

주파수 선택적 페이딩을 갖는 수중 음향 채널에서 COFDM의 성능

Performance of COFDM in Underwater Acoustic Channel with Frequency Selective Fading

서철원, 박지현, 박규칠, 윤종락[†]

(Chulwon Seo, Jihyun Park, Kyu-Chil Park, and Jong Rak Yoon)

부경대학교 정보통신공학과

(접수일자: 2013년 7월 16일; 채택일자: 2013년 8월 22일)

초 록: 수중 음향 통신 채널에서 주파수 선택적 페이딩에 강한 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)에 전방오류정정 기법을 적용한 COFDM(Coded OFDM)의 성능을 평가하였다. OFDM은 광대역 신호를 협대역 신호로 나누어 전송하는 기법으로 다중경로에 의한 성능저하를 해결하는데 효과적인 전송기법이지만, 특정 부 채널에 깊은 페이딩이 있는 경우에 오류가 증가하여 성능이 저하된다. 이러한 페이딩에 대한 오류를 감소시키기 위해 컨벌루션 코드를 적용한 COFDM을 제안한다. 다중 경로 채널에서 COFDM이 OFDM에 비해 상대적으로 우수한 전송성능을 보였다.

핵심용어: 수중 음향 통신, 수중 다중경로 채널, OFDM, 주파수 선택적 페이딩, 컨벌루션 코드, COFDM

ABSTRACT: In this paper, performance of COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) which is OFDM with a forward error correction code, is studied in frequency selective fading underwater acoustic communication channel. The OFDM is a multiplexing technique resistant to frequency selective multipath channel. In OFDM, a broadband information signal is transformed into several narrow band signals and transmits narrow band signals whose bandwidths are less than the channel coherence bandwidth. However, its performance is degraded in a specific narrow band signal due to its deep fading by multipath. To mitigate this degradation, COFDM which is OFDM with convolution code as a forward error correction code, is evaluated. The performance of COFDM is found to be better than that of OFDM in multipath channel.

Keywords: Underwater acoustic communication, Underwater multipath channel, OFDM, Frequency selective fading, Convolutional code, COFDM

PACS numbers: 43.30. Zk, 43.60. Dh

1. 서 론

수중 음향 통신(underwater acoustic communication)의 전송성능은 채널의 시공간적 환경 변동에 영향을 받아 정보전송 성능이 수십 kbps이하로 제한된다.

수중 음향 통신의 전송성능에 영향을 미치는 대표

적인 환경요인은 손실(loss), 배경잡음(ambient noise), 다중경로(multipath), 도플러(Doppler) 등이 있다.^[1] 이런 환경요인 중 전송성능을 제한하는 주된 요인은 다중경로이다. 다중경로는 채널의 시공간적 변동, 특히 경계면의 반사특성과 송·수신기의 위치변동 등에 의해 영향을 받는다. 이로 인해 다중경로 채널로 송신된 신호는 다중경로의 특성에 따라 진폭, 위상, 주파수, 수신시간 등이 영향을 받는다. 이런 수중 다중경로 채널의 변동성과 성능의 관계에 대해 Chitre^[2] 등은 수중 다중경로 채널에서 지연확산(delay

“이 논문은 2013년 한국음향학회 춘계학술대회에 투고했던 논문입니다.”

[†]Corresponding author: Jong Rak Yoon (jryoon@pknu.ac.kr)
Dept. of Information and Communications Engineering Pukyong
National University, Daeyeon 3dong, Namgu, Busan 608-737,
Republic of Korea

(Tel: 82- 51-629-6233, Fax: 82-51-629-6210)

spread)에 의한 대역폭제한과 경계면 변동 등이 수중 음향 통신 시스템의 전송성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

수중 다중경로 채널에서 송신신호는 경계면에 반사되어 각 경로를 통해 시간지연(time delay)^[3]되어 수신된다. 따라서 채널의 일관성 대역폭이 제한되어, ISI(Inter Symbol Interference)와 주파수 선택성(frequency selectivity)이 증가하여 수중 음향 통신 시스템의 전송성능을 저하시킨다. 수중 다중경로 채널에서 전송성능을 향상시키기 위해 Ribas^[4] 등은 OFDM 기법을 수중 영상 전송에 적용하였다.

