

수조에서 MIMO 수중음향통신의 실험적 성능 고찰

권병철 · 김기만*

Experimental Performance Evaluation of MIMO Underwater Acoustic Communication in Water Tank

Byung-chul Gwon · Ki-man Kim *

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약

본 논문에서는 수조에서 실험을 통해 획득한 데이터를 이용하여 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 수중음향통신의 성능을 분석하였다. 이를 위하여 먼저 여러 송수신 위치에서 채널 전달 특성을 측정하였다. 송신신호는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)로 변조하였으며, 수신신호는 Zero Forcing 등화기 등을 포함하는 검출기를 거쳐 복원되었다. 실험이 이루어진 수조 환경이 물리적으로 폐쇄된 매우 심한 다중 경로 전달 환경이어서 최대 30~40 ms의 지연 현상이 나타났다. 실험 결과 송신 및 수신 센서가 각각 두 개인 2x2 MIMO 시스템을 사용하였을 때 채널 특성으로 인해 비트 오차율이 비교적 크게 나타났지만 SISO (Single-Input Single-Output) 시스템에 비해 약 15% 정도 향상된 성능을 갖는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we have analyzed the performance of MIMO (Multi-Input Multi-Output) underwater acoustic communication by using the acquired data via the experiments in water tank. First of all, in the pursuit of this aim, we have measured the channel transfer characteristics at several transceiver locations. The transmitted signal was modulated by QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) and the received signal was recovered through the detector that contains the zero forcing equalizer. A maximum 30~40 ms delay was appeared because of physically closed water tank environment that has the harsh multi-path transmission conditions. In result of experiment, even though the bit error rate showed comparatively large when 2x2 MIMO system with two transmitters and receivers was considered. However, we confirmed it has approximately 15% enhanced performance compared with SISO (Single-Input Single-Output) system.

키워드 : 수중음향통신, MIMO, SISO, 공간 다중화, 다중경로 전달, 비트 오차율, zero forcing 등화기, 채널 임펄스 응답

Key word : underwater acoustic communication, multi-input multi-output, single-input single-output, spatial multiplexing, multipath propagation, bit error rate, zero forcing equalizer, channel impulse response

접수일자 : 2013. 03. 11 심사완료일자 : 2013. 06. 12 게재확정일자 : 2013. 06. 26

* **Corresponding Author** Ki-man Kim (kimkim@hhu.ac.kr, Tel:+82-51-410-4918)

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.7.1577>

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. 서 론

천해에서 수중음향통신 채널 환경은 수신, 수온 분포 및 염분 농도 등에 따라 신호의 전달속도가 변화하고, 특히 해수면이나 해저면의 반사로 인한 다중경로 전달 현상이 나타난다. 또한 페이딩과 도플러 효과가 시간에 따라서 매우 빠르게 변화할 뿐만 아니라 계절이나 기상 상태의 영향을 크게 받는다. 이처럼 수중음향통신은 육상에서의 전파통신에 비해 더욱 많은 제약조건을 갖고 있다. 수중음향통신은 매질의 특성으로 인하여 육상에서의 전파통신보다 매우 낮은 초음파 대역의 반송 주파수를 사용하기 때문에 신호의 대역폭이 제한되어 통신 용량의 증가에 많은 어려움이 있다.

