한국음향학회지 제38권 제1호 pp. 56~65 (2019)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.38, No.1 (2019)
https://doi.org/10.7776/ASK.2019.38.1.056

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

제주 남방큰돌고래 반향정위 클릭음 특성 분석

Analysis of echolocation click signals of Indo-Pacific bottlenose dolphin (*Tursiops aduncus*) in Jeju Island

최강훈,[1] 윤영글,[2] 김선효,[1] 김현수,[1] 최지웅,[1†] 배호석,[3] 박경주[4]

(Kang-Hoon Choi,[1] Young Geul Yoon,[2] Sunhyo Kim,[1] Hyeonsu Kim,[1] Jee Woong Choi,[1†] Ho Seuk Bae,[3] and Kyeongju Park[4])

[1]한양대학교 해양융합공학과, [2]국립수산과학원 고래연구센터, [3]국방과학연구소, [4]해군사관학교

(Received August 31, 2018; revised October 15, 2018; accepted January 25, 2019)

초 록: 남방큰돌고래(*Tursiops aduncus*)는 클릭음을 사용하는 이빨고래로써 국외에서 지속적인 연구가 수행되어 왔다. 그러나 남방큰돌고래의 클릭음에 대한 연구는 대부분 사육중인 개체에 대해 이루어졌으며 국내에서는 휘슬음에 관한 연구만 수행되었다. 본 논문에서는 제주 연안에 서식하는 야생개체의 남방큰돌고래 클릭음에 대한 음향특성을 분석하였다. 음향특성을 분석하기 위해 음향 파라미터인 신호 길이, 첫 번째 피크 주파수, 두 번째 피크 주파수, 3 dB 대역폭 및 10 dB 대역폭을 산출하였으며 호주 서식 종의 클릭음 음향특성과 비교하였다. 결과적으로, 신호 길이는 평균 38 μs를 나타냈고 대부분의 클릭음이 20 μs - 60 μs 범위 내에 속하였다. 2종류의 대역폭의 경우 협대역과 광대역의 주파수 특성 모두 나타냈으며, 첫 번째 피크 주파수(평균 96 kHz ± 18 kHz)와 두 번째 피크 주파수(평균 69 kHz ± 19 kHz)를 통해 바이모달 신호 특성을 확인하였다.

핵심용어: 남방큰돌고래, 반향정위 클릭음, 음향 파라미터, 바이모달

ABSTRACT: The Indo-Pacific bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*) are a toothed whale using echolocation clicks and have been studied continuously abroad. However, most studies on this whale's clicks were performed about captive animals and, in Korea, only the studies of the whistle sounds of this animal were done. In this paper, acoustic characteristics of clicks were analyzed about the free-ranging Indo-Pacific bottlenose dolphins living in the coast of the Jeju Island. Acoustic parameters such as signal duration, 1st and 2nd peak frequency, 3 dB and 10 dB bandwidth for acoustic characteristics were calculated and compared with those of Australian species. As a result, the signal durations had average of 38 μs and most clicks were within range of 20 μs - 60 μs. The two types of bandwidths showed both narrowband and broadband characteristics, and bimodal signal characteristics were confirmed through the 1st peak frequencies(average of 96 kHz ± 18 kHz) and the 2nd peak frequencies(average of 69 kHz ± 19 kHz).

Keywords: Indo-Pacific bottlenose dolphin, Echolocation clicks, Acoustic parameters, Bimodal

PACS numbers: 43.80.Ka, 43.30.Sf

I. 서 론

해양생태계에 대한 관심이 증대됨에 따라 야생 개체의 고래류가 발생시키는 신호의 음향학적 특성을 연구하여 그들의 행동학적 및 생태학적 특성과 같은 생물학적 특성과 비교하거나,[1-3] 고래 음향 신호 분석 결과와 목시조사(visual survey) 결과를 결합하여 고래의 분포 특성과 자원량을 추정하는 연구가 수행되어 왔다.[4,5] 또한 수중음향통신 분야에서도 군사적인 목적으로 통신신호를 수중 생체 소리로 오인하게 하는 은밀통신기법이 고래소리를 활용하여 연구

†**Corresponding author:** Jee Woong Choi (choijw@hanyang.ac.kr)
Department of Marine Sciences and Convergence Engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Kyeonggi-do 15588, Republic of Korea
(Tel: 82-31-400-5531, Fax: 82-31-406-6255)

"이 논문은 2018년도 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문임."

되고 있다.[6,7]

고래 소리는 '반향정위 클릭음(이하 클릭음, echolocation clicks)'과 '의사 소통 신호'로 구분할 수 있으며, 클릭음은 이빨고래만 사용하는 것으로 현재까지 알려져 있고[8] 짧은 충격파 형태의 지향성을 가진 강한 신호로 먹이를 찾거나 물체를 탐지하기 위해 사용된다.[9,10]

고래는 서식 해역의 환경이나 배경소음 등에 대해 쉽게 적응하고 행동학 및 생태학적 특성, 표적 식별 위치에 따라 클릭음의 음향 특성을 변형하여 사용하기 때문에 서식환경에 따른 개체의 클릭음에 대한 음향 특성을 연구할 필요가 있다.[11] 한편 야생 개체는 음향 신호를 측정하기 위해 필요한 정밀한 실험적 통제가 어렵기 때문에 주로 사육 중인 개체에 대한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 야생 개체와 서식환경이 다르므로 다른 특성의 음향 신호를 사용할 가능성이 있어 동일 고래종의 신호 특성을 대표할 수 있을지에 대한 의문이 제기된 바 있다.[12]

남방큰돌고래(Indo-Pacific bottlenose dolphin, *Tursiops aduncus*)는 인도양과 서태평양의 온대 및 열대 지역에 서식하는 중형 돌고래로, 분류학적으로 고래목, 이빨고래아목, 참돌고래과에 속한다.[13,14] 남방큰돌고래는 대부분 천해에 서식하며 회유를 하지 않는 연안정착성으로 국내에서는 100여 마리 이상이 제주도 연안에서 관찰된다.[13,15,16] 남방큰돌고래가 발생시키는 소리에 관한 국외 연구는 클릭음[3,12]과 의사 소통 신호인 휘슬음[17,18]의 신호 특성, 행동과 음향 특성 비교 연구[19]와 같은 분야에서 지속적으로 수행되고 있다. 그러나 국내에 서식하는 남방큰돌고래의 음향 특성 연구는 2002년에 측정한 서울대공원에서 사육 중인 개체의 휘슬음 분석만 수행되었으며[20] 이후 클릭음을 분석하거나 야생 개체에 대한 추가적인 연구는 아직 알려진 바가 없다.

