

서남해 해상풍력 실증단지 주변에서의 수동 음향 관측을 이용한 상괭이 모니터링 가능성 연구

Preliminary study of passive acoustic monitoring of finless porpoises *Neophocaena asiaeorientalis* around the Southwest offshore wind farm in Korea

윤영글,¹ 양원준,¹ 최지웅^{2†}

(Young Geul Yoon,¹ Wonjun Yang,¹ and Jee Woong Choi^{2†})

¹한양대학교 해양융합학과, ²한양대학교ERICA 해양융합공학과

(Received October 27, 2021; revised November 17, 2021; accepted November 22, 2021)

초 록: 인간에 의한 연안 지역 개발 및 변형의 가속화로 인해 해양포유류에 대한 피해가 우려되고 있다. 연안 개발이 해양포유류에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 이해하려면 이들의 분포를 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 서남해 해상풍력 실증단지에서 수동 음향 관측을 통해 상괭이의 출현을 확인하였다. 실험지역에서의 상괭이에 대한 목시관측 결과가 없으므로, 풍력단지에서 탐지된 클릭은 상괭이 발견율이 높은 지역에서 측정된 클릭과 음향특성을 비교하여 검증하였다. 음향 측정 결과에 의하면 상괭이는 매일 출몰하였으며, 평균 클릭수는 40.7회, 상괭이의 출현 비율은 9.7%, 출현 시간은 18.2 min이며, 대기 시간은 94.9 min으로 나타났다. 이 연구를 통해 서남해 해상풍력 실증단지에서 알려지지 않은 상괭이 출현에 대한 정보를 제공하였으며, 이러한 결과는 풍력단지 운영으로 인한 해양포유류의 영향을 모니터링하는데 도움을 줄 수 있다.

핵심용어: 수동 음향 관측, 상괭이, 클릭, 해상풍력단지

ABSTRACT: Due to the accelerated development and transformation of coastal waters by humans, damage to marine mammals is a concern. To understand how coastal development may affect marine mammals, it is essential to determine their distribution characteristics. In this study, the appearance of finless porpoises was confirmed by passive acoustic monitoring around the Southwest offshore wind farm in July, 2020. Although there were no visual observation results of finless porpoises in the research area, the clicks measured in the offshore wind farm were verified by comparing with acoustic characteristics of the clicks measured in the area with a high detection rate. During the experimental period, clicks of finless porpoises were recorded for ten consecutive days, and Clicks per Porpoise Positive Minute (CPPM) was 40.7 clicks min⁻¹, Porpoise Positive Minutes (PPM) was 9.7 %, Encounter duration and waiting time were 18.2 min and 94.9 min respectively. This study provides information on the appearance of them in the Southwest offshore wind farm and this result may help to monitor the impact of marine mammals from wind farm operation.

Keywords: Passive acoustic monitoring, Finless porpoise, Click, Offshore wind farm

PACS numbers: 43.30.Sf, 43.80.Ka

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

“이 논문은 2021년도 한국음향학회 추계학술대회에서 발표하였던 논문임.”



Copyright©2021 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

다양한 인간 활동의 증가로 발생된 환경 변화는 전 세계 해양 생태계를 크게 위협하고 있다.^[1-5] 해양 포유류는 번식력이 낮고 수명이 길기 때문에 산업 어업, 수중 소음, 화학물질 오염, 선박 활동, 서식지 손실과 같은 인위적 활동으로 인한 부수적 피해에 특히 취약하다.^[5-7] 시공간적으로 다양한 인위적 활동은 해양포유류에 생태학적으로 많은 변화를 발생 시키게 되며, 특히 해안 근처의 천해 환경에 서식하는 고래류는 종종 높은 수준의 인위적 활동에 노출된다.^[3,5,7,8] 따라서 인위적 활동으로 인한 고래류에 대한 잠재적인 영향을 최소화하기 위해서는 고래류의 분포 평가가 중요하다.^[7,9]

고래류의 분포는 주로 상당한 시간적 경제적 투자를 통한 항공 또는 선박 기반의 목시 조사를 통해 얻을 수 있다.^[5,10,11] 그러나 목시 조사는 낮 시간과 비교적 좋은 기상상태에서만 수행할 수 있으며, 고래는 주로 수중에 존재하여 10% 미만의 시간에서만 해수면에서 관찰되므로 탐지 가능 시간이 제한된다.^[5,7,11-13] 최근에는 소리를 발생시키는 동물을 감지하여 위치 파악, 이동 패턴, 행동 경향 등을 조사하는 수동 음향 관측(Passive Acoustic Monitoring, PAM) 방법을 이용한 연구가 증가하고 있다.^[14-20] 이 방법은 수동 시스템이므로 고래류의 행동에 영향을 미치지 않는 비침습적이라는 장점이 있다.^[5,7] 또한 시간, 해상 상태, 계절에 관계없이 수중에서 소리를 발생시키고 있는 고래류를 감지할 수 있어, 이들의 존재와 행동에 대한 정보를 높은 시간 분해능으로 제공한다.^[5,21-23] 따라서 본 연구에서도 상괭이를 대상으로 수동 음향 관측을 활용한 연구를 시도하였다.

