Journal of Environmental Science International
24(3); 353~358; March 2015

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2015.24.3.353

TECHNICAL NOTE

환경특성에 따른 안주애기박쥐(*Vespertilio sinensis*)의 반향정위 특징

정철운* · **한상훈**[1)]

국립공원관리공단 종복원기술원, [1)]국립생물자원관

Characteristics of Echolocation Calls of the Parti-coloured Bat, *Vespertilio sinensis*, in Relation to Environment Type

Chul-Un Chung*, Sang-Hoon Han[1)]

Species Restoration Technology Institute, National Park Service, Yeongju 750-811, Korea
[1)]National Institute of Biological Resources, Incheon 404-170, Korea

Abstract

In this study, we analyzed two types of echolocation calls used by the parti-coloured bat, *Vespertilio sinensis*. Bats were captured in the Naejangsan National Park in October 2013. Call sounds of hand-released bats were recorded at the location of capture within the National Park. We analyzed pulse duration (PD), pulse interval (PI), peak frequency (PF), maximum frequency (F_{MAX}), minimum frequency (F_{MIN}), and bandwidth (BW). *V. sinensis* emitted the different types of the echolocation calls depending on the surrounding environment. Frequency modulated-constant frequency (FM-CF) signal of audible range was emitted when they flew in the uncluttered space over the canopy. However, when flying in the cluttered space below the canopy, they only emitted FM signal. FM-CF signal is in the audible range (e.g., low frequency), and FM signal has a harmonic broadband frequency range of two. There were significant differences in PD, PI, PF, FMAX, FMIN, and BW between the calls emitted over and below the canopy. Considering the functional characteristics of FM and CF signals, we conclude that the foraging activity of *V. sinensis* was observed below the canopy, and recommend the use of FM signal and broadband as echolocation signals.

Key words : Environment characteristic, Foraging activity, Naejangsan National Park, Ultrasound signal

1. 서 론

박쥐는 공간적 적응과 먹이의 구분을 위해서 반향정위를 이용한다(Kalko와 Schnitzler, 1993; Zhu 등, 2008). 박쥐가 이용하는 초음파 시그널은 주로 주파수 변조형(frequency modulated, FM), 주파수 일정형(constant frequency, CF)으로 이루어지거나 두가지의 혼합적인 형태로 이용된다(Schnitzler와 Henson, 1980; Surlykke 등, 1993). FM과 CF 시그널은 주파수, 대역폭, 하모니의 구조, 펄스의 지속시간 등에 있어서 분명하게 다른 특징을 가지고 있으며, 박쥐는 종의 형태, 채식지 환경, 초음파 주파수 범위 등에 따라서 차별화된 반향정위 시그널을 이용한다(Fenton, 1990; Schnitzler와 Kalko, 2001). 협대역의 긴 펄스 지속시간을 가지는 시그널은

Received 11 February, 2015; **Revised** 6 March, 2015;
Accepted 9 March, 2015
***Corresponding author** : Chul Un Chung, Species Restoration Technology Institute, Korea National Park, Yeongju 750-811, Korea
Phone: +82-54-637-9120
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.

먹이의 움직임으로부터 반향되는 진폭과 주파수를 파악하여 먹이를 분류하는데 이용된다(Schnitzler와 Kalko, 2001). 그리고 이러한 시그널은 음을 발산하고 그 음이 되돌아오는 시간이 길기 때문에 대상물의 정밀한 위치탐색에는 덜 적합하게 되어 있다. 반면에 광대역의 FM 시그널은 범위와 각도가 정확하게 측정되는 곳에서 먹이의 위치를 정확하게 파악하는데 적합하게 되어 있다(Schnitzler와 Kalko, 2001).

