

환경특성에 따른 집박쥐의 반향정위(Echolocation) 시그널 분석^{1a}

정철운^{2*} · 한상훈³ · 김성철² · 이정일²

Echolocation Signals of *Pipistrellus abramus* in Relation to Environmental Type^{1a}

Chul-Un Chung^{2*}, Sang-Hoon Han³, Sung-Chul Kim², Chong-Il Lee²

요 약

환경특성에 따른 집박쥐(*Pipistrellus abramus*)의 반향정위 변화를 분석하기 위하여 2009년 4월부터 8월까지 경상북도 경주시 천북면 일원의 주간 휴식장소를 대상으로 실시하였다. 환경특성 유형은 일몰 후 출현순간, 출현 후 이동, 논 경작지, 산림 가장자리, 개방공간, 주택단지 등 6개 유형으로 구분하여 비교하였다. 분석결과 환경특성에 따른 차이 및 서식지간 이동과 먹이포획을 위한 비행 사이에서는 차이가 있는 것으로 나타났다. 외부 환경으로의 출현순간에서는 짧은 시간의 FM 시그널만 확인되었으며, 개방 공간에서는 긴 시간의 CF 시그널 형태의 음을 이용하는 것으로 나타났다. 그 외 환경특성에서는 펄스의 형태적인 차이는 있었지만 FM과 CF 시그널을 혼합하여 이용하는 것으로 확인되었다. 먹이포획을 위한 비행과 서식지간 이동을 위한 비행에서는 펄스의 지속시간을 제외한 펄스 간격, 최고 진동수, 개시부와 종결부 진동수에서는 두 가지 비행패턴 사이에서 유의적인 차이가 확인되었다. 출현순간을 제외하고 서식지간 이동을 위한 비행시에는 곤충의 반향을 감지하여 곤충의 탐색에 적합한 협대역의 FM 시그널과 긴 펄스 지속시간을 가지는 형태를 보였으며, 먹이포획을 위한 비행에서는 폭넓은 탐색과 정확한 위치파악을 위한 광대역의 FM 시그널과 짧은 시간의 펄스 지속시간을 갖는 것으로 확인되었다.

주요어: 반향, 진동수, 펄스, CF 시그널, FM 시그널

ABSTRACT

This study was conducted to analyze the changes in the echolocation of *Pipistrellus abramus* according to environmental characteristics. The survey was conducted in the day-roosting site of *P. abramus* located in Gyeongju City (North Gyeongsang Province) from April to August, 2009. The environmental characteristics during the research were classified in six categories: the emergence time after sunset moving time from day roost to feeding areas; rice fields; forest edges; open spaces; and residential areas. Analysis results showed that there are differences in environmental characteristics and also differences between the moving time to the habitat and the moving time to capture preys. At the emergence time from day roost, *Pipistrellus abramus* used a FM signal

1 접수 2009년 11월 2일, 수정(1차: 2009년 12월 14일), 게재확정 2009년 12월 15일

Received 2 November 2009; Revised(1st: 14 December 2009); Accepted 15 December 2009

2 동국대학교 생명과학과 Department of Life Science, Dongguk Univ, Gyeongju(780-714), Korea(batman424@naver.com)

3 국립생물자원관 National Institute of Biological Resources, Incheon(404-170), Korea

a 본 연구는 한국환경기술산업원 차세대 사업 “한반도 포유류 중 보전관리기술개발(과제번호: 052-082-073)” 연구 지원에 의하여 수행되었음.

* 교신저자 Corresponding author(batman424@naver.com)

with a short pulse-duration. In open spaces, however, they used a CF signal with a long pulse-duration. In different environmental situations, they used both FM and CF signals, although the types of pulse which they used were different. Except pulse-duration, there were significant differences in pulse-interval, peak-frequency, starting-frequency and ending-frequency between the movement among habitats and the movement to capture preys. Except the emergence time from day-roost, they showed a narrow band FM signal and a long pulse-duration that are suitable to search for insects by sensing echoes of insects when they moved among their habitats. When they were out to capture their preys, they showed a broad band FM signal and a short pulse-duration which enabled them to widely search and accurately locate their preys.

KEY WORDS: ECHO, FREQUENCY, PULSE, CF SIGNAL, FM SIGNAL

서론

반향정위는 전세계 모든 소익수아목(Suborder Microchiroptera)에 속하는 박쥐가 이용하고 있으며(Jones, 1999), 소익수아목내 대부분의 반향정위 주파수대역은 협대역(narrow band)과 광대역(broad band) 또는 두 가지의 혼합적인 대역폭을 가지는 형태를 나타낸다(Schnitzler and Kalko, 2001). 박쥐가 이용하는 반향정위는 사용하는 시그널의 형태에 따라서 CF(constant-frequency) 시그널을 이용하는 종, FM(frequency-modulated) 시그널을 이용하는 종 그리고 FM과 CF 시그널을 혼합하여 사용하는 종으로 구분할 수 있으며(Schnitzler and Henson, 1980; Surlykke *et al.*, 1993), CF와 FM 시그널의 펄스 형태는 진동수, 대역폭, 하모니(harmonic)의 구조, 지속시간, 에너지 강도 등에 있어서 분명하게 다른 특징을 가지고 있다(Schnitzler and Henson, 1980, Simmons and Stein, 1980; Neuweiler, 1989; Fenton, 1990; Schnitzler and Kalko, 2001). 또한 서식지 환경특성에 따라서도 다양한 진동수의 변조 형태로 표현되게 되며 이러한 변화는 종 및 개체 사이에 있어서도 다양한 형태로 나타나게 된다(Jennings *et al.*, 2004; Bogdanowicz *et al.*, 1999; Jensen and Miller, 1999; Jones, 1999; Jones *et al.*, 1992; Jones and Kokurewicz, 1994; Kalko and Schnitzler, 1989, 1993; Masters *et al.*, 1995; Obrist, 1995; Parsons and Jones, 2000). 뿐만 아니라 반향정위 음성의 구조는 박쥐의 먹이포획 전략과 서식지 구조 특성을 반영할 수 있기 때문에(Zhu *et al.*, 2008), 이러한 반향정위에 대한 연구결과는 박쥐의 생태와 보호방안 마련에 있어서 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다(Parsons and Jones, 2000). 현재 우리나라에 서식하고 있는 박쥐는 모두 소익수아목에 속하는 식충성 박쥐(insectivorous bat)로 환경에 대한 적응과 먹이의 포획 등 모든 부분에 있어 반향정위를 이용하고 있다. 그러나 지금까지 국내에서 서식하는

박쥐의 반향정위에 대한 연구는 이루어지지 않았으며, 또한 반향정위를 이용한 생태학적 연구를 위해서도 서식지 유형에 따른 반향정위 연구는 우선적으로 이루어져야 할 연구 분야 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에 서식하는 집박쥐(*Pipistrellus abramus*)를 대상으로 하여 활동지역의 환경특성에 따른 반향정위 변화를 분석하여 다양한 환경특성에서 종의 동정에 필요한 자료를 구축하고 향후 반향정위를 이용한 박쥐의 생태학적 연구에 활용할 수 있는 결과를 제공하고자 실시하였다.

