

ORIGINAL ARTICLE

관박쥐 어미-새끼 커뮤니케이션 과정에 대한 음향학적 특성

정철운* · 전영신¹⁾ · 이정미¹⁾ · 김성철¹⁾

동국대학교 생태교육원, ¹⁾주식회사 에코넷

Acoustic Characteristics of Ultrasonic Vocalizations During Mother-Pup Communication in the Greater Horseshoe Bat (*Rhinolophus ferrumequinum*)

Chul Un Chung*, Young Shin Jeon¹⁾, Jung Mi Lee¹⁾, Sung Chul Kim¹⁾

Ecological Education Center, Dongguk University, Gyeongju 38066, Korea

¹⁾Econet Co., Ltd., Gyeongju 38103, Korea

Abstract

This study investigated the acoustic characteristics of ultrasonic pulses recorded during mother-pup interactions in the greater horseshoe bat (*Rhinolophus ferrumequinum*) at a nocturnal roost. Ultrasonic vocalizations were analyzed in two behavioral contexts: the maternal approach phase toward the roost, and the post-reunion phase, following physical proximity between the mother and pups. Acoustic recordings were obtained at a bridge roost, where the maternal approach and reunion behaviors were visually confirmed, and the pulse patterns observed in each phase were classified into representative acoustic types (Types 1-3). During the approach phase, high-frequency CF-centered pulses with a typical FM-CF-FM structure and structurally variable pulses in the lower frequency bands co-occurred within the same temporal segments. In some high-frequency pulses, the peak frequencies were lower than the commonly reported CF range of *R. ferrumequinum*, suggesting context-dependent modulation of call structure and frequency during the roost approach. Following the reunion, the pulse structures and frequency distributions became increasingly complex compared with that in the approach phase. Various FM-dominant pulses with modified or reduced CF segments were recorded, and multiple acoustic patterns spanning a broad frequency range were observed simultaneously, indicating overlapping echolocation-related and individual response signals. Low-frequency pulses characterized by high structural variability were repeatedly observed and showed acoustic features consistent with pup vocalizations reported in previous studies. These signals were interpreted as pup responses to maternal calls. This study highlights the structural diversity of ultrasonic vocalizations associated with mother-pup interactions at roosts and contributes to understanding context-dependent acoustic communication in *R. ferrumequinum* during the breeding period.

Key words: Acoustic communication, Echolocation call structure, Mother-pup interaction, *Rhinolophus ferrumequinum*, Ultrasonic vocalization

1. 서론

박쥐는 반향정위(echolocation)를 이용하여 어두운 환경에서도 공간을 인지하고 먹이를 탐색하는 대표

적인 포유류로 박쥐가 이용하는 반향정위 신호는 주로 주파수 변조(frequency modulated, FM) 성분과 고정 주파수(constant frequency, CF) 성분의 조합으로 구성된다(Chung, 2020). 이러한 음향 신호 구조는

Received 10 March, 2026; Revised 30 April, 2026;

Accepted 6 May, 2026

*Corresponding author : Chul Un Chung, Ecological Education Center, Dongguk University, Gyeongju 38066, Korea
Phone : +82-54-771-2022
E-mail : batman424@naver.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

비행 환경, 탐색 범위, 먹이원 유형 등에 따라서 유연하게 조절되는데, 음향 특성에 따라서 박쥐의 발성은 단순한 위치 탐지 수단을 넘어 개체의 행동 상태와 생태적 특성을 해석할 수 있는 중요한 정보로 활용되어 왔다(Schnitzler and Kalko, 2001; Schnitzler et al., 2003).

관박쥐(*Rhinolophus ferrumequinum*)는 대표적인 CF형 음향을 발산하는 박쥐로, 비교적 긴 CF 성분과 이를 전후로 하는 FM 성분이 결합된 FM-CF-FM 구조의 반향정위 신호를 사용한다(Chung et al., 2010). 국내 서식하는 관박쥐의 CF 성분은 주로 68–70 kHz 범위에 집중되며, 이 주파수 대역은 비행 중에도 안정적으로 유지되는 특징이 있어 종 식별과 행동 맥락 해석의 중요한 기준으로 활용된다(Schnitzler et al., 2003; Chung, 2020).

관박쥐에 관한 해외 선행 연구로는 먹이원 구성(Tournayre et al., 2021), 서식지 이용 특성(Pinaud et al., 2018), 지역별 분포 및 행동 생태(Froidevaux et al., 2017), 커뮤니케이션 과정에 대한 음향 특성(Ma et al., 2006), 사회적 발성 음향 특징(Andrews and Andrews, 2003) 등에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 국내의 경우 기본적인 초음파 형태 특징(Chung et al., 2010), 행동권 및 서식지 이용특성(Jeon et al., 2018), 먹이포획 활동에 따른 음향 변화(Chung et al., 2017)에 대한 연구가 수행된 바 있다. 그러나 이러한 선행 연구들은 대부분 서식 현황 파악 또는 보호 관리 측면에 초점을 두고 있거나 개체의 단독비행 또는 먹이를 탐색하는 상황을 중심으로 이루어짐에 따라 번식기 동안 어미와 새끼의 상호작용 과정에 대한 초음파 발성 특성을 이해하기에는 제한적이다.

박쥐의 사회적 맥락에서 사용되는 초음파 발성은 반향정위 신호와는 기능적·구조적으로 구분되는 경우가 많으며, 특히 어미-새끼간 커뮤니케이션 과정에서는 반향정위 신호와 사회적 신호가 동일한 발성 체계 내에서 혼재되어 나타날 수 있다(Fenton, 1985; Knörnschild et al., 2012). 관박쥐를 대상으로한 초기 연구에서도, 새끼가 성장 초기 단계에서 불규칙하고 변동성이 큰 초음파를 발산하며, 어미와의 상호작용 과정에서 발성 패턴이 변화한다는 점이 제시되었다(Matsumura, 1981). 이러한 결과는 번식기 어미-새끼 상호작용 상황에서 관찰되는 초음파 발성이 단순한 반향정위 기능만으로 설명되기 어렵다는 것을 보여준다.

