

# 수중 채널환경에서 FMT-OFDM 시스템의 성능 향상을 위한 연구

김민상\*, 고학림°, 김승근\*, 조대영\*\*, 임태호\*\*\*

## Performance Improvement of FMT-OFDM System in Underwater Channel Environment

Min-sang Kim\*, Hak-lim Ko°, Seung-geun Kim\*, Dea-young Cho\*\*, Tae-ho Im\*\*\*

### 요약

최근 수중통신의 성능 향상을 위해 육상의 이동통신 기술 중 하나인 다중반송파 방식을 수중채널 환경에 적용하기 위한 연구 사례가 증가 하고 있으며, 본 연구에서는 기존 다중반송파 방식에 비하여 우수한 통신 성능을 갖는 시스템 설계를 위해 자원 확산에 의한 주파수 다이버시티 효과와 반복(Repetition)효과를 갖는 RS(Resource Spreading) FMT-OFDM 시스템을 제안한다. 본 연구에서는 실험역에서 측정된 데이터를 기반으로 채널을 모델링하고 시스템 파라미터를 설정한 후 RS FMT-OFDM 시스템과 기존 FMT-OFDM 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증 하였다. 성능검증 결과 기존의 FMT-OFDM 시스템에 비하여 BER  $10^{-3}$  기준 약 12dB 정도 통신성능의 향상이 있었으며, 자원 확산률이 증가함에 따라 통신 성능 향상이 있음을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : FMT-OFDM, FMT, OFDM, Underwater Communication,

### ABSTRACT

Recently, There are increasing number of studies that apply multi-carrier method, a land mobile communication method, to underwater channel environment in order to enhance the performance of underwater communication. Therefore, in this paper, in order to design a new system with improved communication performance compared to the multi-carrier method in underwater communication, we present that the RS(Resource Spreading) FMT-OFDM system has a diversity and repetition effect from resource spreading. Moreover, we verify the performance of RS FMT-OFDM system and existing FMT-OFDM system through simulations after modeling communication channels and setting the system parameter based on the data measured from the real sea. Our result indicate that, compared to the existing FMT-OFDM system, there has been an improvement in communication performance by 12dB based on BER  $10^{-3}$  we also discovered that communication performance improves as the resource spreading rate increases.

※ 본 연구결과는 국토해양부의 “수중 광역 이동통신 시스템 기술개발” 과제에서 수행된 연구결과 중 일부분을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

◆ First Author : Department of Oceanic IT Convergency Technology Research Center, Hoseo University, minsang@hoseo.edu, 정희원

° Corresponding Author : Department of Information and Communication Engineering, Hoseo University, hlko@hoseo.edu, 정희원

\* Korea Research Institute of Ships and Ocean Eng.(KRISO), 중신회원

\*\* San Eng., cdyzone@naver.com, 정희원

\*\*\* Department of Oceanic IT Convergency Technology Research Center, Hoseo University, taehoim@hoseo.edu, 정희원

논문번호 : KICS2015-11-356, Received November 5, 2015; Revised March 21, 2016; Accepted March 23, 2016

## I. 서론

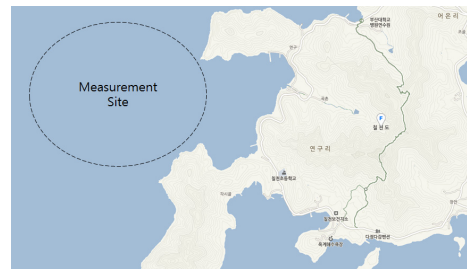
기존에 유선으로 이루어져 왔던 국방 및 수중 생태 조사, 재난 감지 등의 수중 감시망 작업이 최근 무인 잠수정(UUV: Unmanned Underwater Vehicle)이나 글라이더, 수중센서 등을 활용한 무선방식으로 연구동향이 변화함에 따라 수중 유닛의 사용시간 증대와 통신반경 증대 등을 위해 수중 통신성능 향상을 위한 관심이 점차 고조되고 있다<sup>[1]</sup>. 하지만 수중채널 환경은 수온과 수심, 염분 등의 영향으로 인하여 장소와 계절에 따라 급격하게 변화하며, 수중생물 및 해면과 해저면, 해양 생물 등에 의해 발생하는 다중경로 페이딩의 영향으로 극심한 채널 변화가 발생한다<sup>[2]</sup>. 또한 수중통신은 음파를 사용하기 때문에 육상에 비해 저속의 통신이며, 사용하는 반송파에 비하여 넓은 대역폭을 갖기 때문에 광대역의 채널이다<sup>[3]</sup>. 이러한 특징을 갖는 수중 채널환경에서 단일 반송파 방식으로 고속의 데이터 전송을 할 경우 주파수 선택적 페이딩 채널의 등화를 위해 복잡한 채널 등화기를 구현해야 한다. 따라서 복수 개의 반송파로 나누어 전송하여 주파수 선택적 페이딩 채널을 주파수 비 선택적 페이딩 채널로 근사 하여 간단한 채널 등화기 사용으로 채널보상이 가능한 다중 반송파 전송 방식에 대한 연구가 진행되었다<sup>[4]</sup>.

