

## 멸종위기 야생생물 II급 토끼박쥐 *Plecotus ognevi*의 온도선호도와 동면 전략

김선숙\* · 최유성<sup>1</sup> · 김 련<sup>2</sup>

국립생태원 생태연구본부 생태기반연구실, <sup>1</sup>국립생물자원관 생물자원연구부, <sup>2</sup>(사)한국동물연구소

**The Relationship between Thermal Preference and Hibernation Strategies in Endangered *Plecotus ognevi*.** Kim, Sun-Sook\* (0000-0003-4197-4250), Yu-Seong Choi<sup>1</sup> (0000-0002-1117-6808) and Lyoun Kim<sup>2</sup> (0000-0002-8134-7887) (Division of Basic Research, Bureau of Ecological Research, National Institute of Ecology, Seacheon 33658, Republic of Korea; <sup>1</sup>Biological Resources Research Department, National Institute of Biological Resources, Incheon 22689, Republic of Korea; <sup>2</sup>Cave Research Institute of Korea, Chuncheon 24369, Republic of Korea)

**Abstract** Hibernation is regarded as a physiological and behavioral adaptation that permits the survival of animals such as bats during seasonal periods of energy shortage. This study investigated the hibernation period of *Plecotus ognevi* in the temperate climate zone and the relationship between the thermal preference and hibernating process of bats. We hypothesized that the hibernation period of bats is closely related to the external temperature and temperature preference of bat species in the temperate region. To verify this hypothesis, we surveyed the distribution of the *P. ognevi* population in South Korea, and the temperature preference and the characteristics of hibernacula of *P. ognevi*. We predict that hibernation in the bat will begin when the external temperature drops below the thermal preference of the species and will leave from hibernation when the external temperature is higher than the thermal preference. *P. ognevi* hibernated in roosts maintained in low temperature ambient conditions with  $-3.5\sim 7.5^{\circ}\text{C}$ . The body temperatures (averaged  $3.01 \pm 1.30^{\circ}\text{C}$ , ranged  $0.1\sim 7.8^{\circ}\text{C}$ ) of hibernating bats were closely related to the rock surface temperatures rather than the ambient temperatures. The bats began to hibernate in late November and final arousals occurred in mid-March, so that the total length of the hibernation was 115~120 days. The period of hibernation was strongly influenced by fluctuations in the external mean temperature. This study suggests that the onset and termination of *P. ognevi* hibernation is due to the interaction between the temperature of the hibernacula and that of the external environment and is based on the thermal preference of the bats. The study also suggests that the hibernation strategy such as thermal preference and hibernation periods of this species affect to distribution as bat species adapting to a severely climate.

**Key words:** cave-dwelling bat, hibernation, temperature, *Plecotus ognevi*, thermal preference

## 서 론

Manuscript received 9 November 2018, revised 12 December 2018,  
revision accepted 18 December 2018  
\* Corresponding author: Tel: +82-41-950-5983, Fax: +82-41-950-5853,  
E-mail: sskim108@nie.re.kr

온대지역에서 기온이 낮아지고 먹이자원이 고갈되는 시기에 박쥐가 선택하는 동면(hibernation)은 에너지 문

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

제 해결을 위한 적응방식으로 해석된다(Lyman *et al.*, 1982; Nedergaard *et al.*, 1990; Humphries *et al.*, 2003; John, 2005). 온대성 박쥐는 종간 서로 다른 환경과 생활사 전략에 따라 종 특이적인 온도선호도(species-specific thermal preference)를 선택함으로써 개체의 적합도를 높인다(Webb *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2013, 2014). 박쥐의 온도선호도는 종간 차이는 물론 개체군 간에도 차이가 나타나며(Thomas *et al.*, 1990; Nagel and Nagel, 1991; Webb *et al.*, 1996; Arlettaz *et al.*, 2000), 조상종의 기원(origin)이나 생물지리적인 분포의 차이를 반영한다(Grigg and Beard, 2000; Lovegrove, 2000; Humphries *et al.*, 2002; Kokurewicz, 2004; Kim *et al.*, 2013). 따라서 현재 박쥐가 출현된 동면장소는 대상 종에게 적합한 서식지로 가정되어지며(Ransome, 1968; Tidemann and Flavel, 1987; O'Donnell, 2000; Kunz and Lumsden, 2003; Kim *et al.*, 2013), 박쥐 종의 현재의 분포 및 행동, 생리적 특성 등은 개체의 적합도를 최대화하는 전략으로 나타나게 된다(Boyles *et al.*, 2007; Geiser and Stawski, 2011).

동면기간 동안 박쥐의 생존은 동면처 환경특성과 밀접하게 연관되기 때문에(Kokurewicz, 2004; Ruczyński *et al.*, 2005), 종 특이적인 온도선호도는 서식지 선택은 물론 분포를 제한하는 요인으로 작용되기도 한다(McNab, 1982; Geiser and Ruf, 1995; Webb *et al.*, 1996; Humphries *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2013). 토끼박쥐(*Plecotus auritus*)는 영국, 폴란드 등 유럽 서북부지역부터 한국, 일본 등 아시아 지역까지 분포한다(Corbet, 1978; Swift, 1998; Horáček *et al.*, 2000). 그러나 최근에 'west'와 'east'로 구분하여 한국, 중국, 일본 등 동아시아지역에 분포하는 *P. auritus*를 *P. ognevi*로 분리하였다(Kruskop *et al.*, 2012). 본 논문에서 토끼박쥐의 학명과 국명은 NIBR (2012a, b)에 따랐다. 토끼박쥐처럼 분포권이 넓은 종의 온도선호도는 지역 개체군간 차이를 나타내며 동면기간, 에너지소비 등 동면전략과 밀접하게 연관된다(Arlettaz *et al.*, 2000; Humphries *et al.*, 2002; John, 2005). 온도선호도와 밀접하게 연관된 동굴성박쥐의 서식지(동면처) 선택은 종특이적으로 나타나며 종간 또는 종내 차이를 나타내는 온도선호도는 동면기간 등 에너지 전략과 밀접하게 연관된다(Kim *et al.*, 2014).