OFDM 기법은 채널의 일관성 대역폭이 제한되는 주파수 선택적 페이딩 환경에 강인한 기법이다. 광대역 신호를 협대역(narrowband) 신호로 나누어 각 채널별로 전송함으로써 주파수 선택적 채널을 협대역의 주파수 비 선택적 채널로 근사한다. 그러나 지연확산에 의한 ICI(Inter Carrier Interference)와 특정 부반송파(sub-carrier)의 깊은 페이딩(deep fading)에 의해 연접오류(burst error)가 발생한다.^[5]

이러한 연접오류를 해결하기 위해 컨벌루션 코드(convolutional code), R-S부호(Reed-Solomon code)^[6] 및 터보코드(turbo code)와 같은 전방오류정정(forward error correction) 기법을 적용한 COFDM이 적용된다.

본 논문에서는 실 해역 평가의 선행 연구로 음향 채널의 변수를 용이하게 제어할 수 있는 수조에서 OFDM과 COFDM의 성능을 비교 평가하였다. 전방오류정정 기법은 특정 부반송파의 깊은 페이딩에 의한 연접오류 감소에 효과가 있는 컨벌루션 코드를 적용하였으며 OFDM 부반송파는 4 채널을 사용하였다. 100×100(8bit) 이미지의 전송률에 따른 OFDM 각 채널의 주파수 선택성과 오류특성을 해석하였고 OFDM과 COFDM의 성능을 비교 평가하였다.

II. 수중 다중경로 채널에서 지연확산과 주파수 선택성

수중 다중경로 채널은 경계면의 상태와 송·수신기의 위치에 영향을 받는다. Fig. 1과 같이 송신된 신호는 경계면 반사에 의해 각 경로의 지연시간이 달리 수신되며, 각 경로에서 수신되는 신호의 지연은

식(1)과 같다.^[7]

$$\tau_p = l_p / c, \quad (1)$$

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

경계면의 특성에 따른 각 경로의 주파수 응답은 식(2)와 같다.

$$H_p(f) = \frac{\Gamma_p}{\sqrt{A(l_p, f)}}, \quad (2)$$

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

식(1)과 (2)를 이용한 수중 다중경로 채널의 임펄스 응답은 식(3)과 같다.

$$h(t) = \sum_p h_p(t - \tau_p), \quad (3)$$

여기서 $h_p(t)$ 는 $H_p(f)$ 의 역 푸리에 변환(inverse fast Fourier transform)이다.

다중경로에 의한 RMS(Root Mean Square) 지연확산은 식(4)와 같으며, 식(4)의 평균 초과 지연(mean excess delay) $\bar{\tau}$ 와 평균 제곱 지연(mean square delay) $\bar{\tau}^2$ 는 식(5)와 같다.^[8-9]

$$\tau_{rms} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2}, \quad (4)$$

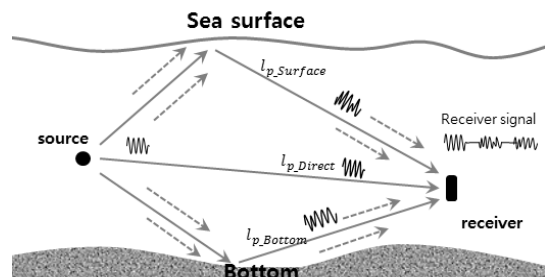


Fig. 1. Underwater multipath channel.

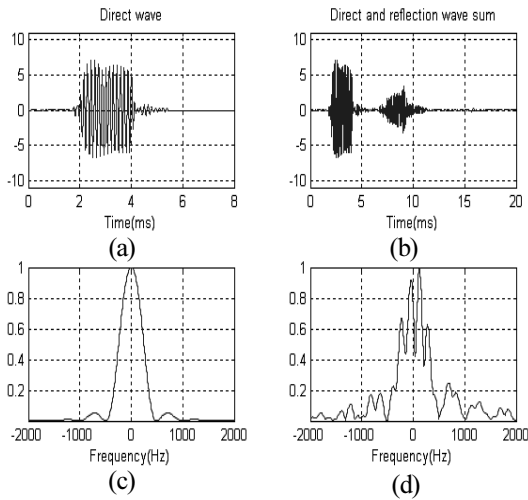


Fig. 2. Coherence bandwidth and frequency selective channel by delay spread, (a) direct wave, (b) direct and reflection wave, (c) spectrum of direct wave, (d) spectrum of direct and reflection wave.

