

기후변화에 따른 상제나비의 잠재적 분포에 대한 지형요소의 영향 평가

김태근 · 조영호¹ · 송교홍¹ · 박영준¹ · 오장근^{2,*}

국립공원관리공단 보전정책부, ¹국립생태원 생태평가연구실, ²국립공원관리공단 국립공원연구원

Assessing the Influence of Topographic Factors on the Distribution of *Aporia crataegi* (Lepidoptera: Pieridae) in Northeast Asia Using a MaxEnt Modeling Approach. Kim, Tae-Geun (0000-0001-6211-1134), YoungHo Cho¹ (0000-0003-1274-6291), Kyo-Hong Song (0000-0002-3289-5334), YoungJun Park¹ (0000-0003-4441-6190) and Jang-Geun Oh^{2,*} (0000-0001-5206-6595) (Korea National Park Services, Seoul 04212, Korea; ¹Division of Ecological Assessment, National Institute of Ecology, Seocheon-gun 33657, Korea; ²National Park Research Institute, Korea National Park Services, Wonju 26441, Korea)

Abstract The purpose of this study is to evaluate topographic characteristics revealed in the predicted distribution areas of *Aporia crataegi*, according to climate change. Towards this end, this study compared the differences of topographic factors, such as altitude, mountain slope and the aspect of slope, in the distribution areas with different potential inhabitation possibilities of the *Aporia crataegi*. The inhabitation possibilities of the *Aporia crataegi* were different, according to altitude and topographic slope, and the inhabitation possibility is judged to be affected more by the topographic conditions including altitude and mountain slope than by the aspect of slope. Especially, the inhabitation possibility of the *Aporia crataegi* was higher in the higher altitude area, as time goes on furthermore. The reason is that the current climate environment, which is suitable for the potential inhabitation of the *Aporia crataegi*, is forecast to be formed with an area with high altitude. Although the difference in the aspect of slope was not statistically significant according to inhabitation possibility, the reason why the inhabitation possibility of the *Aporia crataegi* varies in the mainly southeast slope is conjectured to be derived from the warmer heat environmental condition to grow from a larva into an imago. The result drawn in this study is expected to be utilized as basic data to establish a policy soundly preserving and managing the habitat of biospecies in consideration of climate change and topographic conditions in the natural ecosystem field by using the already built up various biological resources information.

Key words: climate change, *Aporia crataegi*'s distribution, topographic factors

서 론

야생생물의 공간적 분포는 보전계획, 보호지역의 지정,

생태 및 통계학적 모델링뿐만 아니라 생물지리학, 진화, 생물다양성의 패턴, 기후변화 및 침입 종의 영향에 관한 연구를 위한 근본적인 기초를 형성한다(Thomas *et al.*, 2004; Graham and Hijmans, 2006). 또한 멸종위기종이 서식하는 데 적합한 지역을 예측하고, 이에 영향을 주는 환경요소를 이해하는 것은 생물다양성을 증진하기 위한 보전 및 복원 계획을 수립하는 데 있어서 매우 중요하다(Wilson *et al.*,

Manuscript received 16 June 2016, revised 25 June 2016,
revision accepted 26 June 2016
* Corresponding author: Tel: +82-33-769-1602, Fax: +82-33-769-1639,
E-mail: jgohh@hanmail.net

2011). 그럼에도 불구하고 멸종위기종의 분포에 관한 국내 연구는 아직까지 종의 생물적 특성과 출현한 지역의 위치 정보를 단순 기록하는 수준이고, 멸종위기종이 분포하는 패턴에 영향을 주는 다양한 환경요인에 대한 연구는 매우 드물게 이루어지고 있다(Raven and Wilson, 1992; Engler *et al.*, 2004). 특히, 지리적인 위치정보가 부족하거나 또는 존재하지 않은 지역에서 멸종위기종의 분포에 관한 연구는 주로 종이 서식하기에 적합한 지역을 예측하는데 영향을 주는 환경변수를 바탕으로 통계학적 생물종 분포모델(SDMS)을 사용하였다(Guisan and Thuiller, 2005; Elith and Leathwick, 2009). 초창기 생물종 분포모델은 생물종이 출현한 지역과 출현하지 않은 지역 혹은 그 밖의 지역의 환경특성과 상관관계를 이용하여 생물종의 분포를 예측한다(Elith *et al.*, 2006). 하지만 최근에는 특정지역에서 생물종이 서식하지 않는다는 확실한 과학적 근거가 없는 이상, 출현지점의 정보만을 이용하여 기후, 지형, 식생 등의 기후환경변수에 따른 분포특성을 분석하는 연구가 여러 지역에서 다양한 생물분류군을 대상으로 활발히 진행되고 있다(Phillips *et al.*, 2006; Phillips and Dudik, 2008).

