

한국산 익수목(Chiroptera) 3종의 반향정위(echolocation) 형태

정철운 · 임춘우 · 김성철

동국대학교 생명과학과

General Patterns in Echolocation Call of Three Bat Species in Korea

CHUNG, Chul-Un · Chun-Woo LIM · Sung-Chul KIM

Department of Life Science, Dongguk Univ, Gyeongju 780-714, Korea

ABSTRACT

The purpose of this study was to analyze echolocation patterns of a bat and apply the results to identification of a bat using ultrasound data and other ecological study areas of a bat. *Rhinolophus ferrumequinum*, *Myotis petax* and *Pipistrellus abramus* are used in this study. Captured the bats in Gyeongsangnam-do and Gyeongsangbuk-do from August to October, 2010. According to the analysis on ultrasound used by three species of bats, ultrasound of *Rhinolophus ferrumequinum* starts with FM signals and ends with FM signals via CF signals. Compared to *Myotis petax* and *Pipistrellus abramus*, it has longer pulse duration and interval and higher peak frequency with approximately 69kHz. Echolocation patterns of *Myotis petax* consist of almost vertical FM signals and its pulse duration is the shortest among three species of bats with 3.72ms. On the other hand, pulse of *Pipistrellus abramus* begins with FM signals and ends with CF signals and its peak frequency is 45.19kHz, which is the lowest frequency among them.

Key Words : *myotis petax*, peak frequency, *pipistrellus abramus*, pulse duration, pulse interval, *rhinolophus ferrumequinum*

서 론

박쥐는 남북 극지 지대를 제외한 열대에서 아한대지역에 걸쳐 광범위하게 서식하고 있으며, 지금 까지 1,100종 이상이 기록되어 있는 분류군으로(Wilson and Reeder, 2005; 정 등, 2010b), 종의 풍부도와 생태학적 다양성으로 볼 때 가장 성공적으로 적응진화한 포유동물이다(Kalko, 1995; 정 등, 2010b). 박쥐의 생태학적 특징 가운데 반향정위(echolocation)는 환경에 대한 반향(echo)을 이용하여 자신의 위치를 결정짓고, 비행 중인 곤충을 포획하기 위하여 먹이의 탐색, 확인, 위치 파악에 이용된다(Schnitzler and Kalko, 2001). 반향정위는 전세계 모든 소익수아목(Suborder Microchiroptera)에 속하는 박쥐가 이용하고 있으며(Jones, 1999; 정 등, 2009b), 소익수아목내 대부분의 반향정위 주파수 대역은 헵대역

(narrow band)과 광대역(broad band) 또는 두 가지의 혼합적인 대역폭을 가지는 형태를 나타내고 있다(Schnitzler and Kalko, 2001; 정 등, 2009b). 박쥐가 내는 초음파는 주파수가 일정한 성분(constant frequency: CF signal)과 변조하는 성분(frequency modulated: FM signal)으로 구성되어 있는데(Jones, 1999; Schnitzler and Henson, 1980; Surlykke *et al.*, 1993; Vaughan *et al.*, 1997; Schnitzler and Kalko, 1998; Jennings *et al.*, 2004; 정 등, 2009b), 박쥐가 이용하는 반향정위는 이러한 초음파 주파수의 형태에 따라서 CF 시그널을 이용하는 종, FM 시그널을 이용하는 종 그리고 두 가지를 혼합하여 이용하는 종으로 구분된다(Schnitzler and Henson, 1980; Surlykke *et al.*, 1993; 정 등, 2009b). 또한 이러한 주파수 차이에 의한 CF와 FM 시그널의 형태는 진동수, 대역폭, 하모니의 구조, 초음파의 지속시간 등에 있어서 다른 특징을 가지고 있다(Schnitzler and Henson, 1980; Simmons and Stein, 1980; Neuweiler, 1989; Fenton, 1990; Schnitzler and Kalko, 2001; 정 등, 2009b).

현재 우리나라에 서식하고 있는 박쥐는 모두 소익수아목에 속하는 식충성 박쥐(insectivorous bat)로 환경에 대한 적응과 먹이의 포획 등 모든 부분에 있어서 반향정위를 이용하고 있다(정 등, 2009b, 정 등, 2010b). 그러나 지금까지 우리나라에 서식하는 박쥐의 반향정위에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 특히 종별 이용 주파수에 대한 기초적인 초음파 자료도 구축되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구는 우리나라에 서식하는 박쥐 가운데 대표적으로 관박쥐속 관박쥐 *Rhinolophus ferrumequinum*, 윗수염박쥐속 우수리박쥐 *Myotis petax*(Kawai *et al.*, 2003; Atterby *et al.*, 2009; 정 등, 2009a), 집박쥐속 집박쥐 *Pipistrellus abramus* 3종에 대한 반향정위 형태를 분석하여 향후 반향정위 시그널을 이용한 종의 동정 및 박쥐의 생태 연구에 대한 자료수집을 목적으로 실시하였다.

