

중장거리 다중송신채널 환경에서 수중음향통신 시뮬레이터 성능 분석 및 검증

Performance analysis and verification of underwater acoustic communication simulator in medium long-range multiuser environment

박희진,¹ 김동현,¹ 김재수,^{2†} 송희천,³ 한주영⁴

(Heejin Park,¹ Donghyeon Kim,¹ J. S. Kim,^{2†} Hee-Chun Song,³ and Joo Young Hahn⁴)

¹한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원, ²한국해양대학교 해양공학과

³Scripps Institution of Oceanography, ⁴국방과학연구소

(Received August 31, 2018; revised October 22, 2018; accepted November 22, 2018)

초 록: 최근 장거리 수중음향통신 연구가 활발하게 진행되고 있다. 장거리 수중음향통신 연구를 위한 해상실험은 해양환경의 영향을 크게 받고 높은 비용과 많은 시간이 소요된다. 따라서 장거리 환경에서 수중음향통신 시스템의 성능을 예측하고 검증하기 위한 시뮬레이터에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 장거리 수중음향통신 시뮬레이터의 개발을 목적으로 중장거리 다중송신환경에서 수중음향통신 시뮬레이터로서 VirTEX(Virtual Time series Experiment)의 성능을 분석하고, 해상 실험 결과와 비교 검증하였다. 송신 신호는 탐침을 위한 Chirp신호와 16QAM 방식으로 변조된 통신 신호를 사용하였다. VirTEX를 통해 수신 신호를 모의하고 다중송신환경에 의해 발생하는 채널 간 간섭을 적응 수동형 시역전을 이용하여 보상하여 통신 성능을 분석하였다. 또한 2005년 7월 이탈리아의 Elba island 북쪽 해역에서 수행한 FAF05(Focused Acoustic Field 2005) 실험 데이터와 비교하여 이를 검증하였다.

핵심용어: 적응 수동형 시역전, VirTEX (Virtual Time series Experiment), 채널 간 간섭, 수중음향통신

ABSTRACT: UAComm (Underwater Acoustic Communication) is an active research area, and many experiment has been performed to develop UAComm system. In this paper, we investigate the possibility of modifying and applying VirTEX (Virtual Time series Experiment) to medium long range MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) UAComm of about 20 km range for the analysis and performance prediction of UAComm system. Since VirTEX is a time-domain simulator, the generated time series can be used in HILS (Hardware In the Loop Simulation) to develop UAComm system. The developed package is verified through comparing with the sea-going FAF05 (Focused Acoustic Field 2005) experimental data. The developed simulator can be used to predict the performance of UAComm system, and even replace the expensive sea-going experiment.

Keywords: Adaptive passive time reversal, VirTEX (Virtual Time series Experiment), Inter-channel ICI (Interference), Underwater acoustic communication system

PACS numbers: 43.60.Tj 43.60.Dh

1. 서 론

최근 장거리 수중음향통신 연구가 활발하게 진행

되고 있다.^[1,2] 하지만 국내의 수중음향통신에 대한 연구는 단거리에 국한되어있으므로^[3,4] 장거리 수중음향통신에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 장거리 수중음향통신을 목적으로 해상 시험을 진행할 경우, 저주파 음원의 높은 비용, 인력, 장비 등이 요구되며 해양 환경의 영향을 많이 받는다. 따라서

†Corresponding author: J. S. Kim (jskim@kmou.ac.kr)
Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University,
727 Taejong-ro, Youngdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea
(Tel: 82-51-410-4325, Fax: 82-51-403-4320)

“이 논문은 2018년도 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문임.”

장거리 환경에서 수중음향통신 시스템의 성능을 예측하고 검증하기 위한 시뮬레이터에 대한 연구가 필요하다.

수중음향통신은 전자기파에 비해 낮은 반송주파수를 이용하는 음파를 사용하므로 데이터 전송률이 낮다. 따라서 데이터 전송률을 높이기 위한 방안으로 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)통신이 제안되었다.^[5,6] 하지만 MIMO 통신은 다중음원에 의한 채널 간 간섭이 발생해 통신 성능이 저하되는 단점이 있다. MIMO 통신은 통신 성능 개선을 위해 채널 간 간섭에 대한 보상이 필요하다.