상괭이는 쇠돌고래과(*Phocoenidae*)에 속하는 소형돌고래로 동북아시아 지역 연안에 서식하며, 국내에서는 동해 북부를 제외한 대부분의 지역에서 관찰된다.^[24-27] 쇠돌고래과의 쇠돌고래는 크기가 작고 소규모 그룹으로 생활하며, 행동이 은밀하여(*cryptic*) 해상상태가 조금만 나빠져도 목시 관측이 어려운 것으로 알려져 있다.^[28,29] 이들은 반향정위를 위해 클릭을 생성하므로, 분포 및 행동 관찰을 위해서는 목시 조사보다 음향 조사가 효과적인 방법으로 판단되고

있다.^[5,30-34] 상괭이는 쇠돌고래와 크기는 비슷하지만 등지느러미 대신 등에서 꼬리까지 낮은 용기가 돌출되어 있어,^[27] 상대적으로 눈으로 관찰하기 어렵기 때문에 다른 고래들보다 수동 음향 관측이 더 효과적이라고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 서남해 해상풍력 실증단지 주변에 서식하는 상괭이의 분포 특성을 파악하기 위해, 수동 음향 관측을 이용한 상괭이 모니터링의 가능성을 확인하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1 음향조사

상괭이의 음향 신호 녹음은 서남해 해상풍력 실증단지 16호기로부터 약 100 m 떨어진 지점(Site 1, 35° 29' 47.28"N, 126° 19' 7.40" E)에서 2021년 7월 2일부터 7월 13일까지 약 10일간 수행되었다(Fig. 1). 다중 채널 자동기록식 수중청음기(RS-ORCA multi-channel passive acoustic recorder, RS Aqua Ltd, UK / M36-900, GeoSpectrum Technologies Inc., Canada)를 계류하였으며, 해저면으로부터 8.5 m에 수중청음기를 위치시켰다. 샘플링주파수는 상괭이의 고주파 성분의 클릭이 충분히 포함될 수 있도록 384 kHz로 설정하였다. 음향 파일은 10 min 간격으로 저장되었으며, 8 min 40 s의 녹음시간과 1 min 20 s의 저장시간으로 구성되었

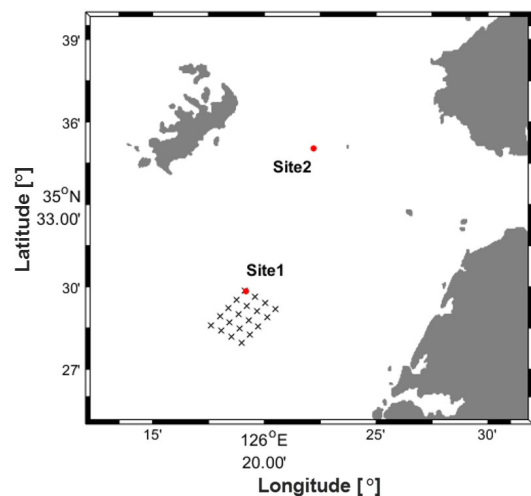


Fig. 1. (Color available online) Location of the experimental site (red circles). The 'x' denotes the Southwest offshore wind turbines.

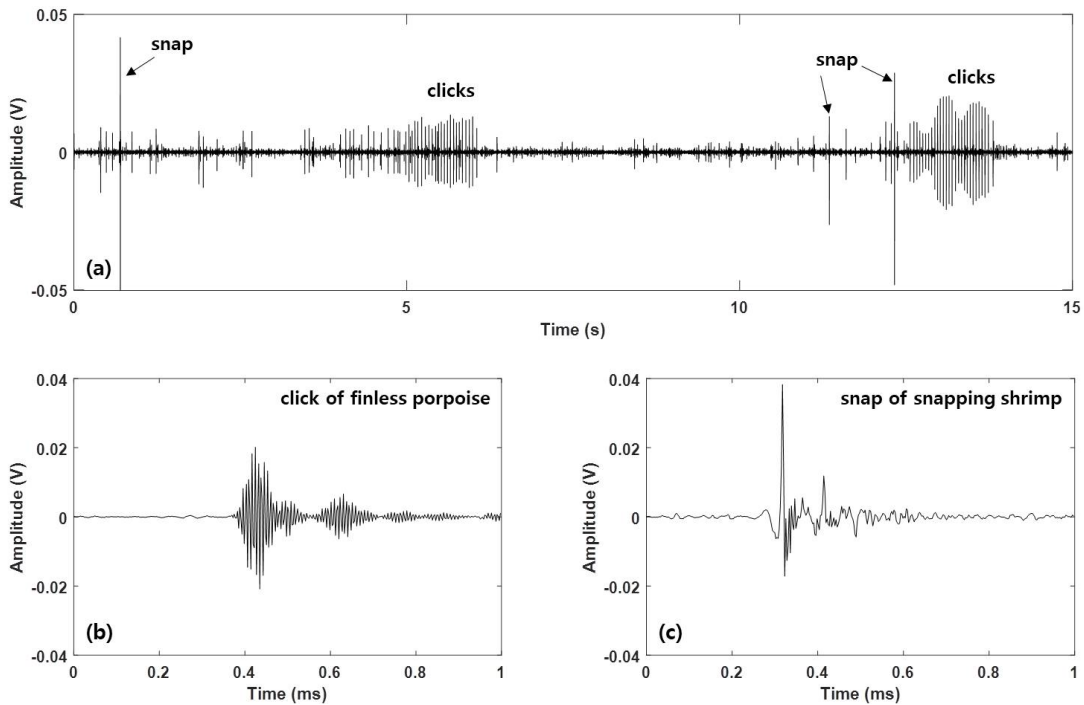


Fig. 2. (a) An example of time series received by the hydrophone, exhibiting many impulsive clicks and snaps. (b, c) Examples of the click of finless porpoise and snap of snapping shrimp. The data were high pass filtered at 20 kHz.

