

일반화된 부엽 제거기 기반 시역전 기술을 이용한 수중음향통신 성능 분석

Performance analysis of underwater acoustic communication using time reversal mirror based on generalized sidelobe canceller

남기훈, 김재수,*† 변기훈**

(Ki-Hoon Nam, J. S. Kim,* and Gi Hoon Byun**†)

국립해양조사원 해양과학조사연구실, *한국해양대학교 해양공학과,
**한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

(Received August 24, 2016; accepted September 23, 2016)

초 록: 수중음향통신에서 다중 입출력(Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) 환경은 인접 심볼 간 간섭뿐만 아니라 송신기 간의 채널 간 간섭의 영향으로 인하여 수신 신호의 왜곡이 발생하는 특징을 갖는다. 신호 보상을 위하여 시역전 기술이 이용되었지만 기존의 시역전 기술은 채널 간 간섭을 효과적으로 제거하지 못하는 한계가 있다. 본 논문에서는 채널간 간섭의 제거를 위해 일반화된 부엽 제거기(Generalized Sidelobe Canceller, GSC)를 적용한 시역전 기술을 제안한다. 제안된 방법의 검증을 위해 FAF05(The Focused Acoustic Forecasting 05) 해상 실험 데이터를 이용하여 기존의 시역전 기술과의 통신 성능 비교를 수행하였으며, 그 결과 제안된 방법에 대한 통신 성능이 기존의 시역전 기술에 비해 향상됨을 확인 할 수 있었다.

핵심용어: 수중음향통신, 시역전 기술, 일반화된 부엽 제거기, 다중 입출력

ABSTRACT: MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) in underwater acoustic communication has distortion of received signal because of ISI (Inter-Symbol Interference) and crosstalk among transmitters. Time-reversal mirror was used for compensating of signal distortion, but it has a limit in eliminating crosstalk effectively. This paper proposes a time-reversal mirror based on GSC (Generalized Sidelobe Canceller) for removing crosstalk. The FAF05 (The Focused Acoustic Forecasting 05) experimental data has been used to verify the suggested method by comparison with the conventional time-reversal for communication performance, and it is demonstrated that the suggested method produces better communication performance results than conventional time-reversal.

Keywords: Underwater acoustic communication, Time-reversal mirror, Generalized sidelobe canceller, Multiple input multiple output

PACS numbers: 43.60.Dh, 43.60.Gk, 43.30.Wi

1. 서 론

수중 환경은 도파관 구조로써 해수면과 해저면의 반사에 의하여 시간차를 갖는 신호가 수신기에 도달하게 된다. 그 결과 다중경로 특성이 발생하여 복잡한 채널 환경을 갖게 된다. 또한 서로 다른 도달 시간

을 갖는 다중경로 신호들의 합성으로 인하여 지연확산이 발생하게 되고 이는 신호 왜곡을 발생시킨다.^[1] 특히 지연확산에 의한 인접 심볼 간 간섭의 발생으로 인하여 통신 성능 복원에 어려움이 발생한다.

수중음향통신은 전파를 이용한 육상통신에 비하여 낮은 반송파 주파수를 사용하게 되고 전송 신호의 대역폭에 제한이 되어 있기 때문에 통신용량의 증가에 어려움이 있다. 송신 신호의 통신용량을 높이기 위한 방안으로 국내외에서 다중 입출력(Multiple

†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)