국내의 경우, 관박쥐를 포함한 박쥐류의 초음파 연구는 주로 종 동정이나 서식지 이용 평가를 목적으로 수행되어 왔으며, 번식기 어미-새끼 상호작용 과정에서의 초음파 발성 특성에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 특히 야간 은신처(roost) 환경내 어미가 새끼에게 접근하거나 합류하는 과정에서 나타나는 초음파 발성의 구조적 다양성과 변화 양상을 체계적으로 분석한 사례는 보고된 바 없으며, 이에 따라 번식기 행동 맥락에서 관찰되는 초음파 발성을 해석하기 위한 기초 자료는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 관박쥐의 야간 은신처 환경에서 관찰되는 어미-새끼 상호작용 상황을 대상으로, 어미 개체의 은신처 접근 단계와 새끼 무리와의 합류 이후 단계에서 나타나는 초음파 발성의 구조적 특성과 음향 유형의 다양성을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 또한 이를 통해 관박쥐의 번식기 행동 맥락에서 나타나는 초음파 발성의 특성을 이해하고, 향후 어미-새끼 커뮤니케이션 연구를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역 및 조사 대상

본 연구는 2025년 7월 경상북도 안동시에 위치한 교량을 대상으로 수행하였다. 해당 교량은 하천을 횡단하는 구조물로, 교량 하부는 콘크리트 거더(prestressed concrete girder) 형태로 조성되어 있어 관박쥐를 포함하여 다양한 애기박쥐과(Vespertilionidae) 종들의 야간 휴식처로 이용되고 있는 곳이다(Chung et al., 2009). 특히 교량내 안경간(shore span) 구간은 지면과 거더와의 공간이 협소하고 접근이 어려워 번식기 수유중인 박쥐에 의한 이용율이 높은 구간으로 본 연구에 이용된 관박쥐 또한 출산 후 새끼를 데리고 이동중인 어미 개체에 의해 야간 중간 기점 역할을 하는 장소이다. 조사 기간 동안 교량 하부에서는 다수의 새끼 개체가 집단으로 모여 있는 장면이 반복적으로 관찰되었다. 본 조사지점에 대한 사전 조사결과(2020–2024) 및 인근의 동굴 서식지에서 확인된 관박쥐의 출산 시점을 고려할 때 본 연구대상지의 어린 개체는 자율비행이 불가능한 생후 10일 내외의 개체로 판단된다. 새끼 무리의 크기는 하나의 거더내 15개체가 모여 있는 상태였으며, 채식활동을 마친 어미의 합류가 주기적으로 관찰되었다. 은신처 복귀 후 새끼와 합류한 어미 개체는 특정

개체를 복부에 붙인 상태로 동일한 지점에서 휴식하거나 교량을 떠나는 행동이 관찰되었다. 본 연구는 이러한 새끼 무리와 어미 개체와의 반복적인 분리-합류 단계에 대하여 해당 공간을 중심으로 발생하는 어미와 새끼 사이의 초음파 발성을 대상으로 하였다.

2.2. 초음파 녹음 및 영상 기록

관박쥐 어미와 새끼가 발산하는 음향 기록을 위해 초음파 녹음기(Batbox Griffin bat detector, Batbox Ltd., UK; sampling rate 705.6 kHz, frequency range 16-190 kHz)를 사용하였으며, 녹음기는 교량 하부에서 개체들이 매달려 있는 위치로부터 약 1.5 m 거리에 설치하였다. 영상 기록은 초음파 녹음이 이루어진 지점과 동일 위치에서 병행하였으며, 4K 디지털 캠코더(FDR-AX700, Sony Corporation, Japan)를 삼각대에 고정하여 지속적으로 촬영하였다. 초음파 녹음기와 캠코더는 동일한 시간 기준으로 동기화하여 설치하였고, 모든 음향 자료는 대응되는 영상 기록과 시간적으로 일치하도록 설정하였다. 녹음은 일정 음압(dB) 수준 이상에서 자동으로 개시되도록 설정하였으며, 분석에 적합하지 않은 무음 구간 또는 노이즈 구간은 제외하였다.

2.3. 행동 단계 구분

동기화된 영상 기록과 초음파 녹음 자료를 바탕으로, 음성 자료를 접근단계와 합류단계로 구분하였다. 접근단계는 영상 프레임 상에서 어미 개체가 새끼들이 모여있는 교량 하부 은신처로 도달하기 직전의 구간으로 정의하였으며, 합류단계는 어미 개체가 교량 하부 은신처 내부 공간으로 완전히 진입하여 새끼 무리와 합류한 직후의 구간으로 정의하였다. 이와 같은 단계 구분은 은신처로 접근하는 과정에서의 공간 인지 및 위치 탐색 과정에서 발생하는 음향 신호와, 어미와 새끼가 동일 공간 내에서 물리적으로 근접한 이후 나타나는 사회적 상호작용 맥락의 발생이 기능적으로 차이를 보일 가능성을 고려하여 설정하였다.

2.4. 음향 분석 및 펄스 유형 분류

초음파 음성 분석은 BatSound 4.0 (Pettersson Elektronik AB, Uppsala, Sweden)과 Kaleidoscope Pro (Wildlife Acoustics Inc., Maynard, MA, USA)

를 이용하여 수행하였다. 분석에는 배경 잡음이 상대적으로 적고, 개별 펄스 형태가 명확하게 확인되는 구간을 선별하여 사용하였다. 스펙트로그램 분석은 FFT size 2048 samples, Hanning window를 적용하여 수행하였으며, 모든 스펙트로그램은 동일한 분석 조건에서 생성하여 자료간 비교가 가능하도록 하였다.

음향 분석 항목으로는 펄스 지속시간(pulse duration, PD), 펄스간 간격(pulse interval, PI), 피크 주파수(peak frequency, PF), 주파수 대역폭(frequency bandwidth, BW)을 측정하였다. PD는 개별 펄스의 시작과 종료 지점을 기준으로 측정하였으며, PI는 연속된 두 펄스 간의 시간 간격으로 산출하였다. PF는 각 펄스에서 에너지 강도가 최대가 되는 주파수로 정의하였으며, 각 지표는 oscillogram과 spectrogram을 병행하여 측정하였다.

접근단계와 합류단계에서 기록된 초음파 음성은 주파수 대역, 펄스 형태 및 배열 특성을 종합적으로 고려하여 세 가지의 대표 타입으로 분류하였다. 각 유형의 분류는 펄스의 구조적 형태, 주요 주파수 대역 분포, 그리고 서로 다른 주파수 대역의 펄스가 동일 시간 구간에서 중첩되어 나타나는 정도 등의 음향적 특징을 종합적으로 고려하였다. 각 타입별 펄스 구간은 정량적 임계값이 아닌 접근단계와 합류단계에서 반복적으로 관찰되는 대표적인 구조적 특징과 경향성을 기준으로 설정하였으며, 음향 신호의 구조적 다양성과 변화 양상을 기술적으로 정리하기 위한 범주적 분류로 사용하였다. 본 연구에서는 특정 펄스를 발성 주체(어미 또는 새끼)로 단정하지 않았으며, 주파수 대역, 펄스 구조, 에너지 분포 등 관찰 가능한 음향적 특성을 중심으로 결과를 제시하였다.