본 논문에서는 장거리 수중음향통신 시뮬레이터의 개발을 목적으로 중장거리 다중송신환경에서 수중음향통신 시뮬레이터의 성능을 분석하였다. 시뮬레이터의 환경은 2005년 7월 이탈리아의 Elba island 북쪽 해역에서 수행한 FAF05 (Focused Acoustic Field 2005)의 환경을 사용하였다.^[7,8] 송신기와 수신기의 거리는 20 km이며, 중장거리에 해당한다.^[9] 인접 심볼 간 간섭과 다중송신환경에 의해 발생하는 채널 간 간섭에 의해 저하된 통신성능을 개선하기 위해, 시뮬레이터를 통해 구현한 수신신호에 기 연구된 수동형 시역전과 적응 수동형 시역전을 적용하였다. 또한 기 연구된 FAF05 데이터와 통신 성능을 비교하여 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 수중음향통신 시뮬레이터와 시뮬레이션에 사용된 실험 환경 및 신호에 대해 설명한다. III장에서는 통신성능 개선을 위해 사용한 수동형 시역전과 적응 수동형 시역전에 대해 설명하고 IV장에서 시뮬레이터를 통해 획득한 수신 신호를 바탕으로 통신성능을 분석하고 해상 실험 데이터와 비교한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 수중음향통신 시뮬레이터

2.1 VirTEX

VirTEX(Virtual Timeseries EXperiment)는 Ray theory를 기반으로 한 음파전달모델인 BELLHOP을 이용하여 채널을 구현하고, 시간 영역에서 콘볼루션을 통해 음향환경 정보를 송신 신호에 적용하여 가상의

수신 신호를 생성하는 모델이다. VirTEX는 음파전달에 있어서 직관적인 이해가 가능하며 거리 종속 환경에서도 사용 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 수신기의 움직임도 반영할 수 있어 도플러 효과를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 단점으로는 고주파에서는 비교적 정확한 채널을 구현하지만, 중·저주파 대역에서는 채널 구현의 정확성이 비교적 낮다. 또한 채널을 구현할 때 단일 주파수를 사용하므로, 실제 해양환경을 구현할 때 한계가 있다.^[10-13]

2.2 시뮬레이션 환경

본 논문에서는 2005년 7월에 이탈리아 북쪽 해역에서 실시한 FAF05의 환경을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용된 음속구조와 실험 환경은 Fig. 1과 같다.^[7]

실험 해역의 해수면 정보와 해저면 지형은 FAF05 실험에서 측정되지 않았으므로 해수면 파형은 고려하지 않았으며 해저면은 평탄하다고 가정하였다.

송신기는 수심 88 m, 101 m, 113 m의 깊이에 3채널이 배치된다. 수신기는 수심 48 m~110m에 2m의 일정한 간격으로 32채널이 배치된다. 송신기와 수신기

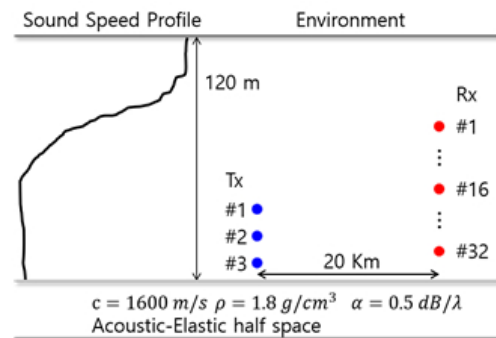


Fig. 1. The geometry of simulation.

Tx1	Probe signal	Guard time	Data packet 1	
Tx2	Guard time	Probe signal	Guard time	Data packet 2
Tx3	Guard time	Probe signal	Guard time	Data packet 3

Fig. 2. Configuration of the transmitted signal packet.

사이의 거리는 20 km이며, 전체 수심은 120 m이다. 송신기와 수신기는 정지 상태이다.