다. 또한 풍력단지에서 녹음된 상괭이의 신호를 검증하기 위해 지역 어촌계의 도움을 받아 상괭이가 많이 발견되는 위치(Site 2, 35° 35' 2.35" N, 126° 22' 11.88" E)에서도 동일한 장비를 구성하여 음향신호를 측정하였다. 정점간의 이동으로 인해 1 h 이내의 설치 및 회수 시간 차이는 발생하였지만, 2대가 모두 계류되어 있는 시간으로 분석을 진행하였다.

2.2 상괭이 클릭 신호 탐지

상괭이는 진폭이 크고 신호의 길이가 짧은 협대역의 고주파 클릭을 사용하여 방향위치를 측정하거나 먹이를 찾는 것으로 알려져 있다.^[25,35,36] 녹음된 신호에서 상괭이의 클릭을 추출하고 음향특성을 분석하는 방법은 소형 선박으로 상괭이 무리에 접근하여 녹음한 상괭이 클릭의 음향 특성을 분석한 선행 연구^[25]를 참고하였다. 녹음된 신호에서 상괭이의 클릭을 추출하기 위해, 20 kHz 이상의 고역통과 필터 후 문턱값 탐지기(threshold detector)^[25,37,38]를 이용하여 신호를 추출하였다. 문턱값은 신호대 잡음비[peak Signal to Noise Ratio, (peak SNR)]를 20으로 설정하여,

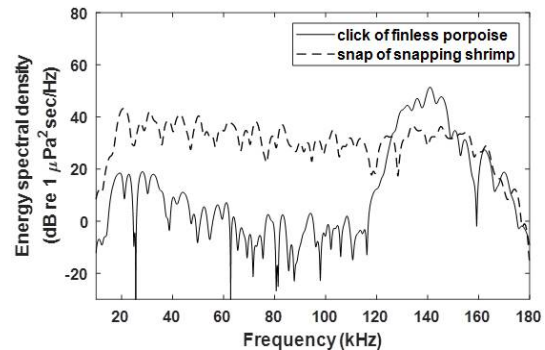


Fig. 3. Comparison of energy spectral density between click of finless porpoise (solid line) and snap of snapping shrimp (dashed line).

그 이하의 신호들은 소음으로 간주하고 제거하였다. 클릭은 신호의 크기가 크고 길이가 짧은 과도 신호이므로, SNR이 20 이상인 신호가 2ms 이상 연속되지 않으면 다른 클릭이라고 가정하여 분리하였다. 각각으로 분리된 신호는 고역통과 필터된 시간축의 신호 세기의 최대 값을 중심으로 1 ms 씩 추출하였다.

일반적으로 상괭이의 클릭은 70 kHz 이상의 고역통과 필터만으로도 다른 신호와 안정적으로 분리된다. 그러나 이번 실험에 녹음된 자료에는 상괭이의

신호 외에도 딱총새우가 발생시키는 스냅 신호도 포함되어 있어[Fig. 2(a)], 이 신호를 분리하는 작업이 필요하였다. 상괭이 신호는 고주파의 협대역 신호이므로 일정한 사이클을 가지는 파형을 보이지만[Fig. 2(b)], 스냅은 딱총새우의 집게에서 발생시킨 캐비테이션 버블이 터지며 방출되는 신호이므로 강력한 피크를 가지는 충격파 형태의 파형으로 나타난다[Fig. 2(c)]. 스냅 신호는 200 kHz 이상의 주파수까지 에너지를 가지는 광대역 신호이므로,^[39] 70 kHz 고역통과 필터를 통과시키더라도 남아있는 고주파 성분으로 인해 클릭과 명확하게 구분되지 않았다. 따라서 딱총새우의 스냅 신호를 제거하기 위해 피크 주파수와 3 dB 대역폭(3 dB bandwidth)을 이용하여 두 신호를 구분하였으며(Fig. 3), 선행 연구된 상괭이 클릭의 음향 특성과 비교하기 위해 신호 길이도 계산하였다.

1 ms 단위로 추출된 모든 클릭들에 대해 음향 특성 분석이 진행되었으며, 시간 축의 최대 값으로부터 10 dB 낮은 시작 시간과 종료 시간의 간격으로 신호 길이를 계산하였다. 주파수 특성은 1 ms 신호를 영삽입하여 1 s의 신호로 만들었으며, 에너지 스펙트럼 밀도로 분석을 통해 피크 주파수와 3 dB 대역폭을 계산하였다. 이때 푸리에 변환의 크기는 샘플링 주파수와 동일하게 설정하였다. 상괭이의 음향특성에 관한 선행연구^[25]를 참조하여 피크 주파수가 105 kHz 이상이면서 3 dB 대역폭이 30 kHz 이하인 음향 특성을 가진 신호들만 상괭이 클릭으로 가정하여 선택되었다. 위의 과정들을 통해 자동으로 선택된 신호들은 돌고래들이 발생시키는 클릭에서 확인되는 특징인 규칙적인 시퀀스를 가지고 있었다.^[36,37]

III. 결과 및 고찰

3.1 클릭 신호의 음향 특성

서남해 해상풍력 실증단지 주변에서 획득한 자료 중 7월 3일 00시부터 13일 00시까지의 240h의 자료를 분석하였으며, 총 48,461개의 상괭이 클릭이 탐지되었다. 음향특성 분석 결과 피크 주파수는 134.6 ± 6.6 kHz, 3dB 대역폭은 14.7 ± 7.7 kHz, 신호 길이는 65.1 ± 20.0 μ s로 나타났다(Table 1). 상괭이 신호를 검증하기 위해 선택한 지역(Site 2)에서 측정된 클릭의 피크

Table 1. List of peak frequency, 3dB bandwidth and signal duration for echolocation clicks of finless porpoises.

