

서식지 적합 지수를 이용한 멸종위기식물 단양쑥부쟁이와 층층둥굴레의 대체서식지 평가

이보은·김정욱*·김남일**·김재근†

서울대학교 생물교육과
*인하대학교 사회인프라공학과
**춘천교육대학교 과학교육과

Evaluation on Replacement Habitat of Two Endangered Species, *Aster altaicus* var. *uchiyamae* and *Polygonatum stenophyllum* Using Habitat Suitability Index

Bo Eun Lee·Jungwook Kim*·Nam-Il Kim**·Jae Geun Kim†

Department of Biology Education, Seoul National University

*Department of Civil Engineering, Inha University

**Department of Science Education, Chuncheon National University of Education

(Received : 19 September 2017, Revised: 13 October 2017, Accepted: 13 October 2017)

요약

4대강 사업 공사로 인해 한강수계에서 자생하던 멸종위기 야생생물 II급인 단양쑥부쟁이와 층층둥굴레의 서식지가 소실되어 이에 대한 대안으로 대체서식지가 조성되었다. 본 연구에서는 조성된 대체서식지가 각 종의 서식에 적합 여부를 파악하기 위하여 서식지 적합 지수(Habitat Suitability Index; HSI)를 이용하였다. 2015년 10월부터 2016년 7월까지 경기도 여주 강천섬과 섬강 일대에 위치한 단양쑥부쟁이 대체서식지와 강천섬과 충북 충주 영죽지구에 위치한 층층둥굴레 대체서식지를 대상으로 HSI를 평가하였다. 단양쑥부쟁이의 평가 변수로는 서식 기질(매몰되지 않은 자갈의 비율), 고도 범위, 토양 양분, 광 조건 4가지를 선정하였고, 층층둥굴레는 토성, 광 조건, 동반 위해종의 피도 3가지를 선정하여 HSI를 이용한 대체서식지 적합성 평가를 수행하였다. 평가 결과, 강천섬의 단양쑥부쟁이(HSI = 0.839)와 층층둥굴레(HSI = 0.846)의 대체서식지 모두 비교적 높은 적합지수를 나타내었으나, 섬강 일대의 단양쑥부쟁이 대체서식지와 영죽지구의 층층둥굴레 대체서식지는 대체서식지로서 적합하지 않음으로 판단되었다(HSI = 0). 또한 이들 부적합한 대체서식지의 경우, 자생지 인근에서 서식에 적합한 장소를 새로이 선정하는 것이 더 바람직할 것으로 판단된다. 본 연구는 식물종에 대해 HSI를 적용한 국내 최초의 시도로, 식물 서식처에 대한 HSI의 효용성을 증명하였다.

핵심용어 : 대체서식지, 서식지 적합 지수(HSI), 서식지 평가 절차(HEP), 적합 지수(SI)

Abstract

As a result of the Four-River Restoration Project in Korea, the habitat of endangered plant species of *Aster altaicus* var. *uchiyamae* and *Polygonatum stenophyllum*, which had been natively grown in the riparian zone of Namhan River, was destroyed and artificial replacement habitats were created. In this study, Habitat Suitability Index (HSI) was used to determine whether the replacement habitats are suitable for each species or not. From October 2015 to July 2016, Habitat Evaluate Procedures (HEP) were conducted on two replacement habitats of *A. altaicus* var. *uchiyamae* (Gangcheonsum and Sum-River) and on two replacement habitats of *P. stenophyllum* (Gangcheonsum and Youngjuk) in the Namhan River watershed. As evaluation parameters for *A. altaicus* var. *uchiyamae* habitat, habitat matrix (ratio of unburied gravel), height above the ordinary water level, soil nutrients, and light conditions were selected and for *P. stenophyllum* habitat, soil texture, light conditions, and coverage of companion species were selected. HSI was applied to evaluate the suitability of each replacement habitat. According to the result of the evaluation, replacement habitats of *A. altaicus* var. *uchiyamae* and *P. stenophyllum* located in Gangcheonsum have relatively high HSI values as 0.839 and 0.846, respectively. On the other hand, replacement habitats of *A. altaicus* var.

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Biology Education, Seoul National University
E-mail: jaegkim@snu.ac.kr

uchiyamae in Sum-River and *P. stenophyllum* in Youngjuk zone have HSI value of 0, indicating unsuitable habitats for these species. This is the first attempt to apply HSI for plant species in Korea and proved the usefulness of HSI on plants.

Key words : Habitat Evaluate Procedures (HEP), Habitat Suitability Index (HSI), Replacement Habitat, Suitability Index (SI)

1. 서 론

단양쑥부쟁이(*Aster altaicus* var. *uchiyamae*)는 하천변 모래사주에 서식하는 국화과(Compositae)의 이년생 초본으로, 전세계적으로 우리나라의 경상북도와 충청북도에만 한정적으로 분포하는 한국 특산식물이며, 환경부 지정 멸종위기 야생생물 II급에 속한다. 단양쑥부쟁이는 하천변에 생육하여 홍수 등의 교란에 직면해 있으며, 개체군의 변동이 심하다. 또한 하천변 범람원의 개발 및 충주댐의 건설에 의한 생육지 침수 등으로 인해 자생지가 파괴되어 그 개체수가 감소하고 있다(National Institute of Biological Resources, 2010).

층층등굴레(*Polygonatum stenophyllum*)는 백합과(Liliaceae)의 다년생 초본으로, 우리나라에 분포하는 10여종의 등굴레속(*Polygonatum*) 식물 중 유일하게 환경부 지정 멸종위기 야생생물 II급으로 지정되어 있다. 층층등굴레는 북방계 식물로 전세계적으로 우리나라의 충청북도 단양을 남쪽 한계로 하여 북쪽으로 분포하고 있다고 하나, 실제 발견된 자생지의 수는 극소수에 불과하다(Jang et al., 1998).

2008년 하반기부터 2012년까지 한강, 낙동강, 금강, 영산강을 준설하고 보를 설치함으로써 하천의 저수량을 늘리고 하천생태계를 복원하는 목적으로 4대강 사업이 시행되었다. 4대강 사업으로 인해 식물, 어류, 양서·파충류, 무척추동물 등의 여러 생물종의 하천 서식지가 교란되었고, 이 중에는 멸종위기 야생생물로 지정된 종들도 일부 포함되어 있다. 4대강 사업에 의해 서식지가 교란된 멸종위기 야생생물의 보전 및 복원을 위해 인근 유역에 대체서식지를 조성하였다. 남한강 수계에서 자생하던 멸종위기 야생생물 II급 종으로 지정된 단양쑥부쟁이와 층층등굴레 모두 그 자생지가 소실되어 이에 대한 대안으로 대체서식지가 조성되었다.

그러나 우리나라의 경우, 현재까지 대체서식지에 관한 명확한 개념이나 규정, 지침이 없는 실정이다. 자연환경보전법 제2조 11항에서 대체자연의 정의를 '기존의 자연환경과 유사한 기능을 수행하거나 보완적 기능을 수행하기 위하여 조성하는 것'으로 규정하여 이러한 대체자연의 한 부분으로서 대체서식지를 이해하고 있으며, 이에 근거하여 대체서식지의 조성이 이행되고 있다.