본 연구대상인 안주애기박쥐(*Vespertilio sinensis*)는 중형 크기의 식충성 박쥐로 중국, 몽골, 우수리, 한국, 타이완, 일본 등에 서식하고 있다(Abe 등, 2005; Simmons, 2005; Fukui 등, 2010). 안주애기박쥐는 한국에서 Mori (1928)에 의한 기록 이 후 몇 차례의 관찰 기록이 있을 뿐 지금까지 본 종의 생태나 초음파 특징에 관한 연구는 이루지지 않았다. 비록 최근 산림벌채와 같은 서식지의 감소에 따라서 사람들에 의해 조성된 인공구조물을 휴식지로 이용하는 사례가 증가하고는 있지만, 안주애기박쥐는 주로 나무의 구멍이나 암반의 틈과 같은 자연적인 구조물을 서식지로 이용한다(Fukui 등, 2010). 본 연구자들은 최근 내장산국립공원에서 안주애기박쥐의 포획에 성공하였으며, 이 종이 지금까지 알려진 것과 다른 두 가지 패턴(FM-CF and FM)의 반향정위 콜을 발산하는 것을 확인하였다.

이전의 연구결과에 따르면 안주애기박쥐는 FM/quasi CF (QCF) 타입을 이용하는데(Fukui 등, 2004; Funakoshi, 2010), 이러한 콜은 복잡하지 않은 서식지 환경에 안정적이다(Simmons 등, 1979). 따라서 이러한 음성 패턴을 이용하는 박쥐는 주로 개방된 공간에서 채식활동을 하는 것으로 여겨져 왔다(Vaughan 등, 1997, Fukui 등, 2004). FM/QCF 패턴을 이용하는 박쥐는 복잡하지 않은 공간 내에서는 상대적으로 길고 협대역의 시그널을 이용한다. 그러나 산림 사이 또는 가장자리와 같은 복잡한 서식공간에서는 짧고 광대역의 시그널을 발산한다(Schnitzler와 Kalko, 1998, 2001; Fukui 등, 2004). 비록 박쥐가 채식지 환경에 따라서 반향정위 콜을 변화시키기는 하지만 본 연구에서 확인된 안주애기박쥐의 반향정위 콜은 이전의 연구와 많은 차이가 있다. 우선적으로 수관층 상부에서 비행시에 발산하는 FM-CF 콜은 가청음 범위의 낮은 주파수를 가지며 거의 QCF 콜에 가까웠다. 그리고 수관층 하부의 산림내 공간에서 비행시에 발산하는 FM 콜은 이전의 연구에서 언급되지 않았던 안주애기박쥐의 시그널 형태이다.

안주애기박쥐는 개방된 상공을 채식장소로 이용하는 것으로 알려져 있다(Funakoshi, 2010). 그러나 본 연구에서는 안주애기박쥐의 비행은 수관층 상부 뿐만 아니라 수관층 하부의 복잡한 식생 공간 내에서도 많은 시간동안 이루어지며, 곤충의 정확한 위치탐색에 필요한 FM 시그널은 수관층 아래의 복잡한 서식공간에서 발산한다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구의 목적은 비행공간의 환경 특성에 따라서 명확하게 구분되는 두가지 유형의 반향정위 시그널 특징을 비교하는 것이며, 추가적으로 확인된 반향정위 시그널을 이용하여 채식지 환경을 고찰해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 2013년 10월 내장산국립공원에서 이루어졌다. 박쥐의 포획은 그물(Mist net, 7×2.5 m, Mesh 16 mm, Poland)을 이용하여 포획하였으며, 현장에서 재방사 후 발산하는 음을 녹음하였다. 일반적으로 움직이지 않는 상태의 박쥐가 발산하는 음성은 자유롭게 비행하는 박쥐의 반향정위 콜을 설명하기에는 부족하다. 또한 움직이지 않는 상태의 박쥐가 발산하는 음의 지속시간은 자유비행 상태와 비교해서 더 짧은 특징이 있다(Waters와 Jones, 1995). 따라서 본 연구에서는 모든 녹음에 대하여 재방사 후 자유비행 상태에서 발산하는 음성을 대상으로 하였다. 포획된 박쥐는 동일한 장소에서 재방사하였으며, 재방사 시에는 개체별 정확한 음성 확인 및 비행위치 파악을 위하여 화학발광 태그(chemiluminescent tag)를 부착하여 30분 간격으로 방사하였다. 방사된 개체의 녹음은 초음파 감지기(D1000x, Pettersson Elektronic AB, Uppsala, Sweden; sampling frequency = 384 kHz, resolution = 12 bits)를 이용하였으며, 개체의 비행위치에 따라 구분하여 녹음하였다.