3. 결 과

3.1. 어미 개체의 은신처(roost) 접근 단계

3.1.1. 접근 type 1 : 고주파 CF 이종 대역 펄스

어미 개체가 은신처로 접근하는 단계에서의 첫 번째 음향 유형은 고주파 CF 이종 대역 펄스로 동일 시간 내에서 서로 다른 주파수 대역을 중심으로 하는 두 종류의 펄스 패턴이 명확하게 관찰되었다. 약 60 kHz 부근에서 피크를 보이는 고주파 펄스는 전형적인 관박쥐의 펄스 유형인 FM-CF-FM 구조와 달리 첫 번째 FM 구

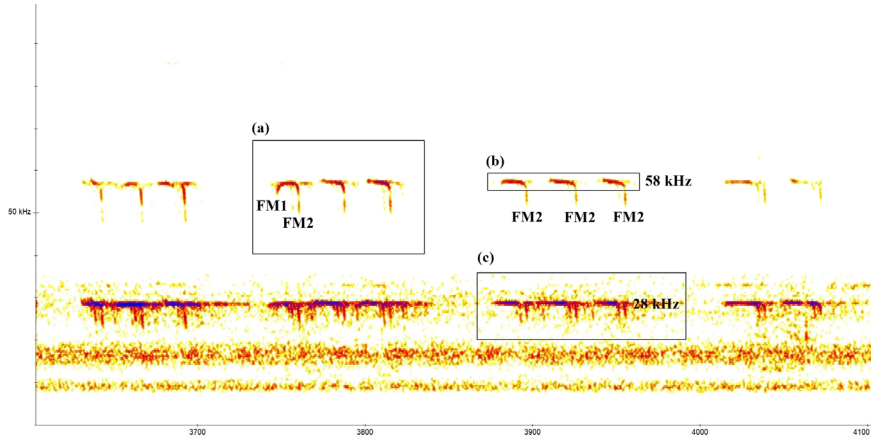


Fig. 1. High-frequency CF dual-band pulses observed during the maternal approach phase toward the roost (approach type 1).

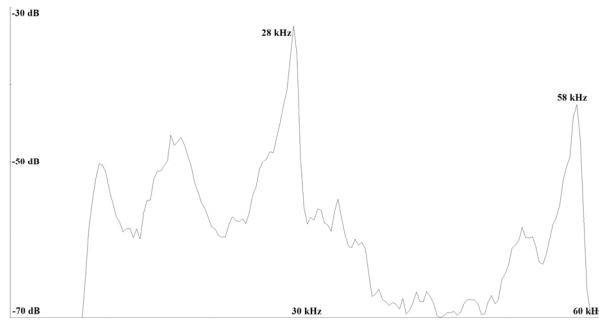


Fig. 2. Power spectrum and sound pressure level (SPL) corresponding to Fig. 1.

간(initial frequency-modulated segment, FM1)은 거의 표현되지 않거나 매우 짧아 대역폭이 좁은 형태로 나타난 반면, CF 구간 이후에 이어지는 두 번째 FM 구간(terminal frequency-modulated segment, FM2)은 상대적으로 넓은 대역폭을 갖는 형태로 확인되었다(Fig. 1-a).

해당 고주파 펄스의 PF는 관박쥐에서 일반적으로 관찰되는 69~70 kHz보다 낮은 58 kHz에서 확인되었다(Fig. 1-b, Fig. 2). PD와 PI는 전체적으로 일정한 범위 내에서 반복적으로 유지되었으며, 시간에 따른 급격한 변동은 관찰되지 않았다. 동일 구간에서 40 kHz 이하의 주파수 대역을 중심으로 반복적으로 출현한 저주파 펄스는 FM1 구간이 없이 CF 성분 이후 비교적 짧은 FM2 구간이 이어지는 CF-FM 형태를 보였다

(Fig. 1-c). 이러한 저주파 펄스의 PF는 약 28 kHz에서 가장 강하게 나타났으며, 이는 50 kHz 이상에서 확인되는 고주파 펄스보다 음향 에너지 강도(sound pressure level, SPL)가 높고 명확히 구분되었다(Fig. 2). 저주파 펄스의 PD와 PI는 고주파 펄스에 비해 상대적으로 변동폭이 크고 규칙성이 낮은 경향을 보였으나, 펄스 자체는 접근 단계 전반에 걸쳐 지속적으로 반복 출현하였다.

3.1.2. 접근 type 2 : 에너지 분화형 복수 CF 중심 펄스

접근 단계에서의 두 번째 펄스 유형은 고주파 대역을 중심으로 하는 전형적인 FM-CF-FM 펄스 구조를 유지하는 형태로(Fig. 3-a), 펄스의 PF 또한 관박쥐의 대표적 CF 주파수 범위인 69 kHz에서 확인되었다

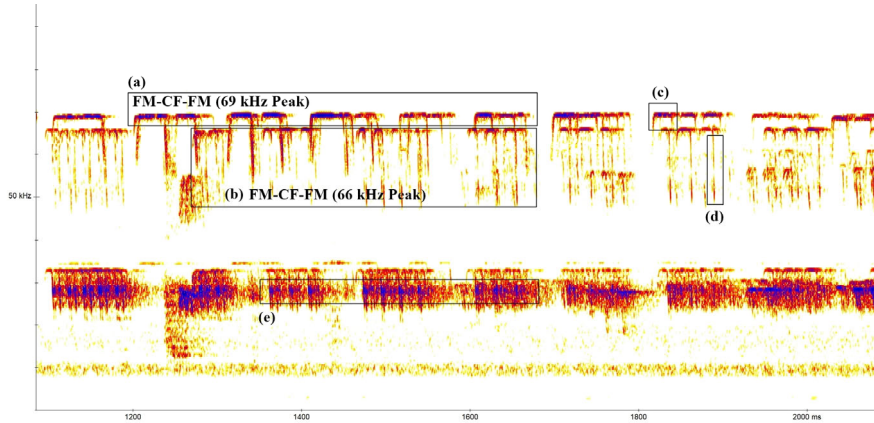


Fig. 3. Multiple CF-centered pulses with differentiated energy levels observed during the maternal approach phase toward the roost (approach type 2).

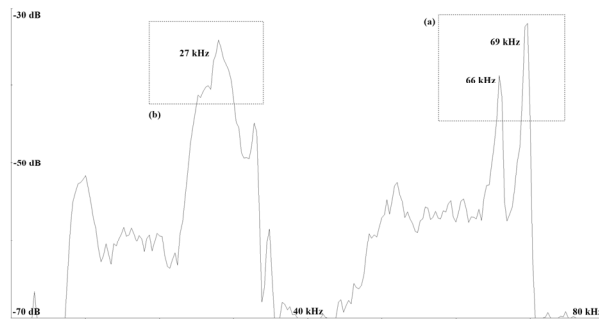


Fig. 4. Power spectrum and sound pressure level (SPL) corresponding to Fig. 3.

(Fig. 4-a).

그러나 펄스의 세부 구조는 단일한 FM-CF-FM 패턴과는 뚜렷이 구분되는 특징을 보였다. 동일 시간 내에서 형태는 유사하지만 PF와 SPL이 서로 다른 두 가지 타입의 FM-CF-FM 펄스가 동시에 출현하는 양상이 관찰되었으며(Fig. 4-a), 각각 69 kHz에서 피크를 보이는 펄스(Fig. 3-a)와 66 kHz에서 피크를 보이는 펄스로 구분되었다(Fig. 3-b). 69 kHz에서 피크를 보이는 펄스는 FM1 구간과 FM2 구간의 대역폭이 비교적 유사한 형태를 나타냈다(Fig. 3-c). 반면 66 kHz에서 피크를 보이는 펄스는 동일한 FM-CF-FM 구조를 가지면서도, FM1 구간의 대역폭은 매우 좁고, CF 이후에 이어지는 FM2 구간은 매우 넓은 대역폭을 갖는 특징적인 형태를 보였다(Fig. 3-d).