재료 및 방법

1. 조사지역 및 포획

일몰 후 집박쥐의 주간 휴식 장소에서 외부 환경으로의 출현 순간부터 주변 환경과 먹이활동지역의 환경특성에 따른 반향정위 변화를 파악하기 위하여 2009년 4월부터 8월까지 총 50회에 걸쳐 집박쥐의 주간 휴식장소로 확인된 인공구조물을 중심으로 집박쥐의 환경특성과 반향정위 변화를 분석하였다. 본 연구에 이용된 집박쥐의 주간 휴식 장소는 경북 경주시 천북면의 도로 터널과 주변의 콘크리트 구조물로 이루어진 지역으로 집박쥐의 먹이활동이 이루어지는 수계지역, 경작지대, 낙엽활엽수림으로 구성된 산림과 주변 가장자리로 관목과 아교목이 조성되어 있는 먹이활동 대상지 그리고 상가 및 주택을 포함하는 거주 단지 등 다양한 유형의 서식지가 조성되어 있는 곳이다(Figure 1). 박쥐의 포획은 비행하는 박쥐의 포획을 위하여 가장 일반적으로 사용되는 mist-net와(Kunz and Kurta, 1988), harp trap을 함께 사용하였으며, 매 조사시 일몰 후 집박쥐의 출현시간에 맞추어 주간 휴식장소 입구와 그 주변에 설치하여 포획하였다. 박쥐의 초음파를 이용한 의사소통은 대기에 의한

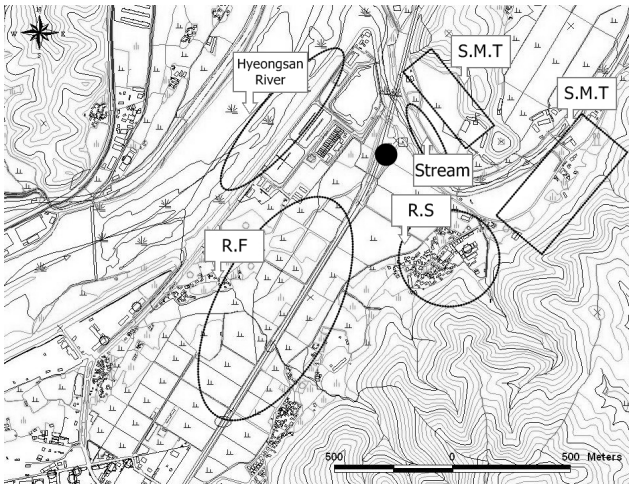


Figure 1. Map of the day-roost site of *Pipistrellus abramus* and habitat types in Gyeongju-City, Gyeongsangbuk-do. R.F, Rice field; S.M.T, Shrubbery and minor tree zone; R.S, Resident site(●, day-roost)



Figure 2. Photograph of chemiluminescent tag in *Pipistrellus abramus*

감쇄작용에 의해서 영향을 받기 때문에(Russ *et al.*, 2005) 포획 및 녹음은 기상상태가 양호한 기간을 선정하여 실시하였으며, 매 조사시 성체 3개체를 포획하여 본 연구에 이용하였다. 포획된 개체의 야간 육안식별을 위하여 견갑골 중앙에 화학발광 태그(chemiluminescent tag, 0.2g)를 부착하였으며(Figure 2), 부착시에는 털을 깎지 않고 부착하여 일정 시간이 경과한 후 태그가 박쥐에게서 분리될 수 있도록 하였다.

2. Echolocation 녹음

반향정위 세부 분석을 위해서 일몰 후 출현 순간, 출현 후 먹이활동 공간으로의 이동, 논 경작지, 개방 공간, 관목 및 아교목으로 이루어진 산림 가장자리, 빌딩을 포함한 주택단지에서의 비행 등 총 6가지의 카테고리로 분류하여 녹음 및 분석하였다. 본 조사에서는 시각적으로 확인된 개체만을 대상으로 녹음하였으며(Siemers *et al.*, 2001), 발광 태그의 부착 이전에 기록이 필요한 출현 순간과 먹이활동지로의 이동에 대한 녹음은 주간 휴식 장소 입구에서 일몰 후 출현 개체에 대하여 랜덤으로 실시하였다. 논 경작지, 개방 공간, 산림 가장자리, 민가 지역의 비행에 대한 녹음을 위하여 태그를 부착한 개체는 이동 경로 및 먹이활동 대상지 파악을 위하여 개체당 2인 이상의 조사자가 육안관찰 및 야간관측 장비(Bushnell, Night-Vision 2.5×42)를 이용하여 공동으로 위치를 확인하였다. 해당 서식지 유형에서의 비행패턴과 지속시간을 기준으로 서식지간 이동을 위한 비

행과 먹이활동을 위한 비행으로 구분하기 위하여 동일 장소에서 동일한 개체가 10분 이상 비행시에는 해당 서식지 유형을 먹이활동 대상지(foraging area)로 그리고 비행패턴은 야간 먹이포획을 위한 비행활동으로 구분하여 기록하였으며(Dietz and Kalko, 2007), 그 외 비행패턴은 서식지간 이동을 위한 비행으로 분류하였다. 반향정위의 녹음과 분석에는 주파수 변조(heterodyne system)와 시간확장 시스템(time expansion system)이 결합되어 있는 초음파 가청변환기(bat detector, Pettersson Elektronik AB, models D-240)를 이용하였다.

3. Echolocation 분석

박쥐가 곤충을 포획하는 것은 탐색단계(search phase), 접근단계(approach phase), 포획단계(terminal phase)의 세 가지 단계가 연속적으로 이루어지며(Briggs and King, 1998), 탐색단계에서 포획단계로 갈수록 펄스의 지속시간은 감소하고 진폭은 감소하게 된다(Kalko and Schnitzler, 1989; Waters and Jones, 1995). 이 중 탐색단계의 시그널은 박쥐가 먹이를 탐색하거나 위치를 확인할 때 이용하는 일정하고 반복적인 형태의 시그널로(Surlykke *et al.*, 1993; Schnitzler and Kalko, 2001; Zhu *et al.*, 2008), 접근단계와 포획단계의 시그널 구조가 유사한데 반하여 더 중 특이적이고 다른 두 단계와 비교해서 다른 시그널의 형태를 나타낸다(Briggs and King, 1998; Kalko, 1995). 따라서 본 연구에서는 각각의 카테고리별로 일정한 패턴을 나타내는 탐색단계를 대상으로 분석하였으며(Zhu *et al.*, 2008), 녹음된 자료는 BatSound ver.4.01(Pettersson Elektronik AB,