분석은 개체별로 가장 정확하게 녹음된 부분에 대하여 분석 프로그램(BatSound v. 4.0, Pettersson Elektronic AB, Uppsala, Sweden, sampling rate of 44.1 kHz, with 16-bit resolution)을 이용하여 수행하였다. 일반적으로 박쥐가 발산하는 시그널은 첫 번째 하모니가 가장 많은 에너지를 포함하고 있다(Siemers 등, 2001;

Sterbing, 2002). 따라서 본 연구에서는 첫 번째 하모니를 대상으로 펄스 지속시간(pulse duration, PD), 펄스 간격(pulse interval, PI), 피크 주파수(peak frequency, PF), 최대 주파수(maximum frequency, F_{MAX}), 최소 주파수(minimum frequency, F_{MIN}), 대역폭(bandwidth, BW)을 측정하였다. PD와 PI는 오실로그램(oscillogram)과 소나그램(sonagram)을 연결하여 측정하였으며, PF는 파워스펙트럼(power spectrum)을 그리고 F_{MAX}, F_{MIN}, BW는 오실로그램과 스펙트로그램(spectrogram, 1024-point FFT in conjunction with a Hamming window)을 연결하여 측정하였다.

본 연구에서는 안주애기박쥐가 발산하는 두가지 패턴의 시그널을 비교하기 위하여 Mann-Whitney U test를 수행하였으며, 분석에는 SPSS 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

안주애기박쥐는 비행하는 공간의 환경특성에 따라서 명확하게 다른 형태의 음성을 발산하는 것이 확인되었다. 연구결과 안주애기박쥐는 수관층 상부의 개방된 공간을 비행할 경우에는 가청음 범위의 FM-CF 시그널을 발산했다. 그러나 수관층 하부의 복잡한 식생공간을 비행할 때는 오직 FM 시그널만을 이용했다. 확인된 두가지 시그널 특징 가운데 수관층 하부의 식생 사이를 비행하는 경우에는 2개의 하모니로 구성된 광대역의 FM 시그널을 발산하였다(Fig. 1).

PD는 2.39±0.50 ms, PI는 98.33±18.61 ms, PF는 30.85±2.07 kHz, FMAX는 47.03±2.17 kHz, FMIN는 22.78±1.02, BW는 23.25±2.62 였다(Table 1). 반면에 수관층 상부를 비행할 경우에는 가청음 범위의 낮은 주파수로 구성된 협대역의 FM-CF 시그널을 발산하였는데 아주 짧은 시간의 FM 시그널 이후 긴 시간의 CF 시그널이 이어졌다(Fig. 1). PD는 114.88±19.11 ms, PI는 199.00 ±12.90 ms, PF는 13.57±0.86 kHz, F_{MAX}는 16.68 ±1.52 kHz, F_{MIN}는 12.38±0.85 kHz, BW는 4.29±1.38 kHz 였다(Table 1).