40 kHz 이하의 주파수 대역에서 확인된 저주파 펄

스는 66 kHz에서 PF를 가지는 고주파 펄스와 구조적으로 유사한 형태를 나타냈으나, 전체 대역폭은 다소 좁은 경향을 보였다. 주파수 특성 측면에서 중요한 차이는 PF를 보이는 펄스의 세부 위치로 나타났다. 일반적인 관박쥐의 PF는 CF 구간에서 확인되는 특징이 있으나, 본 단계에서 확인된 상대적으로 낮은 주파수 펄스에서는 CF 구간이 아닌 FM2 구간의 중앙부, 약 27 kHz에서 PF가 확인되었다(Fig. 3-e, Fig. 4-b). 고주파 펄스와 저주파 펄스의 SPL 비교 결과, 고주파 펄스가 전반적으로 더 높은 에너지 강도를 보였으나, 두 펄스 간 에너지 범위는 상당 부분 중첩되는 양상이 관찰되었다(Fig. 4).

3.1.3. 접근 type 3 : 고주파-저주파 중첩형 복합 펄스

접근단계의 세 번째 타입에서는 서로 다른 주파수 대역의 펄스가 시간적으로 밀접하게 중첩되어 출현하였으며, 접근단계 가운데 가장 높은 음향적 복잡성이 관찰되었다(Fig. 5-a). 고주파 대역을 중심으로 한 펄스는 기본적으로 FM-CF-FM 구조를 유지하였으나, 접근 type 1 및 2에 비해 펄스 형태의 변동성이 증가하였다. FM1 구간은 매우 짧거나 거의 구분되지 않는 경우가 많았으며, CF 구간 이후에 이어지는 FM2 구간은 상대적으로 넓은 대역폭을 갖는 형태로 나타났다(Fig. 5-b).

고주파 펄스의 피크 주파수는 약 63-70 kHz 범위에서 형성되었으며, 에너지 분포는 단일 피크에 집중되기 보다는 인접 주파수 대역으로 확산되는 양상이 확인되었다(Fig. 6-a). PD는 전반적으로 일정한 범위를 유지하였으나, PI는 접근 type 1과 비교하여 단축되는 경향을 보였다.

한편, 40 kHz 이하의 주파수 대역에서 확인된 저주파 펄스는 접근단계 전반에 걸쳐 지속적이고 고밀도로 출현하였다. 이들 펄스는 단순한 FM-only 구조가 아니라, 짧은 CF 성분과 FM 성분이 결합된 CF-FM (Fig. 5-c) 또는 FM-CF-FM 형태(Fig. 5-d)를 보였다. 피크 주파수는 약 28-31 kHz 범위에서 형성되었으며(Fig. 6-b), 일부 펄스에서는 FM2 구간의 중앙부에서 최대 에너지가 확인되었다(Fig. 3-e). 저주파 펄스의 PD와 PI는 고주파 펄스에 비해 변동 폭이 컸고, 배열 역시 일정한 패턴을 보이지 않았다.

3.2. 어미-새끼 합류단계

3.2.1. 합류 type 1 : 고주파 CF 중심 비정형 FM 혼재형 복합 펄스

어미 개체가 새끼 무리와 합류한 직후 확인된 음향 패턴 가운데 첫 번째 유형은 접근단계와 비교하여 펄스의 형태와 배열이 현저히 복잡적으로 변화하였으며, 특정 펄스를 주파수 대역이나 구조만으로 명확히 분류하기 어려운 양상이 관찰되었다.

약 69 kHz의 주파수 대역에서는 FM-CF-FM 구조를 갖는 고주파 펄스가 지속적으로 출현하였다. 이들 펄스는 CF 구간의 지속시간이 상대적으로 매우 짧았으며, CF 이후에 이어지는 FM2 구간은 매우 넓은 대역폭을 갖는 형태로 나타났다(Fig. 7-a). 본 유형의 펄스 형태에서는 50 kHz 이상의 주파수 대역에서 전형적인

FM-CF-FM 구조로 분류하기 어려운 다양한 형태의 펄스가 함께 관찰되었다. 구체적으로, 역 V자 형태의 FM 펄스(inverted V-shaped pulse, iV-pulse)(Fig. 7-b), CF 구간이 위쪽으로 완만하게 변형된 FM-CF-FM 유사 펄스(FM-CF-FM pulse with an upward-slanted CF segment, uCF)(Fig. 7-c), 또는 CF 구간이 나타나지 않는 M자 형태의 FM 펄스(M-shaped pulse, M-pulse)(Fig. 7-d) 등이 동일 시간 범위에서 확인되었다.

한편, 40 kHz 이하의 주파수 대역에서도 접근단계와는 다른 양상이 나타났다. 다수의 펄스에서 특정한 구조 없이 에너지가 넓은 주파수 범위에 분산되어 분포하는 경향이 확인되었으며, 일부 펄스에서는 FM-CF-FM 형태와 유사한 구조가 부분적으로 관찰되었다(Fig. 7-e). PF 분석 결과, 전체 음성 중 69 kHz에서 최대 에너지 피크가 확인되었으며, 동시에 27 kHz에서도 뚜렷한 PF가 형성되었다. 두 주파수 대역의 SPL은 큰 차이를 보이지 않았으며, 서로 다른 주파수 대역의 펄스가 에너지 측면에서도 강하게 중첩되어 나타나는 특징을 보였다(Fig. 8).

3.2.2. 합류 type 2 : 고주파 CF 중심 안정형 반복 펄스

합류 단계의 두 번째 음향 패턴에서는 초음파 펄스의 형태와 배열이 전반적으로 매우 일정하고 제한된 변화폭을 보였다. 고주파 대역의 펄스는 일관되게 FM-CF-FM 구조를 유지하였으며, PF는 CF 구간에서 명확하게 형성되었다(Fig. 9-a). 그러나 특징적으로 이들 펄스의 PF는 관박쥐의 대표적 CF 주파수로 알려진 약 69 kHz보다 높은 71 kHz 대역에서 형성되는 특징을 보였다(Fig. 10-a). 본 펄스 유형에서는 FM1 구간의 대역폭이 일반적인 관박쥐의 FM-CF 비율과 비교하여 현저히 넓게 나타났으며, CF 이후에 이어지는 FM2 구간 역시 상대적으로 매우 넓은 대역폭을 보였다(Fig. 9-b). 이로 인하여 $short\text{-}FM-CF-long\text{-}FM$ 형태의 구조가 반복적으로 확인되었다. 또한 50-60 kHz 이상의 대역에서는 iV 형태의 FM 펄스가 간헐적으로 혼재되어 나타났다(Fig. 9-c).

