 구성되어 있다. 이러한 환경에서 수신되는 다중경로는 직접파, 해면반사파 및 해저 반사파로 구성되고 2회 이상 해저에서 반사되는 경로는 상대적으로 신호세기가 약하게 되며 기존의 연구 결과에 의하면 천해의 다중경로는 3~4개로 제한됨을 보인다[2-5]. 이러한 조건에서 송수신기가 수심에 비해 상대적으로 수평 방향으로 원거리에 위치하는 경우 다중경로 확산도 작게 되어 채널 대역은 넓어진다. 그러나 신호대역을 채널대역보다 좁게 하여 심벌 간 간섭을 억제하더라도 수신 신호세기는 주파수에 따라 결정되는 심벌내의 다중경로 간섭 크기 즉 주파수 선택적 페이딩에 의해 좌우된다[2,6].

따라서 전송신호 대역을 다수의 반송파로 나누어 전송하는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)이나 MFSK(Mary Frequency Shift Keying)에서 특정 반송파가 주파수 선택적인 페이딩의 상쇄 간섭(deep fading) 주파수가 될 경우 낮은 SNR이 되어 오류가 증가한다. 이에 대응하기 위해서

MMSE(Minimum Mean Square Error)를 적용한 등화기를 적용하지만 시변 채널의 경우 OFDM의 부반송파간의 직교성이 확보되지 못하여 부가적인 오류의 원인이 된다[7]. 저속전송의 경우는 심벌 내의 다중경로 간섭에 의한 상쇄간섭주파수를 회피하여 반송주파수를 선택할 수 있으나 대역효율이 좋은 고속전송을 위한 OFDM이나 MFSK 시스템의 경우 반송파의 선택은 제한된다.

본 연구에서는 채널대역이 좁은 천해인 해역에서 수중무인잠수정의 제어 혹은 수중 감시 장치 제어 등에서 요구되는 전송 시스템을 고려하여 전송을 1kbps인 5Ch-4FSK 다중반송파 시스템을 설계하고 부산인근 해역의 주파수 선택적인 페이딩에 의한 심벌 내의 다중경로 간섭에 의한 상쇄간섭주파수(deep fading frequency) 따른 비트 오류율을 해석하였다.

## II. 천해 다중경로 채널 모델

송신기에서 송신된 신호는 해면과 해저 경계면 반사와 매질 음속구조에 의해 고유경로를 따라 수신기에 수신된다. 해면이 파도에 의해 변동하거나 송신기와 수신기가 운동하면 고유경로는 시간적으로 변화한다. 따라서 다중경로 채널의 시변 임펄스 응답  $h_c(\tau; t)$ 는 식 (1)로 주어진다.

$$h_c(\tau; t) = \sum_{i=0}^N \alpha_i(t) e^{-j2\pi f_c \tau_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (1)$$

여기서  $\alpha_i(t)$ 와  $\tau_i(t)$ 는 각각  $i$ 번째 다중경로 신호의 크기 및 지연 시간이고  $f_c$ 는 반송주파수이다.  $i$ 번째 다중경로 신호가 해면 반사파 신호라고 가정하고 해면 파고가 반송파의 파장에 비해 상대적으로 큰 경우 수신기에 도달하는 반사파 신호 크기는 시 불변 거울면 반사(specular reflection) 성분  $\alpha_i$ 와 시변 산란 성분  $\beta_i(t)$ 로 식(2)로 표현할 수 있다.

$$h_i(t) = \alpha_i e^{j2\pi f_c \tau_i} + \beta_i(t) e^{j\phi(t)} = r_i(t) e^{j\theta_i(t)} \quad (2)$$

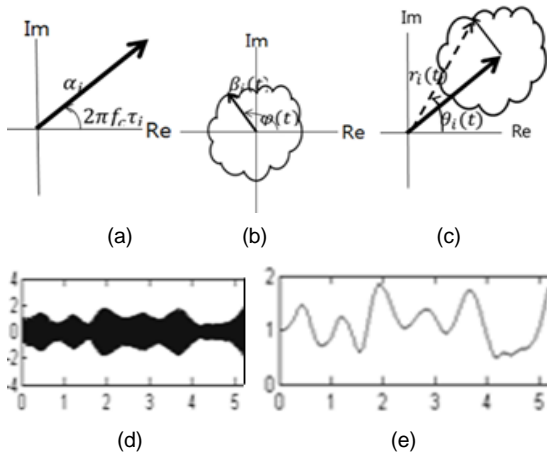
그림 1은 식(2)의 페이저(phasor)의 표현 및 수신 신호의 파형과 포락선  $|r_i(t)|$ 이다. 시불변성분  $\alpha_i$ 는 해면의 Rayleigh 거칠기  $R_{rgh}$ 의 함수로 식(3)으로 주어진