전파통신 분야에서 채널 용량을 증가시키기 위한 방법 가운데 하나로 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 기법이 연구되어져 왔으며, 대표적인 방법으로 V-BLAST (Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time) 방법 등이 있다[1]. MIMO 기법의 장점은 하나의 송수신기를 이용한 통신 방식에 비해 추가적인 주파수 할당 없이 채널 용량을 송수신기 수에 비례하여 증가시킬 수 있다는 것이다. 즉, 다이버시티와 공간 다중화(spatial multiplexing) 효과를 동시에 얻게 된다. 이에 최근 수중음향통신 분야에서도 채널 용량 증가를 위해 MIMO 기법을 적용하는 연구가 이루어지고 있다. 국외의 경우 Ling 등은 변형된 V-BLAST 방법을 제안하였고[2], Magnus 등은 터보 등화기를 갖는 MIMO 시스템을 구성하였다[3]. 최근에는 MIMO-OFDM에 대한 연구가 실험적으로 진행되고 있는 실정이다[4]. 반면 국내에서는 수직으로 배열된 센서 사이의 거리에 따른 공간 다이버시티 효과에 대한 실험적 고찰이나 MIMO와 관련한 시뮬레이션 정도만 이루어지고 있는 초보적인 상태이다. 논문 [5]에서는 수중에서 수직으로 배열된 센서들로부터 획득된 데이터를 분석하여 센서 간의 간격이 10 파장 이상이면 다이버시티 이득을 기대할 수 있다고 하였다. 논문 [6]에서는 MIMO-OFDM 수중음향통신을 다루고 있으나 시뮬레이션에 의존하고 있으며, 실제 MIMO 수중음향통신에 대한 실험은 제대로 이루어지지 않은 실정이다. 이에 본 논문에서는 음향수조에서 실험을 통해 획득한 데이터를 이용하여 MIMO 수중음향통신의 성능을 분석하였다. 실험 시 먼저 채널 분석에 필요한 신호를 전송하여 수중 채널 환경에서의 페이

딩 및 지연 확산 특성 등을 분석하였다. 이때 송수신기는 각각 2개, 4개로 하여 실험을 수행하였고, 수집된 데이터들은 4개의 수신기 가운데 2개의 출력만을 사용하여 2×2 MIMO 시스템으로 처리하였다.

II. MIMO 수중음향통신

본 논문에서 고려한 MIMO 시스템은 다음과 같다. 예를 들어 송신기가 2개인 경우 비트 열은 두 개의 채널로 분배되고, 각 채널 별로 심볼 매핑과 변조 과정을 거쳐 송신된다. 수신단은 검출기 구조를 갖는데 수신된 신호는 복조 후 시간동기화와 반송파 동기화 과정을 거친다. 이후 채널 추정 과정을 수행하였으며, 추정된 채널 정보는 등화기를 구성하는데 사용된다. 이진 데이터는 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조되었고, 이 과정에서 roll-off 계수가 0.3인 raised cosine 필터를 사용하였다. 임의의 시간 k 에서 n 번째 송신기로부터 송신된 데이터 심볼을 $s_n(k)$ 라 하고, N 을 송신기의 수라고 하면 m 번째 수신기에 수신된 기저대역 신호는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$r_m(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=0}^L h_{n,m}(k,l) s_n(k-l) e^{j\phi_{n,m}(k)} + v_m(k) \quad (1)$$

$v_m(k)$ 는 첨가 잡음 신호이며, $h_{n,m}(k,l)$ 는 각 송수신기 사이의 채널 임펄스 응답으로써 최대 지연 길이는 L 이라 하였다. $\phi_{n,m}(k)$ 는 도플러와 동기화 과정에서 발생하는 위상 오차항이나 본 논문에서는 고려하지 않았다. 수신된 신호는 검출기를 이용하여 이진 데이터로 복원되는데 이는 원칙적으로 심볼간 간섭을 제거하기 위해 채널 추정을 포함하는 등화기와 채널들 사이의 간섭을 제거하기 위한 간섭 제거기로 구성된다. 먼저 채널 추정을 위해서 다양한 방법들이 존재하나 본 논문에서는 간단하면서도 효율적인 LMS (Least Mean Square) 알고리즘을 기반으로 하는 방법을 프리앰블 구간에서 수행하였다. 각 송수신기 사이의 채널을 추정하기 위해 송신기들은 순차적으로 프리앰블 신호를 전송하게 된다. 채널 추정 과정을 거치면 각 송신기와 수신기 사이의 채널 임펄스 응답 $\widehat{h_{n,m}}(l)$ 을 얻게 된다.

여기서 식(1)에 나타낸 시간 인덱스 k 는 생략하였다. 이 채널 임펄스 응답을 이용하여 등화기를 구성하는데 본 논문에서는 간단한 Zero Forcing 등화기를 적용하였다. 채널 임펄스 응답을 이용하여 다음과 같은 행렬을 구성할 수 있다.

$$\widehat{H}_{n,m} = \begin{bmatrix} \widehat{h}_{n,m}(L) & \cdots & \widehat{h}_{n,m}(0) & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \widehat{h}_{n,m}(L) & \cdots & \widehat{h}_{n,m}(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