35 kHz 이하의 주파수 대역에서 확인된 저주파 펄스는 비교적 일정한 패턴을 유지하였으며, 32 kHz의 CF 구간(Fig. 9-d)과 28 kHz의 FM2 구간(Fig. 9-e)에서 거의 동일한 SPL이 확인되었다(Fig. 10-b). 펄스 형태는 CF-FM 또는 매우 짧은 FM-CF-FM 구조를 주로

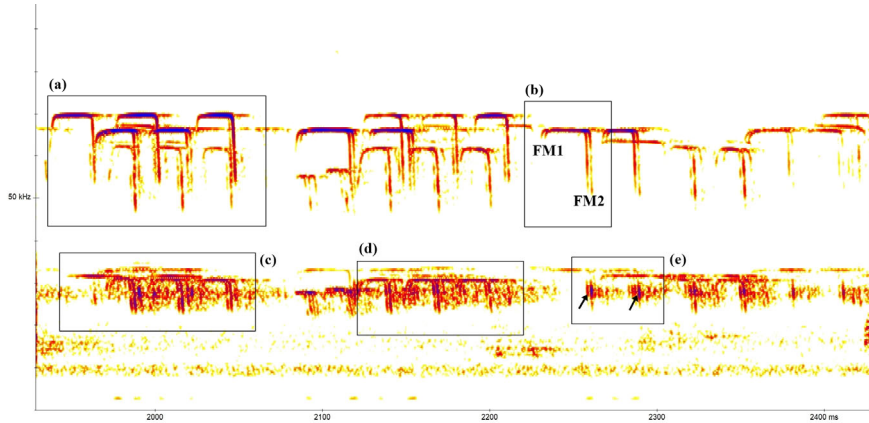


Fig. 5. Composite pulses characterized by overlapping high- and low-frequency components during the maternal approach phase toward the roost (approach type 3).

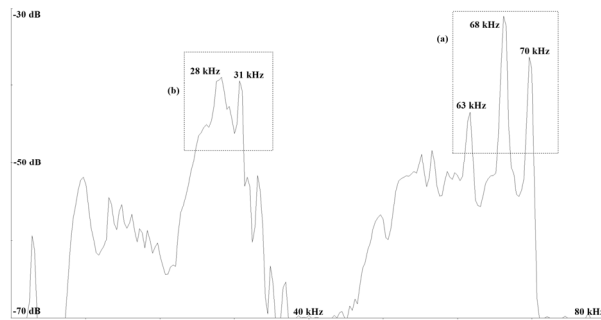


Fig. 6. Power spectrum and sound pressure level (SPL) corresponding to Fig. 5.

나타냈으며, 합류 type 1에 비해 구조적 변동성이 감소한 양상을 보였다.

3.2.3. 합류 type 3: 광대역 FM 중심 다층형 복합 펄스

어미-새끼 합류 직후 관찰된 세 번째 유형의 음향에서는 주파수 대역폭에 따라 서로 다른 다섯가지 범위와 형태의 패턴으로 구분되었으며, 합류단계 중에서도 가장 다양한 주파수 구성과 펄스 형태가 동시에 관찰되었다.

첫 번째 유형은 70-95 kHz에서 확인된 펄스로, 짧은 상향 FM 구간 이후 곧바로 이어지는 긴 하향 FM 구간(asymmetric inverted V-shaped FM pulse, short UFM → long DFM, a-iv pulse) 또는 긴 상향 FM 구간 이후 곧바로 이어지는 짧은 하향 FM 구간(reverse asymmetric inverted V-shaped FM

pulse, long UFM → short DFM, ra-iv pulse)으로 구성된 비대칭적 FM 형태를 보였다(Fig. 11-a). 두 번째 유형은 약 69 kHz 부근에서 피크를 보이는 펄스로, 짧은 FM1 구간과 긴 대역폭의 FM2를 가지는 형태이며, PD, PI, SPL 및 대역폭에서 일정한 패턴을 보이지 않았다(Fig. 11-b). 세 번째 유형은 47-63 kHz에서 확인된 펄스로, CF 구간 없이 a-iv pulse 형태를 보였으며, PF는 약 60-61 kHz의 굴절 지점에서 확인되었다(Fig. 11-c). 네 번째 유형은 47-63 kHz의 a-iv pulse 사이에서 확인되는 형태로 대역폭 10 kHz 이상의 iV-pulse 형태로 나타났으며, PF는 굴절지점 및 FM1 또는 FM2 구간의 중앙부에서 확인되었다(Fig. 11-d). 다섯 번째 유형은 40 kHz 이하의 주파수 대역에서 확인된 펄스로, FM-ShortCF-FM (Fig. 11-e), ShortCF-FM (Fig. 11-f), a-iv pulse (Fig. 11-g), iV-pulse (Fig.

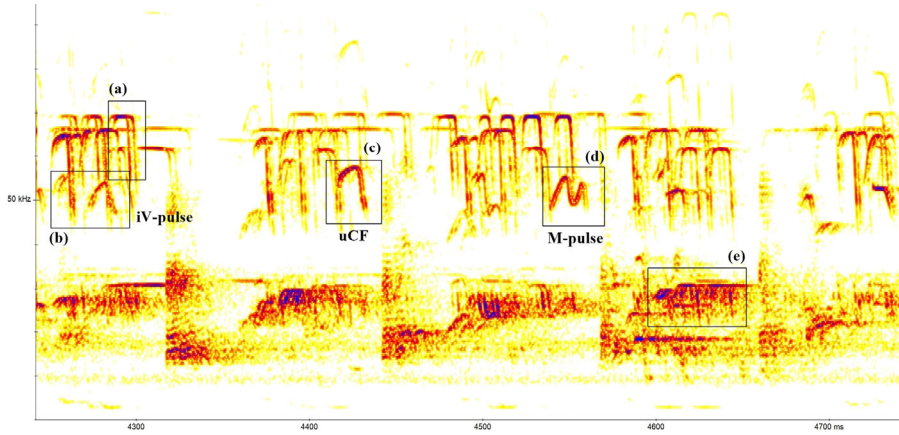


Fig. 7. High-frequency CF-centered composite pulses with intermixed atypical FM components observed during the mother-pup reunion phase (reunion type 1).



Fig. 8. Power spectrum and sound pressure level (SPL) corresponding to Fig. 7.

11-h) 등이 혼재되어 나타났다. 이들 펄스에서는 에너지 강도가 CF 구간, FM2 구간 또는 FM 굴절 지점 등에서 불규칙적으로 분포하였다.

합류 단계의 세 번째 유형에서는 단일 주파수 대역이나 펄스 구조로 설명하기 어려운 다층적인 음향 패턴이 동시에 출현하였으며, 합류 이후의 대표적인 음향 특성 가운데 가장 복잡한 발성 구조를 보이는 것으로 나타났다.