다[8].

$$\alpha_i = -\exp[-2(kh_s \sin\theta)^2] = -\exp[2R_{rgh}^2] \quad (3)$$

$$R_{rgh} = kh_s \sin(\theta) \quad (4)$$

여기서,  $k, h_s, \theta$  는 각각 파수, 해면의 유효파고 및 해면 입사각이다. 저주파수, 거울 해면 및 작은 입사각 조건에서  $\alpha_i$ 는 -1로 완전 반사 경계 조건이 되며 그 반대의 경우 시불변성분은 작아지고 시변 성분이 커지게 된다. 아울러 송수신기의 거리가 먼 경우 해면과 해저의 거칠기는 감소되어 시불변성분은 상대적으로 커지게 된다. 진폭의 포락선  $|r_i(t)|$ 의 분포특성은 시불변성분이 없는 경우 Rayleigh, 있는 경우 Rice 분포특성을 갖는다[8-10].



**Fig. 1** 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 amplitude fading ( $|r_i(t)|$ : envelope).

송수신기 거리가 고정되어 있고 식(1)에서 직접파( $i = 0$ )와 해면반사파( $i = 1$ )를 수신한다고 가정하면 수신신호의 시불변성분의 페이저(phasor)는 다음의 식(5)로 주어진다.

$$h = \alpha_0 e^{j2\pi f_c \tau_0} + \alpha_1 e^{j2\pi f_c \tau_1} \quad (5)$$

$$\Rightarrow \alpha_0 + \alpha_1 e^{j2\pi f_c (\tau_1 - \tau_0)} = \alpha_0 + \alpha_1 e^{j\theta}$$

$$\tau_1 - \tau_0 = \frac{(R_1 - R_0)}{c} \quad (6)$$

여기서  $R_0$ 과  $R_1$ 은 직접파와 해면반사파 각 경로의 전파거리이다. 반송 주파수는 수 kHz 이상으로 고 주파수이므로 작은 시간차에서도 위상차  $\theta$ 는 크게 되고 동일한 시간차(송수신기 고정)에서 주파수에 따라 위상이 변화하여 수신신호의 크기는 변화한다. 신호크기는 보강 간섭 주파수에서 ( $\alpha_0 + \alpha_1$ ), 상쇄 간섭 주파수에서 ( $\alpha_0 - \alpha_1$ )으로 된다. 따라서 심벌 내에서 다중경로파가 간섭하는 경우 반송 주파수에 따라 수신 신호의 크기가 달라진다. 우세한 다중경로가 3개 이상일 경우 식(5)를 확장하여 해석할 수 있다. 아울러 그림 1(d)와 (e)에서 보는 바와 같이 시변 성분은 시간에 따른 신호 페이딩을 야기하며 원거리에서는 그 크기가 감소한다[9,10].

### III. 해상실험 환경 및 수중통신시스템

해상실험은 2016년 9월 25일 부산 해운대 앞바다 수심 약 50m에서 수행되었다. 실험 장치 구성은 그림 2와 같다. 해면 상태의 사진은 그림 3과 같고 그림 3에 보이는 직경 20cm인 부이의 크기와 비교하면 실험 당시의 유효파고는 약 0.5m로 관측되었다. 송수신기의 거리는 수평거리 기준으로 6dB의 전송손실 차이를 갖도록 약 300m, 600m, 1200m 및 2400m로 하였다. 거리에 따른 송신기의 출력은 일정하게 하여 300m와 2400m의 직접파의 크기 차이는 약 18dB이다. 송신기 탑재 선박은 고정되어 있고 수신기 탑재 선박은 설정된 거리에서 표류하도록 하였다. 단 300m의 경우는 송수신기 탑재 선박을 줄로 묶어 거리를 유지하였다. 각 거리에서 실험 준비를 포함한 데이터전송 시간은 최대 1분으로 수신기 탑재 선박 표류에 의해 거리오차가 발생하며 실험시의 조류 속도는 약 3kts로 거리오차의 최대 값은 약 90m이다. 수신기가 조류속도와 같이 이동한다면 최대도플러 확산은  $f_c \times 10^{-3}$ 으로 반송주파수  $f_c$ 를 10kHz로 가정하면 10Hz의 확산을 갖고 도플러 확산 영향을 무시하기 위한 전송 심벌주기는 100ms이하가 된다.