2.3 전송 신호

전송 신호의 구성은 Fig. 2와 같다. 전송 신호는 탐침음원으로 사용할 Chirp 신호와 통신용 데이터 신호로 구성된다. 샘플링 주파수는 12 kHz이며 전송 신호의 중심주파수는 3.5 kHz이다. Chirp 신호는 2.5 kHz에서 4.5 kHz의 주파수 대역을 가진다. 데이터 신호는 16 QAM 변조방식을 사용하였다. 인접 심볼간 간섭을 줄이기 위해 roll-off factor가 1인 RRC(Root Raised Cosine) 필터를 변조와 복조 과정에서 정합 필터로 사용하였다. 데이터 신호는 400개의 비트를 가지는 프리앰블과 15,600개의 비트로 구성된다. 데이터 신호의 전송률은 4 kbps이며, Chirp 신호의 길이는 0.3 s, 데이터 신호의 길이는 10 s이다.^[8]

2.4 신호 대 잡음비

시뮬레이션을 통해 획득한 수신 신호에는 잡음이 고려되지 않았으므로, 실제 환경과 유사하게 모의하고자 잡음을 삽입하였다. 실제 해상 실험 데이터에서 각 수신 채널의 신호 대 잡음비를 계산하고 평균을 취하여 입력 신호 대 잡음비를 산출하였다. 시뮬레이터를 통해 구현한 수신 신호가 실제 해상 실험 데이터와 동일한 입력 신호 대 잡음비를 갖도록 백색 가우시안 잡음을 생성해 삽입하였다.

III. 수동형 시역전

3.1 수동형 시역전

시역전 처리는 수신 신호를 시간 영역에서 반전시켜 재전파하면 송신기에 접속되는 가역성의 원리를 이용한다.^[14-17]

Fig. 3과 같이 N 개의 송신기와 M 개의 수신기가 있는 다중송신채널 환경에서의 수신 신호는 Eq. (1)과 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$r_m(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) * h_{n,m}(t) \quad (m = 1, 2, \dots, M). \quad (1)$$

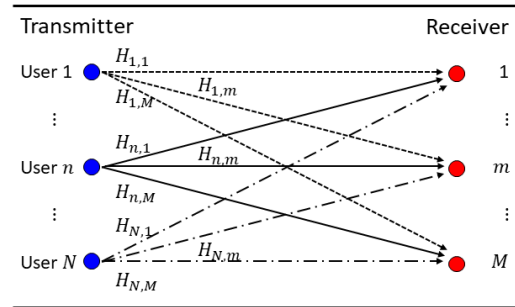


Fig. 3. Schematic diagram of multiuser communications using passive time reversal.

$r_m(t)$ 은 m 번째 수신기에서의 수신 신호, $s_n(t)$ 은 n 번째 송신기에서의 송신 신호, $h_{n,m}(t)$ 은 n 번째 송신기와 m 번째 수신기 사이의 전달함수, *은 콘볼루션 연산자를 의미한다.

수동형 시역전은 전달함수를 구하여 수치적 정합 필터를 수행하는 것으로 시간 영역에서 Eq. (2), 주파수 영역에서 Eq. (3)과 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$y_n(t) = \sum_{m=1}^M r_m(t) * h_{n,m}^*(-t) \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (2)$$

$$Y_n(f) = \sum_{m=1}^M R_m(f) \times H_{n,m}^*(f) \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (3)$$

$y_n(t)$ 과 $Y_n(f)$ 는 각각 수동형 시역전을 통해 재구성된 시간 영역과 주파수 영역에서의 n 번째 송신기에서의 송신 신호를 의미한다.^[17] $y_n(t)$ 를 복조하여 통신 성능을 분석하게 된다.