재료 및 방법

1. 박쥐의 포획

박쥐의 포획은 2009년 8월부터 2009년 10월까지 박쥐의 야간 휴식장소를 대상으로 실시하였으며, 야간 휴식장소에 대한 세부 조사지역은 정 등(2009a)의 자료를 참고하여 선정하였다(Table 1). 포획시에는 동굴, 폐광, 건물 등에 있는 박쥐를 포획하는데 이용되는 hand-net와 비행하는 박쥐를 포획하는데 일반적으로 이용되는 mist-net 및 harp trap를 함께 이용하였다.

2. 반향정위 녹음

조사대상 3종의 반향정위 녹음을 위하여 현장에서 포획된 개체에 대하여 견갑골 중앙에 화학발광 태그(chemiluminescent tag, 0.2g)를 부착하여 비행 중인 개체에 대한 종의 구분 및 녹음을 실시하였다. 녹음은 현장에서 태그 부착후 재방사한 개체를 대상으로 비행중 발산하는 초음파를 선별하여 녹음하였다. 박쥐가 발산하는 초음파를 실시간으로 확인하고, 녹음 및 분석하기 위해서는 heterodyne 검출과 모든 진동수에 대한 기록이 필요하다. Heterodyne 검출방법은 박쥐의 초음파를 전기적인 신호로 변환하여 '인간의 가청범위에서 들을 수 있도록 하는 것이고(Briggs and King, 1998, Ahlen and Baagoe, 1999), time expansion 시스템은 들어오는 모든 신호를 디지털 메모리에 녹음하였다가 저속으로 재생하거나 실험실 내에서 컴퓨터로 분석할 때 이용된다(Briggs and King, 1998; 정 등, 2010b). 본 연구에서

Table 1. List of localities, dates, roost types and number of specimens per species

Species	Ind.	Date	Locality	Type
Family Rhinolophidae				
Genus <i>Rhinolophus</i>				
<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	4	06 Aug '09	Youngduk(Gyeongsangbuk-do) Chongsong(Gyeongsangbuk-do)	Bridge
		27 Aug '09		
		11 Sep '09		
Family Vespertilionidae				
Genus <i>Myotis</i>				
<i>Myotis petax</i>	5	06 Aug '09	Chongsong(Gyeongsangbuk-do)	Bridge
		11 Sep '09		
		21 Sep '09		
Genus <i>Pipistrellus</i>				
<i>Pipistrellus abramus</i>	7	29 Aug '09	Gyeongju(Gyeongsangbuk-do) Ulsan(Gyeongsangnam-do)	Bridge
		11 Sep '09		
		21 Sep '09		
		18 Oct '09		

는 박쥐가 발산하는 소리를 녹음하기 위하여 heterodyne 검출 방법과 time expansion(17~125kHz)이 결합되어 있는 bat detector(Pettersson Elektronik AB, models D-240)를 이용하여 녹음하였다(정 등, 2010a).

3. Echolocation 분석

초음파 검출장비를 통해 녹음된 소리는 BatSound ver4.01(Pettersson Elektronik AB, Sweden)을 이용하여 디지털 형식으로 변환하였으며, 해당 개체의 음성을 제외한 기타 소리를 배제하기 위하여 가장 정확하고 강한 시그널 부분을 추출한 후 각 개체별로 선택하여 분석하였다. 분석은 펄스의 지속시간(pulse-duration: PD), 펄스 간격(pulse-interval: PI), 최고진동수(peak-frequency: PF) 3개 항목에 대하여 실시하였다. 펄스 지속시간은 오실로그래프(oscillogram)과 소나그램(sonagram)을 연결하여 펄스의 개수부터 감쇠까지에 대한 시간을 기준으로 측정하였으며, 펄스 간격은 펄스의 최초 개시부터 시작하여 다음 펄스가 시작될 때 까지를 측정하였다(Siemers *et al.*, 2001; Jennings *et al.*, 2004; 정 등, 2010a). 최고진동수 측정은 파워스펙트럼(power spectrum)을 이용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