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_p P(\tau_p) \tau_p^2}{\sum_p P(\tau_p)}, \quad \bar{\tau} = \frac{\sum_p P(\tau_p) \tau_p}{\sum_p P(\tau_p)}, \quad (5)$$

여기서 $P(\tau_n)$ 는 n 차 경로의 전력밀도이다. Fig. 2^[10]는 일관성 대역폭과 주파수 선택성을 보이는 해상 실험의 결과로 Fig. 2(a)는 직접파의 시간파형이며, Fig. 2(b)는 직접파와 반사파가 존재하는 시간신호이다. Figs. 2(c)과 2(d)는 Figs. 2(a)과 2(b)의 스펙트럼으로 Fig. 2(c)의 직접파의 스펙트럼과 Fig. 2(d)의 직접파 및 반사파의 스펙트럼을 비교하면 Fig. 2(d)는 전송신호 대역폭 내에서 전송신호의 진폭은 주파수에 따라 다른 값을 보여 주파수 선택성이 증가함을 알 수 있다.

식(4)의 RMS 지연확산과 채널의 일관성 대역폭의 관계는 식(6)과 같다.^[8]

$$B_c = \frac{1}{5\tau_{rms}}. \quad (6)$$

식(6)에서 채널의 일관성 대역폭 B_c 가 송신 신호의 대역폭 B_s 보다 넓다면, 송신 신호의 모든 주파수 성분은 Fig. 2(d)에 보이는 왜곡 현상이 없이 수신된다. 반대로 채널의 일관성 대역폭 B_c 가 송신 신호의 대

역폭 B_s 보다 좁다면, 왜곡 현상이 있는 주파수 선택적인 채널로 ISI가 발생하여 오류가 증가한다.

OFDM은 제한된 일관성 대역폭 내에서 각 채널의 B_s 를 B_c 보다 좁게 하여 전송하는 다중화(multiplexing) 기술이다.

III. OFDM과 COFDM

수중 다중경로 채널에 의해 발생하는 ISI 및 주파수 선택적 페이딩에 의한 성능저하를 향상시키기 위한 방법 중 OFDM 방식이 적용되고 있다.

OFDM방식은 Fig. 3과 같이 다중경로 채널에 적용되는 단일반송파와 다중화 전송방식인 FDM(Frequency Division Multiplexing)과 달리 직교성을 갖는 부반송파를 이용하여 상대적으로 대역효율이 높으며, SNR(Signal to Noise Ratio)에 따른 각 부반송파의 데이터 전송률을 조절하여 전송 용량을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 채널 대역의 효율적 활용과 지연확산을 보상하는 등화기 적용을 피할 수 있으며, 협대역 간섭에 강한 다중화 방식이다.^[5]

Fig 4는 OFDM의 블록 다이어그램이다. 2진 정보신

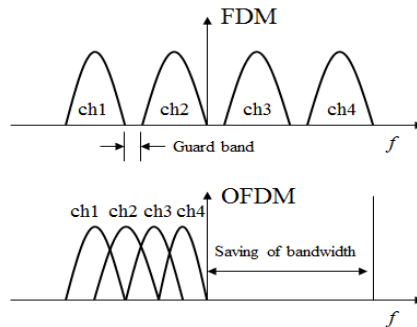


Fig. 3. Bandwidth efficiency comparison of FDM and OFDM.

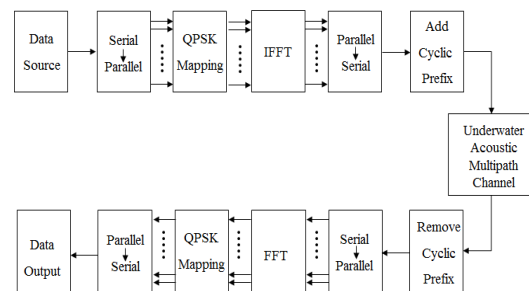


Fig. 4. OFDM block diagram.

호는 직·병렬 변화기를 이용하여 각 부반송파 신호로 분할시켜 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)^[10-11] 변조한다. 변조된 신호는 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 통해 부반송파의 합으로 구성된다. 시간 $t = t_s$ 에서 시작하는 OFDM 심벌은 식(7)과 같으며,^[5] 식(7)의 등가 복소수 기저대역의 표현은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp \left(j2\pi \left(f_c - \frac{i+0.5}{T} \right) (t-t_s) \right) \right\}, \quad (7)$$

$$t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s(t) = \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp \left(j2\pi \frac{i}{T} (t-t_s) \right) \right\}, \quad (8)$$

여기서 d_i 는 복소수 형태로 표현된 심벌이며, N 은 부반송파의 수이며, T 는 심벌구간, f_c 는 반송주파수이다.