본 연구에서는 제주 연안에서 연중 관찰이 가능한 야생 남방큰돌고래를 대상으로 음향 신호를 직접 수집하였다. 수신된 신호 중 클릭음의 음향학적 특성을 분석하여 음향 파라미터를 산출하고 음향 파라미터의 분포 특성 및 상관성을 확인하였다. 또한 서식지에 따라 동일 고래 종의 음향 신호에 대한 특성이 다르므로[21] 호주에 서식하는 남방큰돌고래의 클릭음과 비교 및 분석하였다.

II. 재료 및 방법

2.1 음향조사

본 연구에서 분석한 남방큰돌고래의 음향 신호는 고래연구센터에서 수행한 2017년 2차 제주도 남방큰돌고래 조사에서 획득하였으며, 최근 들어 남방큰돌고래의 발견율이 높아진 대정읍 영락리방파제 인근 해역(북위 33° 15' 8.58", 동경 126° 11' 35.94")에서 측정하였다(Fig. 1). 음향조사는 2017년 6월 14일에 육상 정점조사를 통해 남방큰돌고래 무리의 위치 확인 후 보트로 접근하여 자동 기록식 수중청음기(self-recording hydrophone, SM3BAT/H1, Wildlife Acoustics, Inc., USA)를 이용해서 남방큰돌고래의 음향 신호를 수신하였다. 수신 당시 수중청음기는 약 10 m의 수심인 해역에서 중간 수심인 약 5 m에 위치시켰으며, 정확한 거리추정은 불가능하나 10 여 마리의 남방큰돌고래가 수중청음기로부터 약 300 m 거리반경 내에서 활동하고 있었다. 자동 기록 수중청음기의 수신음압 강도는 -165 dB re:1 V/μPa이고, 샘플링 주파수는 384 kHz, 수신 증폭은 0 dB로 설정하였다.

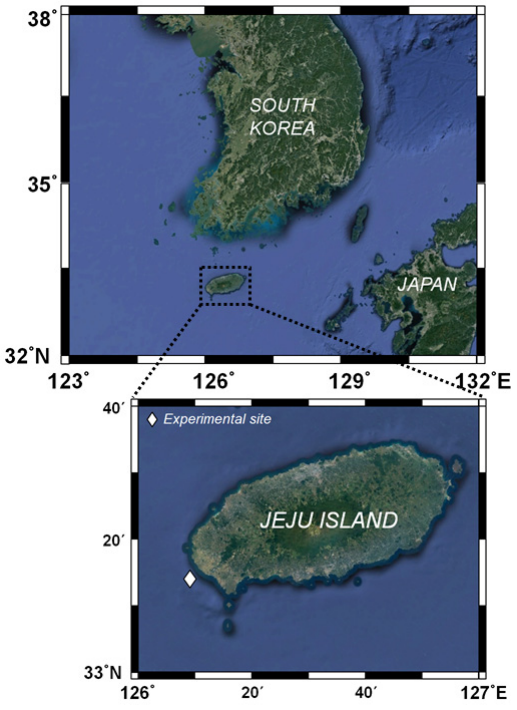

Fig. 1 Experimental site of the south-western part of Jeju Island (33°15'8.58"N, 126°11'35.94"E).

2.2 클릭음 음향 특성 분석: 음향 파라미터

제주 해역에 서식하는 남방큰돌고래가 발생시키는 클릭음의 음향학적 특성을 조사하기 위해 수신된 신호 중 클릭음의 펄스형태 및 반복 주기 등을 확인한 후 클릭음을 포함하며 인접 클릭음을 제외할 수 있도록 1 ms 단위로 추출하였다. 클릭음의 정확한 음향 특성을 조사하기 위해 주변소음보다 충분히 높은 신호대잡음비(20 dB 이상)를 갖는 신호만을 선택하여 총 1,596개의 클릭음을 분석에 이용하였다. 수집된 클릭음 중 1 ms 내에 여러 개의 펄스가 수신된 경우 남방큰돌고래가 직접 발생시키는 신호인지 경계면에 의해 반사 및 산란된 신호인지 구분할 수 없기 때문에 1 ms 내에 포함된 신호 중 첫 번째 펄스 구간을 음향 특성 분석에 이용하였다. 측정된 음향 신호의 주파수 특성을 분석하기 위해 MATLAB(Mathworks, USA)을 이용하여 파워 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density, PSD)와 에너지 스펙트럼 밀도(Energy Spectral Density, ESD) 분석을 수행하였으며, 이때 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT) 크기는 1,024, 주파수 분해능은 375 Hz였고 창함수는 해닝(hanning) 창함수를 이용하였다. 클릭음의 파형과 에너지 스펙트럼 밀도 분석결과를 이용하여 도출한 음향 파라미터는 신호 길이(signal duration), 첫 번째 피크 주파수(1st peak frequency), 두 번째 피크 주파수(2nd peak frequency), 3 dB 대역폭(Bandwidth), 10 dB 대역폭(Bandwidth)이며 본 논문에서는 남방큰돌고래의 위치추정이 불가능하여 음원 준위는 분석에서 제외하였다. 신호 길이는 클릭음 에너지의 최대값으로부터 10 dB 작은 에너지를 갖는 시작 시간과 종료 시간의 간격으로 계산하였고, 첫 번째 피크 주파수와 두 번째 피크 주파수는 에너지 스펙트럼 밀도에서 최대 에너지를 갖는 주파수와 그 다음 최대 에너지를 갖는 주파수로서 검출하였다. 3 dB 대역폭과 10 dB 대역폭은 첫 번째 피크 주파수의 에너지보다 각각 3 dB, 10 dB 낮은 에너지를 갖는 두 주파수의 간격으로 계산하였다.[3,11]

III. 분석 결과

제주 남서쪽 연안에서 수집한 남방큰돌고래 음향신호의 주파수 특성을 분석하고 클릭음의 음향학적 특성을 음향 파라미터를 통해 분석하였다. Fig. 2(a)는 2017년 6월 14일 9시 20분부터 약 4 min 30 s 동안

