

연구논문

기후변화에 따른 한반도 참식나무 생육지 예측과 영향 평가

윤종학* · 中尾勝洋** · 김종현*** · 김선유*** · 박찬호*** · 이병윤***

국립생태원 생태평가팀*, 일본산림총합연구소 식물생태학 연구실**, 국립생물자원관 식물자원과***

Habitat prediction and impact assessment of *Neolitsea sericea* (Blume) Koidz. under Climate Change in Korea^{1a}

Jong-Hak Yun* · Katsuhiko Nakao** · Jung-Hyun Kim*** · Sun-Yu Kim*** ·
Chan-Ho Park*** · Byoung-Yoon Lee***

Ecosystem assessment team, National Institute of Ecology*
Dep. of Plant Ecology, Forestry and Forest Products Research Institute**
Plant Research Division, National Institute of Biological Resource***

Abstract

The research was carried out in order to find climate factors which determine the distribution of *Neolitsea sericea*, and the potential habitats (PHs) under the current climate and three climate change scenario by using species distribution models (SDMs). Four climate factors; the minimum temperature of the coldest month (TMC), the warmth index (WI), summer precipitation (PRS), and winter precipitation (PRW) : were used as independent variables for the model. Three general circulation models under A1B emission scenarios were used as future climate scenarios for the 2050s (2040~2069) and 2080s (2070~2099). Highly accurate SDMs were obtained for *N. sericea*. The model of distribution for *N. sericea* constructed by SDMs showed that minimum temperature of the coldest month (TMC) is a major climate factor in determining the distribution of *N. sericea*. The area above the -4.4°C of TMC revealed high occurrence probability of the *N. sericea*. Future PHs for *N. sericea* were projected to increase respectively by 4 times, 6.4 times of current PHs under 2050s and 2080s. It is expected that the potential of *N. sericea* habitats is expanded gradually. *N. sericea* is applicable as indicator species for monitoring in the Korean Peninsula. *N. sericea* is necessary to be monitored of potential habitats.

Keywords : Species distribution model, Indicator, Potential habitats

I. 서론

과거 100년간(1906~2005년)의 전지구 평균기온은 0.74℃ 상승하였으며, 향후 100년간 1.1℃~6.4℃ 상승할 것으로 예상하고 있다(IPCC, 2007). 또한, 기온 상승과 더불어 해수면은 100년간 최대 59cm 상승할 것으로 예상하고 있으며, 적설량과 적설면적도 감소할 것으로 보고하였다(IPCC, 2007). 기후변화는 생태계 및 생물 생육지 변화 등에 영향을 미칠 것으로 예측되며, 최근 환경조건에 의한 야생 식물종의 분포를 예측하기 위해 통계 모델을 구축하여 생육지를 예측하는 연구가 진행되고 있다. 식물종이 생육에 적합한 환경조건에 분포할 경우, 모델로부터 예측된 분포 확률은 식물종에 대한 생육지 조건에 대응되며, 현재 환경에서 식물 생육에 적합한 장소(생육적지) 및 생육 가능한 지역(잠재 생육지)을 예측할 수 있다. 또한, 모델에 미래기후를 적용하여 미래기후에서의 생육적지 및 잠재 생육지를 예측할 수 있다(津山幾太郎 등, 2008; Horikawa *et al.*, 2009). 미국에서는 동부지역의 주요 수목 80종(Iverson *et al.*, 1998), 영국에서는 식물 33종(Harrison *et al.*, 2001; Berry *et al.*, 2003), 유럽에서는 식물종 1000종 이상에 대하여 잠재 생육지를 예측하여 지구 온난화에 따른 식물다양성에 대한 영향을 평가하였다(Bakkenes *et al.*, 2002; Thuiller *et al.*, 2005). 일본에서는 *Fagus crenata*(Matsui *et al.*, 2004a; 2004b), 눈잣나무(Horikawa *et al.*, 2009), 상록성 참나무류 2종(中尾勝洋 등, 2009), 상록성 침엽수 10종(Tanaka *et al.*, 2009), 섬조릿대(津山幾太郎, 2008) 등의 잠재 생육지 예측에 대한 연구가 보고되었다. 한국에서는 기후변화에 따른 난온대 상록활엽수의 잠재 생육지 변화예측(윤종학 등, 2011a), 후박나무의 잠재 생육지 변화예측(윤종학 등, 2011b)이 있으나, 기후변화에 따른 각 식물종에 대한 분포를 규정하는 기후요인 및 분포 변화 예측 연구는 아직 활발히 진행되고 있지 않다.