미국의 경우, 서식지의 기능을 포함한 습지 관리 규정과 정책에 대한 오랜 역사를 가지고 있다. USACE(Reppert, 1992)에서 제시하는 대체습지의 개념은 각종 개발로 인해 불가피하게 훼손되거나 영향을 받을 수 있는 모든 습지를 보상하여 조성되는 습지로, 서식지 기능을 포함하는 습지를 제시하고 있다. 종 보전을 위한 대체서식지의 조성을 위해

많은 연구 또한 수행되었다. 대체서식지의 위치 선정에 대해서는 대상종의 생태적 특성을 반영하는 것이 가장 중요하며, 관리 정보를 종합적으로 분석하여 평가 또한 수행되어야만 한다(Box, 1996). 나아가 이주된 지역에서 지속적인 생존이 가능하도록 이주된 종의 생존뿐만 아니라 인접지역에서 서식하는 개체군과의 상호 연결성이 높아지도록 고려해야 한다(Pryke and Samways, 2001).

우리나라는 현재 대체서식지 조성 및 관리에 대한 체계적인 기준 부재로 적절하지 않은 입지 선정이나 계획 및 설계, 조성, 유지, 관리에 있어 대상 생물종의 생태적 특성을 고려한 대체서식지 조성 및 관리방안이 마련되지 않아 대체서식지 조성에 대한 실질적인 효과에 많은 의문이 제기되고 있다(Ministry of Environment, 2011). 뿐만 아니라 대체서식지의 조성 이후 평가 및 유지관리에 관한 평가 등이 체계적으로 수행되고 있지 않다. 현재 실시되고 있는 '환경영향평가'는 각종 개발, 사업 등이 동·식물에 미치는 영향에 대해 세부적으로 파악하기 어렵다. 또한 현재의 예측·평가 과정은 정량적인 측정이 어려워 특정 개발 사업에 의한 장·단기적 영향을 도출하는데 많은 어려움이 있다.

서식지 적합 지수(Habitat Suitability Index; 이하 HSI)는 미국 어류 및 야생동물 관리국(U.S. Fish and Wildlife Service, 1980)에 의해 개발된 것으로, 한 종이 이용 가능한 서식지의 정량적, 정성적 특성을 규명하기 위해 환경과의 상호작용에 관한 연구를 바탕으로 개발되었다. 서식지에 영향을 줄 수 있는 서식지의 질을 대변하는 환경 요소들을 정량화함으로써 연구지역의 환경을 정량적으로 평가 및 예측할 수 있으며, 주관적 판단이나 타당성이 없는 가정을 배제한 비교적 객관적인 평가를 가능하게 하는 장점을 지닌다(Gibson et al., 2004).

HSI는 담비(Allen, 1982), 비버(Allen, 1983), 토끼(Warren et al., 2016), 멧돼지(Froese et al., 2017)와 같은 포유류나 송어(Raleigh et al., 1884), 큰입배스(Stuber et al., 1982), 메기(Alexiades and Encalada, 2017) 등의 어류와 같이 대부분 동물 종을 대상으로 이용되어 왔다. 또한 대합조개 양식(Vincenzi et al., 2006), 굴 양식장(Cho et al., 2012), 주름미더덕 어장(Cho et al., 2013) 등과 같이 해양 서식지를 대상으로 적합한 지역을 선정하거나 평가하는데도 많이 이용되어 왔다.

그러나 현재까지 국내에서 식물 종을 위한 대체서식지에 대한 평가는 이루어지지 않았으며, 조사된 적합한 식물 서식지 조건(You and Kim, 2010; Lee et al., 2017)조차 정량화하여 평가되지 않고 있다. 본 연구에서는 4대강 사업으로 조성된 단양쑥부쟁이와 층층등굴레의 대체서식지가 각

종의 서식에 적합한지를 정량적으로 분석하기 위하여 HSI를 이용하였다. 대체서식지를 선정하는 과정에서 입지에 대한 평가가 이루어진 후 대상 식물종이 이식되어야 하나, 본 연구에서는 이미 식물이 이식된 장소를 대상으로 대체서식지 평가를 진행하였다. 이는 현재 이식된 식물의 생육 상태를 통해 대체서식지 평가 방법이 제대로 이루어질 수 있는지를 검증하는 목적을 달성하기 위한 한 방법일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이슈가 되고 조사의 필요성이 뚜렷한 단양쭉부쟁이와 층층동굴레의 대체서식지 지점을 대상으로 선정하고, HSI를 이용하여 대체서식지의 기능을 정량적으로 평가하고 분석하였다. 나아가 평가 결과를 토대로 문제점을 도출하고, 효과적으로 대체서식지가 유지되기 위한 개선방안을 제안하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 단양쭉부쟁이 및 층층동굴레의 서식지 환경과 생육 상태 분석

본 연구에서는 4대강 사업 구간 내 분포하는 단양쭉부쟁이 대체서식지 중 여주 강천섬과 원주 섬강 유역 두 곳을 선정하여 현장 조사를 수행하고, 문헌 자료를 분석하였다. 강천섬의 단양쭉부쟁이 대체서식지는 경기도 여주시 강천면의 강천섬 유원지에 위치하며, A지구, B지구, C지구로 구분하여 관리되고 있다. 섬강 유역의 단양쭉부쟁이 대체서식지는 강원도 원주시 부론면에 위치한다. 남한강과 만나는 섬강의 하류 지역에 위치하며, 제내지에 조성되어 있다(Fig. 1; +1, +2). 단양쭉부쟁이의 자생지 중 대체서식지와 인접한 지역인 여주 강천섬 내에 위치한 자생지를 조사하였다(Fig. 1; +1).

층층동굴레 역시 남한강의 4대강 사업 구간 내 분포하는 여주 강천섬과 충청북도 충주시 양성면 강천리에 위치한 영죽지구 두 곳의 대체서식지를 선정하여 현장 조사를 수행하고, 문헌 자료를 분석하였다(Fig. 1; +1, +3). 층층동굴레의 자생지 중 대체서식지와 인접한 지역인 여주 강천섬 내에 위치한 자생지를 조사하였다(Fig. 1; +1).

단양쭉부쟁이와 층층동굴레에 관한 기존의 선행 연구를 통해 생육과 관련된 환경 요인들을 분석하여, SI 변수를 산정하였다. 현장 조사는 2015년 11월 ~ 2016년 7월 동안 계절별 조사를 수행하였다. 단양쭉부쟁이 서식지 토양의 가용성 양분 및 층층동굴레 서식지 토양의 토성을 확인하기 위해 토양을 채취하였다. 채취한 토양은 실험실에서 식물의 잔뿌리를 제거한 후, 2 mm 체를 이용하여 거른 토양을 분석에 사용하였다. NO₃-N과 NH₄-N은 2M KCl 용액으로 추출한 것을 각각 Hydrazine법(Kamphake et al., 1967)과 Indophenol법(Liddicoat et al., 1975)으로, PO₄-P는 Bray 용액으로 추출하여 Ascorbic acid 환원법(Solorzano, 1969)을 사용하여 비색 정량하였다. 토성은 비중계 분석(Carter, 1993)으로 모래, 미사, 점토의 함량을 구한 후 USDA의 토성 삼각표를 이용하여 결정하였다. 상대광도는 층층동굴레의 평균 초고 높이에서 측정된 광도 값($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)을 나지에서 측정된 광도 값에

대한 비율로 계산하였다.