Sweden)을 이용하여 디지털 형식으로 변환하였다. 시그널의 세부 분석은 종과 서식지 유형에 따라서 변화를 파악할 수 있는 펄스의 지속시간(pulse-duration: PD), 펄스 간격(pulse-interval: PI), 최고 진동수(peak-frequency: PF), 개시진동수(starting-frequency: SF), 종말진동수(ending-frequency: EF)에 대하여 분석하였다(Vaughan *et al.*, 1997; Parsons and Jones, 2000; Jennings *et al.*, 2004). PD는 오실로그래프(oscillogram)과 소나그램(sonagram)을 연결하여 펄스(pulse)의 개시부터 감쇠까지에 대한 시간을 기준으로 측정하였으며, PI는 펄스의 최초 개시부터 시작해서 다음 펄스가 시작될 때 까지를 측정하였다(Siemers *et al.*, 2001; Jennings *et al.*, 2004). PF에 대한 시간 및 진동수 측정은 파워 스펙트럼(power spectrum, FFT=1024)을 이용하여 측정하였으며(Parsons and Jones, 2000), SF와 EF는 오실로그래프와 스펙트로그램(spectrogram)을 연결하여 펄스내 모든 하모니를 포함한 개시부와 종결부에 대하여 각각 측정하였다(Zhu *et al.*, 2008).

결과 및 고찰

1. 일몰 후 출현순간

일몰 후 휴식 장소에서 외부 환경으로 출현하는 순간의 펄스 형태는 짧은 PD와 PI를 가지며, 높은 PF를 나타내는 형태를 보였다(Table 1). 집박쥐의 반향정위 형태는 FM 시그널과 CF 시그널을 혼합하여 이용하는 것으로 알려져 있으며(Jones and Parijs, 1993), PF는 펄스의 종결부인 CF 시그널 부분에서 확인된다. 본 연구에서도 출현순간을 제외

한 모든 서식지 유형에서 FM과 CF 시그널을 혼합하여 사용하고 CF 시그널 형태에서 최고 진동수를 나타내는 형태를 보였다. 그러나 오직 휴식지에서 외부 환경으로 출현하는 순간에서만 CF음이 확인되지 않고 거의 수직에 가까운 짧고 연속된 펄스 형태를 보였다(Figure 3). 따라서 본 조사

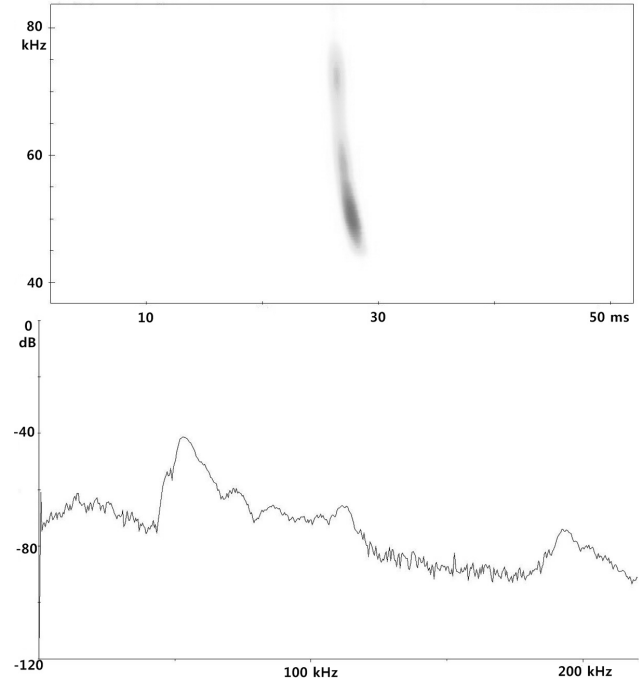


Figure 3. Spectrogram and power spectrum of *Pipistrellus abramus* in emergence time from day roost

Table 1. Parameters of echolocation calls of *Pipistrellus abramus* in different habitats

	Habitat type						p
	E	C	RF	OS	SMT	RS	
PD(ms)	5.77±2.30	12.93±5.50	16.27±1.20	32.45±4.68	5.90±0.56	21.31±0.78	< 0.001
PI(ms)	73.81±14.40	108.63±4.93	98.38±4.44	94.32±6.72	73.87±5.38	85.89±11.87	< 0.001
PF(kHz)	51.11±1.26	45.54±0.18	47.41±0.55	43.23±0.57	48.47±0.84	48.06±0.85	< 0.001
SF(kHz)	74.39±2.82	52.10±0.88	63.59±3.62	46.76±0.71	75.30±1.12	68.92±2.41	< 0.001
EF(kHz)	46.36±0.74	44.56±0.26	46.51±0.49	41.92±0.55	46.54±0.80	46.24±0.38	< 0.001
B.P	F.M	F.M	F.F	F.M	F.F	F.F	
MNH	3	3	3	2	1	3	
HME	Fh	Fh	Fh	Fh	Fh	Fh	

*Values are means (±s.d.); PD, Pulse duration; PI, Pulse interval; PF, Peak frequency; SF, Starting frequency; EF, Ending frequency; B.P, Behavioural pattern; MNH, Maximum number of harmonic; HME, Harmonic with most energy; E, Emergence time from day roost; C, Crossing time from day roost to feeding area; RF, Rice field; OS, Open space; SMT, Shrubbery and minor tree zone; RS, Resident site; F.M, Flying to movement among habitats; F.F, Flying to foraging activity; Fh, First harmonic; significant level, 0.05