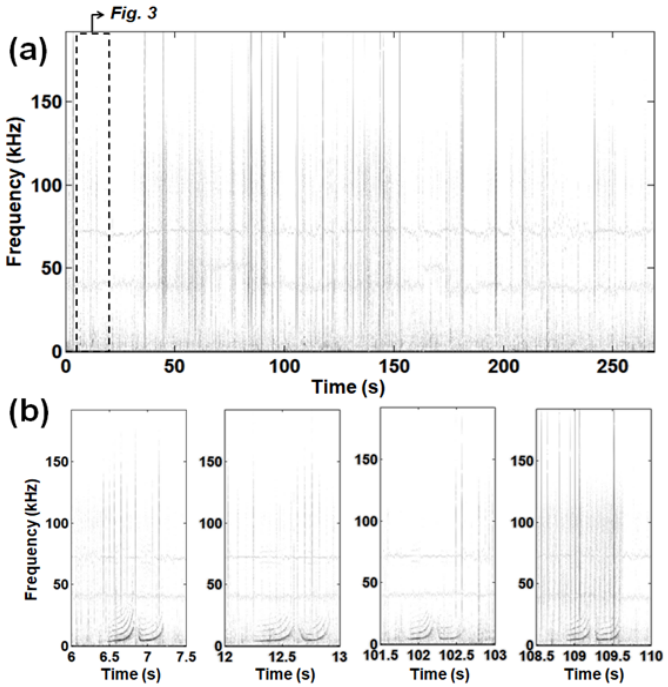

Fig. 2. Spectrogram of signal recorded in the south-western part of Jeju Island on 14 June 2017, (a) full data, (b) whistle signals (FFT size : 1024, overlap size : 512, frequency resolution : 375 Hz, window : hanning).

수신된 신호의 시간과 주파수에 따른 에너지를 나타내는 스펙트로그램이며, 수신된 신호 중 6 s - 7.5 s, 12 s - 13 s, 101.5 s - 103 s, 108.5 s - 110 s의 휘슬음[Fig. 2(b)]을 제외한 모든 신호가 주변소음 또는 클릭음이었다. 클릭음의 정확한 음향 특성 분석을 위해 휘슬음과 클릭음이 동시에 수신된 신호 구간은 제외하고 분석하였다.

남방큰돌고래 클릭음의 주파수 특성을 확인하기 위해 클릭음이 연속적으로 수신된 구간과 고래 소리가 없는 주변소음 구간의 파워 스펙트럼 밀도를 비교하였다(Fig. 3). Fig. 3(a)는 Fig. 2의 5 s - 20 s 구간을 확대한 스펙트로그램으로 실선은 클릭음이 수신된 신호 구간이고(8 s - 9 s), 점선은 클릭음이 수신되지 않은 주변소음 구간(16 s - 17 s)이다. 각 신호 구간의 파워 스펙트럼 밀도는 약 10 kHz 이상의 주파수부터 주변소음보다 클릭음에 의한 에너지가 우세하였고 광대역 주파수 특성을 갖는 것으로 나타났다[Fig 3(b)]. 따라서 클릭음이 우세한 주파수 대역만 분석하기 위해 수신신호에 10 kHz 이상 주파수 대역의 성분만 남기는 고역통과 여파기를 적용하여 분석하였다. 고역통과 여파기는 MATLAB 내부함수인 FIR(Finite Impulse Response) 필터를 이용하여 설계하였다.

추출된 1,596개의 클릭음 중 대표적인 8가지 클릭음 유형의 파형과 에너지 스펙트럼 밀도 및 음향 파

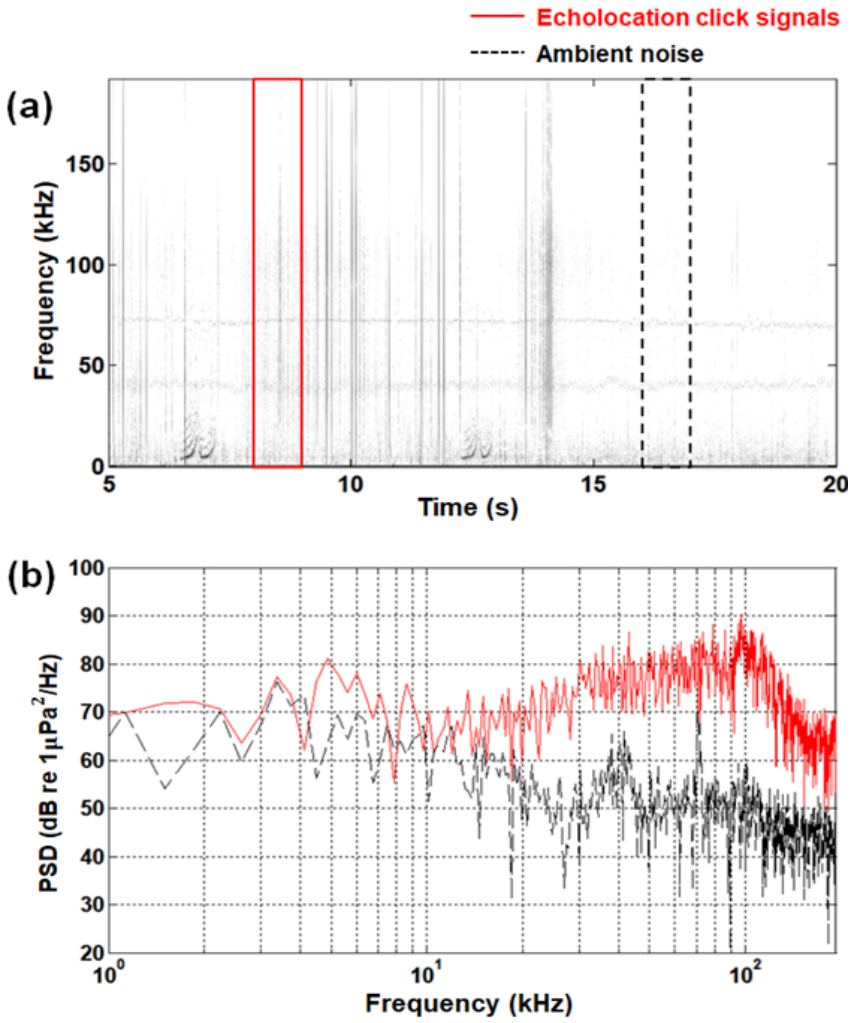

Fig. 3. Comparison of power spectral density between echolocation click signal of Indo-Pacific bottlenose dolphin (solid line) and ambient noise (dotted line) (a) spectrogram, (b) power spectral density (FFT size: 1024, frequency resolution: 375 Hz, window: hanning).