4. 고찰

4.1. 어미 개체의 은신처 접근시 확인된 초음파 음향 특성

본 연구에서 접근단계로 정의한 음향 자료는 어미 개체가 은신처로 접근하는 과정에서 기록된 초음파 신호를 의미하며, 동일 시간내에 합류 직전의 어미와 새끼 양측의 발성이 동시에 포함되어 있을 가능성을 전제로 해석되었다. 따라서 본 단계에서 확인된 초음파 신호는 특정 발성을 단일 발성 주체로 단정하기보다는, 접근 상황에서 공존하는 복수 음향 요소의 조합으로 이해하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 특히 은신처 주변의 제한된 공간 환경에서는 여러 개체의 발성이 동일한 시간에서 중첩되어 기록될 가능성이 있으며, 이러한 점은 접근 단계에서 관찰된 음향 패턴의 복잡성을 이해하는데 중요한 요소가 될 수 있다. 본 연구의 접근단계에서 도출된 type 1-3은 시간적 진행 단계를 의미하지

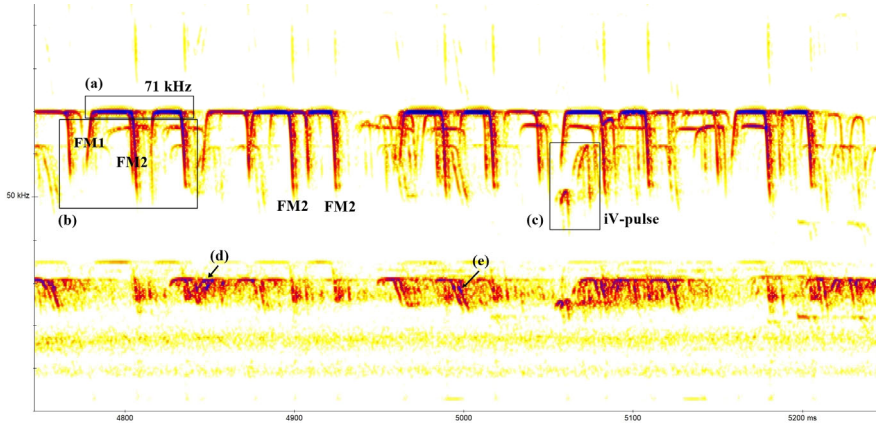


Fig. 9. Repetitive and structurally stable high-frequency CF-centered pulses observed during the mother-pup reunion phase (reunion type 2).

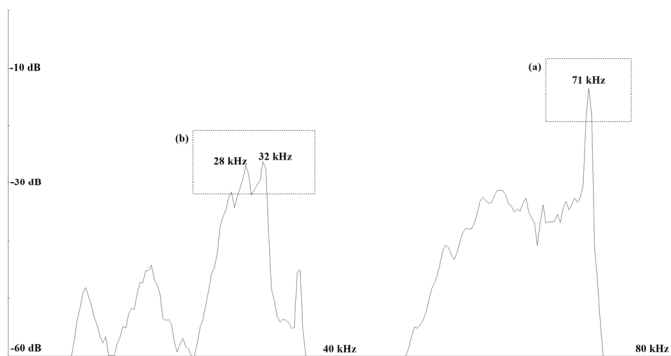


Fig. 10. Power spectrum and sound pressure level (SPL) corresponding to Fig. 9.

않으며, 녹음 자료 전반에서 반복적으로 관찰된 대표적인 음향을 유형화한 결과이다. 따라서 본 연구에서 제시된 음향 유형은 특정한 행동 순서를 의미하기보다는 접근 상황에서 나타나는 다양한 발성 패턴을 구조적 특징에 따라 범주적으로 정리한 것으로 이해할 수 있다.

접근단계 type 1에서는 고주파 CF 중심 펄스와 저주파 대역 펄스가 동일 시간 구간 내에서 비교적 명확히 구분되어 출현하는 특징이 나타났다. 고주파 펄스는 FM-CF-FM 구조를 기본으로 하였으나, FM1 구간이 극히 축소되고 CF 이후의 FM2 구간이 현저히 확장되는 형태를 보였다. 이러한 구조는 전형적인 관박쥐의 반향정위 신호와는 구별되는 것으로 근거리 접근 상황에서 신호 구조가 조절되었음을 알 수 있다. 특히 주목할 점은, 해당 고주파 펄스의 PF가 관박쥐의 일반적인

대표 주파수로 알려진 약 69-70 kHz보다 낮은 약 58-67 kHz 범위에서 형성된 사례가 반복적으로 확인되었다는 점이다. 관박쥐의 CF 주파수는 종 수준에서 비교적 안정적인 특성으로 보고되어 왔기 때문에(Jones and Holderied, 2007), 이러한 PF의 하향 이동은 단순한 개체 변이나 측정 오차로 해석하기 어렵다. 기존 연구에 따르면, 박쥐의 근거리 커뮤니케이션(short-range communication)은 어미-새끼 또는 짝짓기 개체와 같이 가까운 거리내 특정 개체들 사이에서 이루어지며, 이 과정에서 생성되는 음성은 반향정위 신호와 기능적으로 구분되는 사회적 신호(social talk)의 성격을 갖는다(Luo et al., 2013). 또한 박쥐의 커뮤니케이션 음성은 반향정위 펄스에 비해 상대적으로 저주파 대역에 위치하며, 사회적 상호작용 과정에서 복잡한 정보

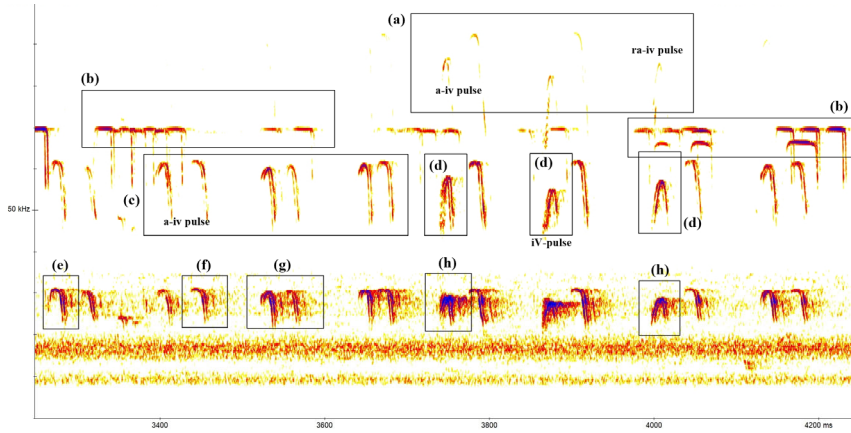


Fig. 11. Multilayered composite pulses dominated by broadband FM components observed during the mother-pup reunion phase (reunion type 3).

를 전달하는데 적합한 구조를 갖는 것으로 알려져 있다 (Ma et al., 2006; Bohn et al., 2008). 이러한 선행 연구를 종합할 때, 본 연구에서 확인된 비정형적인 고주파 PF의 하향 이동은 단순한 공간 인지를 위한 반향정위 기능보다는 은신처 접근 및 어미-새끼 상호작용이라는 사회적 맥락에서 기능적으로 조절된 발성 결과로 판단된다.