Fig. 5는 수중 다중경로 채널에 의한 특정 부 반송파간의 깊은 페이딩에 의한 연접오류를 감소시키기 위해 제안된 COFDM의 블록 다이어그램이다. Fig. 4에서 입력 2진 정보 신호와 직·병렬변환기 사이에 전방오류정정 기법이 추가된 것으로 COFDM에서 적용되는 오류정정 코드는 컨벌루션 코드, R-S 코드, 터보코드 등이 사용되며, 이들 중 컨벌루션 코드는 Fig. 6과 같이 특정 부 반송파의 깊은 페이딩으로 인한 연접오류를 해결하여, 상대적으로 낮은 SNR에 대해 보다 우수한 성능을 보이게 된다.^[5]

Fig. 7은 본 논문에서 적용한 컨벌루션 코드로 구속장 $k=3$ 이고,^[13-14] 부호율이 1/2인 인코더의 블록도이다. 컨벌루션 코드는 부호 k 비트의 연속된 각 입력 열을 n 개의 출력 비트로 맵핑시키며, 간단한 레지스터(register)와 덧셈기로 구현할 수 있다.^[5] 주로 AWGN(Additive White Gaussian Noise)채널과 실시간 처리가 요구되는 채널에 구속장 길이를 작게 하여 적용하고 있으며, 컨벌루션 디코드는 비터비(viterbi) 알고리즘^[15]이 적용된다.

비터비 알고리즘은 최대 유사도(maximum likelihood)

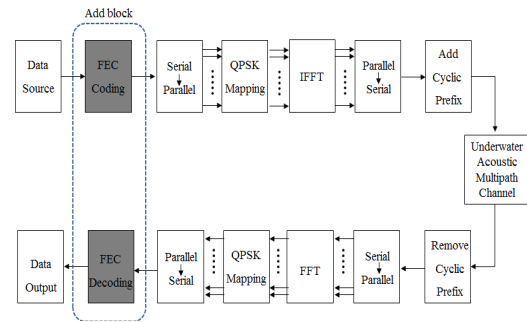


Fig. 5. COFDM block diagram.

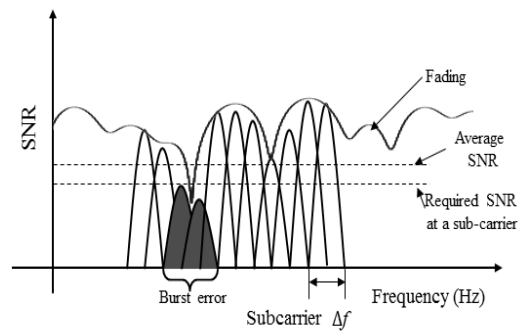


Fig. 6. Deep fading at a sub-carrier of COFDM.

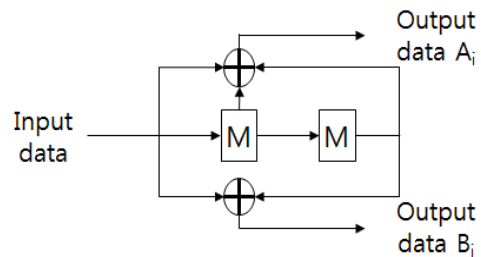


Fig. 7. FEC k=3, rate 1/2 convolutional encoder.

추정을 통해 상대적으로 짧은 구속장의 길이를 갖는 코드의 디코드에 사용된다. 보통 짧은 구속장 길이를 갖는 컨벌루션 코드에 사용되는 비터비 알고리즘은 trellis를 통해 모든 가능성 있는 경로를 비교하여 반복하는 알고리즘이다. 이 알고리즘은 구속장 $k=10$ 이하일 때 적용하며, 간단한 구조를 가진다.

IV. 성능평가 결과

OFDM과 COFDM의 성능평가를 위한 수조 실험의 구성도는 Fig. 8와 같다. 송신기는 ITC-1032, 수신기는 B&K 8106을 사용하였으며, LabVIEW 시스템을

이용하여 성능을 평가하였다.