온대지역에서 분포하는 박쥐의 온도선호도와 에너지 전략에 대한 선행된 연구결과(Humphries *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2013)에 기반하여 본 연구에서는 멸종위기 야생생물 II 급으로 지정된 토끼박쥐의 온도선호도와 동면기간에 대한 연구를 수행하였다. 온대지역에서 박쥐의 동면기간은 대상 지역의 온도와 박쥐 종의 온도선호도와 밀접하게 연관된다는 가설 검증을 위하여 토끼박쥐 개체군의 분포 현황을

파악하였고, 온도선호도와 동면처의 환경 특성을 도출하였다. 또한 토끼박쥐의 동면은 외부기온이 종의 온도선호도보다 낮아지는 시점에서 시작되며 외부기온이 온도선호도보다 높아질 때 동면처를 떠나갈 것이라고 예측하였다. 토끼박쥐의 주요 동면처에서 토끼박쥐 개체수의 변화와 온도선호도를 토대로 동면기간을 산정하였고, 종의 온도선호도가 서식지 선택과 분포에 미치는 영향에 대하여 논의하였다.

## 연구 방법

### 1. 조사 시기 및 박쥐 모니터링

토끼박쥐를 포함한 동굴성 박쥐류의 분포 현황을 파악하기 위해 2005년부터 2011년까지 제주도를 제외한 한국의 동굴과 폐광산을 대상으로 동면중인 박쥐조사를 실시하였다. 문헌(Youngwol-Gun, 2001; CHA, 2004; NIER,

**Table 1.** Description of 24 hibernacula used by *P. ognevi* during winter seasons from 2005 to 2016 in South Korea.

Province	Hibernaculum*	Type <sup>§</sup>	Peak counts	Year
Gangwon	BR	1	4	Jan. 2010
	DDW	2	1	Jan. 2013
	GMS	2	1	Jan. 2013
	GS	1	1	Jan. 2014
	JA	1	2	Feb. 2016
	MG	1	2	Jan. 2015
	KS	1	1	Mar. 2010
	MM	1	1	Dec. 2008
	NG	1	6	Jan. 2013
	OG	1	1	Feb. 2011
	SH	1	9	Jan. 2013
	SE	1	6	Jan. 2014
	SHS	2	7	Jan. 2011
	TC	2	3	Dec. 2008
	WC1	2	4	Jan. 2011
WC2	2	2	Jan. 2011	
YY	1	4	Jan. 2014	
YH	2	6	Jan. 2011	
Gyeongbuk	DRN	1	1	Jan. 2012
	NBI	1	121	Feb. 2016
	OSJ	2	1	Dec. 2008
Chungnam	ASR	2	1	Feb. 2012
	AJ	2	1	Jan. 2011
Chungbuk	CG	1	1	Jan. 2011
Total	24		187	

\*To preserve habitats of endangered species *P. ognevi*, the name and details of the hibernation site was omitted. <sup>§</sup>Type of site: natural cave (1) and abandoned mine (2)

2004; Pyeongchang-Gun, 2005; CHA, 2006; CHA, 2008) 과 금속광산데이터베이스 (<http://apec.kigam.re.kr>)의 자료를 참고하여 조사지역을 선정하였다. 온대성 박쥐의 동면 기간은 종간, 지역간 차이를 나타내지만 (Humphries *et al.*, 2002), 일반적으로 박쥐의 동면기간으로 간주되는 12월 부터 이듬해 2월까지 조사를 수행하였다 (McNab, 1974; Kokurewicz, 2004; Boyles *et al.*, 2007).

선행된 분포 조사(2005~2011년)를 통해 얻어진 자료 가운데 토끼박쥐가 확인된 24개 동면처에 대해 박쥐가 확인된 이후부터 2016년까지 최소 2회 이상 방문하여 매회 토끼박쥐 개체수를 확인하였으며, 각 동면처에서 관찰된 최대 개체수를 기록하였다 (Table 1). 동굴의 구조적 특징으로 인해 정확한 개체수의 파악이 어렵기 때문에 결과에 제시된 개체수는 직접 동정이 확인된 개체만 기록하였다. 본 논문에서는 멸종위기 야생생물 II급인 토끼박쥐 *Plecotus ognevi*의 서식처 보전을 위해 동굴명(또는 폐광) 대신 영문이니셜로 표기하였다 (Table 1).

## 2. 동면처의 대기온도 및 암벽온도, 박쥐의 체온 측정

본 연구에서 토끼박쥐의 온도선호도를 도출하기 위하여 두 가지를 가정하였다. 첫째, 박쥐가 동면수행을 위하여 선택하는 온도선호도는 일시적으로 변화되지 않기 때문에 매년 동일한 장소에 대한 선호성이 높다 (McNab, 1974; Webb *et al.*, 1996; Furman and Özgül, 2002). 둘째, 동면 기간 동안 동면처간 이동을 하더라도 대상종의 온도선호도는 동일하게 유지된다 (Bogdanowicz and Urbańczyk, 1983; Valenciuc, 1989; Jurczyszyn and Bajarczyk, 2001; Kokurewicz, 2004).

온대성 박쥐의 동면장소 선택은 온도와 밀접하게 관련되기 때문에 (Hock, 1951; Humphries *et al.*, 2002; Kokurewicz, 2004; Ruczyński *et al.*, 2005) 종간 온도선호도에 관한 연구수행을 위하여 동면장소의 대기온도와 암벽온도, 동면중인 박쥐의 체표면 온도를 측정하였다. 토끼박쥐의 동면처 특성을 도출하기 위하여 토끼박쥐가 확인된 동면처 24곳 중에서 5개체 이상이 지속적으로 확인된 동면처 3곳 (NBI, SH, SE)을 선정하여 토끼박쥐의 출현이 집중되는 구역에 데이터로거 (Thermo Recorder TR-52, T&D, Japan; EL-USB-TP-LCD, Lascar Electronics, London)를 설치하여 각 동면처의 온도자료를 이용하였다. 데이터로거는 동면처 내부에서 토끼박쥐의 출현이 집중된 구역 (NBI: 동굴입구로부터 80 m~150 m 구간내 2지점, SH: 입구에서 150 m 지점과 하층 광장, SE: 입구 50~70 m 광장)에 지상 1.5 m 높이에 고정 설치하였다.