	Peak frequency (kHz)	3 dB bandwidth (kHz)	Signal duration (μ s)
Site 1	134.6 ± 6.6	14.7 ± 7.7	65.1 ± 20.0
Site 2	137.8 ± 7.0	12.7 ± 5.4	71.2 ± 19.0
Yoon (2020)	135.7 ± 5.8	14.3 ± 2.3	76.7 ± 13.5

주파수는 137.8 ± 7.0 kHz, 3 dB 대역폭은 12.7 ± 5.4 kHz, 신호 길이는 71.2 ± 19.0 μ s로 두 지역 간의 음향 특성은 매우 유사하게 나타났다. 또한 선행 연구 결과인 새만금 내측에서 측정된 상괭이의 음향 특성^[25]과도 유사하므로, 분석에 사용된 신호는 상괭이의 클릭이라고 할 수 있다.

3.2 상괭이 출현 빈도

음향 관측 결과 상괭이의 클릭은 조사기간 동안 매일 탐지되는 것을 확인할 수 있었으며(Fig. 4), 시간당 최대 클릭수는 2,657회로 나타났다. 일별 평균 클릭수는 4,870회였으며, 765~10,379회 범위로 탐지되었다. 상괭이의 시간별 음향 탐지 횟수는 27~4,989회로 오전 시간대에 상괭이의 클릭수가 낮았으며, 상대적으로 새벽시간에 많이 탐지되었다(Fig. 5). 2020년 2월 국립수산과학원 고래연구센터에서 수행한 음향을 이용한 남해 연안에 서식하는 상괭이의 분포 특성 연구 결과^[40]에서도 상괭이의 클릭은 매일 탐지되었다. 그러나 야간보다는 주간에 더 많이 탐지되었으며, 특히 오전시간이 비교적 많이 탐지되어 본 연구 결과와 차이가 있었다. 조사 계절에 의한 영향, 짧은 연구기간, 육상과의 거리 또는 해역 특성에 의한 영향일 수 있으나 이 연구 결과만으로는 정확한 특성을 파악하기 어렵다.

쇠돌고래과 해양포유류에 대한 출현 빈도는 출현 비율(Porpoise Positive Minutes, PPM), 평균 클릭수(Clicks per Porpoise Positive Minute, CPPM), 출현 시간(encounter duration), 대기 시간(waiting time)으로 표현되는 활동 지표를 활용하였으며, 측정 데이터는 1분 간격으로 구분하여 계산한다.^[41-43] 출현 비율은 상괭이 클릭이 탐지된 시간을 전체 녹음 시간으로 나눈 값을 백분율로 표현한 결과이다. 평균 클릭수는 탐

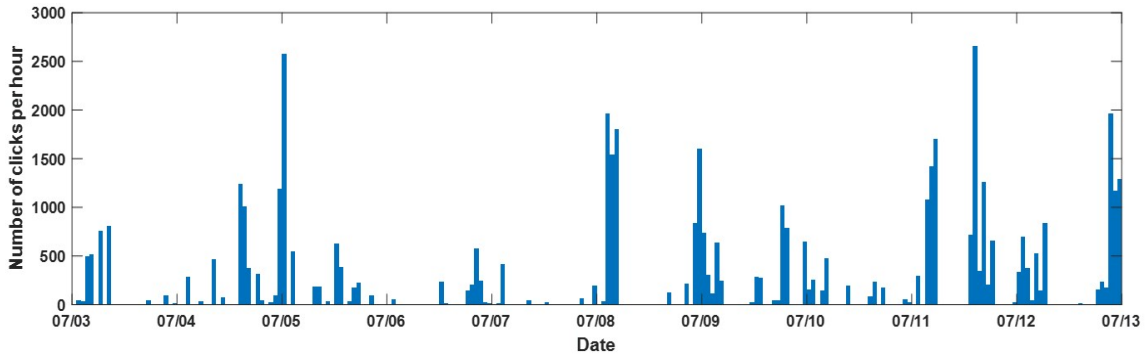


Fig. 4. (Color available online) Temporal variation of the number of clicks per hour measured at the Southwest offshore wind farm (site 1) during the experiment.

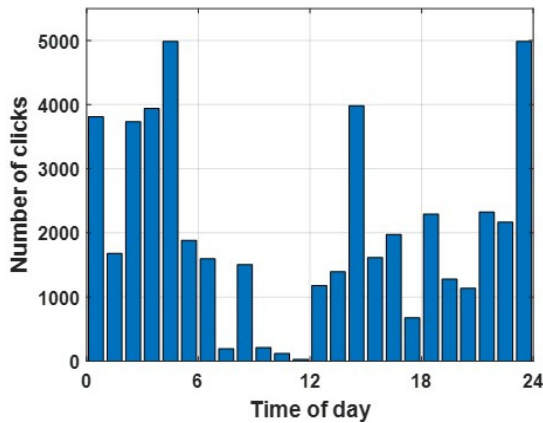


Fig. 5. (Color available online) Click and time of day patterns at site 1, averaged over the 10 days.