송·수신기의 수심은 각각 0.3 m이며, 송·수신기의 전송거리는 0.6 m이다. 실내 수조의 수심은 0.6 m로 배경잡음은 무시하였다. Table 1은 실험파라미터로 각 부 반송파의 변조방식은 QPSK이며, OFDM의 부 반송파는 4개로 전송대역은 30 kHz ~ 30.6 kHz이다. 각 부 반송파의 전송속도는 50 sps, 100 sps, 200 sps로, OFDM의 전송속도는 각각 200 sps, 400 sps, 800 sps로 4배 증가한 전송속도를 갖는다. 전송 데이터는 100×100(8bit) 이미지로 총 80,000 비트를 전송하였다.

Table 2는 각각의 단일 채널에 대한 전송속도와 4 채널에 대한 OFDM의 전송속도 그리고 각 부 반송파의 주파수이다.

Fig. 9는 수조의 채널응답특성으로 LFM(Linear Frequency Modulation)신호를 1초 간격으로 총 60초간

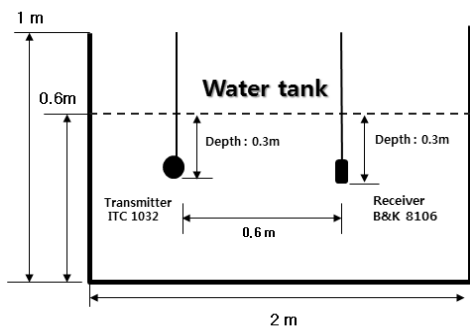


Fig. 8. Experimental configuration in water tank.

Table 1. Water tank experiment parameters.

Modulation	QPSK
Multiplexing	OFDM, COFDM
Sub-carrier numbers	4
Carrier Frequency	30 kHz
Coding Method	1/2 Convolutional Code
Each sub-carrier transmission rate (sps)	50, 100, 200 sps
Cyclic Prefix	2.5 ms
Coherence Bandwidth	~95 Hz
Range	0.6 m
Transmitter and Receiver depth	0.3 m and 0.3 m
Data	Image size(100×100)pixel 8 bit total bit : 80,000 bit
System	LabVIEW
Water Tank	2m×1.5m×1m

수신한 신호의 평균이다. 최대 지연확산 시간은 약 20 ms이며, 식(4)를 이용한 RMS 지연확산은 2.1 ms이며, 식(6)의 RMS 지연확산에 의한 채널의 일관성 대역폭 B_c 는 95 Hz로 최대 전송속도는 95 sps 이하로 제한된다. OFDM의 각 부 반송파 채널의 전송률은 최소한 95 sps 이하로 설계되어야 하지만 본 연구에서는 Table 2와 같이 부 반송파수를 4개로 하고 전송률을 변화시키며 실험하였다.

Fig. 10은 OFDM의 송신신호의 프레임 구조이다. 채널응답 특성 분석을 위한 LFM과 동기를 위해

Table 2. Transmission rates and sub-carrier frequencies.

each sub-carrier transmission rate (sps)	OFDM transmission rate(sps)	Sub-carrier frequency (kHz)			
		1ch	2ch	3ch	4ch
50	200	30	30.05	30.1	30.15
100	400	30	30.1	30.2	30.3
200	800	30	30.2	30.4	30.6

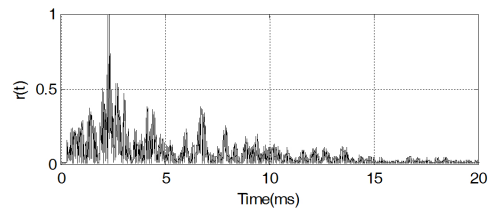


Fig. 9. Channel response of water tank.

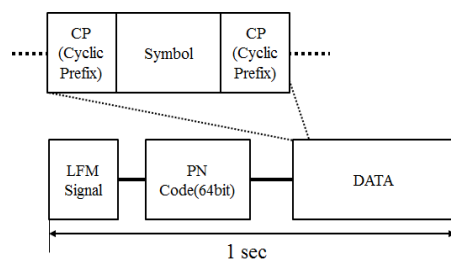


Fig. 10. OFDM frame structure of transmitting signal.