동면처 내부에서 박쥐가 관찰되면 적외선 온도계 (ST80, Raytek, USA)와 온·습도계 (Testo 605-H1, Testo-171, Testo, Germany)를 이용하여 각 개체의 체온 ( $T_b$ , body surface temperature)과 주변의 암벽온도 ( $T_r$ , rock surface temperature), 대기온도 ( $T_a$ , ambient temperature)를 측정하였다. 대기온도는 각 동면처가 위치한 곳에서 가장 가까운 기상측정소의 자료를 이용하였다. 본 연구에서 조사방법은 유럽의 박쥐 모니터링 가이드라인을 준수하여 동면 개체군의 방해를 최소화하였다 (Mitchell-Jones and McLeish, 2004). 연구수행기간 동안 동면처의 조사는 연간 2회 이내로 제한였고, 조사인원은 2~3인으로 필수인원으로 구성하여 진행하였다. 동면처 방문시 동면중인 박쥐의 인위적인 각성되지 않도록 인공조명은 동면중인 박쥐에게 직접 비추지 않았고, 소음과 조명을 최소화하여 조사 시간은 30분을 넘지 않도록 하였다.

## 3. 분석방법

동면기 동안 외부환경변화에 대한 동면처 내부의 온도 안전성을 분석하기 위하여 온도변화지수 (Temperature variability index, V):  $V = (T_{\max\text{-roost}} - T_{\min\text{-roost}}) / (T_{\max\text{-external}} - T_{\min\text{-external}})$ 를 이용하였다 (Tuttle and Kennedy, 2002). 여기서 T value는 10월부터 6월까지 동면처 내부 (roost)와 외부 (external)에서 기록된 최고 온도와 최저 온도를 의미하며 지수로 나타났다. 만일 V값이 0에 가까우면 동면처의 온도 안전성이 높은 것을 의미하고 반대로 1에 가까우면 온도 변화 폭이 높아 불안정한 온도 환경을 의미한다.

에너지 문제 해결을 위하여 선택하는 박쥐의 동면은 에너지 소비를 최소화하는데 집중하지만, 체내에 에너지 저장량이 충분한 개체는 동면중 과도한 에너지 소비가 예상될지라도 보다 안정적인 환경을 선택함으로써 동면과 함께 수반되는 생리적, 생태적 위험으로부터 안전할 수 있는 최적화 전략을 선택한다 (Humphries *et al.*, 2003; Boyles *et al.*, 2007, 2011). 따라서 동면중인 박쥐가 포식이나 온도 변화에 따른 위험을 피하는 것이 가능하다면 현재 박쥐가 출현한 동면장소는 개체에 적합한 환경으로 평가할 수 있다 (Boyles *et al.*, 2007; Masing and Lutsar, 2007). 동면중인 박쥐의 체표면 온도는 체온을 대변하므로 (Barclay *et al.*, 1996; Willis and Brigham, 2003; Dausmann, 2005), 본 연구에서 토끼박쥐의 온도선호도는 동면중인 박쥐의 체표면 온도의 평균값으로 대표하였다 (Kim *et al.*, 2013). 동면중인 박쥐의 체온과 대기온도, 암벽온도와의 관계는 상관분석 (Spearman's rank correlation)으로 분석하였다.

토끼박쥐의 동면기간 산정을 위하여 토끼박쥐가 가장

**Table 2.** The inner ambient and external temperatures during the hibernation period (December and March) were measured at roosting position within three major hibernacula of *P. ognevi* in Korea.

Hibernaculum (Year)	Inner temperature (°C)		External temperature (°C)		V*
	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range	
NBI (2007/08)	2.39 ± 1.22	0~5	-6.98 ± 5.12	-20~3.1	0.2164
SH (2012/13)	1.60 ± 0.96	-0.5~3.5	-7.88 ± 5.99	-22~5.1	0.1476
SE (2014/15)	1.60 ± 2.20	-3.5~7.5	-9.08 ± 5.64	-19.8~8.9	0.3833

\*Index of temperature variability (V): The smaller value indicates a more stable internal environment that varies little with changing external conditions and a large value indicates a less stable, more variable, internal environment.

많이 관찰된 동굴(NBI)에서 2006년부터 2016년까지 토끼박쥐의 개체수 변화를 모니터링하였다. 위에서 제시한 동면기간 조사를 위한 2가지 가정에 따라서 박쥐가 도래하는 시기부터 동면처를 떠나는 시점까지를 토끼박쥐의 동면기간으로 산정하였다. 대상 동굴(NBI)은 토끼박쥐의 동면처로 이용되었기 때문에 토끼박쥐가 동면처에 도래하는 시기와 동면처를 떠나는 시기까지 1~2회의 조사를 수행하였으며, 동면 초기와 말기에 개체수 변화에 대한 모니터링도 병행하였다. 2006년부터 2016년까지 NBI에서 수행된 17회의 조사결과를 취합하여 대상종(토끼박쥐)의 동면기간을 산정하였다(Kim *et al.*, 2013). 박쥐 종의 동면기간은 종특이적인 온도선호도와 대상지역의 기온과 상호작용에 의한 다는 선행연구 결과에 따라 3개 지역 개체군을 모니터링했던 시기의 온도자료를 이용하여 동면기간 산정에 이용하였다(NBI; 2008/9년, SH; 2012/13년, SE; 2014/2015년). 토끼박쥐의 동면기간 산정은 외부 최저 기온과 동면 중인 토끼박쥐의 평균 체표면 온도선의 교차로 만들어지는 두 지점간의 거리를 대상종의 동면기간으로 산정했던 선행연구방법을 따랐다(Kim *et al.*, 2013).

## 연구 결과

### 1. 토끼박쥐 분포 현황 및 잠자리 특성

동굴성 박쥐의 동면처(동굴, 폐광) 140곳을 조사한 결과 24곳에서 토끼박쥐 187개체의 출현을 확인하였다(Table 1). 동면기 조사에서 확인된 토끼박쥐의 동면처는 강원, 경북, 충북, 충남 등 중부 이북 지역에서 분포되는 경향을 나타냈으며 토끼박쥐 동면처 24곳 가운데 19곳이 강원도에 위치하였다. 하지만 토끼박쥐 동면 최대 개체수가 출현된 동면처는 경북 지역에 위치하였다.