지된 전체 클릭수를 클릭이 탐지된 시간으로 나누어 준 결과로, 탐지된 시간 내에서의 분당 클릭수의 평균 값이다.

$$PPM = \frac{N(x_t > 0)}{N_{total}} \quad (1)$$

$$CPPM = \frac{1}{N(x_t > 0)} \sum_{x_t > 0} x_t, \quad (2)$$

여기서 N 은 시간(분)이며, x_t 는 분당 클릭수이다. 출현 시간과 대기 시간은 음향 관측 기간 내에서 발생하는 상괭이 무리(개체)의 개별 출현을 고려하는 방식이다. 클릭이 탐지 되지 않는 미탐지 시간을 10min으로 설정하여 서로 다른 두 무리(개체)의 출현을 구분한다. 즉 마지막 클릭이 기록된 후 10 min 내에 클

릭이 탐지 되었다면 같은 출현으로 간주하고, 미탐지 시간이 10 min을 초과하여 지속된다면 이후에 발생한 클릭은 다른 상괭이의 출현이라고 가정하는 방법이다. 따라서 대기 시간은 미탐지 기간이 10 min보다 큰 기간을 의미하게 된다. 상괭이는 3개 이상의 클릭 그룹으로 정의되는 클릭 트레인 형태의 신호를 발생시키므로^[44], 10 min 내에 5번 미만의 클릭이 탐지된 경우 오탐지로 가정하고 계산에서 제거하였다.

해상풍력단지(Site 1)에서 음향으로 탐지된 상괭이의 출현 비율은 9.7%였으며, 이때의 평균 클릭수는 40.7회로 나타났다. 출현 시간은 18.2 min이며, 대기 시간은 94.9 min으로 나타났다. 상괭이가 많이 발견되는 지역(Site 2)에서의 출현 비율은 16.8%, 평균 클릭수는 65.1회, 출현 시간은 17.5 min, 대기 시간은 57.7 min으로 나타났다. 비교 지역(Site 2)이 조사 시기에 어민들에게 상괭이가 많이 발견되는 지역이라는 것을 고려한다면, 풍력단지에서의 상괭이 출현빈도는 매우 낮은 수준은 아니라고 생각된다.

국내에서 상괭이를 대상으로 하는 활동지표 결과는 존재하지 않아 덴마크의 니스테드(Nysted) 풍력단지 주변에서 측정한 쇠돌고래의 활동 지표 결과와 비교하였다. 쇠돌고래의 월별 출현 비율은 0.13% ~ 0.78%, 평균 클릭수는 26회 ~ 56회, 출현 시간은 2.6 min ~ 4.2 min, 대기 시간은 5.6 h ~ 59 h으로 다양했다.^[43] 평균 클릭수는 본 연구에서 측정된 상괭이 결과와 비슷하였으나, 출현 비율과 출현 시간은 매우 낮고 대기 시간은 상당히 길었다. 그러나 상괭이와 쇠돌고래는 같은 쇠돌고래과에 속하지만 종이 다르며 두 지역에 서식하는 정확한 개체수를 알 수 없어

직접적인 비교는 불가능하였다.

IV. 요약 및 결론

서남해 해상풍력 실증단지에서 음향 관측을 통해 상괭이의 출현 빈도를 관측하였다. 본 논문에서는 녹음된 음향 신호에서 상괭이의 클릭을 추출하였으며, 분석된 상괭이의 신호를 이용하여 시간별 탐지 결과와 활동지표로 상괭이의 출현 빈도를 표현하였다. 상괭이의 클릭은 예상했던 결과와는 달리 풍력 단지 주변에서 측정기간 동안 매일 탐지되었다. 클릭 탐지 과정에서 높은 신호 대 잡음비로 문턱값을 설정하여, 음향 특성을 이용한 상괭이 클릭 추출 방법으로 인해 발생할 오탐지 확률을 줄였다. 음향 관측 결과 상괭이는 해상풍력 실증단지 주변에서 발견되었으므로, 해상풍력 실증단지가 이들의 생활반경에 포함되는 것으로 추정된다. 그러나 상괭이는 계절에 따라 분포 변화가 있는 것으로 알려져 있으므로,^[27,45,46] 이번 조사만으로 이들의 계절별 또는 공간별 분포 특성을 단정하기에는 어려움이 있다. 따라서 정확한 분포 특성을 파악하기 위해서는 추가적인 음향 관측이 필요할 것으로 생각된다.

해양 에너지 인프라의 개발과 선박 교통의 증가로 인해 세계의 바다는 점점 더 시끄러워지고 있다.^[47-49] 최근들어 재생에너지에 대한 수요가 증가함에 따라 해상풍력은 여러 국가에서 관심을 가지고 개발 및 설치되고 있어,^[50-54] 음파를 사용하는 해양 포유류에 미치는 잠재적 소음 영향에 대한 이해의 필요성이 증가하고 있다.^[9] 우리나라도 서남해 해상풍력 실증 단지를 시작으로 대규모 해상풍력단지 건설을 통해 해상풍력 강국으로의 성장을 목표로 하고 있어,^[55,56] 해상풍력 발전기 건설 및 운영 시 발생하는 수중소음이 해양포유류에 미치는 영향에 대한 관심이 많다. 이러한 영향을 파악하고 부정적인 영향을 최소화하기 위해서는 해상풍력단지 건설 예정지에서의 분포특성 연구가 선행되어야 할 것으로 생각된다.