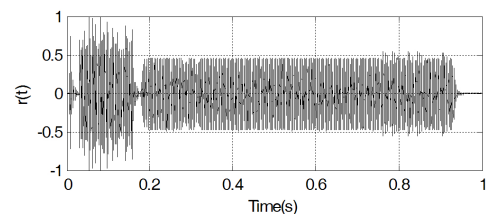


Fig. 11. Received signal waveform of a frame.

PN(Pseudo Noise) sequence 그리고 CP(Cyclic Prefix)와 심벌로 구성된 데이터 구간으로 1초 프레임으로 구성하였다. Fig. 11은 수조에서 송신한 신호의 1초 프레임을 수신한 신호이며, Fig. 12는 Table 2에서 보이는 OFDM 전송속도 800 sps에 대한 30 kHz~30.6 kHz의 4개 부반송파에 대한 주파수 스펙트럼으로 Fig. 6과 같이 다중경로에 의한 페이딩으로 각 부반송파는 서로 다른 크기로 특정 부반송파에서 연접오류가 발생할 것이다.

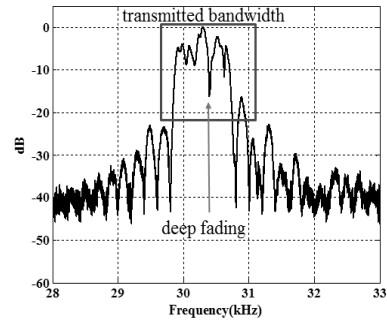
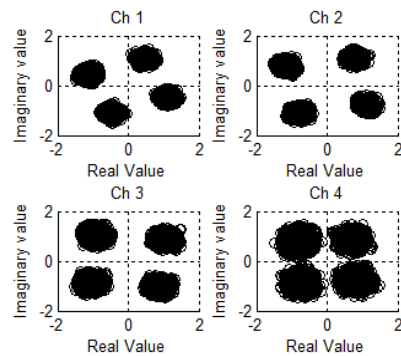
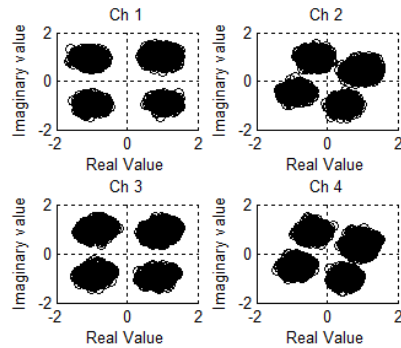


Fig. 12. Spectrum of received signal to show fading of sub-carrier frequencies at 800 sps.

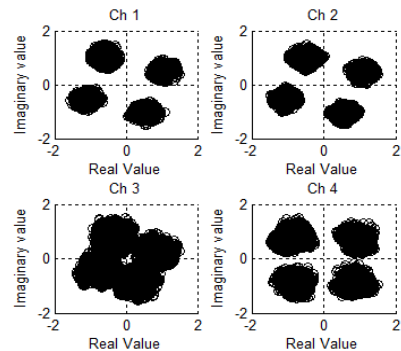
Fig. 13은 Table 2의 전송속도에 대한 OFDM의 각 부반송파 1부터 4가지에 대한 성상도이다. Fig. 13(a)는 200 sps에 대한 결과로 일관성 대역폭 B_c 보다 각 부반송파의 대역폭이 좁아 오류는 발생되지 않는다. Fig. 13(b)는 400 sps에 대한 결과로 일관성 대역폭보다 각 부반송파의 대역이 5 Hz 넓다. 이로 인해 대역폭 제한에 의한 ISI와 30.4 kHz에서 발생하는 깊은 페이딩의 영향을 받기 시작하는 2 번째와 4 번째 채널에서 인접채널의 주파수 대역에 의한 ICI의 영향으로 오류비트가 발생하고 오류율은 약 0.003이었다. Fig. 13(c)는 800 sps에 대한 결과로 각 부반송파의 대역폭이 일관성 대역폭보다 105 Hz 넓다. 이로 인해 ISI의 증가와 주파수 선택적 채널의 깊은 페이딩에 대한 영향으로 인해 2 번째와 3 번째 채널, 특히 3 번째 채널 주파수 30.4 kHz에서 오류 비트가 연접으로 발생하고 오류율은 약 0.02 이었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 13. Constellation of each channel for OFDM: (a) 200 sps, (b) 400 sps, and (c) 800 sps.

수중 다중경로에 의한 일관성 대역폭 제한과 주파수 선택성 증가에 의한 성능 저하를 보이는 Fig. 13의 결과를 개선하기 위해 OFDM에 컨벌루션 코드를 적용한 COFDM의 성능 실험을 수행하였다.