생물종 분포를 예측하기 위해서, 출현정보만을 이용하는 모델 중에서 상대적으로 예측정확도가 높고 모델의 우수성이 여러 선행연구에서 입증되고, 위치자료와 관련된 공간오차 및 5개 지점 정도의 적은 수의 자료를 이용하여 유

용한 모델을 개발할 수 있다는 장점이 있는 MaxEnt 모델링이 널리 활용되고 있다(Ficetola *et al.*, 2007; Ward, 2007; Baldwin, 2009; Cao *et al.*, 2013).

본 연구에서는 기후변화에 따라서 예측된 상제나비의 분포지역에서 나타나는 지형적 특성을 평가하고자 한다. 이를 위해서 상제나비의 잠재적인 서식가능성이 다른 분포지역에서 고도, 산지경사, 그리고 사면향 등 지형요소의 차이를 평가하였다.

재료 및 방법

1. 생물종 자료

상제나비의 표본은 한반도에 인접한 동북아시아 국가를 대상으로 수집하였다. 한국의 표본은 개인이 소장하고 있는 표본을 사용하였으며, 북한의 표본은 2010년 국립생물자원관과 헝가리 자연사박물관의 교류를 통해 확보된 표본을 사용하였다. 또한 한국과 북한의 좌표와 해발고도는 구글어스를 통해 획득한 데이터를 사용하였다. 중국의 표본은 2013년 Jilin의 Yanbian과 Baishan, 일본의 표본은 2014년 북해도, 몽골의 표본은 2010년과 2013년에 Arkhangai, Bulgan, Hovsgol, Selenge, Tov, 러시아의 표본은 Primorsky Kray에서 채집된 표본을 사용하였다. 한국과

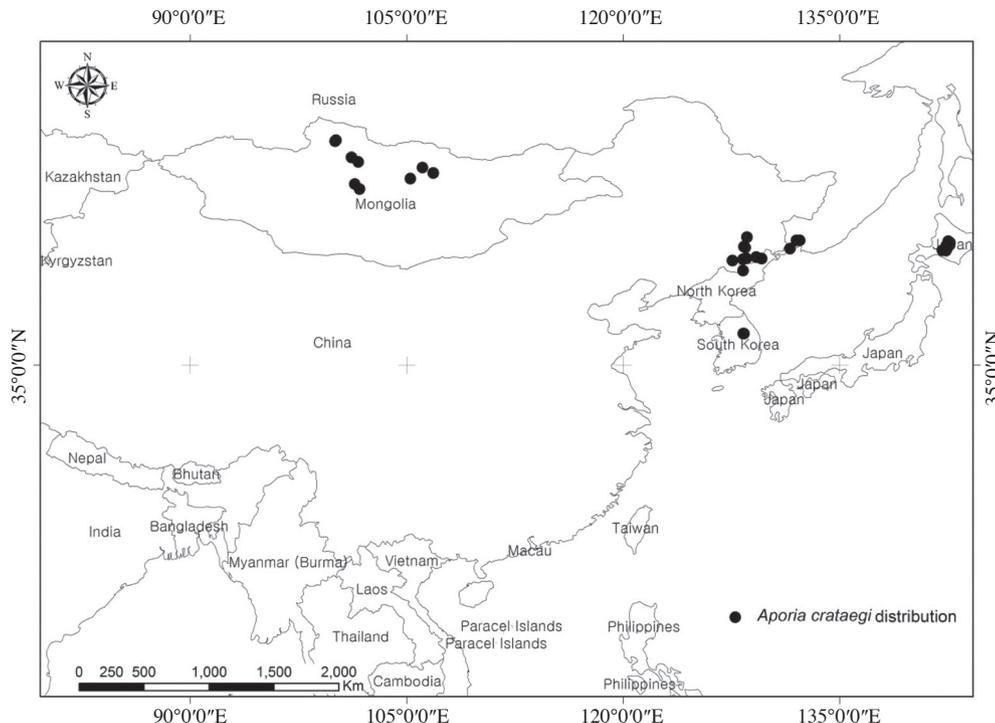


Fig. 1. Distribution of *Aporia crataegi* in the northeast Asia. The black spots (●) show the sampling site.