조사기간 동안 토끼박쥐의 개체수가 5개체 이상 지속적으로 확인된 동면처는 6곳(NBI, SHS, SH, YH, NG, SE)이었으며, 이 중 NBI에서 가장 많은 개체(121개체, 65.8%)가

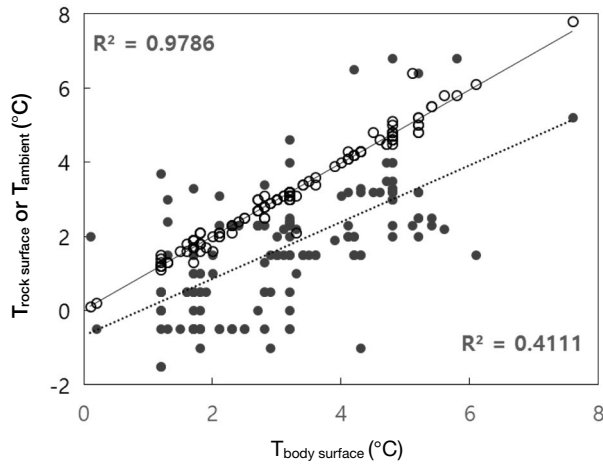
확인되었다. 24개의 동면처 가운데 7곳에서는 2개체에서 4개체가 출현되었고, 11곳의 동면처에서는 각각 1개체씩 관찰되었다(Table 1). 토끼박쥐는 동굴이나 폐광산을 동면 장소로 이용하였고, 폐광산보다는 동굴에서 더 많이 확인되었다. 동면기간 동안 관찰된 전체 동굴 14곳에서 총 160개체(85.3%)가 확인되었고, 폐광산 10곳에서 27개체(14.7%)가 확인되었다. 가장 많이 출현된 NBI를 제외한 23개의 동면처에서 토끼박쥐는 대부분 입구 주변에서 관찰되었다. 토끼박쥐는 몸통과 상완골 사이에 귀를 접고 벽면이나 천정의 작은 틈을 잠자리로 이용하였으며 몸을 드러낸 채 벽면에 낮은 곳에 매달려 잠을 자는 개체들도 다수 관찰되었다.

### 2. 토끼박쥐의 동면처 특성

동면기간(12월부터 3월까지) 토끼박쥐의 주요 동면처 NBI(2008/09년)와 SH(2012/13년), SE(2014/15년)에서 측정된 내부 대기 온도와 대상 지역의 온도를 측정하였다(Table 2). 동면처 3곳의 내부 온도는 외부 온도의 영향을 받았으나, 외부환경에 비해 안정적으로 유지되었다. 동면기간 동안 토끼박쥐에 의해 선택된 동면처 3곳의 온도변화지수(V)는 각각 0.2164(NBI), 0.1476(SH), 0.3833(SE)였다(Table 2).

### 3. 토끼박쥐의 체온과 동면처 암벽온도와 대기온도의 관계

동면 중인 토끼박쥐의 평균 체온( $T_b$ )은  $3.03 \pm 1.30^\circ\text{C}$ (range  $0.1 \sim 7.6^\circ\text{C}$ ,  $n = 179$ )였고, 토끼박쥐 잠자리 주변의 암벽온도( $T_r$ )는  $3.01 \pm 1.30^\circ\text{C}$ (range  $0.1 \sim 7.8^\circ\text{C}$ ,  $n = 179$ ), 대기온도( $T_a$ )는  $1.64 \pm 1.56^\circ\text{C}$ (range  $-1.5 \sim 6.8^\circ\text{C}$ ,  $n = 179$ )였다. 동면 중인 토끼박쥐의 체온은 대기온도에 비해 암벽온도와 높은 상관을 나타냈다(Spearman's rank correlation,  $T_b$  vs  $T_r$ ,  $r_s = 0.979$ ,  $p < 0.001$ ;  $T_b$  vs  $T_a$ ,  $r_s = 0.815$ ,  $p < 0.001$ , Fig. 1).



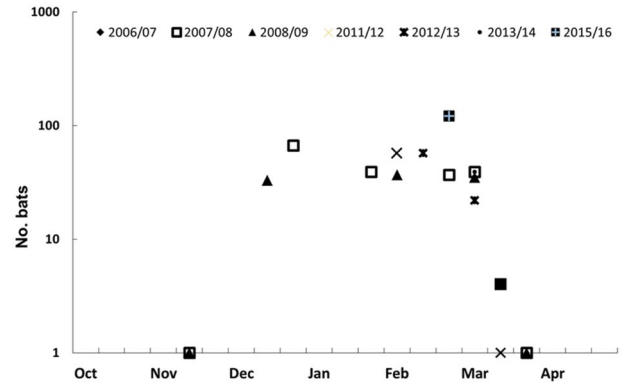
**Fig. 1.** The relationship of skin temperature ( $T_b$ ) of hibernating bats *P. ognevi* ( $n = 178$ ) with rock ( $T_r$ , open circles and solid line) and ambient ( $T_a$ , closed circles and dotted line) temperatures in South Korea.

**4. 토끼박쥐의 온도선호도와 동면기간**

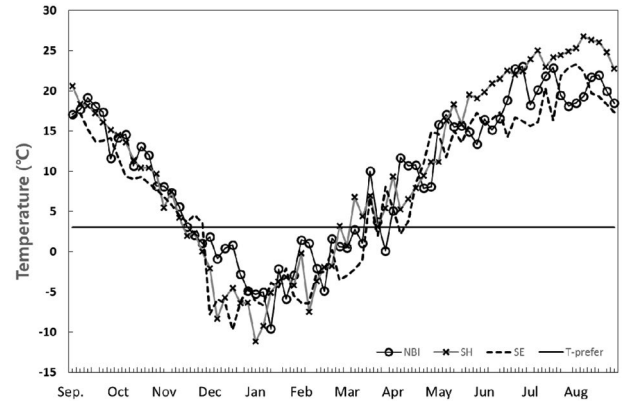
가장 많은 박쥐가 관찰된 동면처인 NBI에서 2006년부터 2016년까지 수행된 17회의 조사결과를 취합한 결과, 토끼박쥐는 11월 중순 이후에 동면처에 도래하기 시작하였고 이듬해 3월 중순 이후에 동면처를 떠났다(Fig. 2). NBI에서 토끼박쥐 개체수는 12월부터 2월말까지 최대 개체수를 기록하였다. 또한 토끼박쥐의 주요 동면처(NBI, SH, SE)가 위치한 3지역의 연간 최저 기온과 토끼박쥐의 평균 체온 온도(3°C)가 교차된 지점 간의 일수는 NBI에서는 115일, SH에서는 115일, SE에서는 120일로 나타났다(Fig. 3). 따라서 이와 같은 방법으로 산정된 토끼박쥐의 동면기간은 115~120일이었다.