서남해 해상풍력 실증단지 건설 전에는 해양포유류에 대한 모니터링이 수행되지 않아, 짧은 조사기간 동안 수행된 본 연구의 결과만으로는 풍력단지 건설로 인한 영향이 있는지는 파악하기 어려움이 있

다. 그러나 앞으로 해상풍력단지 건설이 많이 예정되어 있는 만큼, 다른 환경 조사와 마찬가지로 건설 전/중/후 연구 결과를 비교한다면 해상풍력단지가 해양포유류에 미치는 영향을 파악할 근거가 될 것으로 생각된다. 해상풍력단지는 주로 연안에 건설되어 소형고래류 서식지와 일치하므로,^[57] 앞으로도 해양포유류 분포 특성에 대한 정보가 필요할 것으로 생각된다. 많은 인력과 시간, 비용이 소비되는 목시조사를 반복 수행하기는 쉽지 않으므로,^[58] 연속적인 자료 획득이 쉬운 음향 조사 방법이 효과적일 것으로 생각된다.^[22,23,59] 본 연구에서는 두 개의 정점에서 해양포유류의 수동 음향 관측이 수행되었으나, 추후 풍력단지 주변의 여러 정점에서 지속적인 조사가 수행된다면 해상풍력으로 인한 영향을 예측하고 평가하는데 과학적 자료를 제공할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20203030020080, 해상풍력 단지 해양공간 환경 영향 분석 및 데이터베이스 구축)과 국방과학연구소의 지원(UD200010DD)을 받아 수행된 연구임.

References

1. R. C. Nias, "Endangered Ecosystems," in *Handbook of Encyclopedia of Biodiversity 2nd Ed.*, edited by S. A. Levin (Academic Press, Oxford, 2013).
2. E. R. Hawkins, R. Harcourt, L. Bejder, L. O. Brooks, A. Grech, F. Christiansen, H. Marsh, and P. L. Harrison, "Best practice framework and principles for monitoring the effect of coastal development on marine mammals," *Front. Mar. Sci.* **4**, 59 (2017).
3. B. S. Halpern, S. Walbridge, K. A. Selkoe, C. V. Kappel, F. Micheli, C. D'Agrosa, J. F. Bruno, K. S. Casey, C. Ebert, H. E. Fox, R. Fujita, D. Heinemann, H. S. Lenihan, E. M. P. Madin, M. T. Perry, E. R. Selig, M. Spalding, R. Steneck, and R. Watson, "A global map of human impact on marine ecosystems," *Science*, **319**, 948-952 (2008).
4. S. M. Maxwell, E. L. Hazen, S. J. Bograd, B. S. Halpern, G. A. Breed, B. Nickel, N. M. Teutschel, L. B. Crowder, S. Benson, P. H. Dutton, H. Bailey, M. A.

- Kappes, C. E. Kuhn, M. J. Weise, B. Mate, S. A. Shaffer, J. L. Hassrick, R. W. Henry, L. Irvine, B. I. McDonald, P. W. Robinson, B. A. Block, and D. P. Costa, "Cumulative human impacts on marine predators," *Nature Communications*, **4**, 2688 (2013).
5. A. K. Holdman, J. H. Haxel, H. Klinck, and L. G. Torres, "Acoustic monitoring reveals the times and tides of harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) distribution off central Oregon, U.S.A.," *Mar. Mamm. Sci.* **35**, 164-186 (2019).
 6. S. S. Heppell, S. A. Heppell, A. J. Read, and L. B. Crowder, "Effects of fishing on long-lived marine organisms," in *Handbook of Marine Conservation Biology: The Science of Maintaining the Sea's Biodiversity*, edited by E. A. Norse and L. B. Crowder (Island Press, Washington, D.C., 2005).
 7. R. Aguiar, G. Maguolo, L. Nanni, Y. Costa, and C. Silla Jr., "On the Importance of Passive Acoustic Monitoring Filters," *J. Mar. Sci. Eng.* **9**, 685 (2021).
 8. J. Barlow and K. A. Forney, "An assessment of the 1994 status of harbor porpoise in California," NOAA Technical Memorandum, NOAA-TM-NMFS-SWFSC-205, (1994).
 9. H. Bailey, A. Rice, J. E. Wingfield, K. B. Hodge, B. J. Estabrook, D. Hawthorne, A. Garrod, A. D. Fandel, L. Fouda, E. McDonald, E. Grzyb, W. Fletcher, and A. L. Hoover, "Determining habitat use by marine mammals and ambient noise levels using passive acoustic monitoring offshore of Maryland," OCS Study, BOEM 2019-018, Rep., 2018.
 10. P. G. Evans and P. S. Hammond, "Monitoring cetaceans in European waters," *Mamm. Rev.* **34**, 131-156 (2004).
 11. M. A. McDonald and C. G. Fox, "Passive acoustic methods applied to fin whale population density estimation," *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 2643-2651 (1999).
 12. J. N. Oswald, J. Barlow, and T. F. Norris, "Acoustic identification of nine delphinid species in the eastern tropical Pacific Ocean," *Mar. Mamm. Sci.* **19**, 20-37 (2003).
 13. P. L. Tyack and E. H. Miller, "Vocal anatomy, acoustic communication and echolocation" in *Handbook of Marine Mammal Biology: An Evolutionary Approach*, edited by A. R. Hoelzel (Blackwell Science, Oxford, 2002).
 14. M. A. McDonald, J. A. Hildebrand, and S. C. Webb, "Blue and fin whales observed on a seafloor array in the Northeast Pacific," *J. Acoust. Soc. Am.* **98**, 712-721 (1995).
 15. S. B. Blackwell, W. J. Richardson, C. R. Greene Jr., and B. Streever, "Bowhead whale (*Balaena mysticetus*) migration and calling behaviour in the Alaskan Beaufort Sea, Autumn 2001-04: An acoustic localization study," *Arctic*, **60**, 255-270 (2007).
 16. L. Di Iorio and C. W. Clark, "Exposure to seismic survey alters blue whale acoustic communication," *Biol. Lett.* **6**, 51-54 (2010).
 17. A. M. Thode, K. H. Kim, S. B. Blackwell, C. R. Greene Jr., and M. A. Macrander, "Automated detection and localization of bowhead whale sounds in the presence of seismic airgun surveys," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**, 3726-3747 (2012).
 18. A. M. Thode, K. H. Kim, R. G. Norman, S. B. Blackwell, and C. R. Green Jr., "Acoustic vector sensor beamforming reduces masking from underwater industrial noise during passive monitoring," *J. Acoust. Soc. Am.* **139**, EL105-EL111 (2016).
 19. J. Carlström, "Diel variation in echolocation behavior of wild harbor porpoises," *Mar. Mamm. Sci.* **21**, 1-12 (2005).
 20. V. L. Todd, W. D. Pearse, N. C. Tregenza, P. A. Lepper, and I. B. Todd, "Diel echolocation activity of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) around North Sea offshore gas installations" *ICES J. Mar. Sci.* **66**, 734-745 (2009).
 21. D. K. Mellinger, K. M. Stafford, S. Moore, R. P. Dziak, and H. Matsumoto, "Fixed passive acoustic observation methods for cetaceans," *Oceanography* **20**, 36-45 (2007).
 22. 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).
 23. H. K. Nuuttila, L. Thomas, J. G. Hiddink, R. Meier, J. R. Turner, J. D. Bennell, N. J. C. Tregenza, and P. G. H. Evans, "Acoustic detection probability of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, with static acoustic dataloggers in Cardigan Bay, Wales," *J. Acoust. Soc. Am.* **134**, 2596-2609 (2013).
 24. M. Amano, "Finless porpoises," in *Handbook of Encyclopedia of Marine Mammals 3rd ed.*, edited by B. Würsig, J. G. M. Thewissen, and K. Kovacs (Academic Press, London, 2018).
 25. Y. G. Yoon, D.-G. Han, J. W. Choi, S. Choi, and H. Sohn, "Properties of echolocation click sound of narrow-ridged finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis*) inhabiting the west coast of Korea," *Proc. 49th Inter-noise*, 4435-4438 (2020).
 26. H. Sohn, K. J. Park, Y. R. An, S. G. Choi, Z. G. Kim, H. W. Kim, D. H. An, Y. R. Lee, and T.-G. Park, "Distribution of whales and dolphins in Korean waters based on a sighting survey from 2000 to 2010" (in Korean), *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* **45**, 486-492