접근단계 type 2에서는 동일시간 내에서 서로 다른 CF 중심 주파수를 갖는 FM-CF-FM 펄스가 병행하여 출현하는 양상이 확인되었다. 이는 단일 개체가 복수의 구조적 신호를 조절하여 발성했을 가능성과, 어미와 새끼 또는 인접 개체간 발성이 중첩되었을 가능성을 모두 내포한다. 특히 CF 구간에서의 에너지 집중 여부와 FM 대역폭의 차이는, 해당 펄스가 순수한 반향정위 신호라기보다는 사회적 인지 또는 상호 반응 신호의 성격을 일부 포함하고 있을 가능성을 보여준다.

접근단계 type 3에서는 고주파와 저주파 펄스가 고밀도로 중첩되며, 주파수 확산과 에너지 분포의 다변성이 가장 두드러지게 나타났다. 이 유형에서는 단일 주파수 대역이나 단일 펄스 구조로 접근단계의 음향 환경을 설명하기 어려우며, 접근 상황에서 어미와 새끼간 음향적 상호작용이 본격적으로 활성화되는 구간으로 해석될 수 있다. 이러한 결과는 접근단계가 단순한 공간 인지 과정이 아니라, 어미-새끼간 커뮤니케이션이 개시되는 음향적 전이 단계임을 시사하는 결과로 판단된다.

4.2. 어미-새끼 합류 이후 단계에서의 초음파 발성 특성과 복합성

합류단계는 어미와 새끼가 동일 공간 내에서 물리적으로 근접하거나 접촉한 이후의 상황을 포함하며, 접근 단계에 비해 초음파 발성의 구조적 복잡성과 주파수 분산이 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 합류단계 type 1-3 역시 시간적 순서를 전제하지 않는 대표적인 음향 유형으로, 합류 이후 반복적으로 관찰된 발성 패턴을 유형화한 결과이다.

합류단계 type 1에서는 전형적인 FM-CF-FM 구조 외에도 CF 구간이 결여되거나 변형된 다양한 FM 중심 펄스가 다수 확인되었다. 사회적 맥락에서 발생되는 초음파 신호는 반향정위 신호에 비해 구조적 다양성이 큰 특징을 가지는데(Fenton, 1985; Knörnschild et al., 2012), 해당 펄스 유형과 같은 비정형 펄스의 증가는, 어미와 새끼가 매우 근접한 상태에서 반향정위 기능의 상대적 중요성이 감소하고, 개체간 인지 또는 반응 신호의 비중이 증가했을 가능성을 보여주는 결과로 판단된다.

합류단계 type 2에서는 고주파 CF 중심 펄스의 구조적 안정성이 두드러지게 나타났으며, 일부 펄스에서는 PF가 70 kHz를 초과하는 사례도 확인되었다. 이는 제한된 공간 환경이나 반향 조건 변화에 따라 CF 주파수가 미세 조정되었을 가능성을 보여주는 결과이며 (Schnitzler et al., 2003), 동시에 반복적으로 확인된

ShortFM-CF-LongFM 구조는 합류 이후에도 반향정위 기능이 완전히 소실되지 않고 유지되고 있음을 보여주는 것으로 판단된다.

합류단계 type 3에서는 47-95 kHz에 이르는 광범위한 주파수 범위에서 다양한 FM 중심 펄스가 공존하였으며, CF 구간이 명확하지 않은 펄스나 굴절부에서 에너지가 집중되는 형태도 다수 확인되었다. 이러한 다층적 음향 패턴은 단일 발성 주체에 의한 음향 또는 단일 기능이라기 보다는 복수 개체의 동시 발성 및 다양한 행동 맥락이 중첩된 결과로 해석된다.

4.3. 저주파 불규칙 발성과 새끼 반응 신호 해석의 근거

본 연구에서 반복적으로 확인된 40 kHz 이하의 저주파 대역 펄스는 구조적 변이가 크고, PD, PI 및 에너지 분포에서 높은 불규칙성을 보였다. 이러한 특성은 선행 연구에서 보고된 새끼 박쥐의 발성 발달 및 반응 신호의 특징과 일치한다. 기존 연구에 따르면, 새끼 박쥐의 초기 발성은 주파수 안정성이 낮고, 펄스 구조와 반복성이 성체에 비해 현저히 불규칙한 것으로 보고되어 왔다(Matsumura, 1981; Chung et al., 2010; Chung et al., 2015).

특히 국내에서 수행된 선행 연구에서도, 문둥이박쥐 (*Eptesicus serotinus*) 및 집박쥐(*Pipistrellus abramus*) 새끼의 발성은 저주파 대역에서 불규칙한 FM 중심 구조를 보이며, 성체의 반향정위 신호와는 명확히 구분되는 특성을 갖는 것으로 보고된 바 있다(Chung et al., 2010; Chung et al., 2015). 이러한 연구 결과를 종합할 때, 본 연구에서 확인된 고주파 CF 중심 펄스는 주로 어미의 호출 또는 접근 신호로, 저주파 대역의 불규칙적인 펄스는 어미 호출에 대한 새끼의 반응 신호로 판단된다.

4.4. 연구의 의의, 한계 및 향후 연구 방향

본 연구는 관박쥐의 수유기간내 관찰된 어미-새끼 상호작용 상황을 대상으로, 접근 및 합류 단계에서 나타나는 초음파 발성의 구조적 다양성을 체계적으로 유형화했다는 점에서 의의가 있다. 기존 연구가 주로 먹이 탐색이나 이동 중 반향정위 신호에 집중해 온 것과 달리, 본 연구는 어미-새끼간 커뮤니케이션 맥락에서 초음파 발성을 분석했다는 점에서 학술적 확장성을 갖는다고 보여진다. 다만 본 연구에서는 개체 식별 장치

나 음원 위치 추정 시스템이 적용되지 않았기 때문에, 개별 펄스의 발성 주체를 직접적으로 특정하는 데에는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 다중 마이크 배열을 통한 음원 위치 추정, 개체 표식 기반의 행동-음향 동기화 분석, 그리고 장기간 반복 관측을 통해 발성 주체와 음향 유형간의 관계를 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다. 이를 통해 관박쥐 어미-새끼간 초음파 커뮤니케이션의 기능적 의미와 발성 전략을 보다 체계적으로 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구는 관박쥐의 수유기에 관찰된 어미-새끼 상호작용 상황을 대상으로 영상 자료와 초음파 녹음을 시간적으로 동기화하여, 접근 직전부터 합류 이후까지의 연속적인 행동 맥락 속에서 나타나는 초음파 발성의 구조적 변화를 기술하였다.