관박쥐, 집박쥐, 우수리박쥐의 반향정위 펄스 형태를 비교한 결과, 펄스의 형태를 비롯하여 PD, PI, PF에 있어서도 각각의 종에 따라서 차이를 보였다. PD는 관박쥐 69.52±6.57ms, 우수리박쥐 3.72±0.53ms, 집박쥐 6.81±1.04ms로 관박쥐의 펄스 지속시간이 가장 길게 나타났으며, 그 다음으로 집박쥐와 우수리 박쥐 순으로 확인되었다. PI는 관박쥐 116.36±10.10ms, 우수리박쥐 73.30±13.93ms, 집박쥐 88.53±6.69ms로 나타났으며, PF는 관박쥐 68.67kHz, 우수리박쥐 47.65kHz, 집박쥐 45.19kHz로 확인되었다(Table 2).

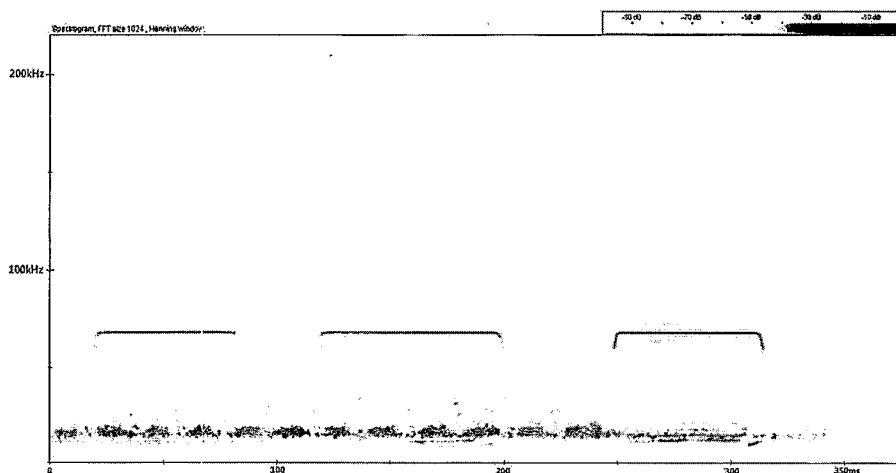
Table 2. Data on echolocation calls of *Rhinolophus ferrumequinum*, *Myotis petax* and *Pipistrellus abramus*

Species	PD (ms)	PI (ms)	PF (kHz)	No. of pulse
<i>R. ferrumequinum</i> (N=4)	69.52±6.57 (59.00~81.50)	116.36±10.10 (99.80~129.90)	68.67±0.53 (68.10~69.90)	62
<i>M. petax</i> (N=5)	3.72±0.53 (2.80~4.40)	73.30±13.93 (48.70~88.10)	47.65±1.64 (44.80~50.30)	73
<i>P. abramus</i> (N=7)	6.81±1.04 (5.00~8.30)	88.53±6.69 (78.40~96.60)	45.19±0.68 (43.40~46.20)	95

PD : Pulse duration, PI : Pulse interval, PF : Peak frequency, () : Range
Duration, interval and peak frequency are means \pm standard deviations

음향스펙트럼을 통해 확인된 관박쥐의 펄스 형태는 짧은 FM 시그널로 시작해서 긴 시간의 CF 시그널로 이어진 다음 다시 짧은 FM 시그널로 끝나는 형태를 보였다(Fig. 1). 또한 조사대상 가운데 상대적으로 긴 PD와 PI를 가지는 것으로 확인되었으며, PF도 약 69kHz로 가장 높게 나타났다(Fig. 2).

일반적으로 길이가 길고 폭이 좁은 날개 형태를 가진 박쥐는 공중을 빠르게 비행하며 곤충을 낚아채는 방법으로 먹이를 포획하지만(Briggs and King, 1988; 정 등, 2010b), 관박쥐처럼 폭이 넓고 길이가 짧은 광단형의 날개를 가진 박쥐는 복잡한 공간에서 느린 속도로 기동성 있는 비행 형태에 적응되어 있다(Jennings *et al.*, 2004; 정 등, 2010b). 따라서 본 연구 결과에서 나타난 것과 같이 관박쥐의 긴 PD는 곤충의 날개짓 소리에 대한 신호를 감지할 수 있는 가능성을 증가시키는 것으로 생각되고 있는데(Schnitzler *et al.*, 1987; Surlykke *et al.*, 1993; 정 등, 2010b), 근거리의 곤충 포획을 위하여 짧고 낮은 강도의 FM 시그널을 이용하고 복잡한 산림내 공간에서 곤충의 움직임을 파악하기 위해서 긴 CF 시그널을 이용하는 것으로 생각된다(Schnitzler and Kalko, 1998; Jennings *et al.*, 2004; 정 등, 2010b). 본 연구에서 나타난 경상북도 지역 관박쥐의 PF는 영국에서 서식하는 관박쥐의 80kHz보다 낮게 나타났으며(Briggs and King, 1998), 일본열도 관동 이북에서 확인된 65~66kHz보다 높게 확인되었다(増田・阿部, 2005).