3.2 적응 수동형 시역전

적응 수동형 시역전 처리는 수신 신호를 시간 영역에서 반전시킨 후, 전달함수에 가중치를 부여해 재전파하는 것이다.^[13,18,19]

N 개의 송신 채널과 M 개의 수신 채널이 존재할 때, n 번째 송신기와 M 개의 수신기 사이의 전달함수는 d_n 으로 Eq. (4)과 같이 정의할 수 있다.

$$d_n = \begin{bmatrix} H_1^n(f) \\ \vdots \\ H_M^n(f) \end{bmatrix} \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (4)$$

가중 벡터는 전달함수에 가중치를 부여하기 위해 이용되며, n 번째 송신신호의 가중 벡터 w_n 은 Eq. (5)와 같이 수식으로 나타낼 수 있다. Eq. (5)에서 \mathbf{K} 는 CSDM(Cross Spectral Density Matrix)이며 Eq. (6)와 같이 수식으로 나타낼 수 있다. $\sigma^2 I$ 는 행렬 역변환을 위한 대각부하(Diagonal loading)이며, 여기서 σ^2 는 임의의 매우 작은 상수이고, I 는 단위행렬이다.

$$w_n = \frac{\mathbf{K}^{-1} d_n}{d_n^H \mathbf{K}^{-1} d_n} \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (5)$$

$$\mathbf{K} = \sum_{n=1}^N d_n d_n^H + \sigma^2 I \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (6)$$

$$Y_n(f) = \sum_{m=1}^M R_m(f) \times w_n^*(f) \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (7)$$

가중벡터를 이용해 적응 수동형 시역전을 수행한 결과는 Eq. (7)과 같이 나타난다. $Y_n(f)$ 은 적응 수동형 시역전을 통해 재구성된 n 번째 송신기에서의 송신 신호를 의미한다.^[17,13] $Y_n(f)$ 의 역푸리에변환 결과를 복조하여 통신성능을 분석하게 된다.

IV. 통신성능분석

본 절에서는 시뮬레이터를 이용해 구현한 수신 신호에 수동형 시역전과 적응 수동형 시역전을 수행하여 재구성된 송신 신호를 복조하여 통신성능을 분석하였다. 통신 성능은 송신 신호의 비트 정보와 복조된 수신 신호의 비트 정보의 오차의 비율인 비트 오류율 비교하여 분석한다. 또한 시뮬레이션 분석 결과를 기 연구된 FAF05 해상 실험 데이터와 비교하여 검증하였다.^[13]

Fig. 4는 수동형 시역전을 적용해 인접 심볼 간 간섭을 보상해 복조한 결과를 성상도에 나타낸 것이다. Fig. 4의 (a), (c), (e)는 시뮬레이터로 모의한 신호의 성상도이다. 비트 오류율은 0.97%, 0.88%, 1.22%이다. Fig. 4의 (b), (d), (f)는 해상 실험 데이터의 성상도이다.^[8] 비트 오류율은 0.46%, 2.45%, 1.32%이다.

시뮬레이터로 모의한 신호의 비트 오류율은 해상 실험 데이터와 0.51%, 1.57%, 0.1%의 차이를 보였다.

그 이유는 시뮬레이션을 수행할 때 해수면과 해저면을 평탄하다고 가정하였고 조류에 의한 수신기의 움직임 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 해수면의

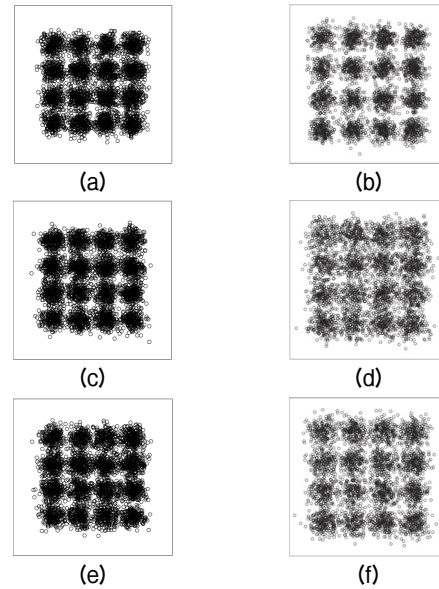


Fig. 4. Constellation results using passive time reversal mirror.