**논 의**

온대지역에 서식하는 박쥐의 지리적 분포는 에너지 공급이 제한되는 동절기에 대상 지역의 온도 환경과 종특이적인 온도선호도와 상호작용에 의해 제한되어진다(Arlettaz *et al.*, 2000; Humphries *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2013). 이때 박쥐 개체의 적합도를 최대화하는 종특이적인 온도선호도는(Richter *et al.*, 1993; Dunbar and Tomasi, 2006; Dunbar and Brigham, 2010; Kim *et al.*, 2013) 동면의 성공 여부에 직접적으로 영향을 주거나 다른 요인들과의 상호작용되어 동면 전략의 차이로 나타난다(Humphries *et al.*, 2002).



**Fig. 2.** Fluctuations in the number of *P. ognevi* individuals hibernating at the hibernaculum, NBI during 7 winter seasons (from 2006/07 to 2015/16).



**Fig. 3.** The annual fluctuation curves for the ambient temperatures in the external environment of three sites (NBI, SH, SE) and the thermal preference (T-prefer) in *P. ognevi*. The data are expressed as the daily mean temperatures of 2008/2009 in NBI and 2012/2013 in SH, and 2014/2015 in SE, respectively, and as the averaged value of the body temperature (3°C) for hibernating bats.

박쥐가 선택한 온도선호도는 동면기간 동안 직면되는 에너지 고갈에 대한 적응전략으로 설명할 수 있다(Lyman *et al.*, 1982; John, 2005; Geiser, 2013). 동면중인 박쥐는 임계온도(critical temperature)에서 최저의 수면대사율을 사용하지만, 자연 상태에서는 환경 변화에 반응하기 위하여 임계치보다는 1~2°C 높은 온도에 맞추어 체온을 조절한다(Arlettaz *et al.*, 2000; Geiser, 2004; Boyles *et al.*, 2007). 온대성 박쥐의 동면전략은 종특이적인 온도선호도를 충족할 수 있는 동면처를 선택함으로써 에너지 요구량을 최소화한다(Geiser and Kenagy, 1988; Thomas *et al.*, 1990; Boyles *et al.*, 2007). 따라서 본 결과에 제시된 토끼박쥐의 체온은 박쥐가 생존을 위해 선택한 전략으로 이해할 수

있다. 온대성 박쥐의 온도선호도는 종간 차이를 나타내지만 (Kim *et al.*, 2014; *Rhinolophus ferrumequinum* (9.19 ± 2.35°C, ranged 1.8~14.3°C); *Hypsugo alaschanicus* (2.78 ± 0.98°C, ranged 2.7~6.2°C); *Miniopterus fuliginosus* (7.83 ± 1.94°C, ranged 6.8~11.6°C); *Murina hilgendorfi* (2.76 ± 1.68°C, ranged 1.7~5.4°C); *Myotis formosus* (13.64 ± 0.76°C, ranged 11.1~14.8°C); *Myotis petax* (4.52 ± 1.02°C, ranged 2.7~7.6°C), 온도선호도와 일치된 동면처를 선택함으로써 임계온도까지 체온을 낮추어 에너지 대사를 최소화시킬 수 있는 것으로 판단된다.

온대성 박쥐의 동면전략이 생리적, 생태적 기능을 적합화하는 것이라면 (Boyles *et al.*, 2011; Geiser and Stawski, 2011), 동면중인 박쥐의 체온은 대기온도에 비해 안정적인 암벽온도와 일치시킬 때 환경 변화로 인한 에너지 소비로 인한 위험은 감소될 수 있다. 동절기 동굴의 암벽온도는 동굴 내 대기온도를 상승시키며 (warm effect), 반대로 하절기에 대기온도를 낮추는 (cool effect) 역할을 하기 때문에 암벽온도는 대기온도에 비해 안정적이다 (McNab, 1974; Perry, 2013). 이때 박쥐의 체온은 암벽온도와 대기온도 사이의 열 평형에 의해 결정되어지기 때문에 동면처의 암벽온도와 대기온도는 박쥐의 잠자리 선택에 영향을 준다 (McNab, 1974; Geiser and Ruf, 1995; Boyles *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2013). 따라서 토끼박쥐의 체온이 대기온도에 비해 암벽온도와 높은 상관을 나타내는 것은 안정적인 암벽온도에 체온을 일치시킴으로 환경변화로 인한 에너지 소비를 최소화하려는 전략으로 이해된다.

토끼박쥐 동면처의 온도는 동굴성 박쥐 7종 가운데 가장 낮았다 (Kim *et al.*, 2014). 이것은 온대지역의 박쥐의 종간 온도선호는 종특이적으로 나타나며 (Webb *et al.*, 1996), 현재 분포된 지역에서 온도선호도의 종간 차이는 생물지리적 차이에 의한 것으로 해석된다 (Lovegrove, 2000). 따라서 박쥐의 온도선호도는 환경과의 상호작용에 의한 생태-생리적 적응 전략으로 설명된다. 따라서 본 연구의 결과를 바탕으로 두 가지 관점에서 논의하고자 한다. 첫째, 연구 결과에서 도출된 토끼박쥐의 온도선호도는 동면기간과 밀접하게 연관된다는 것이다. 온도선호도와 동면 전략은 밀접하게 연관되기 때문에 대상 종의 분포를 제한 요인으로 작용될 가능성을 말해준다 (Humphries *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2013). 붉은박쥐 (*Myotis formosus*)에 대한 연구에서도 온도선호도는 대상 지역에서 동면기간은 물론, 생물지리적 분포를 제한하는 요인으로 작용하였다 (Kim *et al.*, 2013). 선행연구에서 제시한 바와 같이 토끼박쥐의 온도선호도는 동면처 선택은 물론 잠자리 선택에 영향을 주며 외부 환경에 상호작용하여 동면기간 설정에 영향을 준다. 본 결과를