만약 송수신기를 각각 N 개, M 개로 하는 $N \times M$ 시스템이라면 아래 식과 같은 전체 채널 행렬 \widehat{H} 를 아래와 같이 구성할 수 있다.

$$\widehat{H} = \begin{bmatrix} \widehat{H}_{11} & \widehat{H}_{21} & \cdots & \widehat{H}_{M1} \\ \widehat{H}_{12} & \widehat{H}_{22} & \cdots & \widehat{H}_{M2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widehat{H}_{1M} & \widehat{H}_{2M} & \cdots & \widehat{H}_{MM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

채널 행렬 \widehat{H} 를 이용하여 n 번째 송신기로부터 송신된 신호를 복원하기 위한 선형 Zero Forcing 등화기의 계수 w_n 을 아래와 같이 구하고, 등화기 출력을 얻는다.

$$w_n = (\widehat{H}\widehat{H}^H)^{-1}\widehat{d}_n \quad (4)$$

$$\widehat{y}_n = w_n^H r_n \quad (5)$$

식 (4)에서 윗 첨자 H 는 hermitian 행렬을 의미하며, $(\cdot)^{-1}$ 은 역행렬을 뜻한다. 또한 $\widehat{d}_n = [\widehat{h}_{n1}^T \cdots \widehat{h}_{nM}^T]^T$ 이며, $r_n = [r_1^T \cdots r_M^T]^T$ 이다. 마지막으로 간섭 제거기를 이용하여 다른 송신기로부터 전송된 신호를 최소화할 수 있는데 정렬된 연속형 간섭 제거기(ordered successive interference canceller)를 사용할 수 있다[7].

III. 수조 실험 및 결과

다중경로 전달 특성이 나타나는 수중 환경에서 MIMO 시스템의 성능을 고찰하기 위해서 수조 실험을 수행하였다. 실험은 수심이 10 m인 수조에서 이루어졌

는데 그림 1에 보이는 바와 같이 송신기에서 전송한 신호는 4×1 선형 수직 배열된 센서를 이용하여 수신하였으며, 배열 센서간의 간격은 2 m, 송수신기 사이의 수평거리는 7 m로 하였다. 그리고 배열 센서에 수신된 신호는 샘플링율이 192 kHz인 A/D 변환기를 사용하여 디지털 데이터로 변환한 후에 저장하였다. 프리앰블은 0.5 kbps 전송율의 BPSK(Binary Phase Shift Keying)로 변조하였으며, 데이터는 송신기 당 1 kbps의 QPSK로 변조하였다. 반송파 주파수는 12 kHz로 하였고, 별도의 채널 부호화 기법은 적용하지 않았다. 송신 트랜스듀서로는 ITC-1001, 수신 하이드로폰으로는 B&K 8106 모델을 사용하였고, 전력 증폭기로 B&K 2713을 사용하였다.

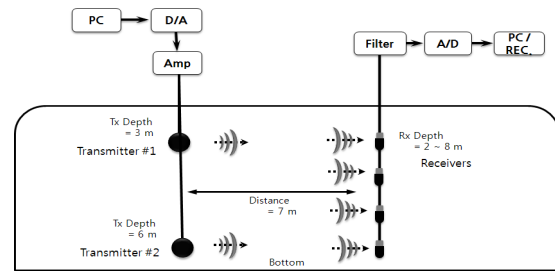


그림 1. 수조 실험 환경
Fig. 1 Experimental environment in water tank.

수조 환경에서의 다중경로 특성 분석을 위하여 프리앰블 구간에서 그림 2와 같이 PN(Pseudo Noise) 부호열을 송신기를 번갈아 가면서 송신하였고, 이어서 동시에 서로 다른 데이터 열을 전송하였다. 그림 1에서 수면 가까이 위치된 송수신기를 각각 1번이라 하고, 바닥 가까이 위치된 수신기를 4번이라 하였다.

Tx 1	Preamble (PN code)	Data
Tx 2	Preamble (PN code)	Data

그림 2. 송신 신호 구조
Fig. 2 Structure of Tx signal

그림 3 (a)~(d)는 첫 번째 송신기와 각 수신기 사이의 채널 응답 특성이며, (e)~(h)는 두 번째 송신기와 각 수신기 사이의 채널 응답 특성이다.