에서 측정한 서식지 환경특성 가운데 펄스의 지속시간이 가장 짧게 나타났다(Figure 4). 선행된 연구결과에 의하면

식충성 박쥐는 복잡한 서식지 공간에서는 짧고 광대역의 반향정위를 발산하고, 개방된 공간일수록 길고 협대역의 시

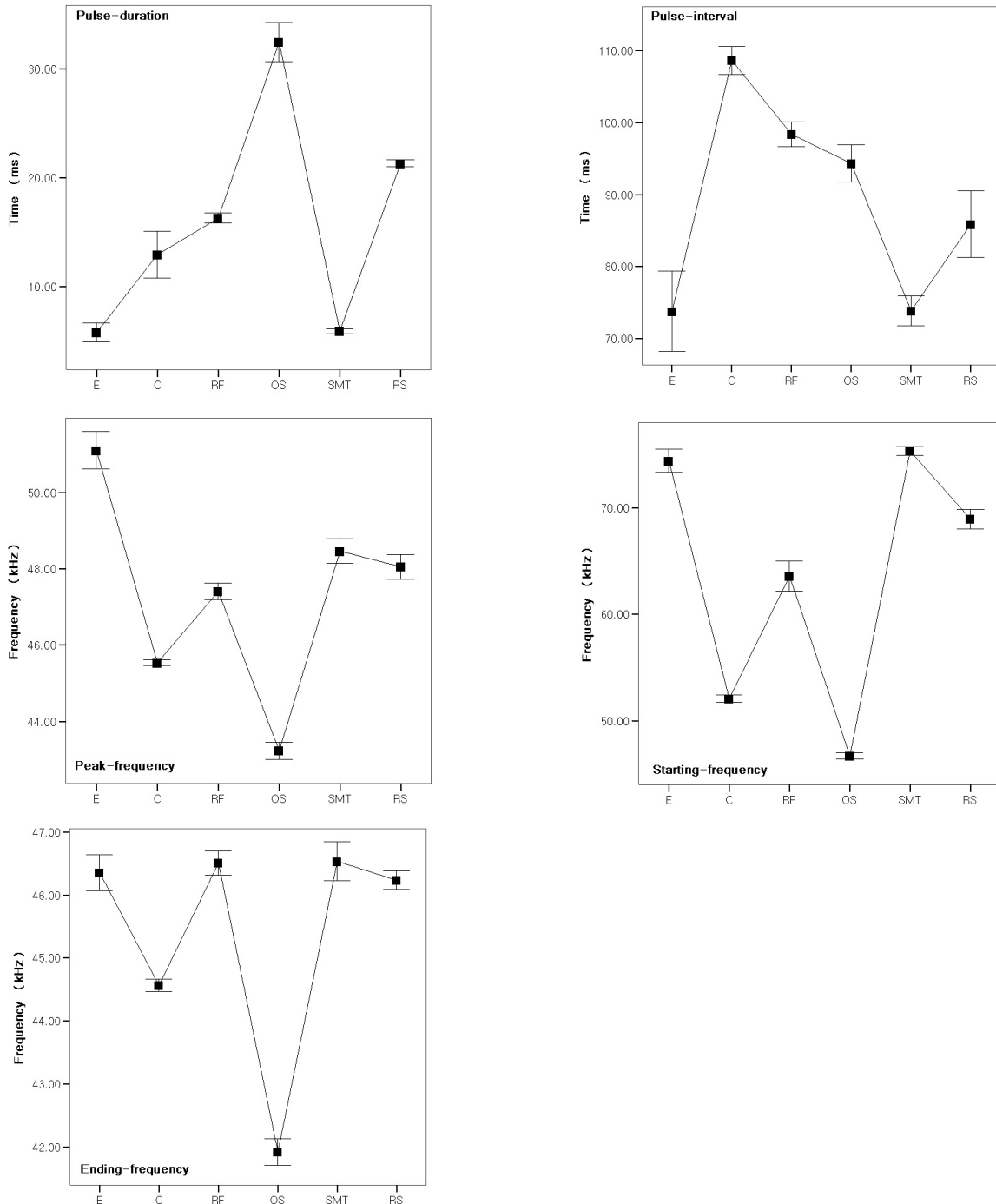


Figure 4. Differences of pulse duration($p < 0.001$), pulse interval($p < 0.001$), peak frequency($p < 0.001$), starting frequency($p < 0.001$) and ending frequency($p < 0.001$) of *Pipistrellus abramus* in different habitats. E, Emergence time from day roost; C, Crossing time from day roost to feeding area; RF, Rice field; OS, Open space; SMT, Shrubbery and minor tree zone; RS, Resident site

그늘을 발산하는 것으로 알려져 있으며(Neuweiler, 1989, 1990; Fenton, 1990; Schnitzler and Kalko, 1998; Siemers *et al.*, 2001), 특히 이러한 수직에 가까운 짧은 FM 음으로 이루어진 펄스 형태는 목표물의 위치에 대한 정확한 범위를 파악하는데 적합한 형태로 알려져 있다(Briggs and King, 1998). 그러나 본 조사에 이용된 주간 휴식지의 경우 휴식 장소에서 출현하는 입구 주변으로는 인위적인 구조물이나 식생구조가 구성되어 있지 않는 지역임을 감안할 때 출현하는 순간 먹이포획을 위한 시그널의 발산보다 주변 환경에 대한 정보를 수집하는 과정으로 생각된다. 즉, 곤충의 반향을 파악하기 위한 협대역의 긴 펄스보다 짧은 PI를 가지는 광대역의 FM 시그널을 이용함으로써 출현순간 근거리의 주변 환경에 대한 빠르고 정확한 반향과 위치확인을 위한 시그널 형태로 판단된다.

2. 출현 후 이동

출현 후 먹이활동 장소로 이동시에 발산하는 시그널 형태는 FM과 CF 시그널을 혼합하여 이용하는 것으로 나타났다. 그러나 일반적으로 광대역의 FM 시그널과 짧은 CF 시그널의 형태를 보이는 탐색단계의 펄스 형태와 비교 하였을 때 상대적으로 좁은 범위의 FM 시그널과 긴 CF 형태의 시그널을 이용하는 것으로 측정되었다(Figure 5). 펄스의

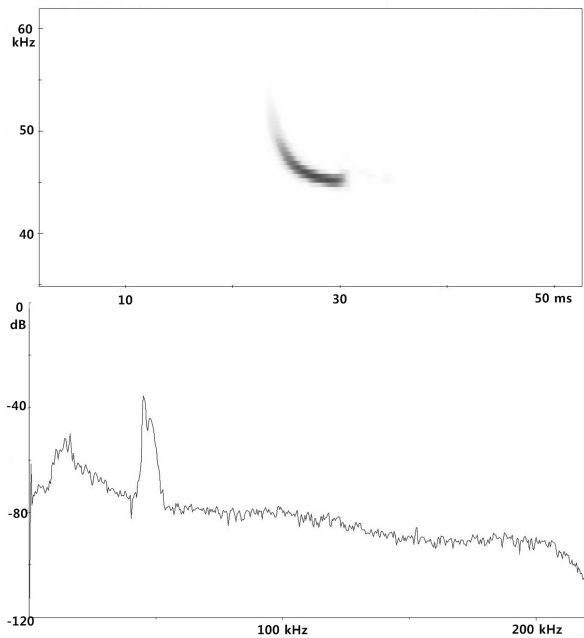


Figure 5. Spectrogram and power spectrum of *Pipistrellus abramus* in crossing time from day roost to feeding area

형태는 FM 시그널의 대역폭이 크고 CF 시그널의 지속 시간이 짧은 먹이활동지에서의 패턴 및 FM 대역폭이 짧고 CF 시그널이 길게 나타난 개방 공간에서의 비행패턴의 중간적인 형태를 보였다. 일반적으로 박쥐는 탐색단계에서 길고 낮은 반복음의 음을 발산하고 접근단계에서는 음의 발산 지속시간은 감소하게 되며, 포획단계에 가서는 아주 짧은 시간 단위로 감소하게 된다(Surlykke *et al.*, 1993). 따라서 본 서식지 유형에서 나타난 짧은 대역폭의 FM 시그널과 긴 시간의 PI는 직접적인 먹이포획을 위한 시그널의 발산보다 출현 후 먹이활동 대상지로의 이동 및 대상지 선택을 위한 탐색 시그널로 판단되며, 상대적으로 길게 나타난 CF 형태 또한 곤충의 반향을 감지하여 우선적인 먹이활동 대상지의 선택을 위한 결과라 판단된다.