대표적인 다중 반송파 방식으로는 FMT(Filtered Multi Tone) 시스템<sup>[5]</sup>과 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템<sup>[6]</sup>이 있다. FMT 시스템은 송신필터를 사용하여 신호를 필터링한 후 원하는 주파수 대역으로 복수개의 반송파를 서로 겹치지 않게 전송하는 방식으로 필터의 사용과 각 반송파 사이에 보호구간의 사용으로 인접 반송파에 미치는 영향이 최소화 되지만 수중채널환경과 같이 상관대역폭이 작을 경우 반송파의 대역폭을 작게 설정하기 위해 필터의 차수를 증가 시켜야 하므로 시스템의 복잡도가 크게 증가하게 된다. 반면 OFDM 시스템은 복수개의 반송파를 이용하여 데이터를 전송하는 방식으로 데이터를 직교성을 갖는 복수개의 반송파로 변조하여 전송함으로써 주파수 효율을 증가시킨다. 이 때 반송파간의 직교적인 특성으로 인하여 서로 중첩이 되어도 ICI(InterCarrier Interference)가 발생하지 않지만 각 반송파 신호의 대역을 제한하지 않으므로 ACI(Adjacent Channel Interference)가 발생하게 되고 이를 방지하기 위해 가상반송파(VC : Virtual Carrier)를 사용한다. 또한 채널을 통과하면서 ISI(InterSymbol Interference)가 발

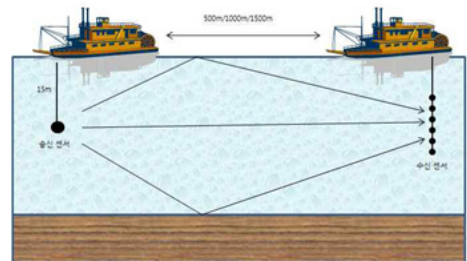
생하게 되므로, 이를 방지하기 위하여 전치 순환부호(CP : Cyclic Prefix)를 사용한다. 하지만 수중은 매우 복잡한 채널 특성을 나타내므로 전치 순환부호와 가상 반송파에 할당해야 하는 자원이 증가하므로 OFDM 시스템의 효율이 감소한다. 따라서 OFDM 시스템의 전치 순환부호와 가상 반송파의 사용을 최소화 하여 데이터 효율증가를 위해 OFDM 시스템에 FMT 시스템을 결합한 시스템에 대한 연구를 수행하였다<sup>[7]</sup>. 하지만 실험역의 수중채널환경은 매우 복잡한 채널 특징을 갖기 때문에 FMT-OFDM 시스템의 성능을 개선할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 FMT-OFDM 시스템에 자원확산 기법을 추가하여, 다중경로 신호가 존재하는 실험역 환경에서 기존의 FMT-OFDM 시스템과 자원확산이 수행된 RS FMT-OFDM 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

## II. 측정환경

본 연구에서는 수중채널환경에 적합한 다중반송파 시스템 설계를 위해 경상남도 거제도의 35°1'48.43"N - 128°37'28.31"E에서 수행하였다<sup>[8]</sup>. 측정 지역의 평균 수심은 30-40m 였으며, 그림 1에 측정 지역의



(a) The experimental locations



(b) The geometry and the setup of the experimental system

그림 1. 측정 장소 및 측정 시스템 설정 및 구조  
Fig. 1. The experimental locations and setup of the experimental system