구축한 HSI 모델의 적합성을 확인하기 위하여 대상 멸종 위기 식물종의 생육 상태를 0.05 유의수준에서 Pearson 상관분석을 수행하였다(SPSS ver. 20.0). 생육 상태는 생장이 대부분 마무리 된 시기인 개화기나 결실기에 자생지의 서식 밀도 및 피도를 기준으로, 대체서식지의 활착 상태를 비교하였다.

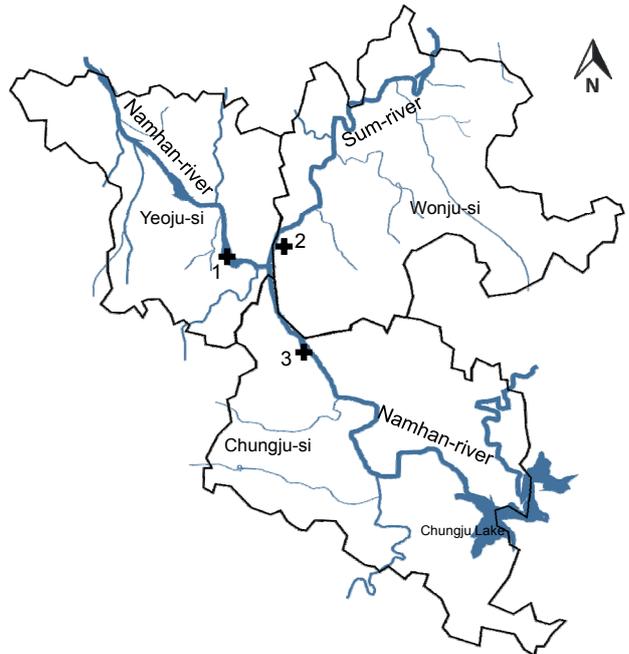


Fig. 1. Study sites in Namhan-river and Sum-river. +1: Gangcheonseom, Yeosu-si; +2: the lower Sum-river region, Wonju-si; +3: Yeongjuk zone, Chungju-si.

2.2 HSI의 기본 개념 및 HSI 모델의 구축

서식지 평가 절차(Habitat Evaluation Procedure; HEP)는 미국 환경영향평가 제도를 규정하는 국가환경정책법(NEPA)에서 비롯되었다. HEP는 평가 대상인 생태계의 복잡하고 이해하기 어려운 개념을 대상종의 서식환경과 직결된 개념으로 바꾸어 서식지로서의 적합성을 단순하면서도 종합적으로 정량 평가하는 것이다. HEP는 생태계 정량 평가 방법 중에서도 주체, 질, 공간, 시간이라는 네 가지 평가 관점을 모두 고려한다(Tanaka, 2006).

HEP에서 서식지의 양은 대상 생물종의 분포 면적을 산출함으로써 구할 수 있고, 서식지의 질은 대상종의 HSI에 의해 계량화할 수 있다(Oh et al., 2010). HSI는 대상 식물종의 서식 조건의 적합한 정도를 표현한 SI(Suitability Index; 적합 지수) 모델을 기반으로 한다. SI는 평가 종의 서식 조건을 규정하는 먹이, 번식 조건 등의 환경요인별로 0(완전히 부적합)에서 1(최적)까지의 수치로 적정 정도를 표현한 것이다(Table 1; Brown et al., 2000). SI는 평가 대상지에서 특정 환경 요인의 범주를 이상적인 서식지에서의 상태에서의 범주에 대한 상대적인 정도로 나타낸다.

Table 1. Definitions of suitability index values (Brown et al., 2000).

SI value	Description of habitat use
1.0	High density of relative abundance in field studies; high reproductive or growth potential; active preference in behavioral studies
0.5	Common occurrence or average density in field studies; average reproductive or growth potential
0.1	Rare occurrence or low density in field studies; tolerance documented in field or laboratory studies; litter potential for growth or reproduction
0	Little or no occurrence in field studies; mortality may occur in laboratory or field studies; active avoidance in behavioral studies

생존에 필수적인 조건인 각각의 환경 요인의 상태(서식지 변수)와 SI 수치의 관계를 나타낸 것을 SI 모델이라 한다. SI 모델은 해당 종에 관한 기존의 문헌 조사, 현장 조사, 해당 종의 전문가 인터뷰 조사 등으로 만들어진다. 각각의 SI에 대한 점수의 차등은 1차 함수 형태의 선형 보간을 통하여 부여할 수 있다(식 2.1; Oh et al., 2010).

$$SI_i = a + bx \quad (2.1)$$

HSI는 1개 이상의 SI를 더하거나 곱함으로써 통합한 것이다. HSI도 SI와 마찬가지로 평가 종의 서식지의 적합 여부를 0(완전히 부적합)에서 1(최적)까지의 수치로 표현한다. 좁은 의미의 HSI 모델은 여러 개의 SI와 HSI의 관계를 나타낸 식을 의미하며, 넓은 의미에서의 정의는 그래프 또는 문장이나 수식의 형식으로 HSI를 산출하는데 필요한 전체 조건이나 규칙을 의미한다. HSI는 SI의 결합으로 산출되는데, SI의 결합 방법에는 산술평균법, 기하평균법, 한정요인법, 가산요인법의 네 가지가 있다. HSI 모델을 구축하는 목적에 맞게 종과 서식지의 관계를 고려한 뒤, 4개의 패턴을 상황에 맞추어 조합한다(Tanaka, 2006).

본 연구는 단양쑥부쟁이와 층층등굴레의 대체서식지 적합성을 평가하는 것이 목적으로, HSI를 산출하기 위해 SI를 기하평균법을 이용하여 결합하였다(식 2.2). 단양쑥부쟁이와 층층등굴레 모두 분포가 제한되어 서식하고 있는 멸종위기 야생생물 II급 식물종으로, SI 변수가 하나라도 0일 때 서식지로서 기능을 하지 못하기 때문에 산술평균보다 엄격하게 현상을 반영한다(Layher and Maughan, 1985). 단양쑥부쟁이와 층층등굴레의 SI 변수의 경우 네 개의 변수가 밀접하게 연관되어 있을 뿐만 아니라, 하나라도 0이 될 경우 대체서식지로서 기능하기 어렵다고 판단되어 기하평균을 이용하여 HSI 모델을 구축하였다.

$$HSI = [SI_1 \times SI_2 \times SI_3 \times \dots \times SI_i]^{1/i} \quad (2.2)$$

HSI 모델로부터 산출된 결과 값은 크게 4단계로 구분할 수 있다(Brown et al., 2000). 본 연구에서는 매우 적합함($HSI \geq 0.84$), 적합함($0.84 > HSI \geq 0.5$), 그리고 적합정

도가 낮음($0.5 > HSI \geq 0.1$), 적합하지 않음($HSI < 0.1$)으로 구분하여 대체서식지의 적합 정도를 평가하였다.