라미터 추정 결과 값을 Fig. 4에 나타내었다. 클릭음 파형을 통해 첫 클릭음 뒤에 경계면에 의해 반사된 것으로 추정되는 클릭음이 불규칙적으로 수신되었음을 확인하였으며, 첫 번째 피크 주파수가 100 kHz에 가까운 신호[Fig. 4(a)-(d)]와 60 kHz에 가까운 신호[Fig. 4(e)-(h)]의 유형으로 구분되었고 신호 길이는 22.7 μs - 42.9 μs의 범위, 3 dB 대역폭 및 10 dB 대역폭은 21.7 kHz - 136.9 kHz의 범위 내에서 다양하게 나타났다. 또한 에너지 스펙트럼 밀도에서는 대부분의 신호가 첫 번째 피크 주파수와 두 번째 피크 주파수를 모두 갖는 신호 특성[Fig. 4(a)-(c), (e)-(g)]을 보였고 첫 번째 피크 주파수만 갖는 신호 특성[Fig. 4(d), (h)] 또한 확인되었다. 1,596개 클릭음의 음향 파라미터 분석 결과를 Table 1에 나타냈으며 평균과 표준편차 및 범위를 값으로 나열하였다. 신호 길이는 평균 38 μs ± 13 μs와 14 μs - 81 μs의 범위로 100 μs 이내의 다양

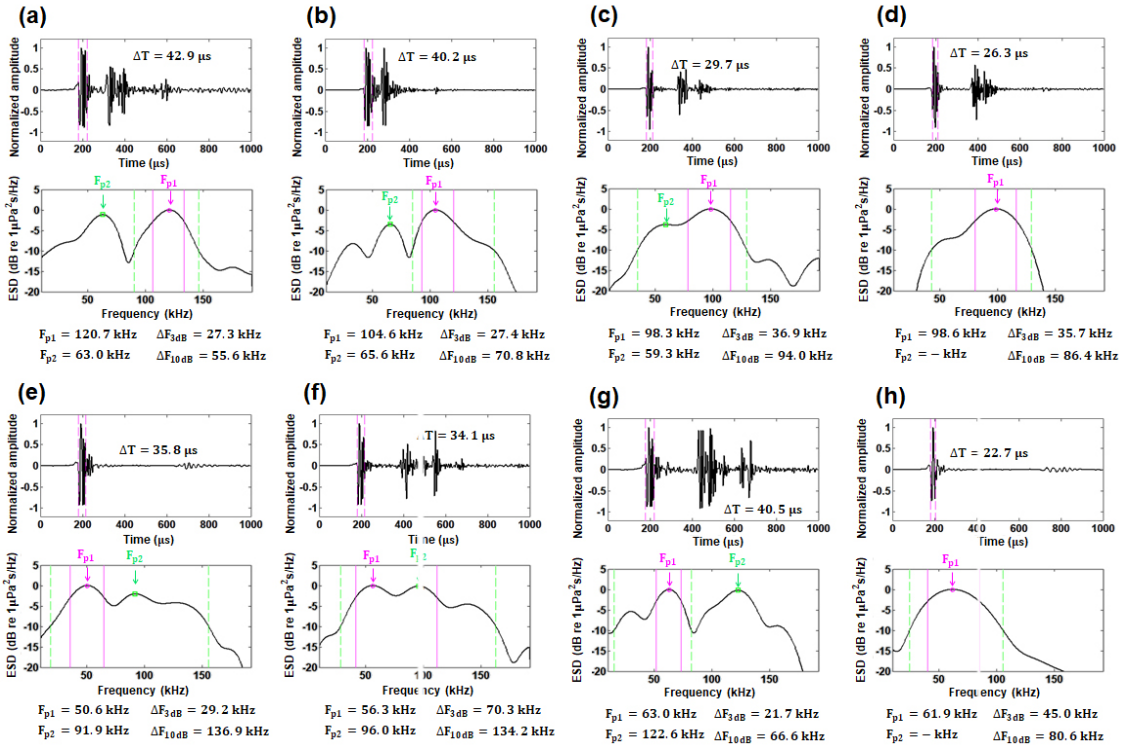

Fig. 4. Waveforms and energy spectral densities of 8 types of echolocation clicks emitted by Indo-Pacific bottlenose dolphin and acoustic parameters [signal duration (△T), 1st peak frequency (F_{p1}), 2nd peak frequency (F_{p2}), 3 dB bandwidth ($\triangle F_{3dB}$), 10 dB bandwidth ($\triangle F_{10dB}$)], (a) - (d) click signals with 1st peak frequency of ~ 100 kHz,(e) - (h) click signals with 1st peak frequency of ~ 60 kHz.

Table 1. Comparisons of acoustic parameters of echolocation clicks emitted by Indo-Pacific bottlenose dolphin by habitat (Jeju Island of South Korea and Exmouth Gulf North West Cape of Australia).

Acoustic parameters	In Jeju Island, South Korea		In Exmouth Gulf North West Cape, Australia	
	Mean ± Standard deciation	Range	Mean ± Standard deciation	Range
△T (μs)	38 ± 13	14 - 81	14 ± 2	10 - 19
F_{p1} (kHz)	96 ± 18	36 - 131	124 ± 13	53 - 141
F_{p2} (kHz)	69 ± 19	16 - 140	-	-
$\triangle F_{3dB}$	35 ± 11	14 - 93	62 ± 17	40 - 108
$\triangle F_{10dB}$	88 ± 32	24 - 164	140 ± 17	92 – 178
Reference	This study		M. De Freitas *et al*. (2015)	