3. 개방된 서식지 구조

개방공간에서 비행하는 개체의 펄스 형태는 협대역의 FM 시그널과 긴 CF음을 이용하는 형태로(Figure 6), 본 조사에서 구분된 서식지 유형 가운데 출현순간의 시그널 형태와 함께 가장 특징적인 형태를 나타내었다. 즉, 하나의 펄스는 최대 2개의 하모니를 가지는 것으로 조사되었으며, 첫 번째 하모니는 짧은 FM음과 긴 CF음의 형태를 나타내고 두 번째 하모니는 FM 시그널이 거의 확인되지 않는 긴

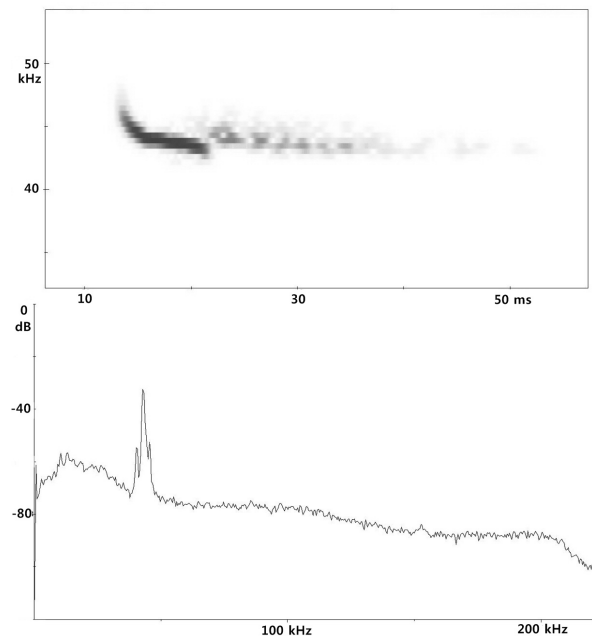


Figure 6. Spectrogram and power spectrum of *Pipistrellus abramus* in open space

CF 시그널 형태를 나타내었다. 따라서 본 조사에서 분석한 서식지 유형 가운데 가장 긴 PD와 가장 낮은 PF를 가지는 것으로 나타났으며(Table 1), SF와 EF 또한 협대역의 FM 시그널을 나타낸 결과에 따라 조사대상 서식지 유형 가운데 가장 낮은 진동수를 보였다. 박쥐는 개방된 공간에서는 펄스 지속시간의 증가, 낮은 주파수와 협대역의 진폭을 가지는 음을 발산하는 경향이 있으며(Barclay, 1986; Zhu *et al.*, 2008), 관박쥐를 대상으로 한 연구에서도 서식지의 구조가 복잡한 구조에서 단순로운 구조로 변화 할수록 PD와 PI는 증가하는 반면 진동수는 낮아지고 대역폭은 좁아지는 것으로 조사된바 있다(Zhu *et al.*, 2008). 또한 Schnitzler *et al.*(2003)이 *Myotis nigricans*를 대상으로 서식지 구조에 따른 반향정위 변화를 비교한 결과에서도 이와 비슷한 형태의 시그널을 발산하는 것으로 나타났다. 이렇게 CF 시그널과 유사한 형태인 협대역의 긴 PD를 가지는 FM 시그널은 곤충의 정확한 위치를 파악하는데 있어서는 광대역의 FM 시그널보다 덜 적합한 형태이나, 작은 곤충으로부터 약한 반향을 파악하고 움직임을 감지하는데 있어서는 잘 적응되어 있는 형태이다(Schnitzler and Kalko, 2001; Schnitzler *et al.*, 2003). 따라서 이러한 시그널 형태는 개방된 환경특성에서 먼 거리에 있는 곤충의 탐색에 도움을 주고, 공기 중에서 음의 감쇠 정도를 감소시키는 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다. 결과적으로 변화된 비행패턴 없이 일정한 높이에

서 일정한 속도로 비행하며 발산하는 이와 같은 시그널은 서식지간 이동시 먼 거리에 있는 곤충의 반향을 파악하고 다음 먹이활동을 위한 대상지 선택과정의 결과로 판단된다.

4. 환경특성과 먹이의 포획

1) 논 경작지

본 환경 특성에서 확인된 펄스 형태는 광대역의 FM 시그널과 짧은 CF 시그널을 혼합하여 이용하는 전형적인 집박쥐류의 펄스 형태를 나타내었으며, 최대 3개의 하모니를 가지는 것으로 측정되었다. 음향 스펙트럼(sound spectrum) 분석결과 첫 번째 하모니는 강한 소리압과 광대역의 대역폭을 나타내었으며, 이어지는 하모니는 낮고 길게 이어지는 CF 시그널의 형태를 나타내었다(Figure 7). PD는 16.27 ± 1.20 ms로 출현순간 및 출현 후 이동시의 비행과 비교해서 긴 지속시간을 갖는 것으로 측정되었으며, 기타 먹이활동이 이루어지는 환경특성에서의 비행과 비교해서는 산림 가장자리에서의 비행보다 길고 민가지역에서의 먹이활동보다 짧은 지속시간을 나타내었다. PI는 98.38 ± 4.44 ms로 먹이활동이 이루어지는 서식지 환경특성 가운데 가장 긴 형태를 나타내었으며, PF와 SF는 각각 47.41 ± 0.55 kHz, 63.59 ± 3.62 kHz로 가장 낮은 진동수를 보였다. Zhu *et al.*(2008)이 관박쥐를 대상으로 서로 다른 서식지 형태에서