HEP는 SI와 HSI의 단계 외에도 HU(Habitat Unit; 서식지 단위), AHSI(Weighted Average Habitat Suitability Index; 평균 HSI), THU(Total Habitat Unit; 합계 HU), CHU(Cumulative Habitat Unit; 누적 HU), AAHU's(Average Annual Habitat Units; 연평균 HU)와 같은 각각의 단계에서 평가가 가능하다. 즉, THU까지 분석하지 않고, HU 또는 HSI의 분석만으로 끝나는 HEP도 있다. '질', '공간', '시간'을 모두 포함하는 단계는 CHU에 의한 평가이나, 본 연구에서는 여러 가지 제약 요건으로 인해 서식지 '질'에 관한 평가 단계인 HSI까지 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SI 변수 선정

3.1.1 단양쑥부쟁이

단양쑥부쟁이의 SI 변수를 선정하기 위해 기존에 단양쑥부쟁이의 서식에 관련된 연구(Kagaya et al., 2008; Matsumoto et al., 2000; National Institute of Biological Resources, 2010)와 전문적인 식견을 바탕으로 단양쑥부쟁이의 서식에 필수적인 항목을 추출하였다. 서식 기질, 고도 범위, 토양 양분, 광 조건 총 4개의 변수를 추출하였고, 4가지 요소를 각각 $SI_1 \sim SI_4$ 로 해당 항목 당 1개씩 변수를 부여하였다.

1) 서식 기질 (SI_1)

단양쑥부쟁이의 전형적인 자생지는 하천의 자갈 사주로, 주기적인 범람으로 인해 자갈이 모래와 미사에 의해 매몰되지 않아 자갈 아래로 그늘진 미환경이 형성된다(Kagaya et al., 2008). 이러한 미환경은 단양쑥부쟁이 유식물의 발아와 정착에 매우 중요하다. 단양쑥부쟁이는 10 ~ 25 cm 자갈이 매몰되지 않고 지면의 대부분을 덮는 환경에서 다른 식물의 피도는 낮아, 단양쑥부쟁이의 생육에 최적인 것으로 알려져 있다(NIBR, 2010). 따라서 매몰되지 않은 10 ~ 25 cm 자갈이 지면의 80% 이상을 덮고 있을 때를 $SI_1 = 1.0$ 으로 설정하고, 10 ~ 25 cm 자갈이 덮고 있는 면적이 0일 때를 $SI_1 = 0$ 으로 하여 식 2.1의 1차 함수 값을 이용하여 각 단계에서의 SI_1 을 구하였다(Fig. 2a).

2) 고도 범위 (SI_2)

현재 남한강 유역에 남아 있는 단양쑥부쟁이의 개체군은 주로 하천이 유입되는 지역의 자갈 사주에 주로 분포하고 있다. 이러한 지역은 급류에 의하여 빈번히 하상이 교란되는 일시적인 생육지로, 단양쑥부쟁이의 생존은 가능하나 다른 식물의 침입이 어렵다(National Institute of Biological Resources, 2010). 생육지의 고도 범위는 홍수 교란 빈도 및 강도와 관련이 있다. 자갈 하상 지형의 고도가 낮은 곳은 홍수 교란이 너무 심하고, 지형의 고도가 높은 곳은 홍수 교란이

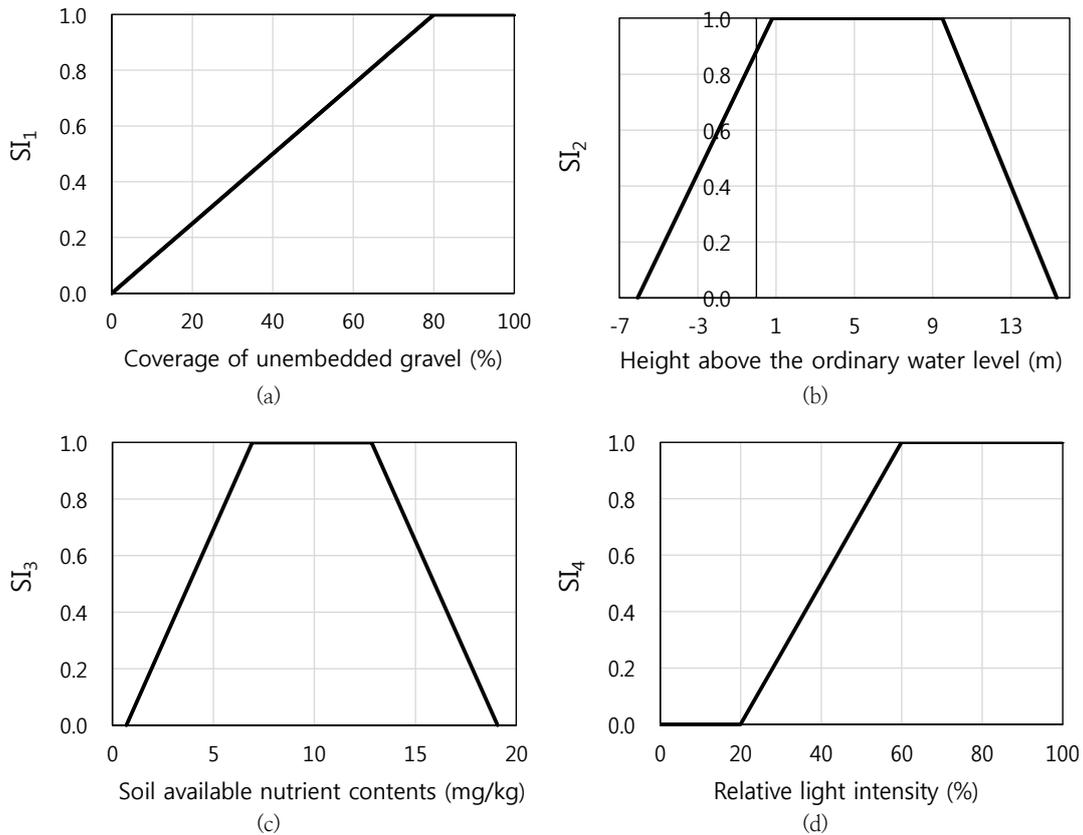


Fig. 2. Suitability index graphs for habitat variables of *A. altaicus* var. *uchiyamae*.

없어서 적당하지 않다. 기존의 연구에서 단양쭉부쟁이 생육지는 하천의 평수위보다 약 0.8 ~ 6.6 m 높은 곳에 위치하고 있다고 밝혀졌으나(National Institute of Biological Resources, 2010), 강천섬에 위치한 단양쭉부쟁이 자생지는 평수위보다 8.5 ~ 9.5 m 높은 곳에 위치하고 있었다. 따라서 평수위 기준 0.8 ~ 9.5 m 고도 범위를 $SI_2 = 1.0$ 으로 부여하였다. 추가적인 자생지의 고도를 통해 표준편차는 3.5로 나타났다으며, 표준편차에 1.96 (95% 신뢰수준)을 곱하여 서식 적정 범위의 하한값으로는 6.9를 감하고, 상한값에는 6.9를 더하여 서식 하한값과 상한값을 각각 평수위 기준 -6.1, 15.3 m로 설정하였다. 따라서 1 이외의 SI_2 값은 식 2.1의 1차 함수 값을 이용하여 계산할 수 있다(Fig. 2b).

3) 토양 양분 (SI_3)

단양쭉부쟁이의 자생지는 암석, 자갈, 모래로 이루어진 빈영양 생태계이다. 교란과 빈영양 환경으로 인해 단양쭉부쟁이 자생지는 식생의 피도가 낮고 단양쭉부쟁이, 할미꽃, 비술나무와 같이 빈영양에서 시식하는 식물종으로 이루어진다(National Institute of Biological Resources, 2010). 단양쭉부쟁이 자생지 토양의 가용성 양분을 분석한 결과, NO_3-N , NH_4-N , PO_4-P 함량은 각각 평균 2.55, 4.50, 2.14 mg/kg으로 나타나 실제로 매우 척박한 환경에서 서식하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 가용성 양분의 합산 값 6.92 ~ 12.83 mg/kg의 함량 범위를 $SI_3 = 1.0$ 으로

설정하였다. 표준편차는 3.18로, 표준편차에 1.96을 곱하여 서식 하한과 서식 상한을 각각 0.68, 19.07 mg/kg으로 설정하였다. 1 이외의 SI_3 값은 식 2.1의 1차 함수 값을 이용하여 계산할 수 있다(Fig. 2c).