북한의 표본을 제외한 국가의 좌표와 해발고도는 채집 당시 현지에서 측정하였다.

각 국가의 채집 지점 수는 한국 2곳, 북한 1곳, 중국 9곳, 일본 12곳, 몽골 9곳, 러시아 3곳으로 총 36곳의 지점(Fig. 1)이 분석에 사용되었다(Kim *et al.*, 2015).

2. 지형자료

지형적인 특성은 공간해상도가 90 m인 SRTM(Shuttle Radar Topographic Mission) 수치표고자료를 이용하여 생성된 해발고도, 지형경사 그리고 사면향의 자료를 이용하였다. SRTM 수치표고자료는 레이더 위성영상자료를 이용하여 전 지구적 규모에서 지형의 높이를 나타내고자 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 JPL(Jet Propulsion Laboratory)과 NIMA(National Imaging & Mapping Agency)가 독일과 이탈리아의 우주국과 협동으로 제작하여 CGIAR-CSI에서 제공하고 있다(Jarvis *et al.*, 2008).

Table 1. Comparison of habitat suitability among the time group.

Between periods	Estimate	Std. error	t value	Pr(> t)
y2050-current	-0.02394	0.00206	-11.622	< 1e-04***
y2070-current	-0.02756	0.00206	-13.376	< 1e-04***
y2070-y2050	-0.00361	0.00206	-1.754	0.185

Table 2. The table of ANOVA analysis for the difference of Possibility of potential geographic distribution with topographic factors.

Dependence Var.	Independence Var.	F value	Pr(>F)
Altitude	Suitability class	24.207	1.26E-15***
Slope	Suitability class	26.754	2.00E-16***
Aspect	Suitability class	0.398	7.55E-01

***, **, and * is significant at $\alpha < 0$, $\alpha < 0.01$, and $\alpha < 0.05$, respectively.

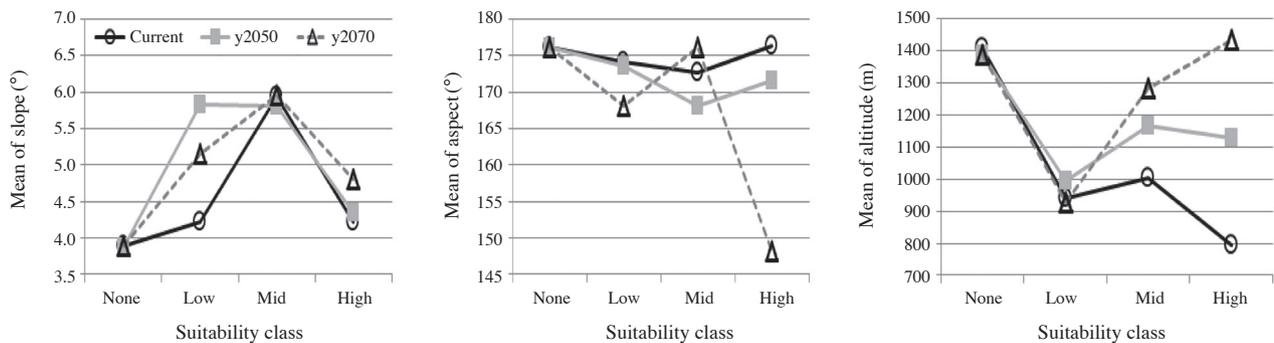


Fig. 2. Possibility of potential geographic distribution by topographical characteristics.

3. 자료분석

본 연구에서는 Kim *et al.*(2015)이 수행한 방법을 적용하여 예측된 상제나비의 분포결과를 바탕으로, 지형요소에 따라서 상제나비의 서식가능성의 차이가 있는지를 분석하였다. 이를 위해서 현재와 미래에 예측되는 상제나비 서식가능성의 차이가 있는지를 비교하고, 25% 단위로 구분한 상제나비 서식가능성이 고도, 산지경사, 그리고 사면향에 따라서 차이가 있는지를 비교하였다. 이는 세 집단 이상의 평균이 모두 같은지를 검정하는 분산분석을 통해서 평가하였다.