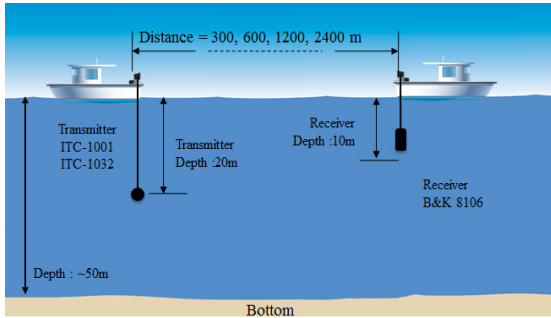


Fig. 2 Experimental configuration for adaptive acoustic communication modem performance in Haeundae.



Fig. 3 Sea state photograph of experimental site.

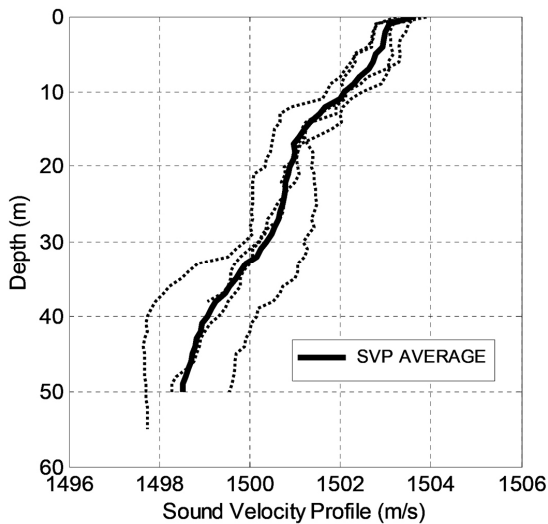


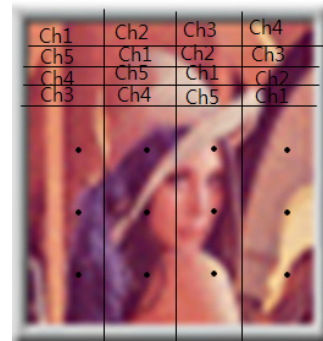
Fig. 4 Sound velocity profiles and an average of four different ranges.

그림 2에서 보는 바와 같이 송신기와 수신기의 수심은 각각 20m와 10m이며 수신기 탑재 선박에서 AML Oceanographic Base X를 이용하여 수직 음속 구조를 측정하였다. 그림 4는 각 거리의 수직음속 구조로 평균값은 약  $-0.12(\text{m/s}/\text{m})$ 의 기울기를 갖는다.

그림 5는 실험에 사용한 Lena 이미지로 그림 5 (a)는 20,000비트 Lena 이미지 각 픽셀의 데이터 배열이고 그림 5 (b)는 각 채널에 분할되는 이미지 구성도이다.



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Lena image transmitted and (b) image segment of each channel.

전송율 1kbps를 5ch로 전송하는 경우 각 채널의 전송율은 200bps이고 4FSK의 심벌율은 100sps이다. 이 경우 각 채널의 4FSK 직교주파수 간의 최소 주파수 편차는 50Hz이다. 본 연구에서는 최소 편차의 2배로 4FSK 주파수를 설정하고 채널간의 간섭을 최소화하기 위한 보호대역은 100Hz로 하였다. 각 채널의 주파수 할당은 표 1과 같다.

**Table. 1** Carrier frequency groups of 5Ch-4FSK.

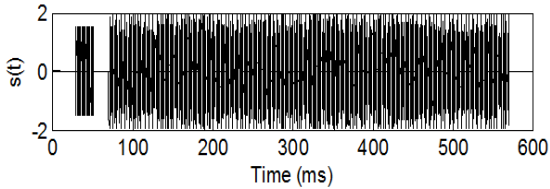
Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5
F1: 16000	F1: 16500	F1: 17000	F1: 17500	F1: 18000
F2: 16100	F2: 16600	F2: 17100	F2: 17600	F2: 18100
F3: 16200	F3: 16700	F3: 17200	F3: 17700	F3: 18200
F4: 16300	F4: 16800	F4: 17300	F4: 17800	F4: 18300

Each Ch. transmission rate: 200bps  
 Symbol rate: 100 sps  
 Each Ch. bandwidth:400Hz, Guard bandwidth: 100Hz

그림 6은 송신데이터의 프레임 구성도이다. 그림 6 (a)에서 PN(Pseudo Noise)신호는 프레임 동기화 채널 응답을 얻기 위한 신호이다. 그림 6 (b)는 이미지의 1/2에 해당하는 전송데이터 파형이다.