현재 가속화 되는 기온상승은 한반도의 남부해안 및 제주도, 울릉도 저지대에 분포하는 난온대 상록활엽수의 분포 확대에 영향을 미칠 것으로 예측된다(윤

종학 등, 2011a). 난온대 상록활엽수림을 구성하는 주요수종 중의 하나인 참식나무는 주로 울릉도와 제주도를 비롯한 남쪽섬에 주로 분포하며(이창복, 1980), 서해안을 따라 북상하며 인천시 옹진군의 덕적군도, 충남 태안군 격렬비열군도의 우백도, 내륙으로는 전남 영광의 불갑산, 해남의 두륜산, 영암의 월출산, 경남의 부산, 및 울릉도를 잇는 선이 북한계선으로 보여진다(이우철과 임양재, 2002; 김중현 등, 2011). 참식나무는 기후변화에 따라 한반도 내륙으로 세력을 확대할 것으로 예상되며, 낙엽활엽수림을 구성하는 졸참나무, 서어나무, 신갈나무 등과 세력경쟁이 예상된다. 또한, 산림군락을 구성하는 군락구조에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 참식나무는 환경부에서 발표한 국가 기후변화 생물지표(CBIS: Climate-sensitive Biological Indicator Species) 100종(Lee *et al.*, 2010)에 선정되어 참식나무의 분포를 규정하는 기후조건과 잠재 생육지 변화를 밝히는 것을 통해 지표종의 검증의 필요성과 기후변화에 따른 한반도 산림 식생 분포 변화를 예측하는데 매우 중요하다.

본 연구는 참식나무를 대상으로 기후요인을 설명변수로 하는 통계모델을 구축하여 현재기후에서 참식나무의 분포를 규정하는 기후조건을 정량적으로 밝히고, 현재기후 및 미래기후에서의 시계열에 따른 잠재 생육지의 분포변화를 예측 및 분석하여 기후변화에 따른 영향을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상지

연구 대상지는 북위 33°~38°, 동경 126°~132°에 놓여 있는 한반도, 제주도, 울릉도를 포함하는 지역을 대상으로 하였다. 지리적으로는 동해를 사이에 두고 일본과 마주하여 위치하고 있으며, 서해를 사이에 두고 중국과 마주하여 위치하고 있다. 한반도의 산지는 태백산맥을 중심으로 동쪽으로는 급경사를 이루고 서쪽으로는 완만하며, 남서쪽으로는 소백산맥이 이어져 있다. 한반도 남서쪽에는 대표적인 도서지역으로 제주도가 위치하며, 동해에는 울릉도가 위치하

고 있다. 한반도의 기후는 전반적으로 연교차가 큰 대륙성 기후의 지배를 받고 있으며, 최근 한반도의 10년 평균기온 평년값은 13.7℃(1991-2000년), 제주도 14.4℃(1991-2000년), 울릉도 11.8℃(1991-2000년)를 나타내고 있다(윤종학 등, 2011a).

2. 식물분포 자료

식물분포 자료는 국립생물자원관(KB)의 식물 표본 자료에서 참식나무를 대상으로 조사되어 수장된 채집 정보를 추출하여 이용하였다. 한반도 식물 분포 자료만으로 난온대 상록활엽수의 생육지를 예측할 경우, 과소 또는 과대 평가되어 예측 될 수 있으므로, 이를 보정하기 위해서 일본의 식물분포 자료를 추가하여 생육지 분포에 이용하였다. 일본 식물분포 자료는 식물사회학적 조사 자료를 근거하여 작성된 PRDB (Phytosociological Releve Data Base)(Tanaka, 2007)에서 참식나무 위치정보를 추출하여 이용하였다. 추출된 참식나무 위치정보는 총 2,171(한국 172; 일본; 1,999)지점이며, 한국과 일본 지역을 대상으로 참식나무의 실제 분포도를 작성하였다(Fig. 1).

3. 기후자료

기후자료는 Worldclim-Global Climate Data (www.worldclim.org)에서 제공하는 동아시아 지역의 한국과 일본의 기후값을 30 arc-seconds(ca. 1km) 격자에 대하여 추출하여 식물 생육에 중요한

4개 기후변수를 적용하였다. 4개 기후변수는 식물 생육기의 열량지표를 나타내는 온량지수(WI; Warmth Index) (Kira, 1977), 동계의 저온 극값 지표를 나타내는 최한월 최저기온 (TMC; Mean minimum temperature of the coldest month), 생육기의 수분공급의 지표로서 5~9월의 하계강수량(PRS; Summer precipitation), 동계의 건조정도 및 적설량의 지표로서 12~3월의 동계강수량(PRS; Summer precipitation)에 대하여 30년(1971~2000년) 평균 기후값을 현재기후 자료(Current climate data)로 적용하였다(Table 1).

미래기후 자료는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 배출 시나리오에 관한 특별 보고서(SRES; Special Report on Emissions Scenarios)에 보고된 전지구 기후모델(GCMs; General Circulation Models) 중에서 CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), CCCMA (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis), HADCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version3)를 선택하여 고성장 사회 스토리라인의 각 에너지원 밸리스를 중시하며, 2100년 이산 화탄소(CO₂) 농도 720ppm을 기준으로 한 A1B 시나리오 산출 결과 값을 이용하였으며, 2050(2060~2089)년, 2080(2070~2099)년 30년 평균 기후값을 적용하여 예측하였다(Fig. 2, Table 1). 현재기후에서 온량지수(WI)는 78.1℃·month, 최한월최저기온(TMC) -13.0℃, 하계강수량(PRS) 864.5mm, 동계강수량(PRW) 112.2mm이며, 미래기후에서 2050s (2040-2069)의 온량지수(WI)는 96.5~103.2℃·month, 최한월최저기온(TMC) -9.9~-8.1℃, 하계강수량(PRS) 911.2~1,219.9mm, 동계강수량(PRW) 112.2~148.5mm이다. 2080s(2070~2099)의 온량지수(WI)는 102.6~118.9℃·month, 최한월최저기온(TMC) -8.3~-5.6℃, PRS(하계강수량) 937.2~1,394.5mm, PRW(동계강수량) 132.1~166.2mm이다. HADCM3 미래 시나리오는 CSIRO와 CCCMA 미래 시나리오 보다 높은 온도와 높은 강수량으로 한반도 미래기후가 예측된 시나리오이다.