한 신호 길이 특성을 보였다. 첫 번째 피크 주파수는 평균 96 kHz ± 18 kHz와 36 kHz - 131 kHz의 범위, 두 번째 피크 주파수는 평균 69 kHz ± 19 kHz와 16 kHz - 140 kHz의 범위로 두 파라미터 모두 넓은 주파수 특성을 갖으나 서로 다른 주파수영역에서 평균값이 나타났다. 3 dB 대역폭은 평균 35 kHz ± 11 kHz와 14 kHz - 93 kHz의 범위, 10 dB 대역폭은 88 kHz ± 32 kHz와 24 kHz - 164 kHz의 범위로써 협대역 주파수와 광대역 주파수를 고루 갖는 특성을 보였다. 서식 해역에 따른 음향 파라미터의 차이를 확인하기 위해 호주 북서쪽 연안(exmouth gulf north west cape)에 서식하는 남방큰돌고래의 음향 특성 연구 결과[3]를 본 연구 결과와 비교하였다(Table 1). 호주 서식 종의 클릭음 신호 길이는 평균 14 μs ± 2 μs와 10 μs - 19 μs의 범위로 제주 서식 종이 평균값 대비 약 3배 더 긴 클릭음을 방사하는 것으로 나타났다. 3 dB 대역폭과 10 dB 대역폭은 각각 평균 62 kHz ± 17 kHz와 범위 40 kHz - 108 kHz, 평균 140 kHz ± 17 kHz와 범위 92 kHz - 178 kHz로 제주 서식 종의 클릭음이 비교적 협대역의 주파수 특성을 보였고, 첫 번째 피크 주파수 의 경우 평균 124 kHz ± 13 kHz와 53 kHz - 141 kHz의 범위로 제주 서식 종이 비교적 더 낮은 주파수의 클릭음을 사용하는 것으로 나타났다.

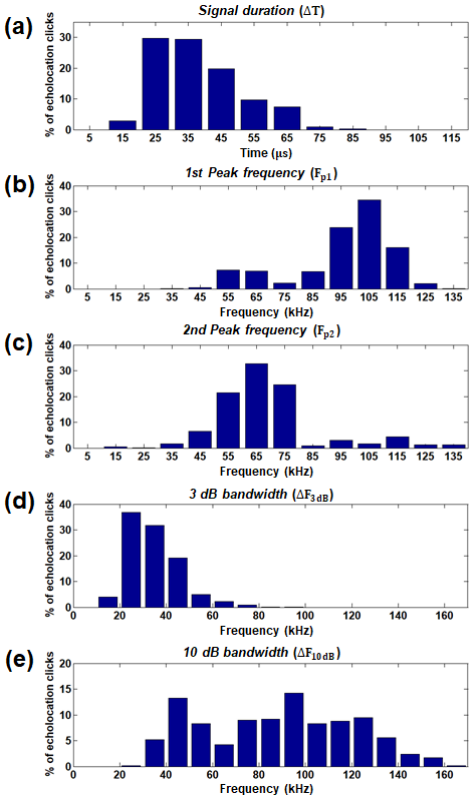

Fig. 5. Distribution of acoustic parameters of echolocation clicks emitted by Indo-Pacific bottlenose dolphin (*N* = 1597) (a) signal duration (△T), (b) 1st peak frequency (F_{p1}), (c) 2nd peak frequency (F_{p2}), (d) 3 dB bandwidth ($\triangle F_{3dB}$), (e) 10 dB bandwidth ($\triangle F_{10dB}$).

음향 파라미터의 분포 특성을 확인하기 위해 히스토그램으로 표현하였다(Fig. 5). 신호 길이는 20 μs - 60 μs 범위의 클릭음이 88 % 이상의 분포를 차지하여 대부분의 클릭음이 이 범위 내에 속하는 것으로 나타났고, 10 μs 이하의 신호 길이를 갖는 클릭음은 약 2.8 %, 70 μs 이상 신호 길이의 클릭음은 약 1 %를 차지하였다. 또한 첫 번째 피크 주파수는 90 kHz - 120 kHz 범위에서 약 74 %, 50 kHz - 80 kHz 범위에서 약 16 %의 분포를 나타냈고, 두 번째 피크 주파수는 50 kHz - 80 kHz 범위에서 약 78 %, 90 kHz - 120 kHz 범위에서 약 9 %의 분포를 보임으로써 이를 통해 두 가지 주파수를 갖는 바이모달(bimodal) 신호 특성을 확인하였다. 3 dB 대역폭은 20 kHz - 50 kHz 범위에 속하는 클릭음이 85 % 이상으로 대부분이 이 범위에 포함되며 70 kHz 이상의 대역폭을 갖는 클릭음은 약 1 %, 20 kHz 이하의 대역폭을 갖는 클릭음은 약 3.8 %의 비중을 차지하였다. 10 dB 대역폭은 40 kHz - 140 kHz의 범위 내에 90 % 이상의 분포를 보이며 비교적 넓은 범위의 분포 특성을 보였다.

IV. 고 찰

제주 남방큰돌고래의 클릭음을 분석하기 위해 수중청음기를 이용하여 약 4 min 30 s 동안 음향 신호를 수신하였고 그중 클릭음만을 추출하였다. 추출된 클릭음으로부터 다중 클릭음 파형 특성을 확인하였으며, 대부분 첫 번째 클릭음이 그 뒤에 수신된 클릭음들보다 큰 에너지를 갖고 수신되었다. 또한 본 논문에서는 다중 클릭음 중 가장 첫 번째 수신된 클릭음에 대한 특성만을 분석하였는데, 다중 클릭음이 남방큰돌고래가 직접 발생시키는 소리일 가능성도 있으나 개체의 정확한 수심이나 수중청음기와의 거리를 확인할 수 없고 해수면 및 해저면과 같은 경계면에 반사되어 수신된 신호일 가능성을 배제할 수 없

었기 때문에[11] 직접 경로로 추정되는 첫 번째 클릭 음만을 분석에 이용하였다. 따라서 추 후에는 단일 클릭음, 이중 클릭음 및 삼중 클릭음 등의 클릭음 파형 구조에 따른 음향특성을 분석할 필요가 있으며, 그에 따른 개체의 행동학적 특성과의 연관성에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 남방큰돌고래의 클릭음은 지향성을 갖는 신호이기 때문에[12] 수신되는 방향에 따른 음향 특성 분석 또한 필요할 것이다.