서식가능성의 구분은 25% 크기로 부적합(None, <25%), 적합 낮음(Low, 25~50%), 적합 보통(Mid, 50~75%), 적합 높음(High, >75%)의 4개 등급으로 하였다. 지형의 특성은 고도, 경사, 그리고 사면방향으로 하였다.

자료의 분포가 정규성을 만족하지 않는 경우, 평균을 통해 비교하고자 하는 대상의 차이를 평가할 수 없으므로 모집단의 자료특성을 고려하지 않는 비모수적인 방법인 kruskal-wallis 분산분석을 적용하고, 지형요소에 따른 상제나비 서식가능성의 차이는 Turkey 사후검정을 통해서 평가하였다(Tukey, 1949; Kruskal and Wallis, 1952). 통계적 분석은 R-3.2.2 통계 패키지를 이용하였다(R Core Team, 2016).

결과 및 고찰

1. 상제나비의 잠재적 서식지역의 지형적 특성

지형요소에 따라서 상제나비가 잠재적으로 서식할 가능성의 차이를 비교하기 전에, 현재와 미래 사이에서 상제나비가 서식할 가능성의 차이는 통계적으로 유의(Pr(>F) = 2.20E-16)한 것으로 나타났다. 현재와 미래시기에 따라서 상제나비가 서식할 가능성의 차이를 상호비교하기 위

하여 사후검정인 Tukey 분석을 실시하였다. 상제나비가 현재에 서식할 가능성과 미래(2050년대, 2070년대)에 서식할 가능성의 차이는 통계적으로 유의하고, 2050년대에 상제나비가 서식할 가능성은 2070년대에 상제나비가 서식할 가능성과 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 1). 이는 생장과 생존과 관련된 기후환경의 차이에 따라서 상제나비가 서식할 가능성은 다를 수 있다고 추측된다.

서식가능성을 25%씩 4개로 구분된 지역에서 해발고도, 지형경사, 그리고 사면방향의 차이를 비교한 결과, 사면방향을 제외한 고도와 지형경사의 차이가 있는 것으로 나타났다, 상제나비가 서식하는 데 사면방향의 영향보다는 고도와 산지경사의 영향을 더 받을 것으로 예상된다(Table 2).

25%단위로 구분한 서식가능성이 지형적인 조건에서 차이가 있는지를 비교하기 위해서 Tukey 방법을 이용하여 사후 검정한 결과, 서식가능성이 낮은 지역(50% 이하, None, Low)에서는 미래와 현재시기에 상관없이 고도에 의한 서식가능성의 차이는 없고, 서식가능성이 높은 지역(50% 초과, Mid, High)은 미래에 갈수록 고도가 점차 높아지는 것으로 나타났다(Fig. 2). 이는 현재에 상제나비에게 적합한 기후조건을 갖는 지역이 미래에는 고도가 높은 지역에서 나타날 것으로 판단되기 때문이다. 상제나비의 서식가능성에 따라서 산지경사의 차이가 있는지를 평가한 결과, 서식가능성이 높은(>75%, high)지역의 산지경사는 미래로 갈수록 높아지는 것으로 나타났다. 사면향의 경우, 남동쪽 사면에서 상제나비가 다양하게 서식할 것으로 나타났다(Fig. 2).

이는 상제나비가 서식하기에 적합한 지역의 현재 기후환경이 미래에는 적합하지 않을 수 있고, 고도와 산지경사 등 지형적 조건에 의해서 나타나는 기후적인 차이가 상제나비의 서식환경에 영향을 미칠 것으로 기대된다(Bennie *et al.*, 2013). 비록 사면향에 따른 서식가능성의 차이는 통계적으로 유의하지 않지만, 주로 남동사면에 상제나비가 서식할 가능성이 다양하다는 것은 유충에서 성충으로 성장하기 위해서 더욱 따뜻한 열 환경조건에 기인할 것으로 추측된다(Weiss *et al.*, 1988).

적 요

본 연구는 기후변화에 따라서 예측된 상제나비의 분포 지역에서 나타나는 지형적 특성을 평가하고자 한다. 이를 위해서 상제나비의 잠재적인 서식가능성이 서로 다른 분포지역에서 고도, 산지경사, 그리고 사면향 등 지형요소의

차이를 비교하였다.