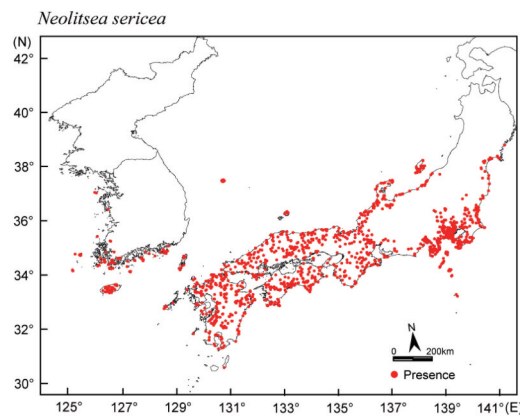


Fig. 1. Actual distribution of *N. sericea*. The number of the presence of *N. sericea* was 2,171 records

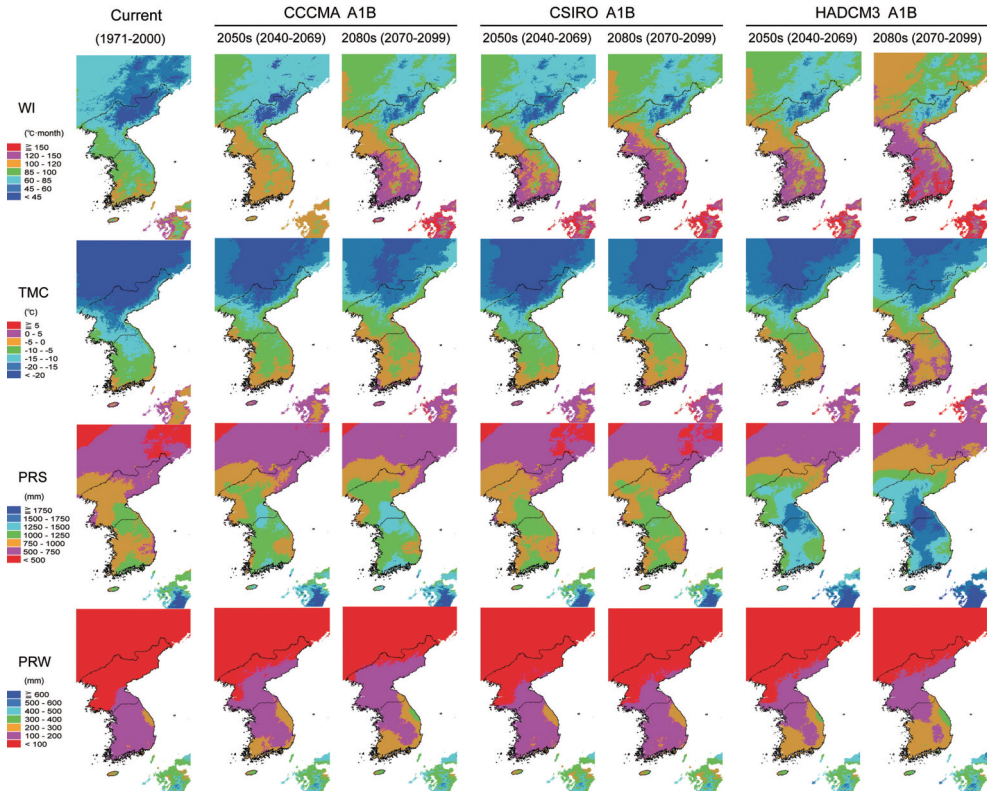


Fig. 2. Maps of four climatic variables under the current climate(1971-2000), the future climate CCCMA A1B, CSIRO A1B and HADCM3 A1B identified as the 2050s(2040~2069) and 2080s(2070~2099). WI: Warmth index. TMC: Mean minimum temperature of the coldest month. PRS: Summer(May-September) precipitation. PRW: Winter(December-March) precipitation.

Table 1. The mean values of four climatic variables under the current climate (1971-2000) and future climate scenarios (CSIRO A1B, CCCMA A1B and HADCM3 A1B) for the 2050s and 2080s in Korean Peninsula. WI: Warmth index (Kira 1948), TMC: Mean minimum temperature of the coldest month, PRS: Summer (May-September) precipitation, PRW: Winter (December-March) precipitation

Climate condition		WI(C° · month)	TMC(C°)	PRS(mm)	PRW(mm)
Current (1971-2000)		78.1	-13.0	864.5	112.2
CSIRO A1B	2050s (2040-2069)	96.5	-9.9	911.2	125.2
	2080s (2070-2099)	107.3	-8.3	937.2	132.1
CCCMAA1B	2050s (2040-2069)	93.4	-9.0	1,002.8	143.6
	2080s (2070-2099)	102.6	-7.0	1,077.5	160.2
HADCM3 A1B	2050s (2040-2069)	103.2	-8.1	1,219.9	148.5
	2080s (2070-2099)	118.9	-5.6	1,394.5	166.2