지도와 측정환경의 모식도를 나타내었다. 그림 1-(b)의 측정 환경을 보면 해면 반사파와 해저면 반사파의 도달거리를 동일하게 하여 해면과 해저면에서 반사되는 신호의 특성을 조사하기 위해 측정해역 중심의 절반인 15m에 위치 시켰고, 거리별 수중채널 특성을 알아보기 위해 100m, 300m, 500m, 1000m, 1500m에서 측정하였다. 그림 2에는 측정에 사용한 송신측과 수신측의 선박과 측정 장비, 송수신센서가 보인다. 송신측의 신호 증폭기는 B&K 2713을 사용하였고 송신 트랜스듀서는 선박 해양 플랫폼 연구소에서 제작한 지향성 트랜스듀서를 사용하였다. 수신측 장비는 수신 신호 증폭기 B&K NEXUS 2692를 사용하였으며, 수신용 하이드로폰은 B&K 8103을 사용하였다. 하이드로폰은 빔 형성 기법을 사용하여 다중경로 신호의 도래각(AoA: Angle of Arrival) 추정을 위해 선형으로 배열하였으며, 이때의 각 센서 간격은 반송주파수의 반파장으로 설정하였다.

전송 신호는 BPSK 변조 방식을 사용하여 1023개의 길이를 가지는 PN 코드를 반복하여 전송하였고 반송주파수는 25kHz를 사용하였으며, Pulse Shaping filter length는 20, Roll-off factor는 0.35로 하여 신호를 전송하였다.

거제도 친해역 지역의 측정 데이터를 사용하여 각도 지연 프로파일과 채널 지연 프로파일 분석을 통해 실효 지연과 상관대역폭을 추정하였고, 분석한 데이터를 기반으로 수중채널 환경에서 다중반송파 시스템을 사용하기 위한 파라미터를 결정 하였다. 거제도 친해역에서 송신기와 수신기사이의 거리가 500m이하인

수신데이터를 분석한 결과 평균적으로 2개의 신호가 서로 다른 방향에서 수신되었고 실효 지연의 평균은 6.1ms였으며, 상관대역폭은 163.93Hz로 산출되었다. 반면 송신기와 수신기 사이의 거리가 1000m이상인 수신데이터를 분석한 결과 평균 1개의 신호가 수신되었으며, 이는 송신측과 수신측의 이격거리가 증가함에 따라 해면이나 해저면에 반사되는 다중경로 신호의 세기가 감소되어 주로 한 개의 신호만 수신된 것으로 추정된다. 이때 평균 실효 지연은 2.67ms로 감소되었고 상관대역폭은 374.53Hz로 산출되었다. 따라서 이러한 측정 환경에서 다중반송파를 사용하여 수신측에서 간단한 등화기로 채널 추정을 위해 측정데이터 분석을 통해 산출된 상관대역폭보다 작게 설정하여야 하므로 제안한 FMT-OFDM 시스템의 각 부반송파의 대역폭은 160Hz보다 충분히 작은 40Hz로 설정하여 시스템을 설계하였다.

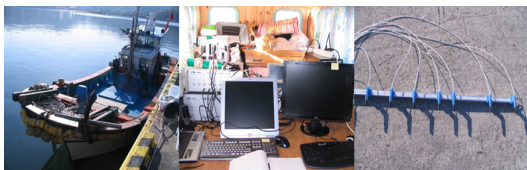
### III. RS FMT-OFDM 시스템

선행 연구에서 제안한 FMT-OFDM 시스템은 OFDM 시스템과 FMT 시스템을 결합한 방식으로 복잡도는 증가하지만 M개의 FMT sub-band 구간에서 부반송파의 개수는 N/M이 되므로 각 sub-band 내에서 FFT 사이즈가 감소된다. 또한, 단일 OFDM 방식을 사용할 경우 열악한 수중채널 환경에 적합한 시스템 설계를 위하여 전치 순환부호와 가상 부반송파 등의 사용으로 데이터 효율이 저하되는데 FMT-OFDM 시스템의 경우 FMT를 통해 각 sub-band를 구분하기 때문에 필터링 효과로 인하여 OFDM에서 사용하는 가상 부반송파를 최소화 할 수 있으므로 데이터 효율을 증가 시킬 수 있다<sup>18)</sup>.

이러한 특징을 갖는 FMT-OFDM 시스템의 성능을 향상시키기 위해 본 연구에서는 기존의 FMT-OFDM 시스템에 자원확산 기법을 추가하여 데이터효율은 감소하지만 주파수 다이버시티와 데이터의 반복효과로 인한 수중 채널환경에서 강인한 성능을 보이는 RS FMT-OFDM 시스템을 제안한다.