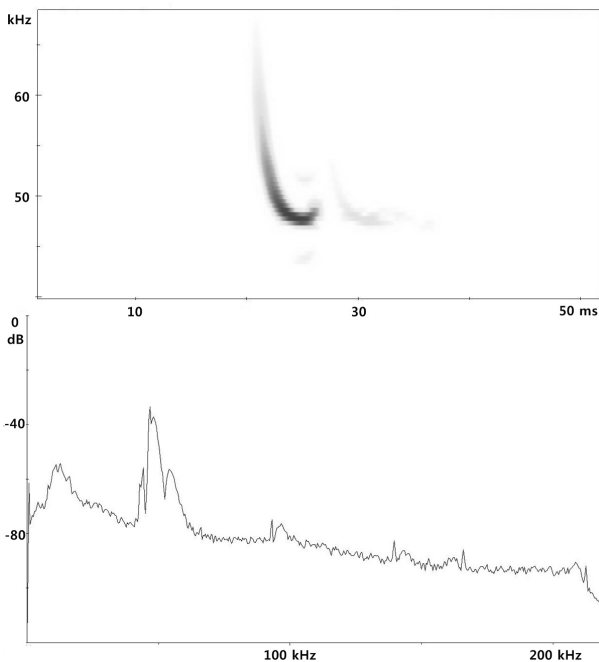


Figure 7. Spectrogram and power spectrum of *Pipistrellus abramus* in rice field

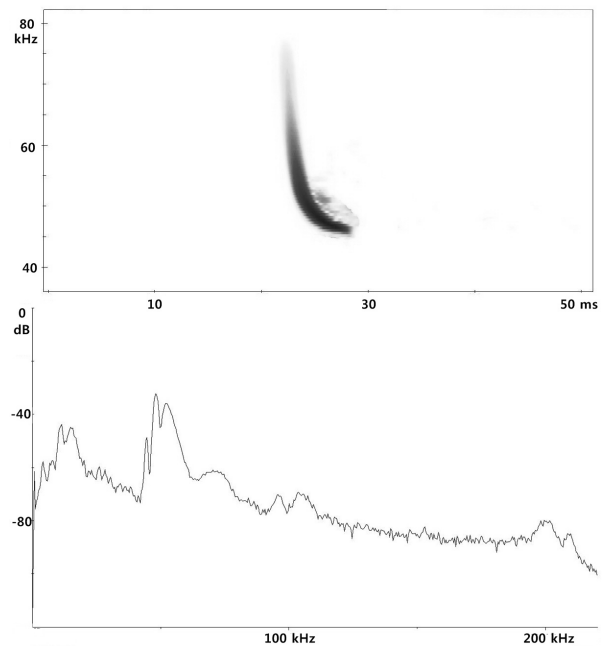


Figure 8. Spectrogram and power spectrum of *Pipistrellus abramus* in shrubbery and minor tree zone

의 반향정위를 비교한 결과에 의하면 서식지 형태가 복합적으로 갈수록 대역폭과 PF는 증가하였으며, 반면에 PD와 PI는 감소하였는데 이러한 결과와 비교해 볼 때 긴 시간의 PI를 가지고 $47.41 \pm 0.55 \text{ kHz}$ 의 PF를 나타낸 논 경작지에서의 펄스 형태는 세 가지 환경특성의 먹이활동 대상지 가운데 가장 개방적인 서식지 형태에 따른 결과라 판단된다.

2) 복합적인 구조의 산림 가장자리

본 서식지 환경특성에서 확인된 펄스 형태는 출현순간 및 개방공간을 제외한 타 서식지 유형에서와 마찬가지로 광대역의 FM 시그널과 짧은 CF 시그널을 혼합하여 이용하는 형태였으며, 하나의 펄스는 한 개의 하모니로 구성된 형태를 보였다(Figure 8). PD와 PI는 먹이활동을 위한 비행패턴 가운데 가장 짧은 $5.90 \pm 0.56 \text{ ms}$ 와 $73.87 \pm 5.38 \text{ ms}$ 로 각각 나타났으며, PF는 평균 48.47 kHz 로 출현 순간을 제외한 모든 서식지 유형 가운데 가장 높게 나타났다. 따라서 FM과 CF 시그널을 혼합하여 사용하는 것으로 확인된 서식지 유형 가운데 EF가 $46.54 \pm 0.80 \text{ ms}$ 로 가장 높게 측정되었으며, SF 또한 $75.30 \pm 1.23 \text{ ms}$ 로 높은 진동수를 보여 펄스 개시부와 종결부 사이의 대역폭이 조사대상 서식지 유형 가운데 가장 큰 것으로 나타났다. 이렇게 짧은 PD와 광대역의 대역폭을 나타내는 시그널 형태는 박쥐가 식생구조와 근접한 위치 즉, 더 복합적으로 변화하는 서식지 구조에서 곤충을 포획할 때 이용하는 형태로(Siemers *et al.*, 2001), 복잡한 서식지 구조에서 목표물의 정확한 위치를 파악하는데 더 안정적인 것으로 알려져 있다(Zhu *et al.*, 2008). 뿐만 아니라 *P. pipistrellus*를 대상으로 한 연구에서도 개방된 서식지 공간보다 산림 가장자리의 복합적인 서식지 구조에서 광대역의 시그널 및 짧은 PD와 PI를 갖는 것으로 연구된바 있다(Siemers *et al.*, 2001). 따라서 본 서식지 유형에서 나타난 펄스 형태는 서식지 구조가 복합적으로 변화할수록 PD는 짧아지고 진동수는 높아지며, 대역폭은 커지는 기존의 연구와 유사한 결과를 나타내었다.

3) 빌딩 및 민가 지역

빌딩을 포함한 고층건물과 상가 및 주택단지를 포함하는 지역에서 비행하는 개체의 펄스 형태는 광대역의 FM 시그널과 짧은 CF 시그널을 이용하는 패턴으로 타 서식지 유형과 비슷하였으며, 본 서식지 환경특성에서 확인된 모든 펄스에서는 3개의 하모니를 가지는 것으로 조사되었다(Figure 9). PD는 모든 펄스에서 연속된 3개의 하모니가 이어짐에 따라 $21.31 \pm 0.78 \text{ ms}$ 로 먹이활동을 위한 비행패턴 가운데 가장 긴 형태로 나타났다. 집박쥐는 빌딩 및 주변의 인공구조물을 주간 휴식장소로 이용하고 산림의 가장자리, 공원, 가로등 주변 등에서 먹이활동을 하는 특징을 가지고

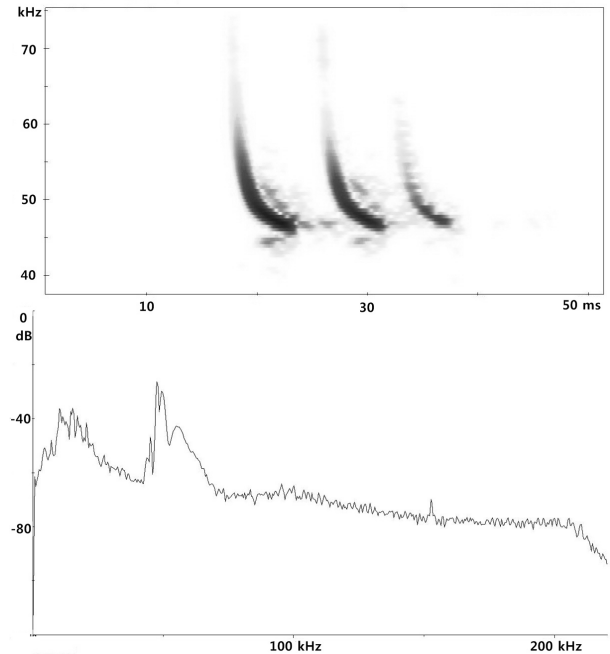


Figure 9. Spectrogram and power spectrum of *Pipistrellus abramus* in resident site