Silence 30ms	PN(1023, BW: 13~23kHz) 20ms	Silence 20ms	Data 500ms
-----------------	-----------------------------------	-----------------	---------------

(a)

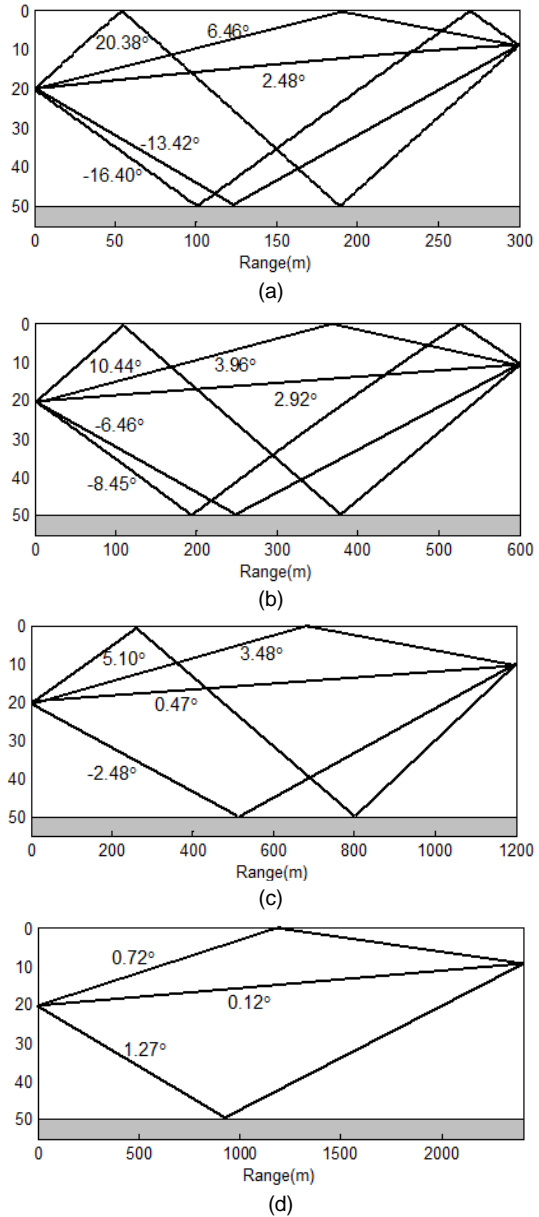


(b)

**Fig. 6** (a) Transmission frame structure and (b) signal of 5Ch-4FSK.

**IV. 수중음향 채널분석 및 실험결과**

그림 7은 그림 4의 평균적인 수직음속 구조로 구한 각 거리 별 5 개의 고유음선으로 각 음선의 숫자는 각 음선이 수평 방향 경계면에 입사하는 각도이다. 1,200m와 2,400m의 고유음선은 각각 4개 및 3개로 수신기가 원리에 위치하여 반사 경로 음선들이 중첩된 결과이다.



**Fig. 7** Simulated multipath eigenray trace results of four different Tx-Rx ranges: (a) 300m, (b) 600m, (c) 1,200m and (d) 2,400m.

그림 8은 1초 간격으로 송신한 20개의 PN 펄스신호를 정합필터 처리하여 구한 다중경로 세기 신호이다. 뚜렷한 실선으로 보이는 경로는 직접파 및 해저 반사파이고 시변 특성을 보이는 경로는 해면 반사 경로이다.

그림 8을 그림 7과 비교하면 근거리에서는 각 다중경로가 분리되어 다수의 반사파가 나타나고 시변 성분이 큰 경로는 해면 반사파이다. 원거리에서는 중첩되어 나타나며 식(3)의 해면 거칠기의 크기가 작아져 시변성분이 작아진다. 조사해역의 다중경로는 굴절 경로가 없는 천해로 신호 세기가 큰 경로는 5개 이하로 제한된다.