그림 3에는 RS FMT-OFDM 시스템의 송신기 구조도를 나타내었으며, 그림 4에는 FMT로 의해 생성되는 sub-band의 개수 M과 자원 확산률 L이 같을 경우에 PSK/QAM으로 변조된 심볼이 자원 확산되어 직병렬 변환되는 구조를 나타내었다.

그림 4에서 보이는 바와 같이 PSK/QAM으로 변조된 심볼은 L배의 자원 확산을 수행한 후 FMT의 sub-band의 개수만큼 병렬화를 수행한다.



(b) Ship for Receiver, Receive equipment and hydrophone



(a) Ship for transmission, Transmission equipment and transducer

그림 2. 실효역 측정을 위한 선박과 장비  
Fig. 2. Ships and equipment for the measurement in real sea environment

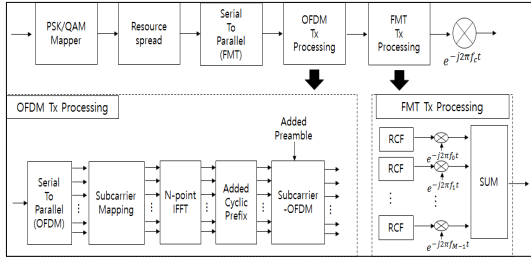


그림 3. RS FMT-OFDM 시스템의 송신기 구조도  
Fig. 3. Block diagram of a RS FMT-OFDM system transmitter

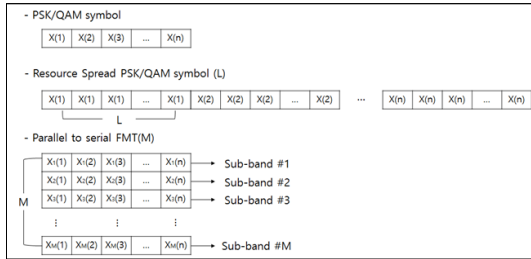


그림 4. RS FMT-OFDM 시스템의 직병렬 방식  
Fig. 4. Serial and Parallel method for a RS FMT-OFDM system

이때 sub-band의  $X_m(k)$ 는 N-point IFFT를 통하여 직교 되고, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_m(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_m(k) e^{j2\pi \frac{nk}{N}}, \quad \begin{cases} n = 0, 1, \dots, N-1 \\ m = 0, 1, \dots, M-1 \end{cases} \quad (1)$$

각 sub-band마다 N-point IFFT된  $x_m(n)$ 은 raised cosine 필터  $h(n)$ 을 사용하여 필터링 되며, M개의 sub-band를 원하는 주파수 영역에 천이 후 더해진 출력의 형상화된 주파수 스펙트럼과 FMT-OFDM 시스템의 심볼 배열 구조가 그림 5에 보인다.

PSK/QAM으로 변조된 심볼을 L배 자원 확산 수행 후 M개의 sub-band의 개수만큼 병렬화 된 심볼은 각 FMT sub-band별로 동일한 심볼이 배치되며, sub-band별로 OFDM이 수행된 직교된 부분송파는 동일한 성분의 데이터가 배치된다. 만약 자원 확산률과 sub-band의 개수가 동일할 경우(L=M) M개의

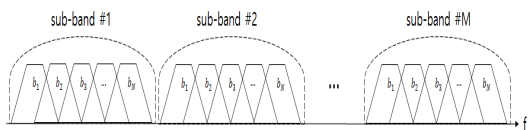


그림 5. RS FMT-OFDM 시스템의 sub-band 구조  
Fig. 5. Sub-band structure of a RS FMT-OFDM system

sub-band에 동일한 데이터가 배치되어 그림 5와 같이 되며, 일정한 간격마다 동일한 부분송파가 반복되어 주파수 다이버시티의 효과와 반복(Repetition)효과를 얻을 수 있다.