Input Multiple Output, MIMO) 수중음향통신 연구가 진행되고 있다.^[2,3] 다중 입출력 환경은 다중 송신기 배열에서 서로 다른 데이터를 전송하는 공간 다중화 특성을 통해 추가적인 주파수의 할당 없이 송신기의 개수와 비례하는 통신용량을 얻을 수 있다. 또한 다중 입출력 환경에서 다중 수신기 배열을 통하여 공간 다이버시티효과를 얻을 수 있기 때문에 데이터의 신뢰도를 높일 수 있다. 하지만 서로 다른 송신기에서 전달한 신호가 하나의 수신기에 동시에 기록되는 현상인 채널 간 간섭이 발생하며 채널 간 간섭은 인접 심볼 간 간섭과 함께 신호 왜곡을 심화시켜 수신 신호 보상에 어려움을 끼친다. 왜곡된 신호를 보상하기 위하여 시역전 기술을 적용하였으나 기존의 수동형 시역전은 채널 간 간섭에 의한 신호 왜곡을 완전히 보상 할 수 없는 한계를 갖는다. 이 때, 적응형 빔형성 기법을 적용한 적응형 시역전 기술이 효과적으로 채널 간 간섭을 완화시키는 것이 확인되었다.^[4]

본 논문에서는 적응형 빔형성 기법 중 하나인 일반화된 부엽 제거기(Generalized Sidelobe Canceller, GSC)를 수동형 시역전에 적용하여 새로운 적응형 시역전 기술을 제안하고 실험 데이터를 통해 제안된 방법의 유효성을 검증한다.

II. 시역전 기술

시역전 기술은 수신된 신호를 시간영역에서 반전하여 재전송함으로써 정확한 채널 추정이 이루어지지 않아도 왜곡된 신호 보상이 가능하며 구현이 간단하다는 특징을 갖는다. 시역전 기술은 공간 다이버시티를 얻기 위하여 시공간적인 집속을 이용하고 특히 다중경로가 있는 수중 통신 채널 환경에서 유용하게 활용될 수 있다. 시간적 집속을 통해 다중경로에 의한 인접 심볼 간 간섭을 완화시킬 수 있고, 공간적 집속은 높은 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 얻을 수 있게 한다.^[5] 또한 시역전 기술의 이점은 다중 채널 적응형 등화기에 비하여 구현이 간단하기 때문에 낮은 계산 복잡성을 갖는다는 점이다.^[6]

2.1 수동형 시역전

수동형 시역전은 송신기에서 수신기에 따른 한 방

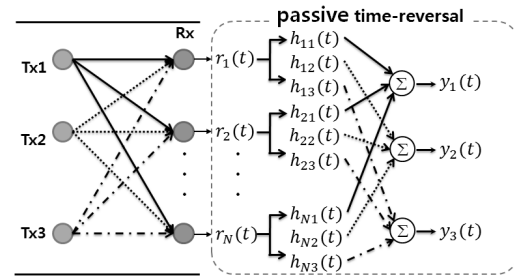


Fig. 1. Schematic diagram of passive time-reversal.

향 전파과정으로써 수행될 수 있다. 수신 채널별로 탐침신호를 이용하여 채널 임펄스 응답을 산출하는 방법으로 시역전 기술을 적용한다. 소음성분을 무시할 때, M 개의 송신기를 갖는 다중 입출력 환경에서 수신기 배열의 i 번째 수신 신호 $r_i(t)$ 는 Eq.(1)과 같다.

$$r_i(t) = \sum_{j=1}^M s_j(t) * h_{ij}(t), \quad (1)$$

여기서 $s_j(t)$ 는 j 번째 송신기의 송신신호, $h_{ij}(t)$ 는 각 송수신기에 대응하는 채널 임펄스 응답, 그리고 $*$ 는 컨볼루션을 의미한다.

3개의 송신기와 N 개의 수신 배열을 갖는 다중 입출력 환경의 수동형 시역전의 구조는 Fig. 1과 같으며 각 수신 신호의 채널 임펄스 응답 $h(t)$ 에 대하여 시간영역에서 반전시킨 $h_i(-t)$ 를 이용하여 수치적 정합 필터를 수행한다. 여기서 N 개의 수신기 배열을 갖는 환경에서 재집속된 수동형 시역전 신호는 Eq.(2)와 같이 나타난다.^[5,7,8]

$$y_i(t) = \sum_{i=1}^N r_i(t) * h_{ij}(-t). \quad (2)$$

2.2 일반화된 부엽 제거기가 적용된 시역전

일반화된 부엽 제거기는 적응형 빔형성 기법 중 하나으로써 간섭 신호를 제거하기 위해 사용된다. 일반화된 부엽 제거기의 구조는 Fig. 2와 같이 도식화할 수 있으며 고정형 빔형성기 w_q , 차단 행렬(blocking matrix) B , 그리고 적응형 빔형성기 w_a 로 구성되며 i 번째 송신기에 의한 전체 복소가중치 벡터 w_i 는 Eq.(3)과 같다.^[9-11]