수관층 상부에서 발산하는 음성과 수관층 하부에서 발산하는 펄스 패턴을 비교한 결과 PD ($Z = 5.960$, $p < 0.001$), PI ($Z = 5.287$, $p < 0.001$), PF ($Z = 5.987$, $p <$

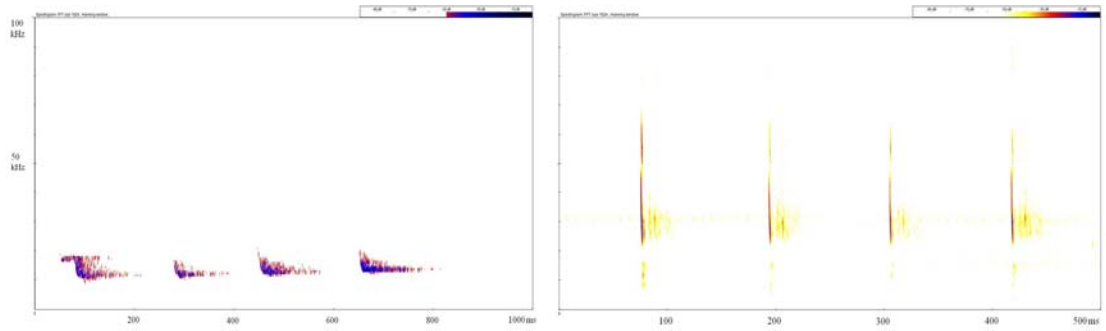

Fig. 1. Comparison of spectrograms of sounds by Vespertilio sinensis between over the canopy (left) and under the canopy (right).

Table 1. Comparison of data on echolocation calls emitted by *Vespertilio sinensis* between different habitat type (Values are mean±S.D.)

Environment type	Call structure	PD	PI	PF	F_{MAX}	F_{MIN}	BW
Under the canopy	FM	2.39±0.50 (N=48)	98.33±18.61 (N=45)	30.85±2.07 (N=50)	46.03±2.17 (N=37)	22.78±1.02 (N=37)	23.25±2.62 (N=37)
Over the canopy	FM-CF	114.88±19.11 (N=16)	199.00±12.90 (N=12)	13.57±0.86 (N=16)	16.68±1.52 (N=16)	12.38±0.85 (N=16)	4.29±1.38 (N=16)

Table 2. Comparison of echolocation calls in cluttered space and in uncluttered space Mann-Whitney U test was used to compare audible sounds and ultrasound

Value	PD	PI	PF	FMAX	FMIN	BW
Z	5.960	5.287	5.987	5.737	5.737	5.736
p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

0.001), F_{MAX} (Z = 5.737, p < 0.001), F_{MIN} (Z = 5.737, p < 0.001), BW (Z = 5.736, p < 0.001) 등 모든 항목에서 유의적인 차이가 있었다(Table 2). PD와 PI는 수관층 상부에서 가청음을 발산할 경우 더 긴 시간을 가졌으며, PF, F_{MAX}, F_{MIN}, BW는 수관층 하부를 비행할 경우 높은 것으로 나타났다.

한국과 가까운 일본에서 서식하는 안주애기박쥐의 음성 구조는 FM/QCF 패턴으로, PD 6.2 ms, PF 24.2 kHz 이고(Fukui 등, 2004), Funakoshi (2010)는 PF 33.2 kHz 로 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 다른 결과를 보였다. 확인된 두가지 타입의 반향정위 음성 가운데 FM-CF 시그널은 가청음 범위의 낮은 주파수로, 아주 짧은 FM 시그널과 긴 CF 시그널 형태였다. 따라서 PF는 이전의 연구보다 낮은 13.57 kHz 였고 PD도 114.88 ms 로 길었다. 반면에 FM 시그널인 초음파 범위에서는 PD가 2.39 ms로 짧았으며, PF는 30.85 kHz로 Funakoshi (2010)와 유사하였다.

식충성 박쥐는 한가지 타입의 채식지만을 이용하기보다 먹이자원의 공급 정도에 따라서 여러가지 유형의 서식지를 이용하며(Brigham 등, 1992; Zukal과 Rehak, 2006), 서식지 이용은 먹이자원의 분포에 의해서 영향을 받게 된다(Kusch 등, 2004; Zukal과 Rehak, 2006). 따라서 이러한 차이는 연구가 이루어진 지역의 서식지 구조차이 또는 계절적인 먹이원의 분포에 기인한 결과로 볼 수도 있다. 그러나 본 연구에서는 FM/QCF 시그널을 이용하고 주로 개방된 상공을 채식지로 이용하는 결과를 보고한 이전의 연구(Funakoshi, 2010)와 비교해 볼 때 많은 차이를 보이고 있다.