- (2012).
27. K. J. Park, Y. G. Yoon, J.-H. Sin, H. Sohn, and Y.-M. Choi, "Distribution and seasonal changes in finless porpoise *Neophocaena asiaorientalis* populations near Gadeok Island, Korea" (in Korean), *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* **50**, 561-566 (2017).
 28. J. L. Laake, J. Calambokidis, S. D. Osmek, and D. J. Rugh, "Probability of detecting harbor porpoise from aerial surveys: Estimating $g(0)$," *J. Wildl. Manage.* **61**, 63-75. (1997).
 29. H. N. Koopman and D. Gaskin, "Individual and geographical variation in pigmentation patterns of the harbour porpoise, *Phocoena phocoena* (L.)," *Can. J. Zool.* **72**, 135-143 (1994).
 30. A. Villadsgaard, M. Wahlberg, and J. Tougaard, "Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena*," *J. Exp. Biol.* **210**, 56-64 (2007).
 31. M. Linnenschmidt, J. Teilmann, T. Akamatsu, R. Dietz, and L. A. Miller, "Biosonar, dive, and foraging activity of satellite tracked harbor porpoises (*Phocoena phocoena*)," *Mar. Mamm. Sci.* **29**, E77-E97 (2013).
 32. D. M. Wisniewska, M. Johnson, J. Teilmann, L. Rojano-Doñate, J. Shearer, S. Sveegaard, L. A. Miller, U. Siebert, and P. T. Madsen, "Ultra-high foraging rates of harbor porpoises make them vulnerable to anthropogenic disturbance," *Curr. Biol.* **26**, 1441-1446. (2016).
 33. J. Teilmann, "Influence of sea state on density estimates of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*)," *J. Cetacean Res. Manage.* **5**, 85-92 (2003).
 34. L. A. Kyhn, J. Tougaard, J. Teilmann, M. Wahlberg, P. B. Jørgensen, and N. I. Bech, "Harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) static acoustic monitoring: Laboratory detection thresholds of T-PODs are reflected in field sensitivity," *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* **88**, 1085-1091 (2008).
 35. F. Nakahara, A. Takemura, T. Koido, and H. Hiruda, "Target discrimination by an echolocating Finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*," *Mar. Mamm. Sci.* **133**, 639-649 (1997).
 36. S. Li, D. Wang, K. Wang, T. Akamatsu, Z. Ma, and J. Han, "Echolocation click sounds from wild inshore finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides sunameri*) with comparisons to the sonar of riverine *N. p. asiaorientalis*," *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 3938-3946 (2007).
 37. W. M. X. Zimmer, *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans* (Cambridge University Press, New York, 2011), pp. 39-85, 119-144.
 38. Y. G. Yoon, K.-H. Choi, D.-G. Han, H. Sohn, and J. W. Choi, "Size estimation of Sperm Whale in the East Sea of Korea using click signals" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **39**, 533-540 (2020).
 39. D. H. Cato and M. J. Bell, "Ultrasonic ambient noise in Australian shallow waters at frequencies up to 200 kHz," *Material Research Laboratory Tech. Rep.*, MRL-TR-91-23, 1992.
 40. S. Choi, Y. Jo, E. H. Kim, J.-H. Sin, H. Lee, J.-T. Yoo, and H. Sohn, "A study on the distribution characteristics of the shark (*Neophocaena asiaorientalis*) inhabiting the southern sea coast using sound" (in Korean), *Proc. Korean Soc. Fish. Aquat. Sci.* **2020**, 218 (2020).
 41. M. Scheidat, G. Aarts, A. Bakker, S. Brasseur, J. Carstensen, P. W. van Leeuwen, M. Leopold, T. V. P. Petel, P. Reijnders, J. Teilmann, J. Tougaard, and H. Verdaat "Assessment of the effects of the offshore wind farm Egmond aan Zee (OWEZ) for harbour porpoise (comparison T0 and T1)," *Rep.*, No. OWEZ_R_253_T1_20090829, 2009.
 42. J. Teilmann and J. Carstensen, "Negative long term effects on harbour porpoises from a large scale offshore wind farm in the Baltic—evidence of slow recovery," *Environ. Res. Lett.* **7**, 045101 (2012).
 43. J. Teilmann, J. Tougaard, and J. Carstensen, "Effects on harbour porpoises from Rødsand 2 off-shore windfarm," *Scientific Rep.*, No. 42, DCE: Danish Centre for Environment and Energy, 2012.
 44. S. Li, D. Wang, K. Wang, J. Xiao, and T. Akamatsu, "The ontogeny of echolocation in a Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaorientalis*)," *J. Acoust. Soc. Am.* **122**, 715-718 (2007).
 45. M. Shirakihara, K. Shirakihara, and A. Takemura, "Distribution and seasonal density of the finless porpoise *Neophocaena phocaenoides* in the coastal waters of western Kyushu, Japan," *Fisheries Sci.* **60**, 41-46 (1994).
 46. T. A. Jefferson, S. K. Hung, L. Law, M. Torey, and N. Tregenza, "Distribution and abundance of finless porpoises in Hong Kong and adjacent waters of China," *Raffles Bull. Zool. Supplement* **10**, 43-55 (2002).
 47. R. K. Andrew, B. M. Howe, and J. A. Mercer, "Long-time trends in ship traffic noise for four sites off the North American West Coast," *J. Acoust. Soc. Am.* **129**, 642-651 (2011).
 48. J. A. Hildebrand, "Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean," *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **395**, 5-20 (2009).
 49. J. E. Wingfield, M. O'Brien, V. Lyubchich, J. J. Roberts, P. N. Halpin, A. N. Rice, and H. Bailey, "Year-round spatiotemporal distribution of harbour porpoises within and around the Maryland wind energy area," *PloS One*, **12**, e0176653 (2017).