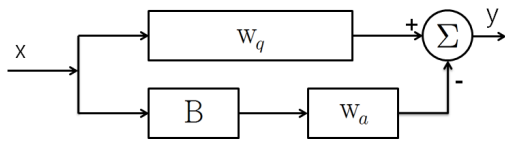


Fig. 2. A structure of generalized sidelobe canceller.

$$w_i = w_q - B^H w_a. \quad (3)$$

이 때 M 개의 송신기와 N 개의 수신기를 갖는 다중 입출력 환경을 가정하면 j 번째 송신기의 신호에 의한 채널 임펄스 응답을 Eq.(4)와 같이 열벡터로 나타낼 수 있다.

$$d_1 = \begin{bmatrix} H_{11}(f) \\ \vdots \\ H_{i1}(f) \\ \vdots \\ H_{M1}(f) \end{bmatrix}, \quad d_2 = \begin{bmatrix} H_{12}(f) \\ \vdots \\ H_{i2}(f) \\ \vdots \\ H_{N2}(f) \end{bmatrix}, \dots, \\ d_j = \begin{bmatrix} H_{1j}(f) \\ \vdots \\ H_{ij}(f) \\ \vdots \\ H_{Nj}(f) \end{bmatrix}, \dots, d_M = \begin{bmatrix} H_{1M}(f) \\ \vdots \\ H_{iM}(f) \\ \vdots \\ H_{NM}(f) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

각 송신기에 따른 고정형 빔형성기 w_q 는 Eq.(4)의 채널 임펄스 응답을 이용하여 Eq.(5)로써 표현된다.

$$w_q = d_j (d_j^H d_j)^{-1} c. \quad (5)$$

위의 식에서 c 는 $d^H w_q = c$ 를 만족하는 특징을 갖으며, $()^H$ 는 공액 복소수 전치를 의미한다.

Fig. 2에서 아래쪽 부분인 B 와 w_a 는 적응형 빔형성 부분으로써 $-B^H w_a$ 의 형태로 적용되며 소음 성분, 인접 심볼간 간섭, 채널간 간섭과 같은 원하지 않는 신호를 감소시킨다. 차단 행렬 B 는 $Bd_j = 0$ 을 만족하는 특징을 갖으며 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 통해 계산할 수 있고, Eq.(6)과 같이 정의할 수 있다.^[10]

$$B = \begin{bmatrix} d_j(2) & -d_j(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_j(3) & -d_j(2) & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & d_j(N) & -d_j(N-1) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

마지막으로 적응형 복소가중치 벡터 w_a 는 비구속 최적화문제를 통해 Eq.(7)과 같이 계산된다.^[9]

$$w_a = (BRB^H)^{-1} BR w_q, \quad (7)$$

여기서 R 은 상호 스펙트럼 밀도 행렬(Cross Spectral Density Matrix, CSDM)로써 $\sum d_j d_j^H$ 을 나타낸다.

일반화된 부엽 제거기를 통해 계산된 복소가중치 벡터 $w_i(t)$ 를 시간영역에서 반전시켜 $w_i(-t)$ 를 도출한다. 그리고 $w_i(-t)$ 를 수동형 시역전의 채널 임펄스 응답 $h_i(-t)$ 에 각각 대입함으로써 일반화된 부엽 제거기가 적용된 시역전 알고리즘을 구성한다.^[3]

III. 실험 환경

제안한 방법의 수중 통신 성능을 이탈리아 앞 해상에서 실시된 FAF05 (The Focused Acoustic Forecasting 05) 실험 데이터를 활용하여 검증하였다.^[3]

송신기의 위치는 88 m, 101 m, 113 m 깊이에 수직으로 배열되었고, 수신기는 48 m ~ 110 m 깊이에 2 m 간격으로 32개의 수직 배열로써 위치한다. 송수신기 사이의 거리는 20 km이고 실험해역의 평균적인 깊이는 120 m이다.