4. 통계해석

통계해석은 대상종의 재/부재 자료를 종속변수로 하고, 4개 기후값(WI, TMC, PRS, PRW)을 독립변수로 하여, 중분분포 모델(SDMs; Speci species distribution models) 중에서 CT-model(Classification

tree model)(Clark and Pregibon, 1992)을 이용하였다. CT-model은 대상종의 분포와 환경 경도와의 관계를 분석하기 위하여, 종속변수를 독립변수로부터 가능한 균질하게 반복하여 2분할되도록 구축되는 통계모델이며(Breiman *et al.*, 1984), 독립변수간의

복잡한 상호작용에 대한 모델화가 가능하며 모델 해석이 용이하다(De'Ath and Fabricius, 2000). CT-model의 구축시 교차확인(cross-validation)(Clark and Pregibon, 1992)을 통해 최적의 분리회수를 결정하였다. 교차 확인은 자료를 10개 그룹으로 나누어 9개 그룹을 이용하여 모델을 구축하고 나머지 1개 그룹으로 모델을 평가하여 100회 반복하여 판정하였다. 또한, 모델 구축에 영향을 미치는 기후변수에 대한 분리 공헌도(DWS: Deviance weighted score)(Matsui *et al.*, 2004a)를 산출하여 기후요인을 확인하였다.

구축된 모델 예측정도(豫測精度)를 판정하기 위해 ROC(Receiver operating characteristic)해석(Metz, 1978; Hanley and McNeil, 1982; Zweig and Campbell, 1993)을 실행하였다. ROC해석에 의해 산출된 AUC값(Area under the curve)은 0.5이상, 1.0이하의 값으로 1.0에 근접 할수록 모델구축이 적합하다고 판정된다. AUC의 평가기준은 0.9~1(excellent), 0.8~0.9(good), 0.7~0.8(fair), 0.6~0.7(poor), 0.5~0.6(fail)으로 구분하였다(Swets, 1988; Thuiller, 2003).

CT-model을 통해 구축된 모델에서 식물종의 생육에 적합한 환경을 갖는 지역으로 모델의 적합도가 최고점일 때 분포확률의 역치 이상인 지역을 생육 적지(Suitable habitats: SHs)로 판단하였다(津山幾太郎 등, 2008). 생육 적지의 역치는 모델의 예측정도 평가를 위한 ROC(Receiver operating characteristic)의 해석(Zweig and Campbell, 1993)에서 감도(Sensitivity)와 특이도(Specificity)가 서로 1.0에 가까운 이상점(理想點)과 1.0과의 거리이며, 계산식은 $MinROC\ dis. = \sqrt{[(1-Se)^2 + (1-Sp)^2]}$ 이다(윤종학 등, 2011). 또한, 95%의 감도(Sensitivity)일 경우 정의되어지는 출현확률을 역치로 적용하여 잠재 생육지(Potential habitat: PHs)로 판단하였다(Tsuyama *et al.*, 2011). 분포 변륙지(Marginal habitats: MHs)는 생육 적지의 역치(閾值)보다는 낮고 잠재 생육지의 분포확률 보다는 높은 지역으로 식물종의 생육은 가능하지만 그다지 적합하지 않은 환경을 갖는 지역으로 판단하여 분석하였다. 모델 해석 프로그램

으로는 R 2.11.1(R Development Core Team, 2011)을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 모델구축 및 기후조건 분석

한반도에 분포하는 참식나무(*Neolitsea sericea*)의 분포 자료와 기후요소의 관계를 CT-model(Classification tree model)을 이용하여 참식나무의 분포 모델(Nse-model)을 구축한 결과 총 7개의 terminal node(TN)가 생성되었다(Fig. 3). Nse-model의 예측정도를 확인하기 위해 ROC분석을 실시한 결과, AUC값이 0.86로 산출되었으며, Swets (1988)의 모델 판정기준 $AUC > 0.8$ 에 의하면 good으로 판정되었다. ROC분석에서 모델의 적합도가 최고점일 경우의 분포확률을 역치(閾值)로 한 값(MinROCdistance)은 0.167이며, 참식나무의 분포 모델(Nse-model)에서 출현확률 0.167이상의 지역을 생육적지(Suitable habitats)로 판단하였다. 분포 재지점(在地点)의 95%를 포함하는 최대 출현확률을 나타내는 분포확률 0.086이상의 지역을 잠재 생육지(Potential habitats), 역치값 0.086~0.167의 지역을 분포 변륙지(Marginal habitats)로 판단하여 분석하였다. Nse-model의 구축 결과, 7개의 TN은 최한월최저기온(TMC) $-4.41^{\circ}C$ 를 기준으로 크게 제 1그룹(TN①, TN②)과 제 2그룹(TN③~⑦)으로 나뉘어졌다. 제1그룹은 최한월최저기온(TMC) $-6.25^{\circ}C$ 를 기준으로 node ①과 node ②로 구분되어지며, 제 2그룹은 최한월최저기온(TMC) $-2.75^{\circ}C$ 기준으로 node ③, ④와 node ⑤~⑦로 구분되었다. 또한, 각 분기된 그룹은 기후요인에 의해 다시 분기되어 각 TN에 대한 기후조건이 산출되었다.