음향 파라미터로써 클릭음의 음향 특성을 분석한 결과, 본 논문에서 분석한 음향 파라미터들이 넓은 범위 내에 분포하는 것은 같은 종이라도 개체의 크기나 나이, 음향신호 수신 당시 개체들의 행동 특성 등에 따라 생체 신호의 음향특성이 달라지기 때문인 것으로 판단된다[11]. 또한 첫 번째 피크 주파수와 두 번째 피크 주파수를 통해 확인된 제주 남방큰돌고래 클릭음의 바이모달 신호 특성은 연안에 사는 돌고래 종들의 원거리 목표 탐지를 위한 저주파 성분과 단거리 환경에서의 적합한 고주파 성분을 모두 사용한다는 가정에 적합한 결과이다.[22-24]

추정된 클릭음의 음향 파라미터 중 신호 길이, 3 dB 대역폭 및 첫 번째 피크 주파수 간 상관성을 확인하였다(Fig. 6). Fig. 6(a)는 첫 번째 피크 주파수에 따른 신호 길이의 산포도, Fig. 6(b)는 첫 번째 피크 주파수에 따른 3 dB 대역폭의 산포도이고 첫 번째 피크 주파수에 대해 약 75 kHz를 기준으로 두 주파수의 범위로 구분하였을 때 주파수 범위에 따라 음향 파라미터 간 상관관계가 상이하였다. Fig. 6(c)는 신호 길이에 따른 3 dB 대역폭의 산포도이고 실선은 식에 해당하는 곡선으로써 이 곡선을 따라 두 파라미터가 역의 상관관계를 보였다.

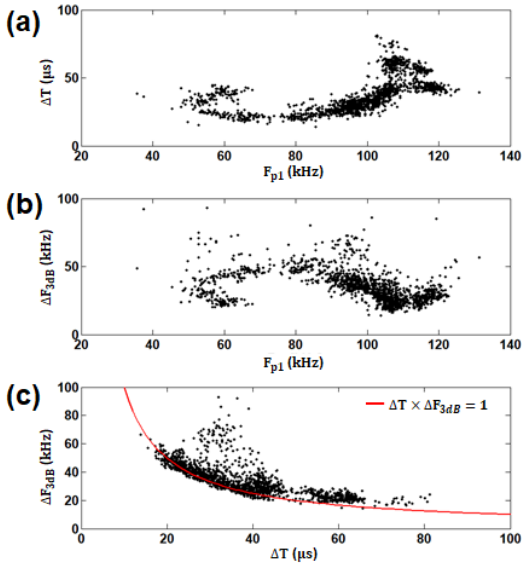

Fig. 6. Scatter plots of (a) signal duration (△T) versus 1st peak frequency (F_{p1}), (b) 3 dB bandwidth (F_{3dB}) versus 1st peak frequency (F_{p1}), and (c) 3 dB bandwidth ($\triangle F_{3dB}$) versus signal duration (△T).

Fig. 7은 Fig. 6(a), (b) 결과를 첫 번째 피크 주파수의 75 kHz에 기준하여 분류된 주파수 범위에 따라 최소자승법을 통해 선형 회귀선을 산출한 결과이다. 첫 번째 피크 주파수 75 kHz 이하의 경우, 선형 회귀선을 통해 첫 번째 피크 주파수가 증가할수록 신호 길이는 감소하고 3 dB 대역폭은 증가하는 경향을 확인하였으나[Fig. 7(a), (b)], 75 kHz 이상의 경우에서는 첫 번째 피크 주파수가 증가할수록 신호 길이는 증가하고 3 dB 대역폭은 감소하는 경향을 보여주며 첫 번째 피크 주파수의 범위에 따라 상반된 결과를 나타냈다[Fig. 7(c), (d)]. 이러한 음향 파라미터간 상관관계는 75 kHz 이하의 경우보다 75 kHz 이상의 경우에서 더욱 뚜렷한 선형적 관계를 보였으며, 이를 통해 사용하는 클릭음의 첫 번째 피크 주파수 범위에 따라 음향 파라미터 간 상관관계가 다르게 나타남을 확인하였다. 또한 첫 번째 피크 주파수가 증가함에 따라 3 dB 대역폭이 감소하는 경향을 보이는 75 kHz 이상의 경우 양쯔강에 서식하는 상괭이(*Neophocaena phocaenoides asiaeorientialis*)의 클릭음 특성과 유사하고,[11] 위와 반대의 경향을 보이는 75 kHz 이하의 경우는 대서양점박이돌고래(*Stenella frontalis*)[25], 긴부리돌고래(*S. longirostris*) 및 점박이돌고래(*S. attenuate*)[26]의 클릭음 특성과 유사하였다. 이러한 차이는 서로 다른 종이기 때문에 나타난 것이며, 음향특성에 영향을 미치는 다양하고 복잡한 관계에 의해 발생했을 것으로 사려된다. 본 논문에서는 남방큰돌고래 음향신호 측정 당시의 해양환경과 개체의 행동에 대한 정보를 동시에 관측하지 않았기 때문에 이런 음향 파라미터간 관계에 대한 정확한 원인에 대해서는 확인할 수 없었다. 따라서 추 후에는 다양한 환경적인 영향 및 생체의 행동에 대한 관찰과 병행하여 음향학적 특성과의 관계를 분석하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