송신 신호의 데이터 패킷 구조는 Fig. 4에 나타내었으며 탐침 신호와 통신용 데이터 신호로 구성된

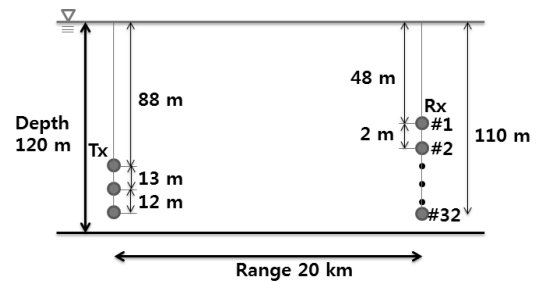


Fig. 3. The experimental setup.



Fig. 4. The transmitted signal packet structure.

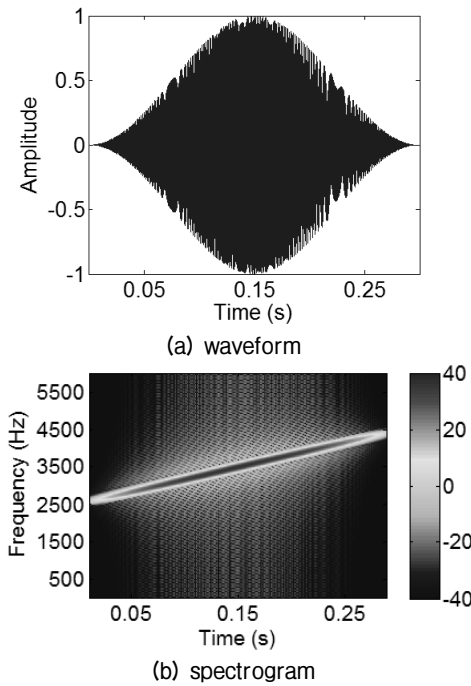


Fig. 5. The probe signal (LFM, up-sweep).

다. 탐침신호는 중심주파수 3.5 kHz, 샘플링 주파수 12 kHz와 대역폭 2 kHz를 갖는 LFM 신호로써 1번, 3번 송신기의 신호는 up-sweep, 2번 송신기의 신호는 down-sweep으로 생성되었다. 또한 각 송신신호에 따른 채널 구별을 위하여 특정한 시간 간격을 무음 구간으로 설정하여 탐침신호 사이에 삽입하였다. 다중 입출력 환경 구성을 위해 통신 신호의 시작 시간을 동일하게 하였으며 각각의 통신 신호를 구성하는 비트정보를 다르게 설정하였다. 통신 신호는 16-QAM으로 변조되었으며 각 송신기의 탐침 신호를 이용하여 생성되었다. 또한 통신 신호는 16,000개의 비트수를 갖으며 전송률은 2 kbps로써 길이는 8 s이다.

IV. 실험 결과

해상 실험 데이터의 7번째 수신기의 수신 신호를 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 각 송신기의 탐침 신호를 이용하여 채널 임펄스 응답을 확인하였으며 Fig. 7은 3번 송신기의 탐침 신호에 의한 채널 임펄스 응답을 수심별로 나타낸 것이다.

통신 성능 분석은 기존의 수동형 시역전과 일반화된 부엽 제거기가 적용된 시역전을 독립적으로 실시

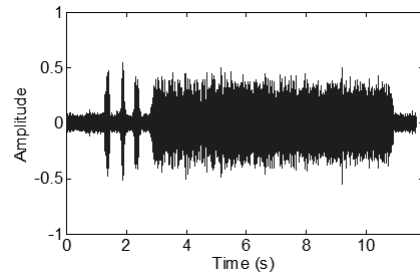


Fig. 6. The received signal (channel: 7).