(a) VirTEX at user 1 (b) FAF05 at user 1^[13]
(c) VirTEX at user 2 (d) FAF05 at user 2^[13]
(e) VirTEX at user 3 (f) FAF05 at user 3^[13]

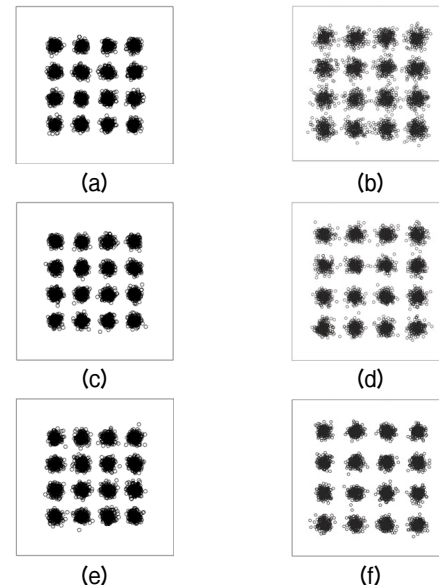


Fig. 5. Constellation results using adaptive passive time reversal mirror.

(a) VirTEX at user 1 (b) FAF05 at user 1^[13]
(c) VirTEX at user 2 (d) FAF05 at user 2^[13]
(e) VirTEX at user 3 (f) FAF05 at user 3^[13]

파형 정보와 해저면의 지형정보를 측정하여 반영하고, 조류에 따른 수신기의 움직임 고려한다면 시뮬레이터의 정확도가 증가할 것이다.^[11]

Fig. 5는 적응 수동형 시역전을 적용해 인접 심볼 간 간섭 뿐만 아니라 다중송신채널환경에서 발생하는 채널 간 간섭을 보상해 복조한 결과를 정상도에 나타낸 것이다. Fig. 5의 (a), (c), (e)는 시뮬레이터로 모의한 신호의 정상도이다. 비트 오류율은 모두 0.00%이다. Fig. 5의 (b), (d), (f)는 해상 실험 데이터의 정상도이다.^[8] 비트 오류율은 0.08%, 0.00%, 0.01%이다.

수동형 시역전보다 적응 수동형 시역전을 적용하였을 때 통신성능이 월등히 높은 것을 확인할 수 있다. 다중송신채널 환경에서 통신 성능 저하의 주원인인 채널 간 간섭이 적응 수동형 시역전에서 원활하게 보상되는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 20km의 중장거리 다중송신채널환경에서 VirTEX 시뮬레이터의 수중음향통신 성능을 분석하였다. 시뮬레이터를 이용해 모의한 수신 신호의 통신 성능을 FAF05 데이터와 비교하여 20km에서 시뮬레이터의 성능을 검증하였다. 시뮬레이션과 해상 실험 데이터와의 통신 성능은 각 송신 위치에서 0.51%, 1.57%, 0.1%의 차이를 가진다. 이러한 차이는 해수면과 해저면의 정보를 반영하지 않은 상황에서 발생했으며 허용 가능한 오차의 범위로 판단된다. 또한 MIMO 환경에서 발생하는 채널 간 간섭을 적응 수동형 시역전을 통해 보상하여, 통신성능이 개선됨을 확인하였다.

추후 연구로 20km 이상의 다중송신채널환경에서 수신기의 이동에 의한 도플러 효과와 해수면과 해저면 정보를 VirTEX 시뮬레이터에 적용시킨다면 장거리 수중음향통신 시뮬레이터를 개발 및 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(UD170022DD).