그림 9는 각 거리의 다중경로 세기 신호의 주파수 스펙트럼으로 거리별 채널 대역 특성이다. 300m, 600m, 1,200m 및 2,400m의 -3dB 채널 대역폭은 약 200Hz 이상이며 전체적으로 거리 증가에 따라 증가하나 1,200m는 여타 거리에 비해 좁다.

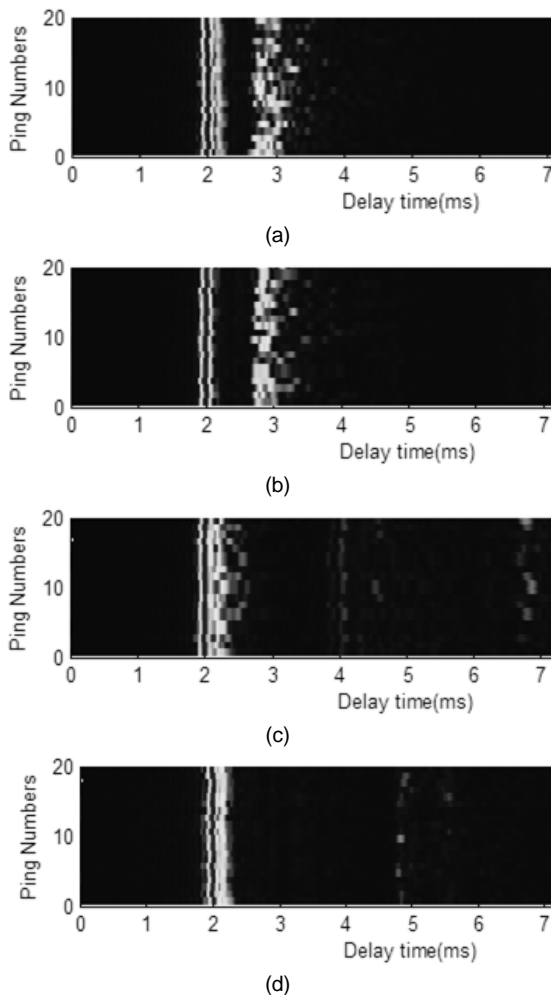


Fig. 8 Multipath intensity profiles of four different Tx-Rx ranges: (a) 300m, (b) 600m, (c) 1,200m and (d) 2,400m.

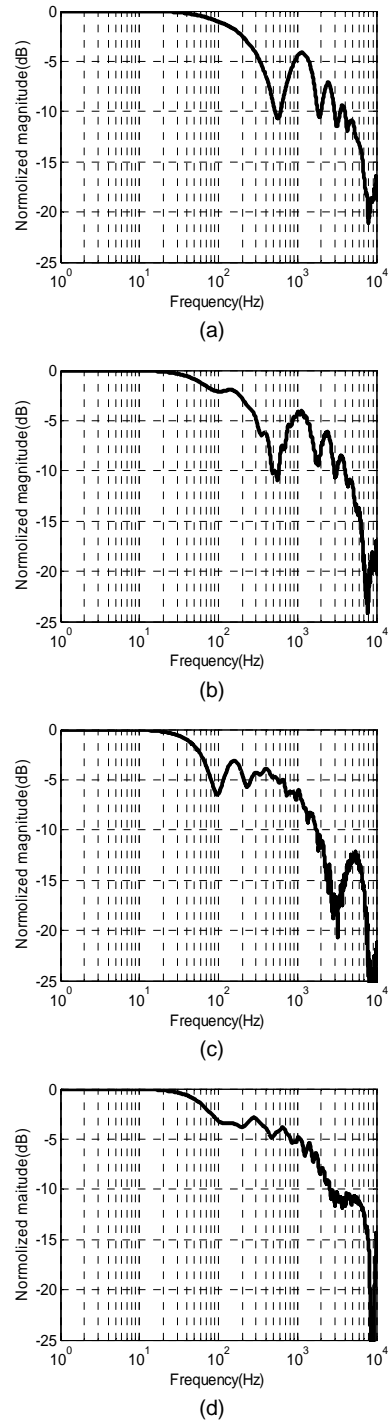


Fig. 9 Channel coherence bandwidths of four Tx-Rx ranges:(a) 300 m, (b) 600 m, (c) 1,200 m, (d) 2,400m.