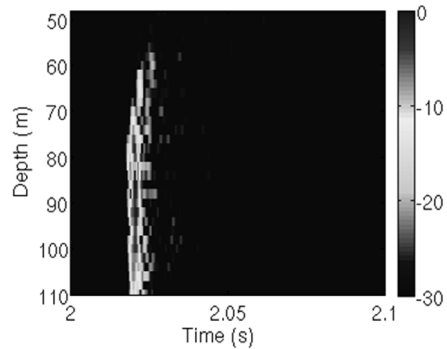


Fig. 7. Channel impulse response.

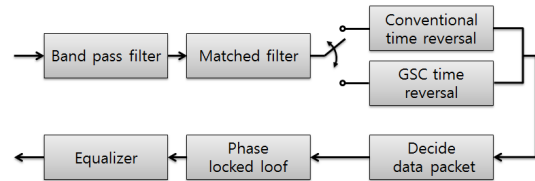


Fig. 8. Flow diagram of proposed underwater acoustic communication algorithm.

하여 비트오류율(Bit Error Rate, BER)을 계산하여 검증한다. 그리고 적용한 시역전 방법에 따른 비트오류율을 비교하여 통신 성능의 양상을 확인한다. 다중 입출력 환경이므로 각각의 송신 신호에 따른 비트오류율을 분석했으며 Fig. 8에서 전체적인 수신 신호 보상 과정의 흐름도를 나타내었다. 각 방법에 따른 비트오류율의 결과는 Table 1에 나타내었으며 기존의 수동형 시역전을 적용한 결과의 성상도는 Fig. 9의 (a)와 같고 송신기 1, 2, 3에 따른 비트오류율은 1.513%, 9.026%, 5.410%로 분석된다. 본 논문에서 제안한 일반화된 부엽 제거기가 적용된 시역전을 적용한 결과는 Fig. 9의 (b)에 나타내었고 각 송신기의 BER은 0.282%, 0%, 0.026%로 분석되며 기존의 시역전 방법과 비교하여 통신성능의 향상이 확인된다.

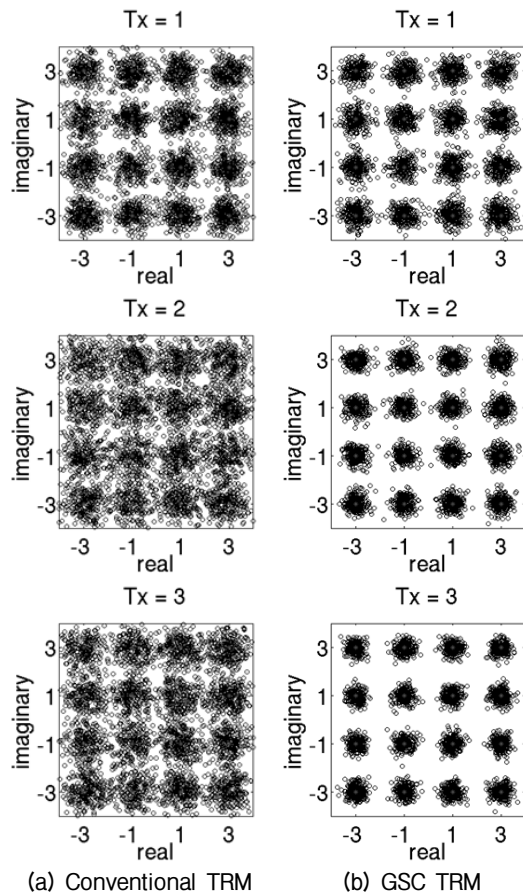


Fig. 9. The constellation of received signal.

Table 1. BER of the received signal (%).