전송속도에 따른 OFDM과 COFDM의 성능 차이는 이미지와 이미지의 오류율로 확인하였다. Fig. 14(a)는 200 sps로 전송한 결과로 각 부반송파 전송 신호 대역폭이 채널 일관성 대역폭보다 좁고 각 채널의 부반송파에 깊은 페이딩이 발생하지 않는 경우이다. 실험결과 OFDM과 COFDM 모두 오류율은 0으로 오류가 발생하지 않았다. Fig. 14(b)는 400 sps로 각 부반송파의 전송신호 대역폭이 일관성 대역폭과 비슷하고 2번 및 4번 채널에 페이딩이 발생하는 경우이다. OFDM의 오류율은 약 0.003이지만, COFDM은 오류가 발생하지 않았다. 이를 통해 전방오류정정 기법

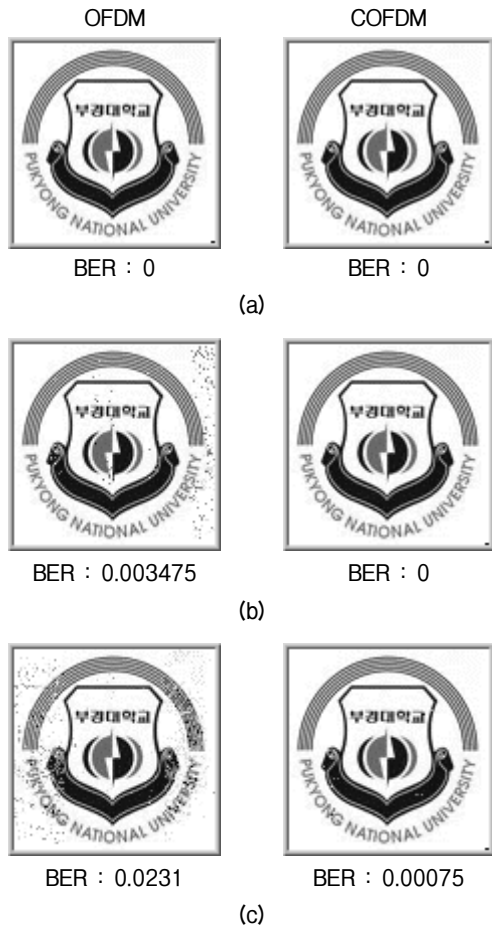


Fig. 14. Image of experimental results for COFDM: (a) 200 sps, (b) 400 sps, and (c) 800 sps.

인 컨벌루션 코드가 적용된 경우 일관성 대역제한에 의한 ISI와 연집오류를 감소시켜 전송성능이 향상됨을 확인하였다. Fig. 14(c)는 800 sps로 각 부반송파의 전송신호 대역폭이 일관성 대역폭보다 약 2배 넓은 경우로 OFDM의 오류율은 약 0.02이지만, COFDM의 오류율은 약 0.0008로 깊은 페이딩에 의한 개별 부반송파의 오류가 개선되어 전체적으로 약 25 배 오류율이 개선되었다. 따라서 COFDM은 깊은 페이딩에 의한 연집오류와 일관성 대역폭 제한에 의해 발생하는 오류를 정정할 수 있는 능력이 OFDM에 비해 우수하다고 판단된다.

V. 결 론

OFDM은 광대역 전송신호를 협대역 신호로 분리

하여 각 부 반송파 채널로 전송함으로써 수중 다중 경로에 의한 주파수 선택적 페이딩 오류를 감소시켜 성능 저하를 극복하는 기법이다. 따라서 각 부반송파의 대역이 다중경로에 의해 결정되는 채널 일관성 대역폭보다 넓을 때는 특정 부반송파의 깊은 페이딩으로 연집 오류가 발생하여 성능이 저하된다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 OFDM에 전방 오류 정정 코드로 컨벌루션 코드를 적용한 COFDM의 성능을 평가하였다.

OFDM과 COFDM의 성능을 수조 실험을 통해 비교 평가한 결과, OFDM의 각 부 반송파 채널이 다중 경로에 의해 주파수 선택적인 채널이 되는 경우에도 컨벌루션 코드가 적용된 COFDM은 특정 부 채널의 깊은 페이딩에 의한 오류를 감소시키는데 효과적이었다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 부경대학교 연구년 교수 지원 사업에 의하여 연구되었음(PS-2010-027).