채널 대역폭 기준을 200Hz로 가정하면 심벌 간 간섭을 무시할 수 있는 신호 대역폭은 200Hz 이하이며 1kbps 5Ch-4FSK의 신호대역폭은 심벌율의 약 1/2인 50Hz 이므로 심벌 간 간섭에 의한 비트오류는 무시할 수 있는 채널 대역이라 할 수 있다.

그림 10은 Lena 이미지 송신신호와 각 거리에서 수신한 PN 신호의 스펙트럼을 비교한 것이다. 거리에 따라 보강간섭 및 상쇄간섭 주파수 대역이 다르고 근거리의 경우가 원거리보다 주파수 선택적 페이딩이 뚜렷하다. 근거리에서 보강간섭과 상쇄간섭 레벨 차이가 크고 이미지 신호의 각 채널 스펙트럼은 거리에 따라 서로 다른 보강 혹은 상쇄 간섭 주파수 대역에 위치한다.

표 2는 각 거리별 수신 이미지 및 비트 오류율이다. 거리 증가에 따라 감소하여 오류율이 감소한다. 그림에서 화살표 방향으로 주기적으로 나타나는 오류의 위치는 그림 5(b)에서 보이는 각 채널 할당 영역과 일치하며 이때 각 채널의 주파수는 상쇄간섭주파수 대역에 위치한다. 거리증가에 따라 페이딩 주파수 폭이 커지므로 오류 주기가 커진다. 300m의 오류율은 2,400m의 오류율의 약 100배이다.

그림 1(d)와 (e)의 형태로 나타나는 시간영역 페이딩에 의한 군집오류를 제거하기 위해 본 연구자들의 기존 채널 코딩 연구[10-13]에서 적용한 RS코드를 적용하면 표 2의 우측 이미지에서 보는 바와 같이 최소 4배 이상의 오류율 개선을 보인다.

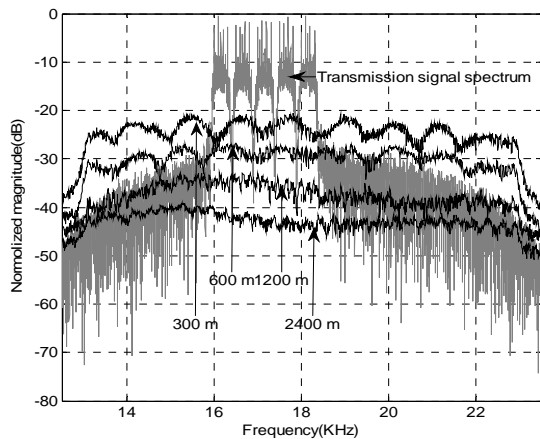


Fig. 10 Comparison of Lena image signal spectrum and channel frequency response at each range.

Table 2 Received image and a bit error rate of 5Ch-4FSK and 5Ch-4FSK/RS at each range.

Range (m)	5CH-4FSK	5CH-4FSK/RS
300		
BER	0,175	0,053
600		
BER	0,07	0,00035
1200		
BER	0,038	0,00025
2400		
BER	0,0027	0,0000

## V. 결론

수심 약 50m이고 유효파고 0.5m, 사니질 저질인 부산인근 해역에서 전송율 1kbps인 5ch-4FSK 시스템의 성능을 송수신기 수평거리 300m, 600m, 1,200m 및 2,400m에서 평가하였다. 각 거리의 다중 경로 확산과 다중경로 간섭에 따른 시간 및 주파수 영역 페이딩 모델을 제시하고 이에 따른 비트 오류율 특성을 해상실험으로 해석하였다.

다중경로는 4개 이하이며 시불변성분과 시변성분으로 구성되고 시변성분은 해면 반사경로이다. 거리 증가에 따라 다중경로는 중첩되어 나타나며 채널 대역은 약 200Hz 이었다. 주파수에 따라 보강간섭과 상쇄간섭에 의한 페이딩이 나타나고 거리증가에 따라 주파수 영역 페이딩은 감소하였다.

5Ch-4FSK의 신호대역을 채널대역의 1/4인 50Hz로 하여 심벌 간 간섭이 무시될 수 있는 조건에서 비트 오류율을 실험하였으나 심벌내의 주파수 영역 페이딩에 의해 각 채널의 반송주파수가 상쇄간섭(deep fading) 대역에 있을 때 오류가 많이 발생한다. RS코드는 시간영역 페이딩에 의한 군집오류를 효과적으로 제거하는 것으로 해석되었고 1kbps, 5Ch-4FSK/RS 시스템은 16~8kHz 대역에서 600m 이상의 거리에서 10<sup>-4</sup>의 비트 오류율을 보인다.