4) 광 조건 (SI_4)

개방된 자갈 사주는 높은 광과 고온 스트레스가 강한 환경으로, 단양쭉부쟁이는 이러한 환경에 적응된 스트레스 내성종이다. 단양쭉부쟁이와 생태적 지위가 유사한 *Aster kantoensis*는 한 여름에 피음에 의하여 노지 광도의 20 ~ 60% 이하로 광도가 낮아지면 유식물의 생존이 어렵다(Matsumoto et al., 2000). 단양쭉부쟁이 역시 유사한 것으로 판단된다. 따라서 노지 광도의 60% 이상의 광도일 때 $SI_4 = 1.0$ 으로 부여하였다. 광량의 부족은 단양쭉부쟁이의 생육을 저해하므로 SI_4 값을 노지 광도의 60%부터 20%까지 1차 함수적으로 감소하는 것으로 설정하였다(Fig. 2d).

3.1.2. 층층둥굴레

층층둥굴레의 SI 변수를 선정하기 위해 기존에 층층둥굴레의 서식에 관련된 연구(Jang et al., 1998; Song et al., 2009; Kim, 2017; Kim et al., 2017)와 전문적인 식견을 바탕으로 층층둥굴레의 서식에 필수적인 항목을 추출하였다. 토성, 광 조건, 동반 위해종의 피도 총 3개의 변수를 추출하였고, 3가지 요소를 각각 $SI_1 \sim SI_3$ 으로 해당 항목 당 1

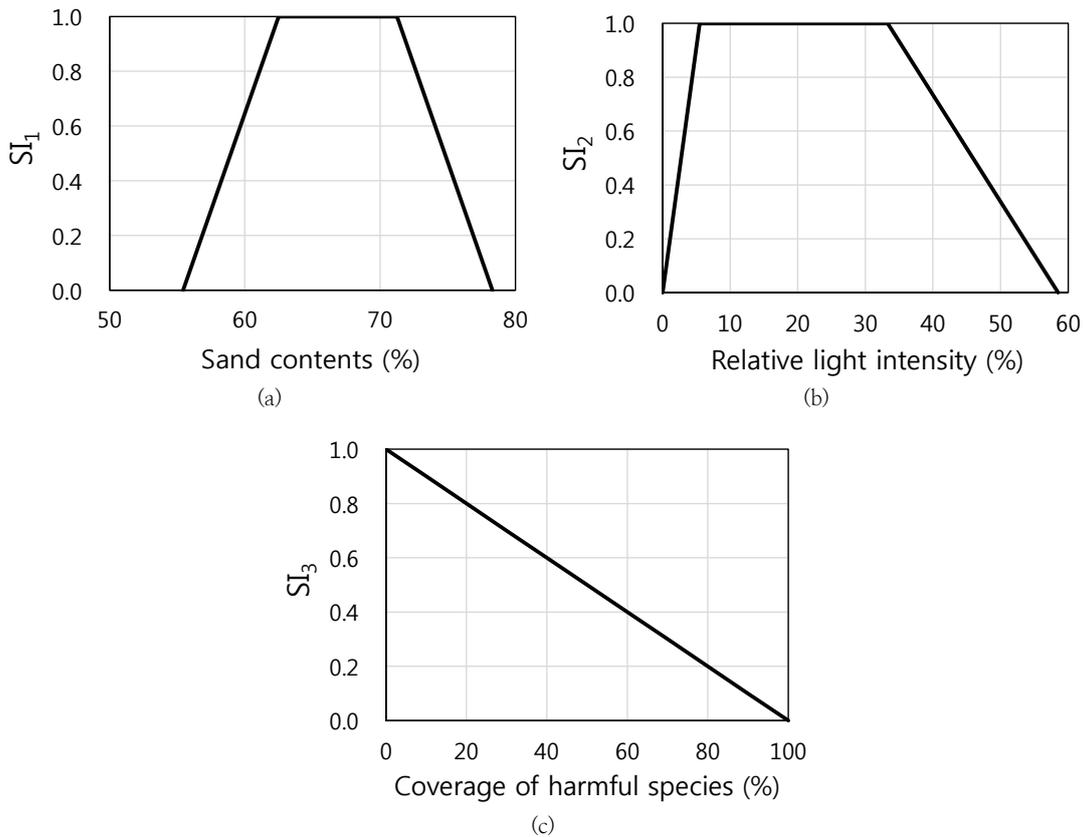


Fig. 3. Suitability index graphs for habitat variables of *P. stenophyllum*.

개씩 변수를 부여하였다.

1) 토성 (SI_1)

층층둥굴레 자생지의 토성을 분석한 결과, 모두 사양토 (sandy loam)로 확인되었다. 미국농무성(USDA) 분류에 의하면 사양토는 모래 약 50 ~ 80%, 점토 20% 이하, 미사 50% 이하로 구성된 토양으로 배수가 좋고, 유기물이 매우 적은 모래 토양으로, 이러한 토양이 층층둥굴레의 서식에 적합한 환경을 제공함을 알 수 있다. 이 중 가장 많은 비율을 차지하고 있는 모래는 층층둥굴레의 자생지에서 62.5 ~ 71.3%의 함량을 보여, 이를 $SI_1 = 1.0$ 으로 설정하였다. 표준편차는 3.6으로, 표준편차에 1.96을 곱하여 서식 하한과 서식 상한을 각각 55.4, 78.3%로 설정하였다. 1 이외의 SI_1 값은 식 2.1의 1차 함수 값을 이용하여 계산하였다(Fig. 3a).

2) 광 조건 (SI_2)

층층둥굴레 자생지는 모두 북사면에 위치하며, 모든 조사구에서 시무나무가 출현하였고(Song et al., 2009), 강천섬 자생지 현장 조사에서도 아까시나무 수관 아래 서식하고 있으며, 빛이 매우 강한 곳에서는 층층둥굴레의 서식이 발견되지 않거나 생육 상태가 불량한 것을 확인하였다. 자생지의 상대광도는 5.5 ~ 33.3%의 값을 보여, 이를 $SI_2 = 1.0$ 으로 설정하였다. 표준편차는 12.9로, 표준편차에 1.96을 곱하여 서식 하한과 서식 상한을 각각 0, 58.5%로 설정

하였다. 1 이외의 SI_2 값은 식 2.1의 1차 함수 값을 이용하여 계산하였다(Fig. 3b).