Fig. 1. Spectrogram of echolocation call in *Rhinolophus ferrumequinum*.

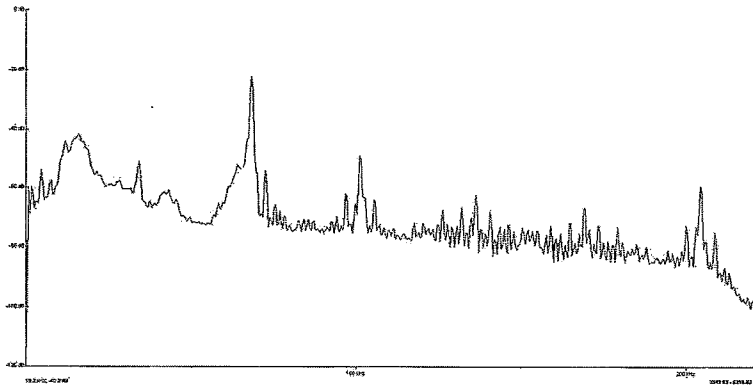


Fig. 2. Power spectrum of echolocation call in *Rhinolophus ferrumequinum*.

우수리박쥐는 PD가 3.72ms로 CF 시그널이 확인되지 않는 짧은 FM 시그널로 이루어진 펄스 형태를 나타내었으며, PF는 47.76kHz에서 확인되었다(Fig. 3 and 4). 이와 같이 FM 시그널로만 구성된 펄스 형태는 전형적으로 윗수염박쥐속(*Myotis*)이 이용하는 것으로 펄스의 형태는 거의 수직에 가깝고 직선 형태를 나타낸다(Briggs and King, 1998; 정 등, 2010b). 이러한 펄스 형태는 주변 환경에 대한 상황을 파악하여 인지하는 역할을 하고(Briggs and King, 1998; 정 등, 2010b), 목표물의 정확한 위치를 파악하는데 있어서 더욱 안정적인 것으로 알려져 있는데(Zhu *et al.*, 2008; 정 등, 2010b), 본 연구에서 확인된 우수리박쥐의 펄스 형태는 정 등(2010b)이 발표한 큰발윗수염박쥐(*Myotis macrodactylus*)의 펄스 형태와 유사한 것으로 짧은 시간의 수직적인 FM 시그널은 윗수염박쥐속(*Myotis*)의 대표적인 펄스 형태로 판단된다.

집박쥐의 펄스 형태는 CF와 FM 시그널의 혼합 형태로 FM 시그널로 시작하여 펄스의 끝으로 갈수록 CF 시그널로 마무리되는 형태를 나타내었다(Fig. 5). 이러한 음성 구조는 서식지 환경 특성에 따라서 PD, PI, PF에 있어서 일부 차이가 있기는 하지만 전형적인 집박쥐의 펄스 형태(정 등, 2009b)로, FD와 PI는 6.81ms와 88.53ms로 관박쥐와 우수리박쥐의 중간값을 보였으며, PF는 45.19kHz로 3종 가

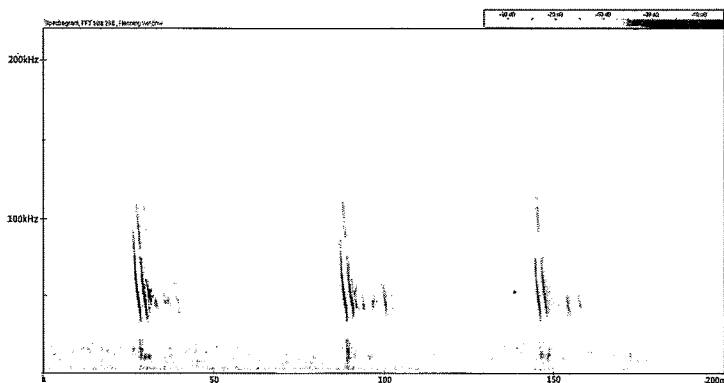


Fig. 3. Spectrogram of echolocation call in *Myotis petax*.