있다(Briggs and King, 1998). 또한 반향정위 시스템의 발달은 서식지에 대한 적응과 함께 이루어지고, 시그널의 구조는 박쥐의 서식지 특성을 반영할 수 있는 것으로 알려져 있다(Zhu *et al.*, 2008). 따라서 본 조사에서 확인된 집박쥐의 이러한 시그널은 위치와 형태 등이 일정한 패턴으로 구성되어 있는 인공 구조물로 인하여 야간 비행시 서식지에 대한 적응의 필요성이 감소하게 되고, 결과적으로 새로운 환경에 대한 탐색 시스템의 변화 보다는 논 및 산림가장자리와 비교해서 개방과 복합성 정도의 차이에 기인한 결과로 판단된다.

5. 먹이활동과 서식지간 이동

해당 서식지 환경특성에 따라서 서식지간 이동을 위한 비행과 먹이활동을 위한 비행으로 구분하여 시그널의 구조를 비교하였다. 분석결과 PD($F=2.89$, $p>0.05$)에서는 두 가지 비행 패턴 사이에 차이가 나타나지 않았으나, PI($F=7.04$, $p<0.05$), PF($F=12.27$, $p<0.001$), SF($F=62.72$, $p<0.001$), EF($F=96.53$, $p<0.001$) 분석에서는 차이를 보였다(Figure 10). PD는 서식지간 이동시 평균 $17.05 \pm 12.14 \text{ ms}$ 로 먹이활동을 위한 비행에서의 $14.49 \pm 6.51 \text{ ms}$ 보다 더 긴 지속시간을 갖는 경향이 있었다. PI는 서식지간 이동시에 $92.25 \pm 17.22 \text{ ms}$ 그리고 먹이활동을 위한 비행시에 $86.04 \pm 12.76 \text{ ms}$ 로 PD와 마찬가지로 서식지간 이동을 위한 비행 패턴에서

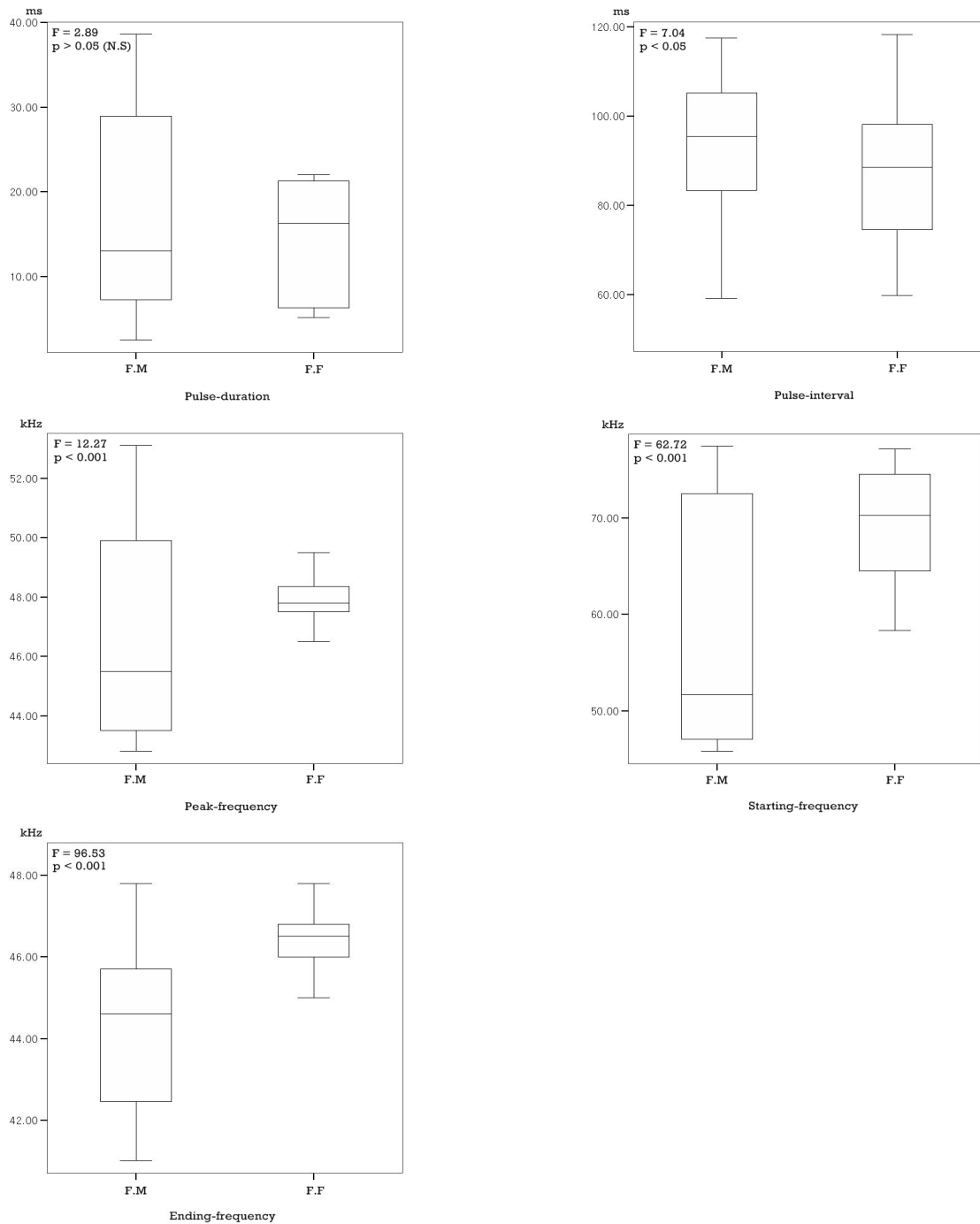


Figure 10. Differences of pulse duration, pulse interval, peak frequency, starting frequency and ending frequency of *Pipistrellus abramus* in different flying patterns. F.M, Flying to movement among habitats; F.F, Flying to foraging activity; N.S, Not significant

의 시간이 긴 것으로 측정되었다. 그러나 시그널의 진동수를 나타내는 측정값에서는 모두 먹이포획을 위한 반향정위의 진동수가 높았는데, 서식지간 이동시의 PF(46.62±3.42

kHz), SF(57.75±12.15 kHz), EF(44.28±1.91 kHz)와 비교해서 먹이활동을 위한 비행의 PF(47.97±0.86 kHz), SF(69.26±5.45 kHz), EF(46.42±0.59 kHz) 진동수가 높은

것으로 나타났다. 결과적으로 서식지간 이동을 위한 비행 패턴 가운데 FM 시그널만 확인된 출현순간을 제외하고는 곤충의 반향을 감지하여 목표물의 탐색시에 더 적합한 형태인 협대역의 FM 시그널과 긴 시간의 PD를 가지는 펄스 형태를 나타내었으며, 먹이활동을 위한 비행 패턴에서는 광대역의 FM 시그널을 이용한 폭넓은 탐색 시스템과 함께 곤충의 정확한 위치를 파악할 수 있는 짧은 시간의 PD를 가지는 것으로 확인되었다.