결론적으로 천해에서 수중통신시스템의 성능은 원거리보다 근거리에서 상대적으로 채널환경 영향을 더 받는다고 할 수 있으며 아울러 본 연구의 결과는 MFSK나 OFDM과 같은 다중반송파 시스템의 최적 주파수 대역 선정이나 잡음에 취약한 상쇄간섭 주파수 대역의 등화기 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2016 year)

### REFERENCES

- [ 1 ] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE Oceanic Engineering Society*, vol. 25, pp. 4-27, Jan. 2000.
- [ 2 ] K. C. 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," *Journal of Acoustical Society of Korea*, vol. 32, no. 2, pp. 95-103, Feb. 2013.
- [ 3 ] X. Dandan, C. Seo, J. Park, and J. R. Yoon, "Impact of surface scattering on performance of QPSK," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no. 8, pp. 1818-1826, Aug. 2014.
- [ 4 ] T. C. Yang, "Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 120, pp. 2595-2614, Oct. 2006.
- [ 5 ] T. C. Yang, "Properties of underwater acoustic communication channels in shallow water," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 131, pp. 129-45, Jan. 2012.
- [ 6 ] J. Kim, J. Park, M. Bae, K. C. Park, and J. R. Yoon, "Effect of frequency dependent multipath fading on non-coherent underwater communication system," *Journal of Acoustical Society of Korea*, vol. 35, no. 4, pp. 295-302, Jul. 2016.
- [ 7 ] L. Wan and V. K. Dubey, "Performance of frequency and time domain coded OFDM over fast fading LEO channels," in *Proceedings of IEEE/AFCEA EUROCOMM 2000, IEEE/AFCEA*, pp. 179-183, 2000.
- [ 8 ] H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, New York NY: Academic Press, pp. 209 and 577, 1998.
- [ 9 ] J. Park, K. Park, and J. R. Yoon, "Underwater acoustic communication channel simulator for flat fading," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 49, pp. 07HG101-4, Jul. 2010.
- [ 10 ] M. Bae, J. Park, J. Kim, D. Xue, K. C. Park, and J. R. Yoon, "Frequency-selective fading statistics of shallow-water acoustic communication channel with a few multipaths," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, pp. 07KG031-7, Jul. 2016.
- [ 11 ] C. Seo, J. Park, K. C. Park, and J. R. Yoon, "Performance comparison of convolution and Reed-Solomon codes in underwater multipath fading channel," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 53, pp. 07KG021-3, Jul. 2014.
- [ 12 ] J. Park, C. Seo, K. C. Park, and J. R. Yoon, "Effectiveness of convolution code in multipath underwater acoustic channel," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, pp. 07HG011-3, Jul. 2013.
- [ 13 ] M. Bae, X. Dandan, J. Park, and J. R. Yoon, "Multipath fading channel characterization and performance of forward error correction codes in very shallow water," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 19, no. 10, pp. 2247-2255, Oct. 2015.





**김종주(Jongju Kim)**

1996 부경대학교 정보통신공학과 학사  
2014 부경대학교 정보통신공학과 석사  
2013~현재 : 뉴디어스 대표이사  
※관심분야 : 수중통신, 디지털 신호 처리, 실시간 패킷 처리



**박지현(Ji Hyun Park)**

2000 밀양대학교 정보통신공학과 학사  
2002 부경대학교 정보통신공학과 석사  
2008 부경대학교 정보통신공학과 박사  
※관심분야 : 수중 음향, 수중 통신 시스템, FPGA설계



**배민자(Minja Bae)**

1993 부경대학교 정보통신공학과 학사  
1995 부경대학교 전자공학과 석사  
2007~현재 : 지니테크 대표이사  
※관심분야 : 수중통신, 디지털 신호 처리, 통화 품질측정 알고리즘, 패킷신호처리



**윤종락(Jong Rak Yoon)**

1987 Florida Atlantic University Dept. of Ocean Engineering M,S  
1990 Florida Atlantic University Dept. of Ocean Engineering Ph,D  
1990~현재 부경대학교 정보통신공학과 교수  
※관심분야 : 수중 음향, 음향 신호 처리, 음향 신호 해석 및 식별, 수중 음향 통신