3) 동반 위해종의 피도 (SI_3)

층층둥굴레 자생지의 식생구조에 대한 연구 결과, 노박덩굴, 쉼, 박주가리, 청미래덩굴 등의 덩굴식물과 산딸기, 곰딸기, 줄딸기, 멧석딸기 등 관목성 및 초본성 딸기류에 의해 층층둥굴레의 생육이 저해된다(Song et al., 2009). 덩굴식물은 층층둥굴레가 생육하기 시작하는 4월 ~ 7월까지의 크게 영향을 주지 않으나, 7월 이후 층층둥굴레의 상당량을 피복하여 광량을 급격하게 감소시키고 종자 결실에 피해를 주는 것으로 조사되었다(Song et al., 2009). 따라서 층층둥굴레의 종자 성숙 이전 시기인 7월에 층층둥굴레의 생육을 저해하는 동반종의 피도가 100%일 때 $SI_3 = 0$ 으로, 반대로 층층둥굴레 위해종의 피도가 0%일 때 $SI_3 = 1.0$ 으로 하여 1차 함수적으로 감소하는 것으로 설정하였다(Fig. 3c).

3.2 SI의 결합 및 대체서식지에의 적용

3.2.1 단양쑥부쟁이

강천섬의 단양쑥부쟁이 대체서식지 A ~ C지구의 현장 조사 결과, A지구는 10 ~ 25 cm 크기의 자갈이 지면의 약 80% 정도를 덮고 있으므로 $SI_1 = 1$ 로 산출되었으며, B지구는 10 ~ 25 cm 크기의 자갈이 지면의 약 50% 정도를 덮고

있으므로 $SI_1 = 0.625$ 로 산출되었다. 반면 C지구는 10 ~ 25 cm 크기의 자갈이 지면의 약 10% 정도를 덮고 있으므로 $SI_1 = 0.125$ 로 산출되었다. 강천섬의 A지구는 평수위보다 12.5 m 높은 곳에 위치하고 있으므로 $SI_2 = 0.495$, B지구는 12.7 m 높은 곳에 위치하고 있으므로 $SI_2 = 0.446$, C지구는 13.0 m 높은 곳에 위치하고 있으므로 $SI_2 = 0.408$ 로 각각 산출되었다. 강천섬의 양분 함량은 대체로 낮았는데, A지구의 가용성 양분 합산값은 11.10 mg/kg, B지구의 가용성 양분 합산값은 12.74 mg/kg으로 모두 6.92 ~ 12.83 mg/kg 범위이므로, $SI_3 = 1$ 로 산출되었다. C지구의 가용성 양분 합산값은 5.26 mg/kg으로 양분 함량이 매우 낮아 $SI_3 = 0.734$ 로 산출되었다. 강천섬에 조성된 단양쭉부쟁이 대체서식지 모두 지면을 가리는 목본, 관목종이 존재하지 않아 노지 광도의 100% 광도를 가지는 서식지이므로, $SI_4 = 1$ 로 산출되었다(Table 2).

섬강 하류에 조성된 단양쭉부쟁이 대체서식지는 현장 조사 결과, 10 ~ 25 cm 크기의 자갈이 지면의 약 80% 정도를 덮고 있어 $SI_1 = 1$ 로 산출되었다. 그러나 섬강의 대체서식지는 평수위보다 16.2 m 높은 곳에 위치하고 있어 $SI_2 = 0$ 로 산출되었다. 실제로 제내지에 위치하고 있어 홍수 교란이 일어나기 어려울 것으로 판단된다. 섬강의 양분 함량은 자생지에 비해 높은 13.07 mg/kg으로, $SI_3 = 0.844$ 로 산출되었다. 섬강에 조성된 단양쭉부쟁이 대체서식지는 지면을 가리는 목본, 관목종이 존재하지 않아 노지 광도의 100% 광도를 가지는 서식지이므로, $SI_4 = 1$ 로 산출되었다(Table 2).

기하 평균을 이용하여 HSI를 분석한 결과, 강천섬의 A지구는 HSI가 0.839, B지구는 0.595로 본 연구에서 선정한 대체서식지의 적합 정도를 기준으로 '적합($0.84 > HSI \geq 0.5$)'한 대체서식지로 구분된다. C지구의 HSI는 0.334로 '적합정도가 낮은($0.5 > HSI \geq 0.1$)' 대체서식지로 구분된다. B지구는 자갈이 일부 매몰되어 있어, 자갈의 피도가 낮아 A지구에 비해 단양쭉부쟁이의 서식지로서의 적합도가 낮은 것으로 나타났으나, 실제 생육 상태를 분석한 결과, B지구의 밀도와 피도 모두 A지구에 비해 높게 나타났다(Fig. 4). C지구의 경우, 자갈이 상당수 매몰되어 있을 뿐만 아니라 자갈이 거의 없는 매질이다. 또한 양분 함량도 매우 낮아 A, B지구에 비해 단양쭉부쟁이의 서식도 어려울 뿐만 아니라 경쟁종의 서식도 어려운 것으로 확인되었다.

Table 2. SI and model component HSI scores at replacement habitats for *A. altaicus* var. *uchiyamae*.

	Gangcheonseom			Sum-river basin
	A Zone	B Zone	C Zone	
SI_1	1	0.625	0.125	1
SI_2	0.495	0.446	0.408	0
SI_3	1	1	0.734	0.844
SI_4	1	1	1	1
HSI	0.839	0.595	0.334	0

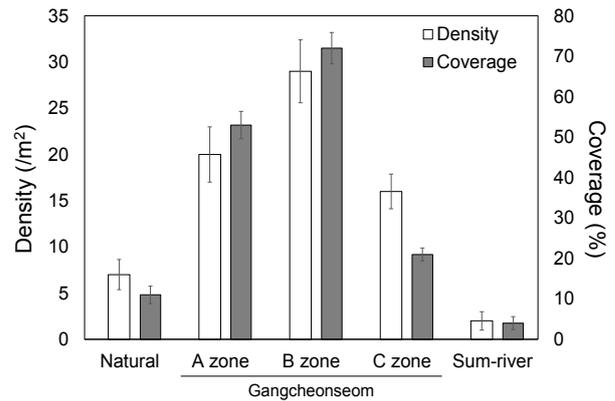


Fig. 4. Density and coverage of *A. altaicus* var. *uchiyamae* at natural and replacement habitats. Vertical bars indicate \pm SE.

섬강의 단양쭉부쟁이 대체서식지는 HSI가 0으로, '적합하지 않은($HSI < 0.1$)' 대체서식지로 구분되었다. 본 연구에서는 기하 평균으로 SI를 결합하였기 때문에 SI 중 어느 하나라도 0값을 지니면 HSI가 0으로 산출된다. 이는 단양쭉부쟁이가 서식하기 위해서 필수적인 요소 중 어느 한 요소라도 결핍되어서는 안된다는 가정을 전제로 한다. 섬강의 대체서식지는 다른 요소들이 대부분 1에 가까운 값으로 산출되었으나, 대체서식지가 조성된 곳의 해발고도가 서식이 적합한 범위의 상한보다 높아 대체서식지로서의 기능을 하기 어렵다는 것을 보여준다. 실제로 현장 조사 결과, 섬강의 대체서식지 주변의 제외지 쪽으로는 단양쭉부쟁이가 비교적 높은 밀도로 서식하고 있으나, 조성된 대체서식지 전체 면적 중 단양쭉부쟁이의 피도는 5% 이하로 조사되었으며, 대부분의 공간을 다른 경쟁식물종이 뒤덮었다. 밀도와 피도 또한 자생지 보다 낮아 대체서식지로서 유지되기 어려운 것으로 판단된다(Fig. 4).