50. S.-P. Breton and G. Moe, "Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America," *Renew. Energy*, **34**, 646-654 (2009).
51. B. Hamilton, M. Bielecki, C. Bloch, T. Decker, L. Frantzis, K. Midura, J. Paidipati, and F. Zhao, "Offshore wind market and economic analysis," 2014 annual market assessment, Tech. Rep., DE-EE0005360, 2014.
52. S. Rodrigues, C. Restrepo, E. Kontos, R. T. Pinto, and P. Bauer, "Trends of offshore wind projects," *Renew. Sust. Energ. Rev.* **49**, 1114-1135 (2015).
53. K. M. Stone, S. M. Leiter, R. D. Kenney, B. C. Wikgren, J. L. Thompson, J. K. D. Taylor, and S. D. Kraus, "Distribution and abundance of cetaceans in a wind energy development area offshore of Massachusetts and Rhode Island," *J. Coast. Conserv.* **21**, 527-543 (2017).
54. U. Stöber and F. Thomsen, "How could operational underwater sound from future offshore wind turbines impact marine life?," *J. Acoust. Soc. Am.* **149**, 1791-1975 (2021).
55. J.-H. Maeng, B.-J. Cho, O.-J. Lim, and J. Seo, "A study on the environmental impact of offshore wind farms through monitoring case in overseas country" (in Korean), *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energ.* **16**, 276-289 (2013).
56. H.-T. Oh, M.-Y. Yeo, H.-E. Jung, and J.-M. Shim, "Status and improvement of environmental impacts assessment on the marine endangered species around the coastal area of offshore wind energy - case study of the marine mammals and sea birds -" (in Korean), *J. Fish. Mar. Sci. Edu.* **32**, 1428-1444 (2020).
57. H. K. Nuuttila, C. M. Bertelli, A. Mendzil, and N. Dearle, "Seasonal and diel patterns in cetacean use and foraging at a potential marine renewable energy site," *Mar. Pollut. Bull.* **129**, 633-644 (2018).
58. K. J. Park, H. Sohn, Y. H. Kim, D. N. Kim, H. W. Kim, D. H. An, and Y.-R. An, "Feasibility of Aerial Surveys of Finless Porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* off the West Coast of Korea" (in Korean), *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* **46**, 966-969 (2013).
59. 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), *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* **50**, 406-412 (2017).

저자 약력

▶ 윤 영 글 (Young Geul Yoon)



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

▶ 양 원 준 (Wonjun Yang)



2020년 2월 : 한양대학교 해양환경과학과
학사
2020년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 해양융합
과학과 석박통합과정

▶ 최 지 응 (Jee Wonng 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 해양융합
공학과 교수
2020년 5월 ~ 현재 : 미국음향학회 석학
(Fellow) 회원