연구결과 안주애기박쥐는 개방된 상공을 비행할 때는 가청음의 짧은 FM과 긴 CF 시그널을 이용하였다. 비록 박쥐가 개방된 공간을 비행할 경우 이러한 패턴의 음성을 발산하기는 하지만 본 연구에서 확인된 패턴은 지금까지 기록되지 않았던 주파수가 낮은 가청음 범위의 시그널이었다. 지금까지의 이론대로라면 이러한 시그널 형태는 곤충을 발견하는데는 유리하지만 정확한 위치를 파악하고 포획하는데는 덜 적합한 형태이다. 또한 본 조사지역은 참나무로 구성된 수관층으로 인하여 산림내부 공간과 상부의 개방된 공간이 구분되어져 있다. 따라서 수관층 상부의 개방된 공간에서 발산하는 가청음 형태의 FM-CF 시그널은 안주애기박쥐의 채식활동과는 밀접한 관련이 없는 것으로 추정된다.

반면에 산림 식생 내부에서 확인된 FM 시그널은 야간 채식활동과 직접적인 관련이 있다고 생각된다. 왜냐하면 광대역의 FM 시그널은 주변 환경으로부터 먹이를 식별하는 감각을 증가시켜주며, 목표물의 정확한 위치를 파악하는데 적합하다(Schnitzler와 Kalko, 1998; Simers 등, 2001). 뿐만 아니라 본 조사가 이루어진 지역은 계곡과 작은 지류들이 조성되어 있으며, 주변으로는 하층 식생이 잘 발달되어 있다. 따라서 개방된 상층보다 상대적으로 더 다양하고 많은 곤충을 포획할 수 있다고 기대되는 것도 이러한 가정을 뒷받침하는 근거라고 할 수 있다(Zukal과 Rehak, 2006).

결과적으로 본 연구에서 확인된 안주애기박쥐의 반향정위 특징은 환경특성에 따라서 명확하게 구분되는 두가지 특징의 반향정위를 이용하며, 이용되는 시그널은 FM-CF와 FM 이었다. 특히 FM-CF 시그널로 구성된 반향정위를 이용할 경우에는 가청음 범위의 매우 낮은 주파수를 이용하였다. 또한 FM과 CF 시그널의 기능적인 특징을 고려해 볼 때, 안주애기박쥐의 채식활동은 수관층 하부에서 이루어지며 이때 이용되는 반향정위 음성은 광대역의 FM 시그널인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 안주애기박쥐의 환경특성에 따른 반향정위 음성의 변화를 분석하였으며, 비행하는 공간의 환경특성에 따라서 명확하게 다른 형태의 음성을 발산하는

것을 확인하였다. 안주애기박쥐는 수관층 상부의 개방공간 비행시에는 FM-CF 시그널을 이용하였으며, 복잡한 식생공간을 비행할 경우에는 오로지 FM 시그널만을 발산하였다. FM-CF 시그널로 구성된 반향정위를 이용할 경우에는 가청음 범위의 매우 낮은 주파수를 이용하였으며, 수관층 하부에서 이용되는 FM 시그널은 아주 짧은 시간의 광대역 주파수 범위를 이용하였다. 결과적으로 안주애기박쥐는 FM-CF 시그널과 FM 시그널 두가지 패턴의 반향정위를 이용하며, FM과 CF 시그널의 기능적인 특징을 고려해 볼 때 채식활동은 수관층 하부에서 이루어지며 이때 이용되는 반향정위 음성은 광대역의 FM 시그널인 것으로 판단된다.

REFERENCE

Abe, H., Ishii, N., Itoo, T., Kaneko, Y., Maeda, K., Miura, S., Yoneda, M., 2005, A guide to the mammals of Japan, Tokai University Press, Tokyo, 206.