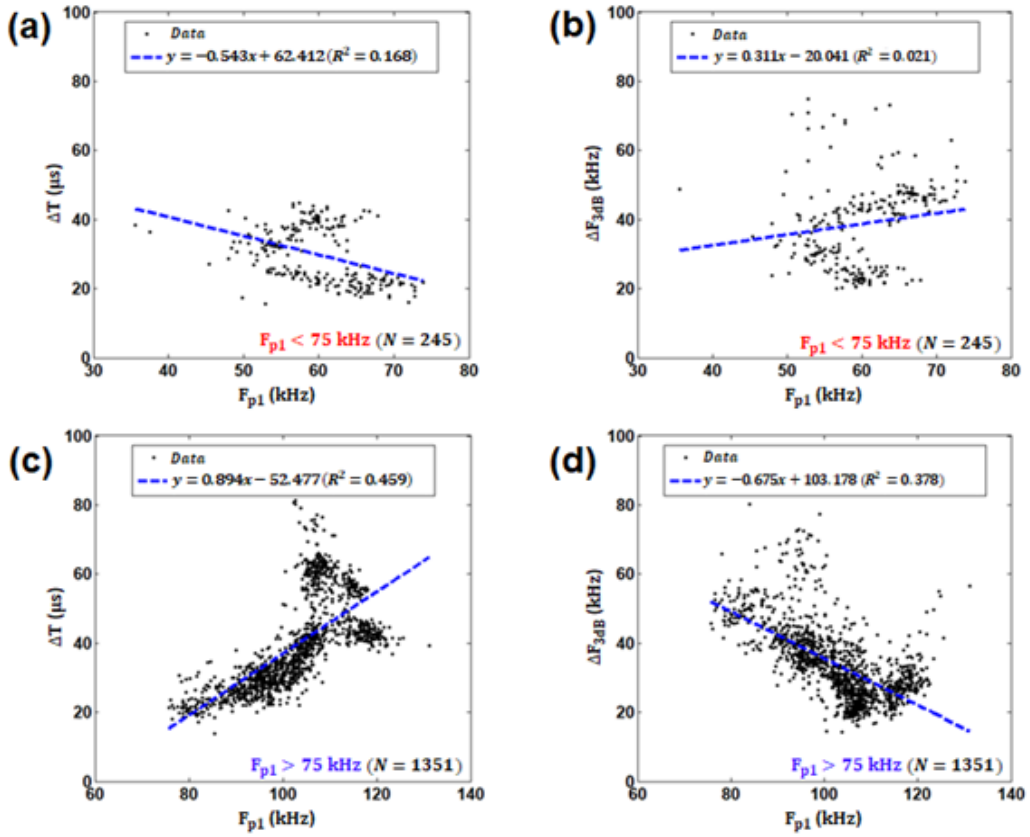

Fig. 7. Scatter plots of (a) signal duration (△T) versus 1st peak frequency (F_{p1}) [F_{p1} < 75 *kHz*], (b) 3 dB bandwidth ($\triangle F_{3dB}$) versus 1st peak frequency (F_{p1}) [F_{p1} < 75 *kHz*], (c) signal duration (△T) versus 1st peak frequency (F_{p1}) [F_{p1} > 75 *kHz*], and (d) 3 dB bandwidth ($\triangle F_{3dB}$) versus 1st peak frequency (F_{p1}) [F_{p1} > 75 *kHz*]. The equation of the least square linear regression line through the data, its correlation coefficient are indicated in the upper of each plot.

V. 결 론

2017년 6월 14일 제주도 인근 해역에서 남방큰돌고래를 육상 정점조사한 후 자동 기록 수중청음기를 통해 남방큰돌고래의 음향 신호를 수신하였으며 신호 중 클릭음을 추출하여 음향 특성을 분석하였다. 음향 파라미터인 신호 길이, 첫 번째 피크 주파수, 두 번째 피크 주파수, 3 dB 대역폭, 10 dB 대역폭을 통해 클릭음의 음향 특성을 분석하였고 호주 서식 종과 비교함으로써 서식 해역에 따른 음향 특성 차이를 확인하였다. 분석 결과 제주 남방큰돌고래 클릭음의 신호 길이는 평균 38 μs로 대부분의 클릭음이 20 μs - 60 μs 범위 내에 속하였다. 대역폭의 경우 협대역과 광대역의 주파수 특성을 고루 갖는 것으로 나타났다. 피크 주파수 추정 결과를 통해 바이모달 신호 특성을 보였으며 피크 주파수 범위에 따라 음향 파라미터 간 상관관계가 다르게 나타남을 확인하였다.

본 연구에서는 제주 연안에 서식하는 남방큰돌고래의 클릭음을 몇 가지의 음향 파라미터만으로써 음향 특성을 분석하였으며, 보다 정확한 음향학적 특성을 파악하기 위해서는 클릭음의 사이클 수, 반복속도, 음원준위, 빔 패턴 특성 등의 추가적인 음향 파라미터에 대한 분석 연구가 필요하다. 한편 국내에서 음향을 이용한 고래 연구가 진행되지 않았고[10] 목시조사의 보조자료로써 고래류 탐지 및 식별에 이용하기 위한 한반도 연안에 서식하는 다양한 고래류의 생체 음향신호 음향 특성에 대한 연구는 필수적으로 요구되기 때문에, 고래류 음향신호를 분석하고 음향 특성의 데이터베이스화에 기여한다는 점은 매우 의의가 있다. 더불어 고래류 음향신호의 음향학

적 특성만을 분석한 연구로써 개체의 행동학적 및 생태학적 특성 등과 연관시켜 음향 특성을 분석하는 추후 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 국립수산과학원 수산과학연구사업 고래류 자원 및 생태조사(R2018026), 한국해양과학기술진흥원의 분산형 수중 관측 제어망 개발, 국방과학연구소(UD170022DD)의 지원에 의해 수행되었음.