고도와 지형경사에 따라서 상제나비가 서식할 가능성은 다르게 나타났고, 사면방향에 대한 영향 보다는 고도와 산지경사의 지형조건에 영향을 더 받을 것으로 나타났다. 특히 미래로 갈수록 상제나비의 서식가능성은 고도가 높은 지역에서 높게 나타났는데, 이는 상제나비가 잠재적으로 서식하기 적합한 현재의 기후환경이 미래에는 고도가 높은 지역으로 형성될 것으로 예상된다. 비록 서식가능성에 따라서 사면향의 차이는 통계적으로 유의하지 않지만, 주로 남동사면에 상제나비의 서식가능성이 다양하다는 것은 유충에서 성충으로 성장하기 위해서 더욱 따뜻한 열 환경조건에 기인할 것으로 추측된다.

본 연구에서 유도된 결과는 기존에 구축된 다양한 생물 자원 정보를 활용하여 자연생태계분야에서 기후변화와 지형적인 조건을 고려하여 생물종의 서식지를 온전하게 보전하고 관리하는 정책을 수립하는 데 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Baldwin, R.A. 2009. Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy* **11**: 854-866.
- Bennie, J., C.R. Lawson, R.J. Wilson, J.A. Hodgson, C.D. Thomas, C.T.R. Holloway, D.B. Roy and T. Brereton. 2013. Range expansion through fragmented landscapes under a variable climate. *Ecology Letters* **16**(7): 921-929.
- Cao Yong, R.E. Dewalt, J.L. Robinson, Tari Tweddale. 2013. Using Maxent to model the historic distributions of stonefly species in Illinois streams: The effects of regularization and threshold selections. *Ecological Modelling* **259**: 30-39.
- Eliith, J., S. Ferrier, F. Huettmann and J. Leathwick. 2006. The evaluation strip: A new and robust method for plotting predicted responses from species distribution model. *Ecological Modelling* **186**(3): 280-289.
- Eliith, J. and J.R. Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **40**: 677-697.
- Engler, R., A. Guisan and L. Rechsteiner. 2004. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal Applied Ecology* **41**: 263-274.
- Ficetola, G.F., W. Thuiller and C. Miaud. 2007. Prediction and validation of the potential global distribution of a problematic alien invasive species - the American bullfrog. *Diversity and Distributions* **13**: 476-485.
- Guisan, A. and W. Thuiller. 2005. Predicting species distribu-

- tion: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* **8**: 993-1009.
- Graham, C.H. and R.J. Hijmans. 2006. A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. *Global Ecology and Biogeography* **15**: 578-587.
- Jarvis, A., H.I. Reuter, A. Nelson and E. Guevara. 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Kim, T.G., Y.G. Han, O.S. Kwon and Y.H. Cho. 2015. Changes in *Aporia crataegi*'s potential habitats in accordance with climate changes in the northeast Asia. *Journal Ecology and Environment* **38**(1): 15-23.
- Kruskal, W.H. and W.A. Wallis. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* **47**(260): 583-621.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**: 231-259.
- Phillips, S.J. and M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **31**: 161-175.
- Raven, P.H. and E.O. Wilson. 1992. A fifty-year plan for biodiversity surveys. *Science* **258**: 1099-1100.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Thomas, C.D., A. Cameron, R.E. Green, M. Bakkenes, L.J. Beaumont, Y.C. Collingham, B.F.N. Erasmus, M.F.D. Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A.S.V. Jaarsveld, G.F. Midgley, L. Miles, M.A. Ortega-Huerta, A. Townsend Peterson, O.L. Phillips and S.E. Williams. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* **427**: 145-148.
- Tukey, J.W. 1949. Comparing individual Means in the Analysis of Variance. *Biometrics* **5**(20): 99-114.
- Ward, D.F. 2007. Modelling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand. *Biological Invasions* **9**: 723-735.
- Weiss, S.B., D.D. Murphy and R.R. White. 1988. Sun, slope and butterflies: topographic determinants of habitat quality for *Euphydryas editha*. *Ecology* **69**: 1486-1496.
- Wilson, C.D., D. Roberts and N. Reid. 2011. Applying species distribution modelling to identify areas of high conservation value for endangered species: A case study using *Margaritifera margaritifera*(L.). *Biological Conservation* **144**: 821-829.