한반도 참식나무의 분포와 기후요인에 대한 생육 적지(SHs)는 분포확률 0.167 이상의 지역으로 TN ④, TN⑥, TN⑦이며, 분포 변륙지(MHs)는 분포확률 0.086~0.167의 지역으로 TN③, TN⑤로 예측되었으며, 잠재 생육지(생육적지와 분포 변륙지)는 TN ③~⑦의 5개 TN으로 예측되었다. 구축된 Nse-

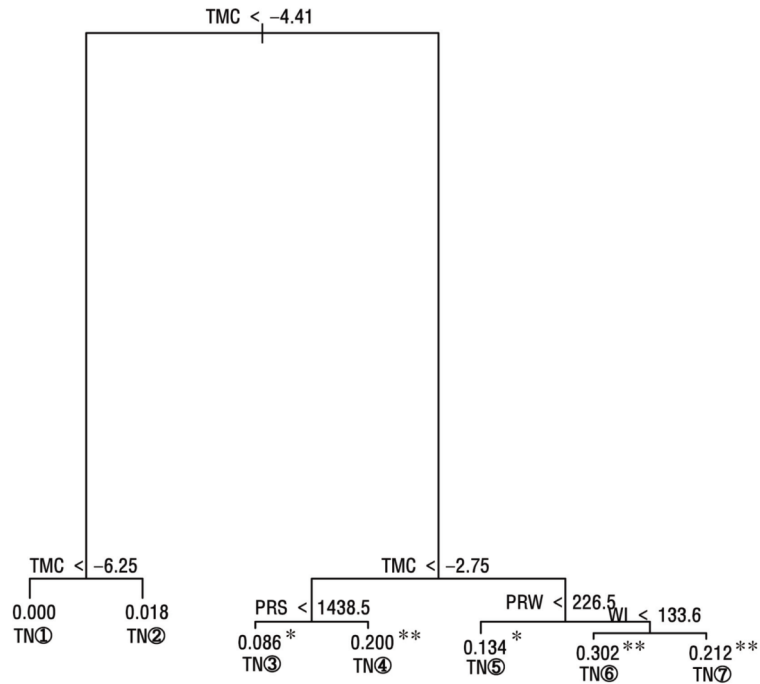


Fig. 3. Classification tree for *N. sericea* trees based on the four climatic variables. Splitting conditions and probability of occurrence of *N. sericea* are shown at the first few major nodes. If the conditions shown at the top of a branch are met, follow the left branch, otherwise follow the right branch, resulting in 7 terminal nodes (TN). The length of the vertical lines below each true-false split corresponds to the change in the magnitude of deviance between parent and children nodes. TMC: the minimum temperature of the coldest month, WI: warmth index, PRS: summer(May-September) precipitation. PRW: winter(December-March) precipitation. *Marginal habitats(MHs), **Suitable habitats(SHs)

model에서 가장 높은 출현확률을 나타내는 TN⑥의 기후조건은 $-2.75^{\circ}\text{C} \leq \text{TMC}$, $226.5\text{mm} \leq \text{PRW}$, $\text{WI} \leq 133.6$ 의 지역으로 예측되었다. 그 다음으로 출현확률이 높은 TN⑦은 $-2.75^{\circ}\text{C} \leq \text{TMC}$, $226.5\text{mm} \leq \text{PRW}$, $133.6 < \text{WI}$, TN④는 $-4.41^{\circ}\text{C} \leq \text{TMC} < -2.75^{\circ}\text{C}$, $\text{PRS} < 1438.5\text{mm}$ 의 기후조건이다. 분포 변류지로 판단되는 TN③의 기후조건은 $-4.41^{\circ}\text{C} \leq \text{TMC} < -2.75^{\circ}\text{C}$, $\text{PRS} < 1438.5\text{mm}$ 이며, TN⑤는 $-2.75^{\circ}\text{C} \leq \text{TMC}$, $\text{PRW} < 226.5\text{mm}$ 의 기후조건으로 분석되었다.

Nse-model의 구축시 terminal node(TN) 분리에 공헌한 독립변수의 분리공헌도(DWS; Deviance weighted score)는 TMC(최한월최저기온)가 96.3%, PRW(동계강수량)가 1.8%, PRS(하계강수량)가 1.0%, WI(온량지수)가 0.9%로 분석되었다. 따라서, 참식나무의 분포를 결정하는 제 1요인으로는 최한월

최저기온(TMC), 제 2요인으로는 동계강수량(PRW)로 분석되었으며, 제 3, 4요인으로 하계강수량(PRS), 온량지수(WI) 순으로 참식나무의 분포 영향에 작용하고 있는 것으로 분석되었다.