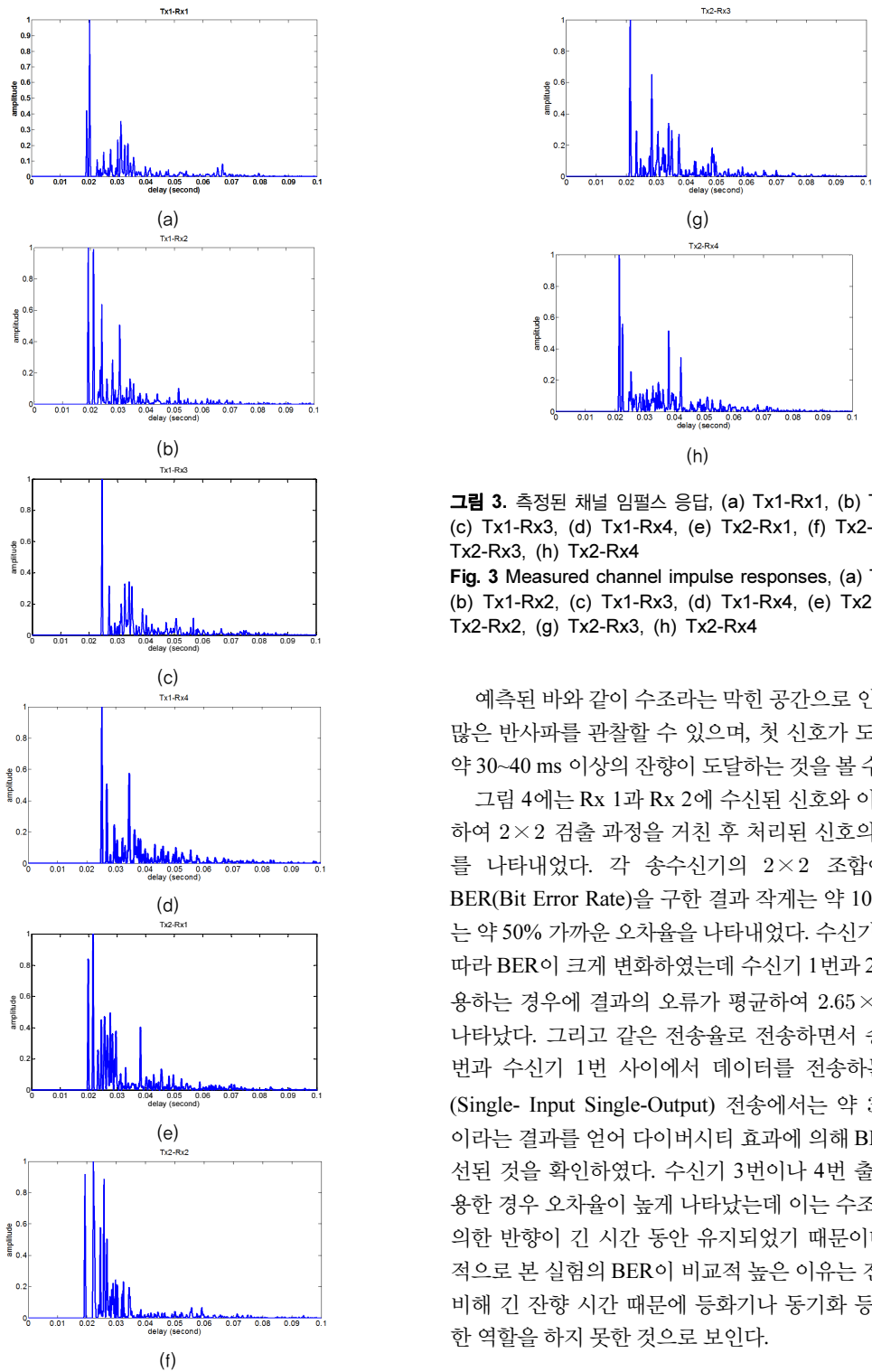


그림 3. 측정된 채널 임펄스 응답, (a) Tx1-Rx1, (b) Tx1-Rx2, (c) Tx1-Rx3, (d) Tx1-Rx4, (e) Tx2-Rx1, (f) Tx2-Rx2, (g) Tx2-Rx3, (h) Tx2-Rx4

Fig. 3 Measured channel impulse responses, (a) Tx1-Rx1, (b) Tx1-Rx2, (c) Tx1-Rx3, (d) Tx1-Rx4, (e) Tx2-Rx1, (f) Tx2-Rx2, (g) Tx2-Rx3, (h) Tx2-Rx4

예측된 바와 같이 수조라는 막힌 공간으로 인하여 수많은 반사파를 관찰할 수 있으며, 첫 신호가 도달한 후 약 30~40 ms 이상의 잔향이 도달하는 것을 볼 수 있다.