단양쭉부쟁이의 생육 상태와 본 연구의 HSI를 비교하고자 피도와 HSI 값의 상관분석을 수행한 결과, 유의미한 상관관을 보이지 않았다($R^2 = 0.506, p > 0.05$). 이러한 결과는 인위적인 개입에 의한 것으로, 현재 강천섬의 단양쭉부쟁이 대체서식지는 주기적으로 경쟁종을 제거해주는 작업을 수행하고 있기 때문에 양분이 높은 B지구의 단양쭉부쟁이의 생육이 왕성하게 나타날 수 있다. C지구도 주기적으로 관리하고 있어 자생지에 비해 높은 밀도와 피도의 생육 정도를 보이거나(Fig. 4), 처음에 이식한 개체수($38/m^2$)에 비해 매우 낮은 활착률을 보이고 있어 단양쭉부쟁이 서식지로서의 적합도가 낮음을 확인할 수 있다. 이러한 인위적인 개입이 규칙적이고 지속적이라면, HSI 값을 산출하는 데 반영하여 보다 정확한 HSI model을 만들 수 있다.

3.2.2. 층층둥굴레

강천섬의 층층둥굴레 대체서식지의 토양 분석 결과, 모래의 함량이 평균 61.3%로 구성된 토양으로, $SI_1 = 0.824$ 로 산출되었다. 강천섬의 대체서식지 내에 식재된 은행나무는 수고가 10 m 이상의 큰 교목으로, 충분한 그늘을 형성한다.

은행나무 수관 아래에서 층층동굴레가 높은 피도(64.3%)로 서식하고 있었으며 상대광도가 6.7%로, $SI_2 = 1$ 로 산출되었다. 층층동굴레의 개화 시기인 7월의 현장 조사 결과, 강천섬의 대체서식지 내에서 쇠뜨기, 개망초, 갈대, 쑥, 소리쟁이, 환삼덩굴 등이 서식하고 있었다. 이 중 갈대와 환삼덩굴은 층층동굴레의 상당량을 피복하여 생육에 크게 영향을 미칠 수 있는 종이다. 대체서식지 내의 갈대는 20.8%, 환삼덩굴은 5.7%의 피도를 차지하고 있으므로, $SI_3 = 0.735$ 로 산출되었다(Table 3).

영죽지구에 조성된 층층동굴레 대체서식지는 토양 내 모래의 함량이 평균 62.92%로, $SI_1 = 1$ 로 산출되었다. 그러나 영죽지구의 대체서식지 내부를 포함한 주변에는 지면을 가리는 목본 및 관목종이 존재하지 않아 상대광도가 100%로 나타났다. 따라서 $SI_2 = 0$ 로 산출되었으며, 현장 조사 결과 10개체/m²의 낮은 밀도와 6.3%로 낮은 피도를 보여 생육이 불량함을 확인하였다(Fig. 5). 7월의 현장 조사 결과, 강천섬의 대체서식지 내에서 달뿌리풀, 물억새, 줄, 달맞이꽃, 개망초 등이 서식하고 있었다. 이 중 달뿌리풀과 물억새, 줄은 층층동굴레의 광도를 급격하게 저해하여 생육에 크게 영향을 미칠 수 있는 종이다. 대체서식지 내의 세 종의 피도는 평균 93.6%로, $SI_3 = 0.064$ 로 산출되었다(Table 3).

기하 평균을 이용하여 HSI를 분석한 결과, 강천섬의 층층동굴레 대체서식지는 HSI가 0.846으로, 본 연구에서 선정한 대체서식지의 적합 정도를 기준으로 ‘매우 적합($HSI \geq 0.84$)’한 대체서식지로 구분된다. 반면, 영죽지구의 대체서식지는 HSI가 0으로, ‘적합하지 않은($HSI < 0.1$)’ 대체서식지로 구분되었다.

Table 3. SI and model component HSI scores at replacement habitats for *P. stenophyllum*

	Gangcheonseom	Youngjuk zone
SI_1	0.824	1
SI_2	1	0
SI_3	0.735	0.064
HSI	0.846	0

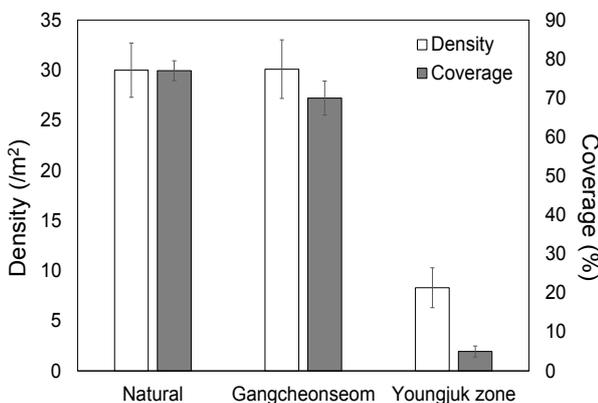


Fig. 5. Density and coverage of *P. stenophyllum* at natural and replacement habitats. Vertical bars indicate \pm SE.

층층동굴레의 생육 상태와 본 연구의 HSI를 비교하고자 피도와 HSI 값의 상관분석을 수행한 결과, 유의미한 상관을 보여 강천섬의 층층동굴레 대체서식지가 적합한 위치에 조성되었음을 뒷받침한다($R^2 = 0.998, p < 0.05$). 현장 조사 결과, 층층동굴레 대체서식지는 인위적인 개입(경쟁종 제거)이 없는 것으로 확인되며, 강천섬 대체서식지의 층층동굴레는 자생지와 유사한 생육 상태를 보였다(Fig. 5). 영죽지구의 대체서식지는 그늘이 전혀 없는 지역으로, 자생지와 비교하여 생육 상태가 매우 저조하며, 층층동굴레 개체수도 매우 적었다(Fig. 5). 영죽지구는 범람의 영향을 크게 받는 지역으로, 야교목 이상의 큰 교목이 자라기 어려운 환경이다. 따라서 활엽수목의 식재를 통해 그늘을 조성하는 방안 조차 어려운 실정이다. 현재 영죽지구 층층동굴레의 생육을 저해하는 달뿌리풀, 물억새, 줄 등의 경쟁종을 제거하는 것은 단기적이고 일시적인 유지 방안으로, 조성된 대체서식지의 위치상 장기적으로 유지하기는 어려울 것으로 판단된다.

4. 결 론

4대강 사업 공사로 인해 조성된 멸종위기 야생생물 II급 단양쑥부쟁이와 층층동굴레의 대체서식지의 적합성 평가를 시도하기 위해 서식지 적합 지수(HSI)를 이용하였다. 단양쑥부쟁이와 층층동굴레의 서식에 필수적으로 필요한 항목을 각각 4가지, 3가지로 추출하여 기하 평균으로 결합하고, 산출된 HSI 값을 검증하기 위해 서식지 내 멸종위기종의 생육 정도와의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 단양쑥부쟁이의 경우 서식 환경 조건 외에 경쟁종을 제거하는 인위적인 개입으로 인해 유의미하지 않은 상관을 나타내었다. 반면 인위적인 개입이 없는 층층동굴레의 경우 유의미한 상관을 보여 HSI model이 식물종 서식지 평가 방법의 적절함을 뒷받침해준다. 본 연구에서 수행한 HSI model은 식물 서식지를 평가하는데 있어서도 적용이 가능하며 정량적인 평가가 가능하여, 추후 대체서식지를 선정하는 과정에서 유지·관리에 있어서도 유용할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 단양쑥부쟁이 및 층층동굴레와 관련된 선행 연구와 대체서식지 인근의 자생지만을 조사한 것을 기반으로 하여 HSI 변수를 도출하였다. 따라서 향후 보다 많은 단양쑥부쟁이와 층층동굴레 자생지의 추가 조사를 통한 HSI의 변수와 기준의 정밀한 보완이 필요하다.