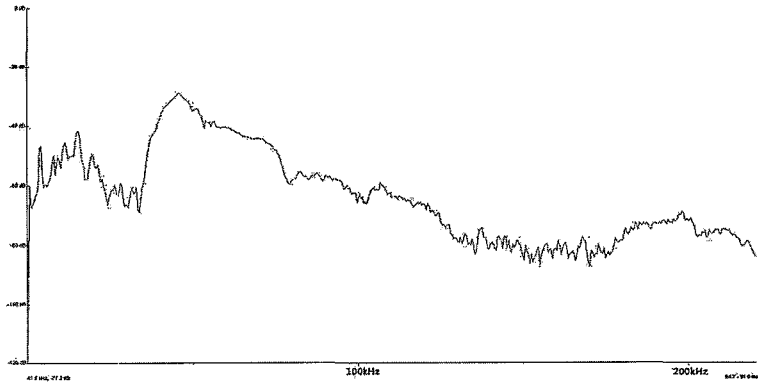


Fig. 4. Power spectrum of echolocation call in *Myotis petax*.

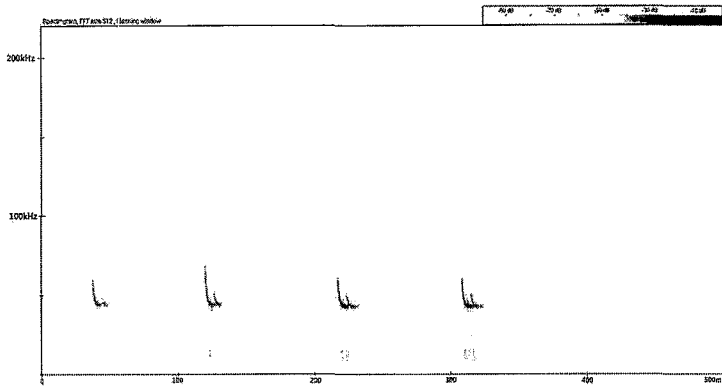


Fig. 5. Spectrogram of echolocation call in *Pipistrellus abramus*.

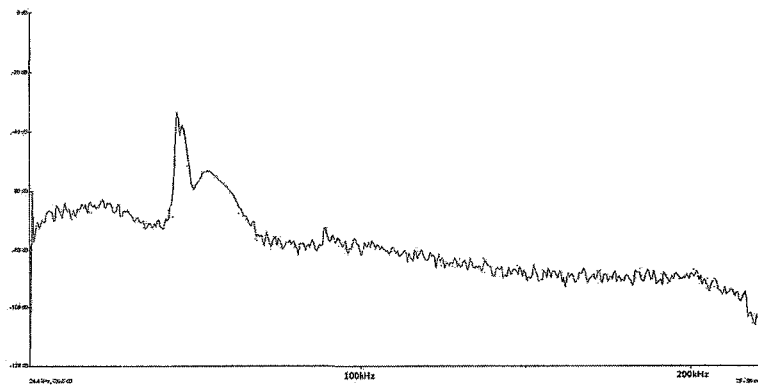


Fig. 6. Power spectrum of echolocation call in *Pipistrellus abramus*.

운데 가장 낮게 확인되었다(Fig. 6). 본 연구에서 확인된 집박쥐의 펄스 형태를 볼 때 개방공간에서의 먹이의 정확한 위치탐색을 위한 FM 시그널 그리고 복잡한 서식지 구조에서의 곤충의 반향 감지를

위한 CF 시그널을 함께 이용함으로써 조사대상종 가운데 경작지와 밭당 및 가옥을 포함하여 가장 복합적이고 다양한 서식지 환경을 이용하는 집박쥐의 생태적 특성을 반영한 결과로 사료된다. 본 연구는 우리나라에 서식하는 관박쥐속, 윗수염박쥐속, 집박쥐속의 대표적인 종에 대한 반향정위 형태를 분석함으로써 향후 음성 데이터를 활용한 종의 동정에 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 생각되며, 나아가 지리적인 차이에 의한 반향정위 패턴 변화 및 환경특성에 따른 종별 음성 연구가 추가적으로 연계되어야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 2009년도 한국자연환경보전협회 학술연구사업으로 진행되었습니다.