References

1. E. E. Henderson, J. A. Hildebrand, and M. H. Smith, “Classification of behavior using vocalizations of Pacific,” J. Acoust. Soc. Am. **130**, 557-567 (2011).
2. M. L. Melcón, M. Failla, and M. A. Iñíguez, “Echolocation behavior of franciscana dolphins (*Pontoporia blainvillei*) in the wild,” J. Acoust. Soc. Am. **131**, EL448-EL453 (2012).
3. M. de Freitas, F. H. Jensen, J. Tyne, L. Bejder, and P. T. Madsen, “Echolocation parameters of Australian humpback dolphins (*Sousa sahulensis*) and Indo-Pacific bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*) in the wild,” J. Acoust. Soc. Am. **137**, 3033-3041 (2015).
4. J. Barlow and B. L. Taylor, “Estimates of sperm whale abundance in the northeastern temperate pacific from a combined acoustic and visual survey,” Marine Mammal Sci. **21**, 429-445 (2005).
5. E. K. Jacobson, K. A. Forney, and J. Barlow, “Using paired visual and passive acoustic surveys to estimate passive acoustic detection parameters for harbor porpoise abundance estimates,” J. Acoust. Soc. Am. **141**, 219-230 (2017).
6. S. Liu, G. Qiao, and A. Ismail, “Covert underwater acoustic communication using dolphin sounds,” J. Acoust. Soc. Am. **133**, EL300-EL306 (2013).
7. S. Liu, G. Qiao, A. Ismail, B. Liu, and L. Zhang, “Covert underwater acoustic communication using whale noise masking on DSSS signal,” in OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE, 1-6 (2013).
8. W. M. X. Zimmer, *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans* (Cambridge University Press, New York, 2011), Part.1.
9. M. A. Roch, M. S. Soldevilla, J. C. Burtenshaw, E. E. Henderson, and J. A. Hilderbrand, “Gaussian mixture model classification of odontocetes in the Southern California Bight and the Gulf of California,” J. Acoust. Soc. Am. **121**, 1737-1748 (2007).
10. Y. G. Yoon, H. Sohn, K. J. Park, Y.-M. Choi, S. Kim, and J. W. Choi, “Study of acoustic characteristics of common dolphins *delphinus delphis* in the East Sea” (in Korean), Kor. J. Fish. Aquat. Sci. **50**, 406-412 (2017).
11. S. Li, K. Wang, D. Wang, and T. Akamatsu, “Echolocation signals of the free-ranging Yangtze finless porpoise,” J. Acoust. Soc. Am. **117**, 3288-3296 (2005).
12. M. Wahlberg, F. H. Jensen, N. A. Soto, K. Beedholm, L. Bejder, C. Oliveira, M. Rasmussen, M. Simon, A. Villadsgaard, and P. T. Madsen, “Source parameters of echolocation clicks from wild bottlenose dolphins,” J. Acoust. Soc. Am. **130**, 2263-2274 (2011).
13. H. W. Kim, H. Sohn, Y.-R. An, K. J. Park, and Y.-M. Choi, “Occurrence of Indo-Pacific bottlenose dolphins *Tursiops aduncus* off Jeju Island, Korea during the Early 2000s” (in Korean), Kor. J. Fish. Aquat. Sci. **48**, 940-946 (2015).
14. T. A. Jefferson, M. A. Webber, and R. L. Pitman, *Marine Mammals of the World* (Academic Press, London, 2008), pp. 221-223.
15. S. G. Choi, H. W. Kim, Y.-R. An, K. J. Park, and Z. G. Kim, “Coastal resident stock of bottlenose dolphins in the Jeju Islands” (in Korean), Kor. J. Fish. Aquat. Sci. **42**, 650-656 (2009).
16. H. W. Kim, *Distribution patterns and population abundance estimates of Indo-Pacific bottlenose dolphins (Tursiops aduncus) off the Jeju Island, Korea, in the early 2000s* (in Korean), (Ph.D.thesis, Pukyong National University, 2011).
17. T. Morisaka, M. Shinohara, F. Nakahara, and T. Akamatsu, “Geographic variations in the whistles among three Indo-Pacific bottlenose dolphin *Tursiops aduncus* populations in Japan,” Fish. Sci. **71**, 568-576 (2005).
18. T. Gridley, P. Berggren, V. G. Cockcroft, and V. M. Janik, “Whistle vocalizations of Indo-Pacific bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*) inhabiting the south-west Indian Ocean,” J. Acoust. Soc. Am. **132**, 4032-4040 (2012).
19. E. R. Hawkins and D. F. Gartside, “Whistle emissions of Indo-Pacific bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*) differ with group composition and surface behaviors,” J. Acoust. Soc. Am. **127**, 2652-2663 (2010).
20. H.-L. Shin, D.-O. Seo, D.-J. Lee, D.-J. Hwang, M-K. Bae, and Y.-W. Lee, “Characteristics of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) whistle” (in Korean), J. Kor. Soc. Fish. Technol. **38**, 271-277 (2002).
21. I. C. Ansmann, J. C. Goold, P. G. H. Evans, M. Simmonds, and S. G. Keith, ‘‘Variation in the whistle characteristics of short-beaked common dolphins, *Delphinus delphis*, at two locations around the British

Isles,'' J. Mar. Biol. Assoc. UK **87**, 19-26 (2007).
22. C. Kamminga and H. Wiersma, ''Investigations on Cetacean Sonar II. Acoustical similarities and differences in odontocete sonar signals,'' Aquat. Mamm. **8**, 41-62 (1981).
23. C. Kamminga, H. Wiersma, and W. H. Dudok van Heel, ''Sonar sounds in Orcaella brevirostris of the Mahakam River, East Kalimantan, Indonesia; the first descriptions of the acoustic behaviour,'' Aquat. Mamm. **10**, 83-95 (1983).
24. C. Kamminga, M. T. Van Hove, F. J. Engelsma, and R. P. Terry, "Investigations on Cetacean Sonar X: A comparative analysis of underwater echolocation clicks of *Inia spp*. and *Sotalia spp*.," Aquat. Mamm. **19**, 31-43 (1993).
25. W. W. L. Au and D. L. Herzing, "Echolocation signals of wild Atlantic spotted dolphin (*Stenella frontalis*)," J. Acoust. Soc. Am. **113**, 598-604 (2003).
26. M. Schotten, W. W. L. Au, M. O. Lammers, and R. Aubauer, ''Echolocation recordings and localization of wild-spinner dolphins (*Stenella longirostris*) and pantropical spotted dolphins (*Stenella attenuate*) using a four hydrophone array,'' in *handbook of Echolocation in Bats and Dolphins*, edited by J. Thomas, C. F. Moss, and M. Vater (University of Chicago, Chicago, 2003).

저자 약력

▸ 최 강 훈 (Kang-Hoon Choi)

2012년 2월: 한양대학교 해양환경과학과 학사
2014년 3월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합공학과 석·박사 통합과정

▸ 윤 영 글 (Young Geul Yoon)

2012년 2월: 한양대학교 해양환경과학과 학사
2014년 2월: 한양대학교 해양환경과학과 석사
2014년 3월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합과학과 박사과정

▸ 김 선 효 (Sunhyo Kim)

2009년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 학사
2011년 2월: 한양대학교 해양환경과학과 석사
2016년 8월: 한양대학교 해양융합과학과 박사
2016년 10월: 한양대학교 박사 후 연구원
2017년 10월~현재: 한양대학교 연구조교수

▸ 김 현 수 (Hyeonsu Kim)

2008년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2010년 2월: 인하대학교 전자공학과 석사
2017년 8월: 인하대학교 전자공학과 박사
2017년 9월 ~ 현재: 한양대학교 박사 후 연구원

▸ 최 지 웅 (Jee Woong Choi)

1996년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 학사
1998년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 석사
2002년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 박사
2002년 11월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate
2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합공학과 교수

▸ 배 호 석 (Ho Seuk Bae)

2007년 2월: 서울대학교 지구환경시스템공학부 학사
2011년 2월: 서울대학교 에너지시스템공학부 박사
2011년 3월 ~ 10월: 서울대학교 에너지자원 신기술연구소 선임연구원
2011년 11월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원

▸ 박 경 주 (Kyeongju Park)

1990년 3월: 해군사관학교 학사
1998년 2월: 군사과학대학원 석사
2003년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 박사
2010년 ~ 현재: 해군사관학교 해양학과 교수