사 사

본 연구는 환경부의 환경정책기반공공기술개발사업(2016-000210003)에서 지원받았습니다.

References

Alexiades, AV and Encalada, AC (2017). Distribution and habitat suitability of Andean climbing catfish in the Napo

- River Basin, Ecuador, *Tropical Conservation Science*, 10, pp. 1–7.
- Allen, AW (1982). *Habitat suitability index models: marten*, U.S. Fish and Wildlife Service, Fort Collins, Colorado.
- Allen, AW (1983). *Habitat suitability index models: beaver*, U.S. Fish and Wildlife Service, Washington DC.
- Box, J (1996). Setting objectives and defining out puts for ecological restoration and habitat creation, *Restoration Ecology*, 4, pp. 427–432.
- Brown, SK, Buja, KR, Jury, SH, Monaco, ME and Banner, A (2000). Habitat suitability index models for eight fish and invertebrate species in Casco and Sheepscot Bays, Maine, *North American J. of Fisheries Management*, 20(2), pp. 408–435.
- Carter, MR (1993). *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers, Florida.
- Cho, YS, Hong, SJ, Lee, WC, Kim, HC, and Kim, JB (2013). Suitable site assessment using habitat suitability index for *Styela Clava* and *Styela Plicata* in Jindong Bay, *J. of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 19(6), pp. 597–605. [Korean Literature]
- Cho, YS, Lee, WC, Hong, SJ, Kim, HC, Kim, JB, and Park, JH (2012). Estimation of stocking density using habitat suitability index and ecological indicator for oyster farms in Geoje–Hansan Bay, *J. of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 18(3), pp. 185–191. [Korean Literature]
- Froese, JG, Smith, CS, Durr, PA, McAlpine, CA, and van Klinken, RD (2017). Modelling seasonal habitat suitability for wide-ranging species: Invasive wild pigs in northern Australia. *PloS one*, 12(5), e0177018.
- Gibson, LA, Wilson, BA, Cahill, DM and Hill, J (2004). Modelling habitat suitability of the swamp antechinus (*Antechinus minimus maritimus*) in the coastal heathlands of southern Victoria, Australia, *Biological Conservation*, 117(2), pp. 143–150.
- Jang, KH, Park, JM, Kang, JH and Lee, ST (1998). Growth and flowering characteristics of *Polygonatum* spp., *Korean J. of Medicinal Crop Science*, 6(2), pp. 142–148. [Korean Literature]
- Kagaya, M, Tani, T and Kachi, N (2008). Effect of gravel conditions on seedling emergence of the endangered monocarpic perennial *Aster kantoensis* (Compositae) on a floodplain, *Plant Species Biology*, 23(1), pp. 47–50.
- Kamphake, LJ, Hannah, SA and Cohen, JM (1967). Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction, *Water Research*, 1(3), pp. 205–216.
- Kim, MH (2016). *The impact of invasive plant (Ambrosia trifida) on the performance of endangered plant (Polygonatum stenophyllum) in Korea*, Master's Thesis, Kongju University. [Korean Literature]
- Kim, EJ, Lee, SI, Jeong, YH and You, YH (2017). Effect of flowering and light intensity on plant growth of herb community at habitats of endangered plant species *Polygonatum stenophyllum*, *Proceedings of the 72th annual meeting of the Korean Association of Biological Sciences*, The Korean Association of Biological Sciences, p. 161. [Korean Literature]
- Layher, WG and Maughan, OE (1985). Spotted bass habitat evaluation using an unweighted geometric mean to determine HSI values. *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science*, 65, pp. 11–18.
- Lee, EP, Han, YS, Lee, SI, Cho, KT, Park, JH and You, YH (2017). Effect of nutrient and moisture on the growth and reproduction of *Epilobium hirsutum* L., an endangered plant, *J. of Ecology and Environment*, 41, 35.
- Liddicoat, M, Tibbits, S and Butler, E (1975). The determination of ammonia in seawater. *Limnology and Oceanography*, 20(1), pp. 131–132.
- Matsumoto, J, Muraoka, H and Washitani, I (2000). Ecophysiological mechanisms used by *Aster kantoensis*, an endangered species, to withstand high light and heat stresses of its gravelly floodplain habitat, *Annals of Botany*, 86(4), pp. 777–785.
- Ministry of Environment (2011). *A guideline on the environmental impact assessment for the constructing and managing substitute habitats*, Korea Environment Institute. [Korean Literature].
- National Institute of Biological Resources (2010). *The genetic evaluation of important biological resources V: '10 Genetic diversity and taxonomic status analysis of endangered species*, 1485009267, Kyungpook National University. [Korean literature].
- Oh, TG, Kim, YC, Yang, YS, Kim, CH and Lee, MO (2010). A suitability selection for marine afforestation using habitat evaluation procedure, *J. of the Korean Society of Marine Engineering*, 34(6), pp. 894–905. [Korean Literature]
- Pryke, SR and Samways, MJ (2001). Width of grassland linkages for the conservation of butterflies in South African afforested areas, *Biological Conservation*, 101, pp. 85–96.
- Raleigh, RF, Zuckerman, LD and Nelson, PC (1984). *Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: brown trout*, U.S. Fish and Wildlife Service, Washington DC.
- Reppert, RT (1992). *National wetland mitigation banking study: wetland mitigation banking concepts*, U.S. Army Corps of Engineers, Water Resources Support Center, Institute for Water Resources, Policy and Special Studies Division.
- Solorzano, L (1969). Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method, *Limnology and Oceanography*, 14(5), pp. 799–801.

- Song, JM, Lee, GY and Yi, JS (2009). Growth environment and vegetation structure of natural habitat of *Polygonatum stenophyllum* Maxim., *J. of Forest Science*, 25(3), pp. 187–194. [Korean Literature]
- Stuber, RJ, Gebhart, G and Maughan, OE (1982). *Habitat suitability index models: largemouth bass*, U.S. Fish and Wildlife Service.
- Tanaka, A (2006). *Theory and Practices for Habitat Evaluation Procedure in Japan*, Tokyo. [Japanese Literature]
- U.S. Fish and Wildlife Service (1980). Habitat as a basis for environmental assessment, *Ecological Services Manual*, 101.
- Vincenzi, S, Caramori, G, Rossi, R and De Leo, GA (2006). A GIS-based habitat suitability model for commercial yield estimation of *Tapes philippinarum* in a Mediterranean coastal lagoon (Sacca di Goro, Italy), *Ecological Modelling*, 193(1), pp. 90–104.
- Warren, A, Litvaitis, JA and Keirstead, D (2016). Developing a habitat suitability index to guide restoration of New England cottontail habitats, *Wildlife Society Bulletin*, 40(1), pp. 69–77.
- You, YH and Kim, HR (2010). Key factors causing the *Euryale ferox* endangered hydrophyte in Korea and management strategies for conservation. *J. of Korea Wetlands Research*, 12(3), pp. 49–56. [Korean Literature]