그림 4에는 Rx 1과 Rx 2에 수신된 신호와 이를 이용하여 2×2 검출 과정을 거친 후 처리된 신호의 성상도를 나타내었다. 각 송수신기의 2×2 조합에 따른 BER(Bit Error Rate)을 구한 결과 작게는 약 10%, 크게는 약 50% 가까운 오차율을 나타내었다. 수신기 조합에 따라 BER이 크게 변화하였는데 수신기 1번과 2번을 사용하는 경우에 결과의 오류가 평균하여 2.65×10^{-1} 로 나타났다. 그리고 같은 전송율로 전송하면서 송신기 1번과 수신기 1번 사이에서 데이터를 전송하는 SISO (Single- Input Single-Output) 전송에서는 약 3×10^{-1} 이라는 결과를 얻어 다이버시티 효과에 의해 BER이 개선된 것을 확인하였다. 수신기 3번이나 4번 출력을 사용한 경우 오차율이 높게 나타났는데 이는 수조 바닥에 의한 반향이 긴 시간 동안 유지되었기 때문이다. 전반적으로 본 실험의 BER이 비교적 높은 이유는 전송율에 비해 긴 잔향 시간 때문에 등화기나 동기화 등이 충분한 역할을 하지 못한 것으로 보인다.

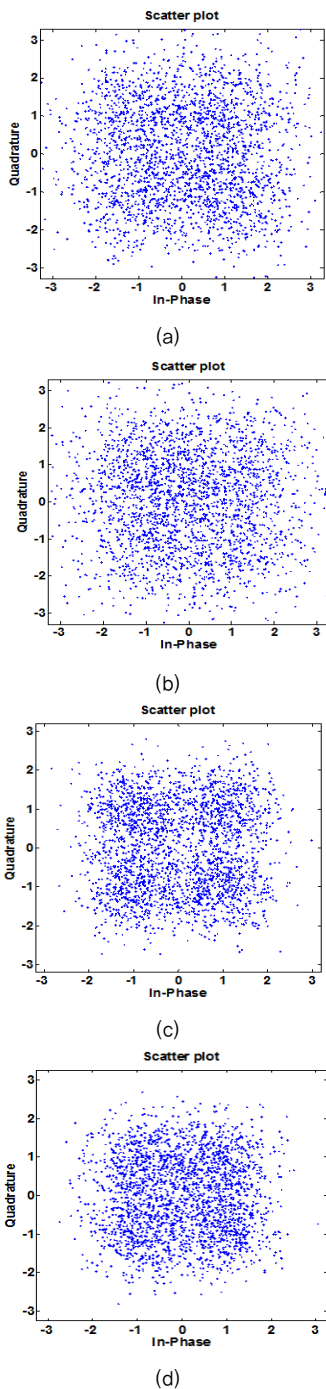


그림 4. 성상도, (a) Rx1 수신 신호, (b) Rx2 수신 신호, (c) Rx1 처리된 신호, (d) Rx2 처리된 신호

Fig. 4 Constellations, (a) Rx1 received signal, (b) Rx2 received signal, (c) Rx1 processed signal, (d) Rx2 processed signal

다음의 그림 5에는 수조에서 측정된 채널 정보를 이용하여 시뮬레이션을 통해 BER 곡선을 구한 것으로 SISO 채널과 2x2 MIMO 채널의 성능을 나타낸 것이다. 데이터는 매번 104개씩 생성하였다. BER 곡선에서 SISO 통신보다는 MIMO 통신의 장점을 확인할 수 있다.