통하여 토끼박쥐의 동면기간은 온도선호도와 밀접하게 연관됨을 확인하였다. 가장 많은 동면 개체수가 관찰된 동면처 (NBI)에서 토끼박쥐는 11월 20일 이후에 동면처에 정착을 시작하여 이듬해 3월 중순 이전에 동면처를 떠나는 것으로 확인되어, 동면기간은 115~120일로 나타났다. 또한 토끼박쥐의 주요 동면처가 위치한 3개 지역의 최저 기온과 토끼박쥐의 온도선호도를 이용하여 산정된 동면기간은 115~120일로 실측 자료와 일치되었다. 비록 토끼박쥐와 붉은박쥐의 온도선호도는 종간 차이가 있었지만, 종특이적인 온도에 따른 동면기간의 선택에 대한 동일한 기작이 적용된 것으로 해석된다.

둘째, 토끼박쥐의 온도선호도는 대상 종의 분포에 영향을 준다. 동굴성 박쥐의 주요 잠자리로 이용되는 동굴이나 폐광의 온도 환경은 안정적이지만, 동굴 내부의 온도는 동굴의 물리적 구조와 공기의 순환에 의해 영향을 받기 때문에 단일 동굴 안에서도 다양한 미소환경이 조성된다 (Romero, 2009; Perry, 2013). 따라서 동면처의 최저 온도는 그 지역의 겨울 기온과 밀접하고 (Richter *et al.*, 1993; Solick and Barclay, 2007), 다양한 미소 서식지를 제공하는 동굴시스템은 동굴 생물 (cave fauna)의 분포와 풍부도에 영향을 준다 (Busotti *et al.*, 2006; Romero, 2009). 동면중인 박쥐의 온도선호도는 대상 종의 분포를 제한하는 요인으로 작용된다고 제안하였다 (Humphries *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2013). 유럽 (영국, 폴란드, 에스토니아)에 서식하는 토끼박쥐 (*P. auritus*) 개체군의 온도선호도 (평균 0.21°C, 범위 -2.5~3.8°C); Swift, 1998; Masing and Lutsar, 2007)는 본 결과에 제시된 것과는 차이를 나타내는데 이러한 개체군간 온도선호도의 차이는 서로 다른 환경에 적응된 결과로 해석된다. 본 연구결과에 제시된 토끼박쥐 개체군 (*P. ognevi*)의 온도선호도가 유럽 개체군 (*P. auritus*) 개체군보다 높은 것은 유럽 개체군의 서식지보다 낮은 위도에 분포하는 것과 밀접하게 연관된다. 즉 대상 지역에서 적응하기 위하여 선택된 개체군의 온도선호도는 생존전략으로 나타난다 (Tidemann and Flavel, 1987; Humphries *et al.*, 2002; Kunz and Lumsden, 2003). 토끼박쥐의 온도선호도가 다른 종에 비해 낮은 것은 조상종의 기원 (origin)이나 생물 지리적인 분포의 차이를 반영한다 (Arlettaz *et al.*, 2000; Lovegrove, 2000; Humphries *et al.*, 2002; Kokurewicz, 2004; Kim *et al.*, 2013). 따라서 본 연구에서 제시된 토끼박쥐의 온도선호도는 대상종의 분포를 제한하는 요인으로 작용될 것으로 추측된다. 영국을 포함하여 폴란드, 에스토니아 등 고위도 지역에 분포하며 본 결과에 제시된 토끼박쥐의 동면처 대부분이 중부 이북 지역에 국한되는 것 또한 토끼박쥐의 온도선호도와 연관될 것으로 판단된다. 토끼박

쥐의 온도호도를 충족할 수 있는 동면처의 유무는 토끼박쥐의 분포와 밀접할 것으로 추정된다.

특정 종의 서식지 요구 조건을 도출하기 위한 적합한 지표(indicator)는 안정적인 개체군에 의해 이용되는 서식지의 특성과 부합되기 때문에(Tidemann and Flavel, 1987; O'Donnell 2000; Kunz and Lumsden, 2003), 본 연구에서 도출된 토끼박쥐의 온도선호도는 대상 종의 서식지(잡자리) 요구 조건을 평가하는 기준으로 타당할 것으로 판단된다. 또한 토끼박쥐의 온도선호도와 동면처의 특성이 동면 전략과 밀접한 것은 물론 온대지역에 분포하는 박쥐 종의 분포와 연관된다는 관점을 제시한다. 특히 토끼박쥐의 온도선호도는 생존 전략이 집중되는 동면기에 박쥐의 적응을 이해할 수 있는 단서가 될 수 있다. 결과적으로 토끼박쥐의 온도선호도와 서식지 특성 등 개체군의 정량화된 생태학적 정보는 멸종위기종의 보전 및 위협요인 진단, 서식지 보호관리방안을 위한 방향점을 제시할 것으로 기대한다(Racey, 2009).