인용문헌

- Barclay, R.M.R.(1986) The echolocation calls of hoary(*Lasiurus cinereus*) and silver-haired (*Lasionycteris noctavigans*) bats as adaptations for long-versus short-range foraging strategies and the consequences for prey selection. *Can. J. Zool.* 64: 2,700-2,705.
- Bogdanowicz, W., M.B. Fenton and K. Daleszczyk(1999) The relationship between echolocation calls, morphology and diet in insectivorous bats. *J. Zool., Lond.* 247: 381-393.
- Briggs, B. and D. King(1998) *The Bat Detective-A Field Guide for Bat Detection.* Batbox Ltd., pp.14-35.
- Dietz, M. and E.K.V. Kalko(2007) Reproduction affects flight activity in female and male Daubenton's bats, *Myotis daubentoni*. *Can. J. Zool.* 85: 653-664.
- Fenton, M.B.(1990) The foraging behaviour and ecology of animal-eating bats. *Can. J. Zool.*, 86: 411-422.
- Jones, G.(1999) Scaling of Echolocation Call Parameters In Bats. *J. Exp. Biol.* 202: 3359-3367.
- Jones, G. and T. Kokurewicz(1994) Sex and age variation in echolocation calls and flight morphology of Daubenton's bats *Myotis daubentonii*. *Mammalia*. 58: 41-50.
- Jones, G., T. Gordon and J. Nightingale(1992) Sex and age differences in the echolocation calls of the lesser horseshoe bat, *Rhinolophus hipposideros*. *Mammalia*. 56: 189-193.
- Jones, G. and S.M.V. Parijs(1993) Bimodal echolocation in pipistrelle bats : are cryptic species present?. *Proc. R. Soc. Lond. B.* 251: 119-125.
- Jennings, N.V., S. Parsons, K.E. Barlow and M. Gannon(2004) Echolocation calls and wing morphology of bats from the West Indies. *Acta. Chiro.* 6(1): 75-90.
- Jensen, M.E. and L.A. Miller(1999) Echolocation signals of the bat *Eptesicus serotinus* recorded using a vertical microphone array: effect of flight altitude on searching signals. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 47: 60-69.
- Kalko, E.K.V.(1995) Insect pursuit, prey capture and echolocation in pipistrelle bats (*Microchiroptera*). *Anim. Behav.* 50: 861-880.
- Kalko, E.K.V. and H.U. Schnitzler(1989). The echolocation and hunting behavior of Daubenton's bat, *Myotis daubentoni*. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 24: 225-238.
- Kalko, E.K.V. and H.U. Schnitzler(1993) Plasticity in echolocation signals of European pipistrelle bats in search flight: implications for habitats use and prey detection. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 33: 415-428.
- Kunz, T.H., and A. Kurta.(1988) Capture methods and holding devices. pp. 1-29. In: *Ecological and behavioral methods for the study of bats.* (T.H. Kunz, ed.). Smithsonian Institution Press, Washington, D.C. 533pp.
- Masters, W.M., K.A.S. Raver and K.A. Kazial(1995) Sonar signals of big brown bats, *Eptesicus fuscus*, contain information about individual identity, age and family affiliation. *Anim. Behav.* 50: 1243-1260.
- Neuweiler, G.(1989) Foraging ecology and audition in echolocating bats. *Trends Ecol. Evol.* 4: 160-166.
- Neuweiler, G.(1990) Auditory adaptations for prey capture in echolocating bats. *Physiol Rev.* 70: 615-641.
- Obrist, M.K.(1995) Flexible bat echolocation-the influence of individual, habitat and conspecifics on sonar signal design. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 36: 207-219.
- Parsons, S. and G. Jones(2000) Acoustic identification of twelve species of echolocating bat by discriminant function analysis and artificial neural networks. *J. Exp. Biol.* 203: 2,641-2,656.
- Russ, J.M., G. Jones and P.A. Racey(2005) Responses of soprano pipistrelles, *Pipistrellus pygmaeus*, to their experimentally modified distress calls. *Anim. Behav.* 70: 397-404.
- Schnitzler, H.U. and O.W. Henson(1980) Performance of airborne animal sonar systems. I. *Microchiroptera*. In: *Animal Sonar Systems* (Ed. by R.G. Busnel and J.F. Fish), New York: Plenum Press. pp.109-181.
- Schnitzler, H.U. and E.K.V. Kalko(1998). How echolocating bats search and find food. In Kunz, T.H and P.A. Racey. eds. *Bat Biology and Conservation.* Washington: Smithsonian Institution Press. pp.183-196.
- Schnitzler, H.U. and E.K.V. Kalko(2001) Echolocation by Insect-Eating Bats. *BioScience.* 51: 557-569.
- Schnitzler, H.U., C.F. Moss and A. Denzinger(2003) From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats. *Trends. Ecol. Evol.* 18: 386-394.
- Siemers, B.M., E.K.V. Kalko and H.U. Schnitzler(2001) Echolocation behavior and signal plasticity in the Neotropical bat *Myotis nigricans*(Schinz, 1821)(Vespertilionidae): a convergent case with European species of *Pipistrellus*?. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 50: 317-328.
- Simmons, J.A. and R.A. Stein(1980) Acoustic imaging in bat sonar: echolocation signals and the evolution of echolocation. *J. comp. Physiol.* 135: 61-84.

- Surlykke, A., L.A. Miller, B. Mohl, B.B. Andersen, J. Christensen-Dalsgaard and M.B. Jorgensen(1993) Echolocation in two very small bats from Thailand: *Craseonycteris thonglongyai* and *Myotis siligorensis*. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 33: 1-12.
- Vaughan, N., G. Jones and S. Harris(1997) Identification of British bat species by multivariate analysis of echolocation parameters. *Bioacoustics.* 7: 189-207.
- Waters, D.A. and G. Jones(1995) Echolocation call structure and Intensity in Five Species of Insectivorous Bats. *J. Exp. Biol.* 198: 475-489.
- Zhu, X., J. Wang, K. Sun, T. Jiang, Y. Jiang and J. Feng(2008) Echolocation calls of *Rhinolophus ferrumequinum* in relation to habitat type and environmental factors. *Acta. Ecologica. Sinica.* 28: 5248-5258.