Source	Conventional TRM	GSC TRM
1	1.513	0.282
2	9.026	0
3	5.410	0.026

V. 결 론

본 논문에서는 다중 입출력 송수신 환경을 갖는 수중 음향 통신에서 채널 간 간섭을 완화시키기 위해 적응형 빔형성 기법 중 하나인 일반화된 부엽 제거기를 적용한 시역전 방법을 제안하였고, 제안된 방법의 성능 검증을 위해 해상 실험 데이터를 이용하여 통신 성능을 분석하였다.

통신 성능 분석을 위해 각 송신신호의 탐침 신호를 이용하여 채널 임펄스 응답을 산출하였고 이를 이용하여 일반화된 부엽 제거기를 통해 복소가중치 벡터를 산출하였다. 그리고 기존의 시역전 기술과

일반화된 부엽 제거기가 적용된 시역전 기술에 채널 임펄스 응답과 복소 가중치 벡터를 각각 적용하여 서로의 비트오류율을 비교하였다. 기존의 시역전 기술을 적용했을 때 비트오류율은 송신기 1, 2, 3에 따라 1.513 %, 9.026 %, 5.410 %로 결과가 나타났고 일반화된 부엽 제거기가 적용된 시역전 적용시 비트오류율은 각각 0.282 %, 0 %, 0.026 %로 나타났다. 기존의 시역전 기술과 비교하여 일반화된 부엽 제거기가 적용된 시역전에서 채널 간 간섭의 완화를 통해 통신 성능의 향상이 확인되었다.

앞으로의 연구는 국내 해역에서의 다중 입출력 수중음향통신 실험을 통한 검증이 필요하다.

감사의 글

FAF05의 해양실험 자료를 사용할 수 있도록 허용 해준 미국 스크립스 해양연구소(Scripps Institution of Oceanography, SIO)의 물리연구부(Marine Physical Lab., MPL)에 감사드립니다.

References

1. P. J. Urick, *Principles of Underwater Sound 3rd Ed* (McGraw-Hill, New York, 1983), pp. 11-147.
2. B. C. Gwon and K. M Kim, "Experimental performance evaluation of MIMO underwater acoustic communication in water tank" (in Korean), *J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.* **17**, 1577-1582 (2013).
3. H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, T. Akal, and M. Stevenson, "Multiuser communications using passive time reversal," *IEEE J. OCEAN. ENG.* **32**, 915-926 (2007).
4. H. C. Song, J. S. Kim, W. S. Hodgkiss, and J. H. Joo, "Crosstalk mitigation using adaptive time reversal," *J. Acoust. Soc. Am.* **127**, EL19 (2010).
5. H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, W. J. Higley, K. Raghukumar, T. Akal, and M. Stevenson "Spatial diversity in passive time reversal communications," *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 2067-2076 (2006).
6. M. Stojanovic, J. A. Capitovic, and J. G. Proakis, "Adaptive multi-channel combining and equalization for underwater acoustic communications," *J. Acoust. Soc. Am.* **94**, 1621-1631, (1993).
7. J. S. Kim, H. C. Song, and W. A. Kuperman, "Adaptive time-reversal mirror," *J. Acoust. Soc. Am.* **109**, 1817-1825 (1993).

8. 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).
9. L. J. Griffiths and C. W. Jim, "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming," *IEEE Trans. Antennas Propag.* **30**, 27-34 (1982).
10. D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques* (Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993), pp. 349-371.
11. A. M. Zoubir, M. Viberg, R. Chellappa, and S. Theodoridis, *Academic Press Library in Signal Processing: Array and Statistical Signal Processing* (Academic Press, Amsterdam, 2014), pp. 527-529.

저자 약력

▶ 남 기 훈 (Ki-Hoon Nam)



2014년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학사
2016년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학석사
2016년 1월 ~ 현재: 국립해양조사원 해양
과학조사연구실 연구원

▶ 김 재 수 (J. S. Kim)



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

▶ 변 기 훈 (Gi Hoon Byun)



2013년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학사
2015년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학석사
2015년 9월 ~ 현재: 한국해양과학기술원-
한국해양대학교 해양과학기술전문대
학원 박사과정