2. 현재기후에서 생육지 예측

구축된 참식나무 분포 모델(Nse-model)을 토대로 현재기후에서 참식나무의 잠재 생육지를 예측한 결과, 실제분포와 유사한 서남부 해안지역 및 남해안 지역과 울릉도, 제주도 해안 내륙으로 예측되었다(Fig. 4). 참식나무의 생육적지(TN③, TN⑤)는 서남부 해안지역의 진도, 해남반도, 완도, 남동부 해안지역의 부산, 장안, 울산, 제주도, 울릉도의 해안내륙지역으로 면적은 $2,744\text{km}^2$ 으로 예측되었다. 분포 변류지(TN④, TN⑥, TN⑦)은 서남부 내륙지역의 나주, 광주, 남해안 지역의 여수, 장승포, 남동부 내륙

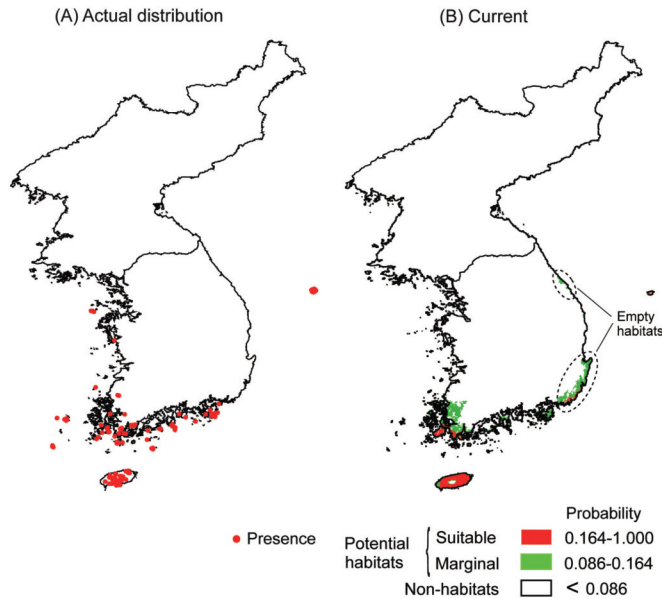


Fig. 4. Distribution of *N. sericea* in Korea. Map (a) shows the actual distribution, map (b) shows the potential habitats, suitable habitats, marginal habitats and empty habitats

지역, 동부 해안지역의 동해, 삼척으로 나타났으며 면적은 5,037km²로 예측되었다. 현재기후하에서 참식나무의 잠재 생육지(생육적지와 분포변복지)는 7,781km²로 한반도 면적의 약 3.4%를 차지하였다. 또한, 기후적으로는 생육가능하나 실제로 분포하고 있지 않는 생육지(Empty habitats)(Armonies & Reise 2003; Tsuyama *et al.*, 2011)는 남동부 해안 내륙과 동부 해안지역 동해, 삼척이 예측되었다(Fig. 4). 이 지역은 참식나무의 분포 이동능력 등의 제한

으로 실제로는 분포하고 있지 않으나 기후적으로는 생육 가능한 지역으로 분석되었다. 현재기후에서 모델을 통해 예측된 참식나무의 잠재 생육지와 한반도 수평적 식생대의 관계를 살펴보면, Yim(1977)은 한반도 수평적 식생대 구분에서 난온대 상록활엽수림을 한랭지수(Coldness Index: CI) -10℃ · month 을 상한선으로 남부해안 무안, 장흥, 하동, 울산을 경계하고 있으며, 한반도 난온대 상록활엽수림대는 본 연구에서 예측된 참식나무의 잠재 생육지 보다 북상

Table 2. Comparison between the area of habitats *N. sericea* under the current climate and that under the climate change scenarios (CCCMA A1B, CSIRO A1B and HADCM3 A1B) for 2050s and 2080

Climate condition		Habitat type		
		Suitable habitats(km ²)	Maginal habitats(km ²)	Potential habitats(km ²)
Current		2,744	5,037	7,781
CCCMA	2050s	12,030	13,327	25,357
A1B	2080s	13,172	28,211	41,384
CSIRO	2080s	6,217	15,056	21,273
A1B	2030s	4,481	18,316	22,797
HADCM	2050s	14,504	31,975	46,479
A1B	2080s	26,339	35,715	62,054
The mean	2050s	7,444	23,914	31,357
three scenarios	2080s	8,499	41,376	49,875

하여 한계선을 나타내고 있다.

3. 미래기후에서 생육지 예측

미래기후에서 한반도 참식나무의 생육지 변화를 예측하기 위해 미래기후 시나리오 CCCMA, CSIRO, HADCM3의 A1B를 적용하여 2050년(2040~2069)와 2080년(2070~2099)년의 시계열에 따른 잠재 생육지를 예측한 결과, 미래기후 2050년의 잠재 생육지는 21,273~46,479km²로 예측되었다(Table 2). 3개(CCCMA, CSIRO, HADCM3)의 기후 시나리오에서 예측된 잠재 생육지의 가능지역을 종합하여 산출한 면적은 약 31,357km²이며, 한반도 면적의 약 13.7%를 차지하였다. 잠재 생육지는 서해안쪽으로 북한지역의 옹진반도 해안까지 예측되었으며, 남한 지역 내륙으로는 태안, 김제, 나주, 순천, 진주, 김해 등으로 예측었다(Fig. 5). 또한, 동부 지역으로는 경주, 포항을 비롯하여 동해안 지역의 삼척, 속초, 고성과 북한지역의 장전까지 예측되었다(Fig. 5). 미래기