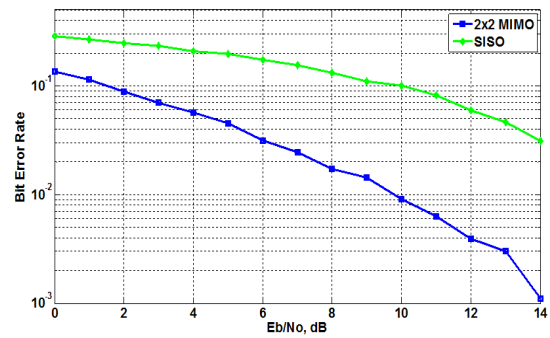


그림 5. BER 곡선
Fig. 5 BER curve

IV. 결 론

본 논문에서는 국내에서는 아직 시뮬레이션에만 그치고 있는 MIMO 수중음향통신의 성능을 직접 수조에서 실험을 통해 획득한 데이터를 이용하여 분석하였다. 이를 위해 먼저 다중 경로 전달 특성의 영향을 고찰하여 수중 채널 전달 특성을 측정하였다. 실험 결과 수조라는 환경으로 인하여 매우 심한 다중 경로 전달 특성을 관찰하였으며, 이로 인해 오차율은 전반적으로 높게 나타났지만 SISO 시스템을 사용하는 것에 비해 상대적으로 오차율이 감소되었다.

따라서 육상 무선통신에서 사용되는 MIMO 전송 방식과는 다른 형태로 송신되어야 하며, 특히 간섭 제거기의 역할이 매우 클 것으로 판단된다. 향후 실제 해역에서 MIMO 시스템을 구축하고, 데이터를 획득하여 그 성능을 분석할 계획이다

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD110101DD, 국제공동연구) 및 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

[1] G.D.Golden, G.J.Foschini, R.A.Valenzuela, and P.W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture," *Electron. Letters*, vol. 35, no. 1, pp.14-16, January 1999

[2] J.Ling, T.Yardibi, X.Su, H.He, and J.Li, "Enhanced channel estimation and Symbol Detection for High Speed multi-input multi-output underwater acoustic communications," in *proceeding of the 5th IEEE Signal Processing Education Workshop*, Marco Island, FL, pp. 126-131, 2009.

[3] Magnus L. Nordenvaad and Tommy Oberg, "Iterative reception for acoustic underwater MIMO communication," in *Proceeding of the IEEE Oceans 2006*, Boston, MA, vol. 21, no.3, pp. 1-6, 2006.

[4] B.Li, J.Huang, S.Zhou, K.Ball, M.Stojanovic, L.Freitag, and P.Willett, "MIMO-OFDM for high rate underwater acoustic communications," in *Proceeding of the IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 634-644, 2009.

[5] H.L. Ko, S.G. Lee, M.S. Kim, D.Y. Cho, K.Y. Kim, B.H. Park, J.W. Park, and Y.G. Lim, "Performance Analysis of the Spatial Correlation for Underwater Channel Environments," in *Proceeding of the Journal of the Acoustic Society of Korea*, vol. 31, no. 2, pp.107-113, 2012

[6] D.K. Han, B. Hui, K.H. Chang, S.H. Byun, S.M. Kim, and Y.K. Lim, "Design Philosophy of MIMO OFDM system for Underwater Communication," in *Proceeding of the Korean Institute of Information and Communication Sciences*, vol. 15, no. 1, p.22-32, 2011.

[7] H. Lin, Y. Tang, L. Guan and S. Shao, "Ordered successive interference cancellation (OSIC) in V-BLAST systems with asynchronous transmission mode," in *Proceeding of the Wireless Personal Communications*, pp. 263-275, 2010.



권병철(Byung-Chul Gwun)

2013년 한국해양대학교 전자공학과 (학사)
2013년-현재 한국해양대학교 전자공학과 (석사과정)
※관심분야 : 수중통신, DSP 및 CPLD



김기만(Ki-Man Kim)

1988년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1996년-현재 한국해양대학교 전자공학과 교수
1988년-현재 IEEE, member
1997년-현재 한국정보통신학회, 종신회원
2003년-현재 한국음향학회 논문편집위원 (수중음향 분야)
2007년-현재 방위사업청 지정 수중통신탐지특화연구소센터 실장
2013년-현재 TTA WG3181 수중음파통신 표준화 그룹 위원
※관심분야 : 수중음향통신, 소나 신호처리, MIMO detection, 채널 추정, DSP 및 CPLD