그림 6에는 RS FMT-OFDM 시스템의 수신기의 구조도가 보인다. 반송파가 제거된 수신 신호는 기저 대역에서 주파수 천이 후  $h(n)$ 을 사용하여 필터링을 수행하며, 필터를 통과한 신호  $q_m(n)$ 은 OFDM 신호 처리를 위한 병렬화 및 N-point FFT를 수행한다.

$$Q_m(k) = \sum_{n=0}^{N-1} q_m(n) e^{-j2\pi \frac{nk}{N}}, \quad \begin{cases} n = 0, 1, \dots, N-1 \\ m = 0, 1, \dots, M-1 \end{cases} \quad (2)$$

N-point FFT를 수행한 신호  $Q_m(k)$ 의 프리앰블과 파일럿 신호를 이용하여 채널 추정을 하였으며, 자원 역확산을 수행한 후 심볼을 복원하였다.

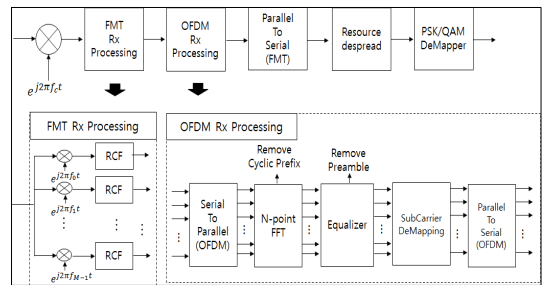


그림 6. RS FMT-OFDM 시스템의 수신기 구조도  
Fig. 6. Block diagram of a RS FMT-OFDM system receiver

#### IV. 성능 검증 및 시뮬레이션

성능 검증용 시뮬레이션에서는 다중경로 신호가 존재하는 실험 환경에서 제안한 RS FMT-OFDM 시스템의 성능을 검증하기 위하여, 일반적으로 2개의 다중경로 신호가 뚜렷하게 존재하는 송신기와 수신기 사이의 이격거리가 100m인 경우의 실험 환경을 적용하였다. 제안한 시뮬레이터에서는 채널등화가 완벽히 수행되었다는 가정하였고, 실험역의 다중경로 신호에 의한 영향을 고려하여 자원확산을 수행하지 않은 FMT-OFDM 시스템과 자원확산을 수행한 RS FMT-OFDM 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하였다.

그림 7에는 FMT-OFDM 시스템과 RS FMT-OFDM 시스템의 성능이 보인다. FMT-OFDM 시스템과 RS FMT-OFDM 시스템은 4개의 sub-band

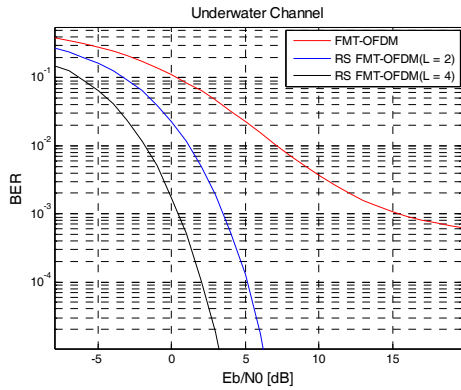


그림 7. OFDM, FMT-OFDM와 RS FMT-OFDM의 성능 비교  
 Fig. 7. Performance comparison of OFDM, FMT-OFDM and RS FMT-OFDM

로 구성되어 있으며, 각 sub-band당 32개 부반송파로 구성되어 있다. 32개의 부반송파는 2개의 파일럿, 1개의 DC, 3개의 가상 부반송파로 구성되어 있다. 시뮬레이션 결과 자원 확산을 2배 수행한 RS FMT-OFDM 시스템은 자원 확산을 수행 하지 않은 FMT-OFDM 시스템에 비하여 BER  $10^{-3}$  기준 약 12dB의 성능향상이 있음을 보였다. 또한 RS FMT-OFDM 시스템에서 자원 확산률 L=4인 경우 자원 확산률 L=2인 시스템과 비교하였을 경우 2배의 반복효과로 BER  $10^{-3}$  기준 약 3dB의 통신 성능 향상이 있음을 확인할 수 있었다.