후 2050년에서 참식나무의 잠재 생육지는 현재기후에서 보다 약 4배 증가된 면적으로 분석되었다(Table 2). 미래기후 2080년에서 잠재 생육지는 22,797~62,054km²로 예측되었으며(Table 2), 3개 기후시나리오에서 예측된 잠재 생육지의 가능지역을 종합하여 산출한 면적은 약 49,875km²이며, 한반도 면적의 약 21.8%를 차지하였다. 잠재 생육지는 서해안쪽으로 북한지역의 은율과 옹진반 내륙, 사리원, 남한 지역 내륙으로 안산, 수원, 태안반도 내륙, 예산, 전주, 광주, 순천, 의령, 밀양 등의 내륙까지 예측되었으며, 동해안쪽으로는 경주, 포항, 울진, 동해, 속초와 북한지역의 원산까지 잠재 생육지가 예측되었다(Fig. 5). 미래기후 2080년의 참식나무의 잠재 생육지는 현재기후에서 보다 약 6.4배 증가된 면적으로 분석되었다(Table 2). 미래기후에서 한반도 참식나무의 잠재 생육지는 현재기후를 기준으로 2050년, 2080년에 걸쳐 증가된 면적이 예측되었다. IPCC에서 미래기후 시나리오의 불확실성에 대한 의견은 있

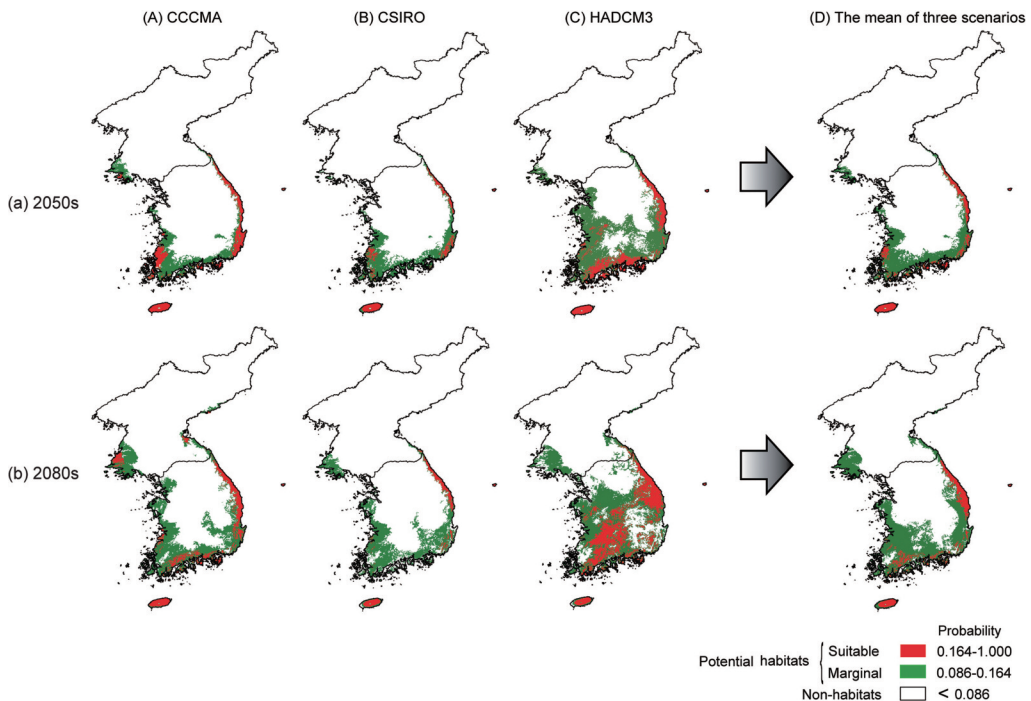


Fig. 5. Distribution of potential habitats of *N. sericea* under the future climate change scenarios for (a) 2050s and (b) 2080s. (A) CSIRO A1B, (B) CCCMA A1B and (C) HADCM3 A1B. (D) The mean of three probabilities under the GCMs: CCCMA A1B, CSIRO A1B and HADCM3 A1B

지만 3개의 미래기후 시나리오를 통해 예측된 기후 변화에 따른 한반도 참식나무의 분포 변화는 점진적으로 내륙으로 확대와 북상 할 것으로 판단된다. 한반도 남부지방 및 해안지방은 농경지, 시가지 등의 인간 활동에 의한 토지이용으로 난온대 상록활엽수의 잠재생육지 및 생육지가 파괴되어 파편화 생육지가 형성되어있지만, 기후변화에 따라 점진적으로 한반도 남부지역에 분포하는 난온대 낙엽수림(남부)을 구성하는 서어나무, 졸참나무, 굴참나무, 갈참나무, 소사나무군락 등과의 세력 경쟁이 예상된다. 또한, 기후변화가 진행됨에 따라 난온대 낙엽수림대는 북상할 것이며, 남해안지역에 주로 분포하는 난온대 상록활엽림을 구성하는 참식나무를 비롯하여 후박나무, 구실갯밤나무, 동백나무, 생달나무 등은 난온대 낙엽활엽수림으로 침입되는 과정에서 한반도 산림군락의 군락구조의 종조성의 변화 및 산림 생태계의 변화가 예상된다.