References

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound 3th Edition*, (McGraw-Hill, New York, 1983), pp. 99-233.
2. M. Chitre, S. Shahabudeen and M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges," *J. Marine Tech. Soc.*, **42**, 103-116 (2008).
3. G. Zhang, J. M. Hovem, H. Dong, and L. Liu, "Experimental studies of underwater acoustic communications over multipath channels," *SENSORCOMM 2010, IEEE*, 458-461 (2010).
4. J. Ribas, D. Sura, and M. Stojanovic, "Underwater wireless video transmission for supervisory control and inspection using acoustic OFDM," *IEEE OCEANS 2010, IEEE*, 1-9 (2010).
5. R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications* (Artech House, Norwood 2000), pp.33-58.
6. L. Liu, Y. Wang, L. Li, X. Zhang, and J. Wang, "Design and implementation of channel coding for underwater acoustic system," *ASICON, IEEE*, 497-500 (2009).
7. M. Stojanovic and J. C. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization," *Communications Magazine, IEEE*,

- 47, 84-89 (2009).
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. Kor.* **32**, 95-103 (2013).
 9. J. Kim, K. Park, J. Park, and J. R. Yoon, "Coherence bandwidth effects on underwater image transmission in multipath channel," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 07HG05-1-07HG05-5 (2011).
 10. J. Park, J. Kim and J. R. Yoon, "Effect of text transmission performance on delay spread by water surface fluctuation in underwater multipath channel" (in Korean), *J. Electronic. Soc. Kor.*, TC1, 1-5 (2011).
 11. W. K. Lam and R. F. Ormondroyd, "A coherent COFDM modulation system for a time-varying frequency selective underwater acoustic channel," *7th Oceanography Eng., IEEE*, 198-203 (1997).
 12. J. Huang, C. He, X. Shen, and Q. Zhang, "High-speed underwater acoustic communication based on OFDM," *Convention 2005, IEEE*, 1135-1138 (2005).
 13. J. F. Sifferlen, H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, and J. M. Stevenson, "An iterative equalization and decoding approach for underwater acoustic communication," *J. Oceanic Eng.* **33**, 182-197 (2008).
 14. J. Trubuil, A. Goalic, and N. Beuzelin, "An overview of channel coding for underwater acoustic communications," *MILCOM 2012, IEEE*, 1-7 (2012).
 15. A. Goalic, J. Trubuil, and N. Beuzelin, "Channel coding for underwater acoustic communication system," *Oceans 2006, IEEE*, 1-4 (2006).

저자 약력

▶ 서 철 원(Chulwon Seo)



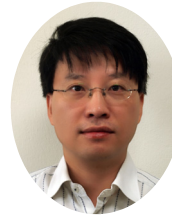
2012년 2월 :부경대학교 학사(공학사)
2012년 3월 ~ 현재: 부경대학교 석사과정
(관심분야) 수중음향통신, 수중음향신호
처리, 수중로봇제어

▶ 박 지 현(Jihyun Park)



2000년 2월: 부산대학교 학사(공학사)
2002년 2월: 부경대학교 석사(공학석사)
2008년 8월: 부경대학교 박사(공학박사)
2010년 8월: 음향진동공학연구소
2008년 11월 ~ 현재: 부경대학교
(관심분야) 수중음향통신시스템, 수중음향

▶ 박 규 철 (Kyu-Chil Park)



1993년 2월: 부경대학교 전자공학과 학사
1995년 2월: 부경대학교 전자공학과 석사
2000년 3월: 일본 오카야마대학 자연과학
연구과 박사
2002년 3월 ~ 현재: 부경대학교 정보통신
공학과 교수
(관심분야) 음향정보처리, 역문제, 컴퓨터
수치시뮬레이션

▶ 윤 종 락(Jong Rak Yoon)



1977년 2월: 부경대학교 어업물리 학사
1980년 2월 부경대학교 수산물리 석사
1987년 2월: Florida Atlantic University 해양
공학과 음향공학 전공 석사
1990년 2월: Florida Atlantic University 해양
공학과 음향공학 전공 박사
1990년 4월 ~ 현재: 부경대학교 정보통신
공학과 교수
(관심분야) 수중음향, 수중음향통신, 음향
신호처리