References

1. H. C. Song, S. Cho, T. Kang, and W. S. Hodgkiss, "Long-range acoustic communication in deep water using a towed array," *J. Acoust. Soc. Am.* **129**, 71-75 (2011).
2. T. Shimura, H. Ochi, and H. C. Song "Experimental demonstration of multiuser communication in deep water using time reversal," *J. Acoust. Soc. Am.* **134**, 3223-3229 (2013).
3. S. H. Oh, G. H. Byun, and J. S. Kim, "Performance improvement of underwater acoustic communication using ray-based blind deconvolution in passive time reversal mirror" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **35**, 375-382 (2016).
4. K. H. Choi, S. H. Kim, J. W. Choi, H. S. Kim, and B. N. Kim, "Algorithm and experimental verification of underwater acoustic communication based on passive time reversal mirror in multiuser environment" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **35**, 167-174 (2016).
5. A. C. Singer, J. K. Nelson, and S. S. Kozat, "Signal processing for underwater acoustic communications," in *IEEE Communications Magazine*, 90-96 (2009).
6. D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Ocean. Eng.* **25**, 4-27 (2000).
7. S. I. Kim, G. F. Edelmann, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, and H. C. Song, "Spatial resolution of time-reversal arrays in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **110**, 820-829 (2001).
8. H. C. Song, J. S. Kim, and W. S. Hodgkiss, "Crosstalk mitigation using adaptive time reversal," *J. Acoust. Soc. Am.* **127**, 19-22 (2010).
9. F. Mosca, and T. Shimura, "Low-frequency acoustic source for AUV long-range communication," *Mast Europe*, 1-9 (2011).
10. M. Siderius and M. B. Porter, "Modeling broadband ocean acoustic transmissions with time-varying sea surfaces," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, 137-150 (2008).
11. J. S. Kim, "Virtual time series experiment (VirTEX) simulation tool for underwater acoustic communication," *Proc. 09 Acoustic Society America Conf.*, 2174 (2009).
12. J. S. Kim, H. C. Song, W. S. Hodgkiss, M. Dzieciuch, and M. B. Porter, "Dynamic channel modeling with a time-evolving sea surface," *Proc. 10 European Conference on Underwater Acoustic*, 741-745 (2010).
13. S. H. Oh, H. S. Kim, J. S. Kim, J. H. Cho, J. H. Chung, and H. C. Song, "Performance Analysis of Underwater Acoustic Communication Systems Using Underwater Channel Simulation Tool," (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **31**, 373-383 (2012).

14. M. Fink, "Time-reversal mirrors," J. Phys. D: Appl. Phys. 26, 1333-1350 (1993).
15. W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, T. Akal, C. Ferla, and D. R. Jackson, "Phase conjugation in the ocean : Experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror," J. Acoust. Soc. Am. **103**, 25-40 (1998).
16. H. C. Song and W. S. Hodgkiss, "Multiuser communication using passive time reversal," IEEE J. Ocean. Eng. **32**, 915-926 (2007).
17. M. J. Eom, J. S. Kim, J. H. Cho, H. Y. Kim, and I. Sung, "Algorithm and experimental verification of underwater acoustic communication based on passive time-reversal mirror" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **33**, 392-399 (2014).
18. J. S. Kim, H. C. Song, and W. A. Kuperman, "Adaptive time-reversal mirror," J. Acoust. Soc. Am. **109**, 1817-1825 (2001).
19. M. J. Eom, S. H. Oh, J. S. Kim, and S. M. Kim, "Algorithm and experimental verification of underwater acoustic communication based on passive time reversal mirror in multiuser environment," (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **35**, 167-174 (2016).

▶ 김 재 수 (J. S. Kim)



1981년: 서울대학교 조선공학과 공학사
 1984년: 미국 University of Florida, 해양공학 공학석사
 1989년: 미국 MIT, 해양공학, 수중음향 공학박사
 1990년~1991년: 국방과학연구소 선임연구원
 1999년 ~ 2001년: 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist
 2009년 ~ 2010년: 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist
 1991년 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학과 교수

▶ 송 희 천 (Hee-Chun Song)



1978년: 서울대학교 조선공학과 공학사
 1980년: 서울대학교 조선공학과 공학석사
 1990년: 미국 MIT, 해양공학, 수중음향 공학박사
 1991년 ~ 1995년: 한국해양연구소 선임연구원
 1996년 ~ 현재: 미국 Scripps 해양연구소 연구원

▶ 한 주 영 (Joo Young Hahn)



1997년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 학사
 2000년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 석사
 2004년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 박사
 2005년 8월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

저자 약력

▶ 박 희 진 (Heejin Park)



2017년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 공학사
 2017년 3월 ~ 현재: 한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 석사과정

▶ 김 동 현 (Donghyeon Kim)



2013년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 공학사
 2015년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 공학석사
 2017년 3월 ~ 현재: 한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 박사과정