## 적 요

온대지역에 분포하는 박쥐가 생존을 위하여 선택하는 동면은 에너지가 고갈되는 시기에 직면하는 에너지 문제 해결을 위한 적응현상이다. 본 연구에서 온대지역에 분포하는 토끼박쥐의 온도선호도와 동면전략(동면기간)에 대한 연구를 수행하였다. 박쥐의 온도선호도와 동면전략과의 연관성을 알아보기 위하여 박쥐의 온도선호도는 동면기간에 영향을 준다는 가설 검증을 하였다. 이를 위하여 토끼박쥐의 분포를 확인하였고 동면처의 환경특성 및 토끼박쥐의 온도선호도를 도출하였다. 또한 토끼박쥐는 외부 최저 기온이 온도선호도보다 낮아지는 시기에 동면처에 도착하여 외부 최저 기온이 온도선호도보다 높아지는 시기에 동면처를 떠날 것으로 예측하였다. 동면중인 토끼박쥐의 평균 체온은  $3.03 \pm 1.30^{\circ}\text{C}$  (range  $0.1 \sim 7.6^{\circ}\text{C}$ ,  $n = 179$ )로 대기온도( $T_a$ )에 비해 암벽온도( $T_r$ )와 밀접하게 상관되었다. 토끼박쥐는 외부 기온이 온도선호도보다 낮아지는 11월 중순 이후에 동면처에 도착하여 115~120일 동안 동면처에 머물렀다. 또한 외부 기온이 온도선호도보다 높아지는 시기인 3월 중순 이후에 동면처를 떠났다. 본 연구의 결과는 토끼박쥐의 동면기간은 대상 종의 온도선호도와 외부기온과의 상호작용에 의한 것임을 시사하며 또한 대상 종의 온도선호도 및 동면기간 같은 동면전략은 대상 종의 분포 제한 요인으로 작용될 수 있다.

## 사 사

조사기간 동안 험난한 동굴 조사를 함께해 주신 김봉현 선생님(사단법인 한국동굴연구소)과 최용근(한국동굴생물연구소) 선생님께 감사 드립니다. 국내 동물 자료 공유와 원활한 조사진행을 위해 협조해주신(사)한국동굴연구소 이종희 연구원과 최재훈 연구원께도 감사 드립니다. 본 연구는 '식층성 박쥐의 생태적 역할과 기능(NIE-C-2018-2)' 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Arlettaz, R., C. Ruchet, J. Aeschmann, E. Brun, M. Genoud and P. Vogel. 2000. Physiological traits affecting the distribution and wintering strategy of the bat *Tadarida teniotis*. *Ecology* **81**: 1004-1014.
- Barclay, R.M., M.C. Kalcounis, L.H. Crampton, C. Stefan, M.J. Vonhof, L. Wilkinson and R.M. Brigham, 1996. Can external radio transmitters be used to assess body temperature and torpor in bats? *Journal of Mammalogy* **77**: 1102-1106.
- Bogdanowicz, W. and Z. Urbańczyk. 1983. Some ecological aspects of bats hibernating in city of Poznan. *Acta Theriologica* **28**: 371-385.
- Boyles, J.G., B. Smit and A.E. McKechnie. 2011. Does use of the torpor cut-off method to analyze variation in body temperature cause more problems than it solves? *Journal of Thermal Biology* **36**: 373-375.
- Boyles, J.G., M.B. Dunbar, J.J. Storm and V. Brack. 2007. Energy availability influences microclimate selection of hibernating bats. *Journal of Experimental Biology* **210**: 4345-4350.
- Busotti, S., A. Terlizzi, S. Frascetti, G. Belmonte and F. Boero. 2006. Spatial and temporal variability of sessile benthos in shallow Mediterranean marine caves. *Marine Ecology Progress Series* **325**: 109-119.
- CHA. 2004. The report of caves in Chungcheongbuk-do I.
- CHA. 2006. The report of caves in Chungcheongbuk-do II.
- CHA. 2008. The report of caves in Chungcheongbuk-do III.
- Corbet, G.B. 1978. The mammals of the Palaearctic region: a taxonomic review. British Museum (Natural History).
- Dausmann, K.H. 2005. Measuring body temperature in the field-evaluation of external vs. implanted transmitters in a small mammal. *Journal of Thermal Biology* **30**: 195-202.
- Dunbar, M.B. and R.M. Brigham. 2010. Thermoregulatory variation among populations of bats along a latitudinal gradient. *Journal of Comparative Physiology B* **180**: 885-893.
- Dunbar, M.B. and T.E. Tomasi. 2006. Arousal patterns, metabolic rate, and an energy budget for eastern red bats (*Lasiurus*