접근단계에서는 전형적인 FM-CF-FM 구조를 기본으로 하면서도, 초기 FM 구간의 축소, CF 이후 FM 구간의 확장, 그리고 PF의 하향 이동 등 기존에 보고된 관박쥐의 일반적인 반향정위 신호와는 구별되는 구조적 변형이 반복적으로 확인되었다. 이러한 결과는 접근단계의 발성이 단순한 공간 인지를 위한 반향정위 신호에 국한되지 않고, 은신처 접근 및 어미-새끼 상호작용이라는 특정 행동 맥락에 따라 기능적으로 조절될 수 있음을 보여준다. 합류 이후 단계에서는 접근단계에 비해 초음파 발성의 구조적 복잡성과 주파수 분산이 전반적으로 증가하였으며, 전형적인 FM-CF-FM 구조 외에도 CF 구간이 변형되거나 결여된 다양한 FM 중심 펄스가 관찰되었다. 특히 광범위한 주파수 대역에서 복수의 펄스 형태가 함께 나타난 결과는, 합류 이후의 음향 환경이 단일 발성 주체나 단일 기능으로 설명되기 어려운 다층적 구조를 가지고 있음을 보여준다. 또한 40 kHz 이하의 저주파 대역에서 확인된 불규칙적인 펄스들은 기존 연구에서 보고된 새끼 박쥐의 발성 특성과 일치하며, 고주파 CF 중심 펄스가 어미의 호출 또는 접근 신호로, 저주파 대역의 불규칙한 펄스가 어미 발성에 대한 새끼의 반응 신호로 해석될 수 있는 근거를 제공한다.

본 연구에서는 관박쥐 어미-새끼 상호작용 과정에서 나타나는 초음파 발성이 전형적인 반향정위 신호를 기반으로 하되, 행동 맥락에 따라 구조적으로 유연하게

변형될 수 있음을 제시하였다. 다만 본 연구는 특정 은신처 환경에서 관찰된 사례를 중심으로 분석한 결과이므로, 향후 다양한 서식 환경과 개체군을 대상으로 추가 연구를 통해 이러한 음향 특성이 일반적인 행동 패턴으로 나타나는지에 대한 검증이 이루어질 필요가 있다. 이러한 한계에도 불구하고, 본 연구결과는 관박쥐의 초음파 발성이 반향정위 기능을 넘어 어미-새끼 사이의 커뮤니케이션과 밀접하게 연관된 다기능적 신호 체계임을 시사하며, 향후 개체 식별 기반 음향 분석과 장기적 행동-음향 연계 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Andrews, M. M., Andrews, P. T., 2003, Ultrasound social calls made by greater horseshoe bats (*Rhinolophus ferrumequinum*) in a nursery roost, *Acta. Chiropterol.*, 5(2), 221-234.
- Bohn, K. M., Schmidt-French, B., Ma, S. T., Pollak, G. D., 2008, Syllable acoustics, temporal patterns, and call composition vary with behavioral context in Mexican free-tailed bats, *J. Acoust. Soc. Am.*, 124(3), 1838-1848.
- Chung, C. U., 2020, A Field guide to Korean bats, List of Korean Creatures Series, Econature Press, Seoul, 1-272.
- Chung, C. U., Han, S. H., Lee, C. I., 2009, Use of bridges as roosting site by bats (Chiroptera), *Korean J. Environ. Ecol.*, 23(4), 294-301.
- Chung, C. U., Han, S. H., Lee, C. I., 2010, Development of vocal signals in the *Pipistrellus abramus* (Chiroptera: Vespertilionidae), *Kor. J. Env. Eco.*, 24, 202-208.
- Chung, C. U., Kim, S. C., Jeon, Y. S., Han, S. H., 2017, Variation in echolocation and prey-capture behavior of *Rhinolophus ferrumequinum* during foraging flight, *J. Env. Sci. Int.*, 26(6), 779-788.
- Denzinger, A., Schnitzler, H. U., 2013, Bat guilds, a concept to classify the highly diverse foraging and echolocation behaviors of microchiropteran bats, *Front. Physiol.*, 4, 164.
- Fenton, M. B., 1985, Communication in the Chiroptera, Indiana Univ. Press, Bloomington, 161-174.
- Fenton, M. B., 2003, Eavesdropping on the echolocation and social calls of bats, *Mammal Rev.*, 33(3), 193-204.
- Froidevaux, J. S. P., Boughey, K. L., Barlow, K. E., Jones, G., 2017, Factors driving population recovery of the greater horseshoe bat (*Rhinolophus ferrumequinum*) in the UK: Implications for conservation, *Biodivers. Conserv.*, 26(7), 1601-1621.
- Jeon, Y. S., Kim, S. C., Han, S. H., Chung, C. U., 2018, Characteristics of the home range and habitat use of *Rhinolophus ferrumequinum* in an urban landscape, *J. Env. Sci. Int.*, 27(8), 665-675.
- Jones, G., Holderied, M. W., 2007, Bat echolocation calls: Adaptation and convergent evolution, *Proc. R. Soc. B*, 274(1612), 905-912.
- Jones, G., Siemers, B. M., 2011, The communicative potential of bat echolocation pulses, *J. Comp. Physiol. A*, 197(5), 447-457.
- Knörnschild, M., Jung, K., Nagy, M., Metz, M., Kalko, E. K. V., 2012, Bat echolocation calls facilitate social communication, *Proceedings of the royal society B. Bio. Sci.*, 279(1748), 4827-4835.
- Luo, B., Jiang, T., Liu, Y., Wang, J., Lin, A., Wei, X., Feng, J., 2013, Brevity is prevalent in bat short-range communication, *J. Comp. Physiol. A*, 199(4), 325-333.
- Ma, J., Kobayasi, K., Zhang, S., Metzner, W., 2006, Vocal communication in adult greater horseshoe bats *Rhinolophus ferrumequinum*, *J. Comp. Physiol. A*, 192(5), 535-550.
- Matsumura, S., 1981, Mother-infant communication in a horseshoe bat (*Rhinolophus ferrumequinum nippon*): Vocal communication in three-week-old infants, *J. Mammal.*, 62(1), 20-28.
- Pinaud, D., Claireau, F., Leuchtman, M., Kerbiriou, C., 2018, Modelling landscape connectivity for greater horseshoe bat using an empirical quantification of resistance, *J. Appl. Ecol.*, 55(6), 2600-2611.
- Schnitzler, H. U., Kalko, E. K. V., 2001, Echolocation by insect-eating bats, *Bioscience*, 51(7), 557-569.
- Schnitzler, H. U., Moss, C. F., Denzinger, A., 2003, From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats, *Trends Ecol. Evol.*, 18(8), 386-394.
- Tournayre, O., Leuchtman, M., Galan, M., Trillat, M., Piry, S., Pinaud, D., Filippi-Codaccioni, O., Pontier, D., Charbonnel, N., 2021, eDNA metabarcoding reveals a core and secondary diets of the greater horseshoe bat with strong spatio-temporal plasticity, *Environ. DNA*, 3(1), 277-296.

-
- Adjunct professor. Chul-Un Chung
Ecological Education Center, Dongguk University
batman424@naver.com
 - Doctor. Young-Shin Jeon
Division of Academic Research, Econet Co.Ltd
bigboss369@naver.com

-
- Senior Researcher. Jung-Mi Lee
Division of Academic Research, Econet Co.Ltd
batman8122@gmail.com
 - Doctor. Sung-Chul Kim
Division of Academic Research, Econet Co.Ltd
tlrqkd01@naver.com