### V. 결 론

본 연구에서는 RS FMT-OFDM 시스템을 제안하였으며, 실험에서 측정된 데이터를 기반으로 채널을 모델링하였고 다중반송파 시스템의 파라미터를 설정하였다. 성능 검증결과 RS FMT-OFDM 시스템은 자원 확산에 의한 효과로 기존의 FMT-OFDM 시스템에 비하여 BER  $10^{-3}$  기준 약 12dB 통신 성능 향상이 있었다. 또한 RS FMT-OFDM 시스템의 자원 확산률이 L=2인 시스템과 L=4인 시스템의 성능을 비교하였을 때 자원 확산률의 증가에 따른 반복효과에 대한 성능 향상을 보였다. 따라서 본 연구에서 제안한 RS FMT-OFDM 시스템은 기존 FMT-OFDM 시스템에 비하여 시스템의 복잡도 증가와 데이터 전송효율은 감소 하지만 자원 확산을 통한 통신 성능 향상으로 향후 수중채널 환경에서 보다 강인한 성능을 갖는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인 할 수 있었다. 또한 본

연구에서 제안한 시스템은 비교적 간단한 방법으로 동일한 데이터를 sub-band에 분배 할 수 있기 때문에 향후 수신단에서 주파수 다이버시티 효과를 얻기 위한 연구를 통해 보다 우수한 성능을 갖는 시스템을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] E. M. Sozer, M. Stojanovic, and J. G. Proakis, "Underwater acoustic networks," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 72-83, Jan. 2000.
- [2] A. C. Singer, J. K. Nelson and S. S. Kozat "Signal processing for underwater acoustic communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 90-96, 2009.
- [3] M. Stojanovic and J. Presig, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 84-89, Jan. 2009.
- [4] Y. S. Cho, J. K. Kim, and W. Y. Yang, *MIMO-OFDM wireless communications with matlab*, Hongrung publishing company, pp. 179-182, 2012.
- [5] G. Cherubini, E. Eleftheriou, and S. Olcer, "Filtered multitone modulation for very high-speed digital subscriber lines," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, no. 5, pp. 1016-1028, Jun. 2002.
- [6] K. C. Cho, "Performance analysis of the pre-equalizer system for the OFDM system," *J. KICS*, vol. 39B, no. 12, pp. 864-869, Dec. 2014.
- [7] M. S. Kim, D. Y. Cho, T. H. Im, "A study on the multi-carrier system for throughput enhancement in underwater channel environments," *J. KICS*, vol. 40, no. 6, pp. 1194-1199, Jun. 2015.
- [8] M. S. Kim, D. Y. Cho, and H. L. Ko, "Analysis on the correlation coefficient for the diversity technique combined with beam-forming using measurement data in underwater channel environments," *J. KICS*, vol. no. 37A, pp. 1023-1030, Dec. 2012.

**김 민 상 (Min-sang Kim)**



2008년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
2010년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
2013년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 박사  
2013년 2월~2016년 2월 : 호서

대학교 정보통신공학과 박사후 연구원  
2016년 3월~현재 : 호서대학교 해양IT융합기술연구소 조교수  
<관심분야> 수중통신, 이동통신, 해양통신, 스마트 안테나 시스템

**고 학 림 (Hak-lim Ko)**



1983년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 졸업  
1986년 8월 : Fairleigh Dickinson Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 석사  
1995년 8월 : North Carolina state Univ. 전기 및 컴퓨터

공학과 박사  
1996년~현재 : 호서대학교 정보통신 공학과 교수  
<관심분야> 스마트 안테나 시스템, 이동통신, 수중통신, 해양통신

**김 승 근 (Seung-geun Kim)**



1995년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사  
1997년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 석사  
2002년 8월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사  
2002년 10월~현재 : 한국해양과

학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원  
2004년 3월~2015년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 겸임교원(부교수)  
2015년 3월~현재 : 과학기술연합대학원대학교 해양시스템공학과 겸임교원(교수)  
<관심분야> 수중음향통신 시스템 개발, 해상 VHF 디지털 통신 시스템 개발, 선박 항해통신 장치 및 서비스

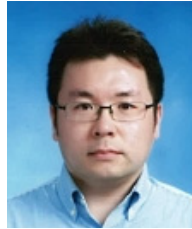
**조 대 영 (Dea-young Cho)**



2009년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
2011년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
2014년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 박사  
2014년~현재 : (주)산 ENG.

<관심분야> smart antenna, DSP

**임 태 호 (Tae-ho Im)**



2006년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 졸업  
2008년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 석사  
2012년 8월 : 중앙대학교 전자전기공학부 박사  
2012년 7월~2015년 2월 : 삼성

전자 DMC연구소 책임연구원  
2015년~현재 : 호서대학교 해양IT융합기술연구소 조교수  
<관심분야> 이동통신, 수중통신, 해양통신