참고문헌

- 정철운, 한상훈, 이정일. 2009a. 박쥐의 휴식지로서 교량 이용에 관한 연구. 한국환경생태학회지. 23(3): 294-301.
- 정철운, 한상훈, 김성철, 이정일. 2009b. 환경특성에 따른 집박쥐의 반향정위(Echolocation) 시그널 분석. 한국환경생태학회지. 23(6): 553-563.
- 정철운, 한상훈, 이정일. 2010a. 집박쥐의 발성 시그널 발달에 관한 연구. 한국환경생태학회지. 24(2): 202-208.
- 정철운, 한상훈, 임춘우, 김성철, 이화진, 권용호, 김철영, 이정일. 2010b. 한국에 서식하는 관박쥐 *Rhinolophus ferrumequinum*, 집박쥐 *Pipistrellus abramus*, 큰발윗수염박쥐 *Myotis macrodactylus*의 반향정위 형태. 한국환경과학회지. 19(1): 61-68.
- Ahlen, I. and H. J. Baagoe. 1999. Use of ultrasound detectors for bat studies in Europe: experiences from field identification, surveys, and monitoring. Acta Chiro. 1: 137-150.
- Atterby, H., J. N. Aegerter, G. C. Smith, C. M. Conyers, T. R. Allnutt, M. Ruedi and A. D. McaNicoll. 2010. Population genetic structure of the Daubenton's bat(*Myotis daubentonii*) in western Europe and the associated occurrence of rabies., Eur J Wildl Res. 56: 67-81.
- Briggs, B. and D. King. 1998. The Bat Detective-A Field Guide for Bat Detection. Batbox Ltd. pp. 14-35.
- 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.
- Jennings, N. V., S. Parsons, E. K. Barlow and M. Gannon. 2004, Echolocation calls and wing morphology of bats from the West Indies. Acta Chir. 6(1): 75-90.
- Kalko, E. K. V. 1995. Insect pursuit, prey capture and echolocation in pipistrelle bats(*Microchiroptera*). Anim. Behav. 50: 861-880.
- Neuweiler, G. 1989. Foraging ecology and audition in echolocating bats. Trends Ecol. Evol. 4: 160-166.
- 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), pp. 109-181. New York:

- Plenum Press.
- Schnitzler, H. U. and E. K. V. Kalko. 1998. How echolocating bats search and find food. pp. 183-196 In Kunz, T. H. and P. A. Racey. eds. Bat Biology and Conservation. Washington: Smithsonian Institution Press.
- Schnitzler, H. U., E. Kalko, L. Miller and A. Surlykke. 1987. The echolocation and hunting behavior of the bat, *Pipistrellus kuhli*. J. Comp. Physiol. 161: 267-274.
- Schnitzler, H. U. and E. K. V. Kalko. 2001. Echolocation by insect-eating bats. BioScience. 51(7): 557-569.
- 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.
- Wilson, D. E. and D. M. Reeder. 2005. Mammal Species of the World: A Taxonomic and Geographic Reference. Third Edition. The Johns Hopkins University Press, Baltimore. p. 2142.
- 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.
- 増田 隆一, 阿部 永, 2005. 動物地理の自然史(分布と多様性の進化). 北海道大學図書刊行會, pp. 225- 241.

요 약

본 연구는 한국산 익수목 가운데 관박쥐(*Rhinolophus ferrumequinum*), 우수리박쥐(*Myotis petax*), 집박쥐(*Pipistrellus abramus*)를 대상으로 반향정위 형태를 분석하여 음성자료를 이용한 종의 동정과 생태학적 연구에 활용하기 위하여 실시하였다. 박쥐의 포획은 2009년 8월부터 2009년 10월까지 경상남북도 지역내 박쥐의 야간 휴식장소를 대상으로 실시하였다. 연구 결과, 관박쥐는 짧은 시간의 FM 시그널로 시작하여 긴 CF 시그널로 이어진 후 다시 짧은 FM 시그널로 끝나는 형태로, 긴 펄스 지속시간과 펄스 간격 그리고 높은 최고진동수를 나타내었다. 우수리박쥐는 CF 시그널이 확인되지 않고 짧은 시간의 수직적인 FM 시그널만 이용하는 것으로 확인되었으며, 펄스 지속시간이 3.72ms로 조사대상 3종 가운데 가장 적은 값을 보였다. 집박쥐는 FM 시그널로 시작하여 CF 시그널로 끝나는 형태를 나타내었으며, 최고진동수는 3종 가운데 가장 낮은 45.19kHz로 확인되었다.

검색어 : 관박쥐, 우수리박쥐, 집박쥐, 최고진동수, 펄스간격, 펄스지속시간