Brigham, R. M., Aldridge, H. D. J. N., Mackey, R. L., 1992, Variation in habitat use and prey selection by Yuma bats, *Myotis yumanensis*. J. Mammal., 73, 640-645.

Fenton, M. B., 1990, The foraging behaviour and ecology of animal-eating bats, Canadian Journal of Zoology, 80, 1004-1013.

Fukui, D., Agetsuma, N., Hill, D. A., 2004, Acoustic identification of eight species of bat (Mammalia: Chiroptera) inhabiting forests of southern Hokkaido, Japan: Potential for conservation monitoring. Zoological Science, 21, 947-955.

Fukui, D., Okazaki, K., Miyazaki, M., Maeda, K., 2010, The effect of roost environment on roost selection by non-reproductive and dispersing Asian parti-coloured bats *Vespertilio sinensis*. Mammal Study, 35, 99-109.

Funakoshi, K., 2010, Acoustic identification of thirteen insectivorous bat species from the Kyushu District, Japan, Mammalian Science, 50, 165-175. (in Japanese with English abstract)

Kalko, E. K. V., Schnitzler, H. U., 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.

Kusch, J., Weber, C., Idelberger, S., Koob, T., 2004, Foraging habitat preferences of bats in relation to food supply and spatial vegetation structures in a western European low mountain range forest. Folia Zoologica, 53, 113-128.

Mori, T., 1928, Four new species of bats (Vespertilionidae) from Korea. Annotationes Zoologicae Japonenses, 11, 389-395.

Schnitzler, H. U., Henson, O. W., 1980, Performance of airborne animal sonar systems. I. Microchiroptera. In: Animal Sonar Systems(Eds., Busnel, R. G., Fish, J. F.), New York, Plenum Press., 109-181.

Schnitzler, H. U., Kalko, E. K. V., 1998, How echolocating bats search and find food. In: Bat Biology and Conservation.(Eds., Kunz, T.H., Racey, P. A.) Washington. Smithsonian Institution Press, 183-196.

Schnitzler, H. U., Kalko, E. K. V., 2001, Echolocation by Insect-Eating Bats. BioScience, 51, 557-569.

Siemers, B. M., Kalko, E. K. V., Schnitzler, H. U., 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., Fenton, M. B., O'Farrell, M. J., 1979, Echolocation and pursuit of prey by bats. Science, 203, 16-21.

Simmons, N. B., 2005, Order Chiroptera. In: Mammal Species of the World: A Taxonomic and Geographic Reference.(Eds., Wilson, D. E., Reeder, D. M.). Third Edition. Volume 1, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 312 - 529.

Sterbing, S. J., 2002, Postnatal development of vocalizations and hearing in the phyllostomid bat, *Carollia perspicillata*. J. Mamm., 83, 516-525.

Surlykke, A., Miller, L. A., Mohl, B., Andersen, B. B., Christensen-Dalsgaard, J., Jorgensen, M. B., 1993, Echolocation in two very small bats from Thailand: *Craseonycteris thonglongyai* and *Myotis siligorensis*. Behavioral Ecology and Sociobiology, 33, 1-12.

Vaughan, N., Jones, G., Harris, S., 1997, Identification of British bat species by multivariate analysis of echolocation parameters. Bioacoustics, 7, 189-207.

Waters, D. A., Jones, G., 1995, Echolocation call structure and Intensity in Five Species of Insectivorous Bats. Journal of Experimental Biology, 198, 475-489.

Zhu, X., Wang, J., Sun, K., Jiang, T., Jiang, Y., Feng, J., 2008, Echolocation calls of *Rhinolophus ferrumequinum* in relation to habitat type and environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 28, 5248-5258.

Zukal, J., Rehak, Z., 2006, Flight activity and habitat preference of bats in a karstic area, as revealed by bat detectors. Folia Zoologica, 55, 273-281.