- borealis*) in winter. *Journal of Mammalogy* **87**: 1096-1102.
- Furman, A. and A. Özgül. 2002. Distribution of cave-dwelling bats and conservation status of underground habitats in the Istanbul area. *Ecological Research* **17**: 69-77.
- Geiser, F. 2004. Metabolic rate and body temperature reduction during hibernation and daily torpor. *Annual Review of Physiology* **66**: 239-274.
- Geiser, F. 2013. Hibernation. *Current Biology* **23**: R188-R193.
- Geiser, F. and C. Stawski. 2011. Hibernation and torpor in tropical and subtropical bats in relation to energetics, extinctions, and the evolution of endothermy. *Integrative and Comparative Biology* **51**: 337-348.
- Geiser, F. and G.J. Kenagy. 1988. Torpor duration in relation to temperature and metabolism in hibernating ground squirrels. *Physiological Zoology* **61**: 442-449.
- Geiser, F. and T. Ruf. 1995. Hibernation versus daily torpor in mammals and birds: physiological variables and classification of torpor patterns. *Physiological Zoology* **68**: 935-966.
- Grigg, G. and L. Beard. 2000. Hibernation by echidnas in mild climates: hints about the evolution of endothermy, p. 5-19. *In: Life in the Cold* (Heldmaier, G. and M. Klingenspor, eds.). Springer, Berlin Heidelberg.
- Hock, R.I. 1951. The metabolic rates and body temperatures of bats. *The Biological Bulletin* **101**: 289-299.
- Horáček, I., Hanák, V. and J. Gaisler. 2000. Bats of the Palearctic region: a taxonomic and biogeographic review, p. 11-157. *In: Proceedings of the VIIIth European Bat Research Symposium Vol. 1: Approaches to Biogeography and Ecology of Bats* (Woloszyn, B.R., ed.). Institute of Systematics and Evolution of Animals PAS, Krakow.
- Humphries, M.M., D.W. Thomas and D.L. Kramer. 2003. The role of energy availability in mammalian hibernation: a cost-benefit approach. *Physiological and Biochemical Zoology* **76**: 165-179.
- Humphries, M.M., D.W. Thomas and J.R. Speakman. 2002. Climate-mediated energetic constraints on the distribution of hibernating mammals. *Nature* **418**: 313-316.
- John, D. 2005. Annual lipid cycles in hibernators: integration of physiology and behavior. *Annual Review of Nutrition* **25**: 469-497.
- Jurczyszyn, M. and R. Bajaczyk. 2001. Departure dynamics of *Myotis daubentonii* (Kuhl, 1817) (Mammalia, Chiroptera) from their hibernaculum. *Mammalia* **65**: 121-130.
- Kim, S.S., Y.S. Choi and J.C. Yoo. 2013. Thermal preference and hibernation period of Hodgson's bats (*Myotis formosus*) in the temperate zone: how does the phylogenetic origin of a species affect its hibernation strategy? *Canadian Journal of Zoology* **91**: 47-55.
- Kim, S.S., Y.S. Choi and J.C. Yoo. 2014. Thermal preference and the selection of hibernacula in seven cave dwelling bats. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 258-272.
- Kokurewicz, T. 2004. Sex and age related habitat selection and mass dynamics of Daubenton's bats *Myotis daubentonii* (Kuhl, 1817) hibernating in natural conditions. *Acta Chiropterologica* **6**: 121-144.
- Kruskop, S.V., A.V. Borisenko, N.V. Ivanova, B.K. Lim and J.L. Eger, 2012. Genetic diversity of northeastern Palaearctic bats as revealed by DNA barcodes. *Acta Chiropterologica* **14**: 1-14.
- Kunz, T.H. and L.F. Lumsden. 2003. Ecology of cavity and foliage roosting bats, p. 3-89. *In: Bat Ecology* (Kunz, T.H. and M.B. Fenton, eds.). The University of Chicago Press, Chicago.
- Lovegrove, B.G. 2000. Daily heterothermy in mammals: coping with unpredictable environments, p. 29-40. *In: Life in the Cold* (Heldmaier, G. and M. Klingenspor, eds.). Springer, Berlin Heidelberg.
- Lyman, C.P., J.S. Willis, A. Malan and L.C.H. Wang, eds. 1982. Hibernation and Torpor in Mammals and Birds. Academic Press, New York.
- Masing, M. and L. Lutsar. 2007. Hibernation temperatures in seven species of sedentary bats (Chiroptera) in northeastern Europe. *Acta Zoologica Lituanica* **17**: 47-55.
- McNab, B.K. 1974. The behavior of temperate cave bats in a subtropical environment. *Ecology* **55**: 943-958.
- McNab, B.K. 1982. Evolutionary alternative in the physiological ecology of bats, p. 151-196. *In: Ecology of Bats* (Kunz, T.H., ed.). Plenum Publishing Corporation, New York.
- Mitchell-Jones, A.J. and A.P. McLeish, 2004. Bat workers' manual, 3rd ed. Joint Nature Conservation Committee.
- Nagel, A. and R. Nagel. 1991. How do bats choose optimal temperatures for hibernation? *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* **99**: 323-326.
- Nedergaard, J., B. Cannon and R. Jaenicke. 1990. Mammalian hibernation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* **326**: 669-686.
- NIBR. 2012a. National List of Species of Korea "Vertebrates".
- NIBR. 2012b. DNA Barcode system for Korean indigenous species.
- NIER. 2004. The report of caves survey in Korea.
- O'Donnell, C.F.J. 2000. Conservation status and causes of decline of the threatened New Zealand long-tailed bat *Chalinolobus tuberculatus* (Chiroptera: Vespertilionidae). *Mammal Review* **30**: 89-106.
- Perry, R.W. 2013. A review of factors affecting cave climates for hibernating bats in temperate North America. *Environmental Review* **21**: 28-39.
- Pyeongchang-Gun. 2005. The report of caves investigation in Pyeongchang-gun.
- Racey, P.A. 2009. Bats: status, threat and conservation successes. *Endangered Species Research* **8**: 1-3.
- Ransome, R.D. 1968. The distribution of the greater horse-shoe bat, *Rhinolophus ferrumequinum*, during hibernation, in



- relation to environmental factors. *Journal of Zoology* **154**: 77-112.
- Richter, A.R., S.R. Humphrey, J.B. Cope and V. Brack, Jr. 1993. Modified cave entrances: thermal effect on body mass and resulting decline of endangered Indiana bats (*Myotis sodalis*). *Conservation Biology* **7**: 407-415.
- Romero, A. 2009. *Cave Biology: Life in Darkness*. Cambridge University Press.
- Ruczyński, I., I. Ruczyńska and K. Kasprzyk. 2005. Winter mortality rates of bats inhabiting man-made shelters (northern Poland). *Acta Theriologica* **50**: 161-166.
- Solick, D.I. and R.M.R. Barclay. 2007. Geographic variation in the use of torpor and roosting behaviour of female western long-eared bats. *Journal of Zoology* **272**: 358-366.
- Swift, S.M. 1998. *Long-eared bats*. A&C Black.
- Thomas, D.W., M. Dorais and J.M. Bergeron. 1990. Winter energy budgets and cost of arousals for hibernating little brown bats, *Myotis lucifugus*. *Journal of Mammalogy* **71**: 475-479.
- Tidemann, C.R. and S.C. Flavel. 1987. Factors affecting choice of diurnal roost site by tree-hole bats (Microchiroptera) in southeastern Australia. *Wildlife Research* **14**: 459-473.
- Tuttle, M.D. and J. Kennedy. 2002. Thermal requirements during hibernation, p. 68-78. *In: The Indiana Bat: Biology and Management of an Endangered Species* (Kurta, A. and J. Kennedy, eds.). Bat Conservation International.
- Valenciuc, N. 1989. Dynamics of movements of bats inside some shelters, p. 511-517. *In: European bat research* (Hanák, A., I. Horáček and J. Gaisler, eds). Charles University Press, Praha.
- Webb, P.I., J.R. Speakman and P.A. Racey. 1996. How hot is a hibernaculum? A review of the temperatures at which bats hibernate. *Canadian Journal of Zoology* **74**: 761-765.
- Willis, C.K.R. and R.M. Brigham. 2003. Defining torpor in free-ranging bats: experimental evaluation of external temperature-sensitive radiotransmitters and the concept of active temperature. *Journal of Comparative Physiology B* **173**: 379-389.
- Yeongwol-Gun. 2001. The report of caves investigation in Yeongwol-gun.