IV. 결론

본 연구에서 한반도 참식나무의 생육을 결정하는 기후조건과 기후변화에 따른 잠재 생육지 분포 변화를 중분포 모델과 3개의 기후시나리오 (CCCMA, CSIRO, HADCM3의 A1B)를 적용하여 기후 변화가 한반도 참식나무의 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 참식나무의 분포를 규정하는 가장 큰 기후 요인으로는 최한월최저기온(TMC)이며, -4.4°C 이상 지역에서 분포하는 것으로 분석되었다. 제 2요인으로는 동계강수량(PRW)로 분석되었으며, 제 3, 4요인으로 하계강수량(PRS), 온량지수(WI) 순으로 참식나무의 분포 영향에 작용하고 있는 것으로 분석되었다.

기후변화가 진행됨에 따라 참식나무의 잠재 생육지는 2050(2040~2069)년에서 현재기후에서 보다 약 4배, 2080(2070~2099)년에서 약 6.4배 증가하였다. 참식나무는 기후변화에 따라 잠재 생육지의 증가와 더불어 확대 북상할 것으로 판단된다. 참식나무는 한반도 기후변화에 주요한 식물 지표종으로 유효하다고 판단되며, 잠재 생육지로 예측된 서해안 도서 지역 및 남부 내륙의 저지대 등의 안정적 생육지역에

대하여 지속적인 모니터링 조사가 필요할 것으로 판단된다. 중분포 모델(SDMs)을 통한 기후변화에 따른 참식나무의 식물 지표종의 유효 검증과 현재기후 및 미래기후에서의 잠재 생육지 변화 예측은 기후변화가 진행됨에 따라 참식나무의 분포 확대 양상을 파악을 통해, 기후변화 모니터링 조사지역의 효과적인 선정과 기후변화에 따른 생육가능 지역을 평가하는데 중요한 자료로 활용될 것으로 사료된다.

참고문헌

- 김중현, 윤종학, 남기흠, 이정현, 최병희, 이병윤, 2011, 덕적군도 내 무인도서의 관속식물상 연구, 한국환경과학회지, 20, 1-23.
- 이창복, 1980, 대한식물도감, 향문사, 서울.
- 이우철, 임양재, 2002, 식물지리, 강원대학교, 춘천.
- 윤종학, 中尾勝洋, 박찬호, 이병윤, 2011a, 기후변화에 따른 한반도 후박나무의 잠재 생육지 및 분포예측, 한국환경생태학회지, 25, 903-910.
- 윤종학, 김중현, 오경희, 이병윤, 2011b, 한반도 난온대 상록활엽수의 분포변화와 기후조건, 한국환경생태학회지, 25, 47-56.
- 中尾勝洋, 松井哲哉, 田中信行, 福島 司, 2009, 日本における常緑カシ類2種の個体および優占林の分布を規定する気候条件, 日本立地学会誌 森林立地, 51, 27-37.
- 津山幾太郎, 松井哲哉, 小川みふゆ, 小南裕志, 田中信行, 2008, 本州東部におけるチチマザサの潜在分布域の子測と気候変化の影響評価, GIS-理論と応用, 16, 11-25.
- Armonies, W. and K. Reise, 2003, Empty habitat in coastal sediments for populations of macrozoobenthos, Helgoland Mar Research, 56, 279-287.
- Clark, L. A. and D. Pregibon, 1992, Tree-based models, In: J. M. Chambers and T. J. Hastie, eds., Statistical Models in S, California, Wadsworth & Brooks/Cole

- Advanced Books & Software, Pacific Grove, pp.377-419.
- De'Ath, G., and K. E. Fabricius, 2000, Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis, *Ecology*, 81, 3178-3192.
- Bakkenes, M., J. R. M. Alkemade, F. Ihle, R. Leemans and J. B. Latour, 2002, Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050, *Global Change Biology*, 8, 390-407.
- Berry, P. M., T. P. Dawson, P. A. Harrison, R. Pearson and N. Butt, 2003, The sensitivity and vulnerability of terrestrial habitats and species in Britain and Ireland to climate change, *Journal of Nature Conservation*, 11, 15-23.
- Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen and C. J. Stone, 1984, Classification and regression trees, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, US, 358pp.
- Hanley, J. and B. McNeil, 1982, The meaning and use of the area under receiver operating characteristic (ROC) curve, *Radiology*, 143, 29-36.
- Harrison, P. A., P. M. Berry and T. P. Dawson, eds., 2001, Climate Change and Nature Conservation in Britain and Ireland: Modelling Natural Resource Responses to Climate Change (the MONARCH project), UKCIP Technical Report, Oxford.
- Horikawa, M., I. Tsuyama, T. Matsui, Y. Kominami and N. Tanaka, 2009, Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (*Pinus pumila*), *Landscape Ecology*, 24, 115-128.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007: the Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Iverson, L. R. and A. M. Prasad, 1998, Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States, *Ecological Monographs*, 68, 465-485.
- Kira, T.(1977) A Climatological interpretation of Japanese vegetation zones. In Miyawaki, A. and Tuxen, R. (eds.) *Vegetation science and environmental protection*. Maruzen, Tokyo, pp.21-30.
- Lee, B. Y., G. H. Nam, J. H. Yun, G. Y. Cho, J. S. Lee, J. H. Kim, T. S. Park, K. K. Kim and K. H. Oh , 2010, Biological indicators to monitor responses against climate change in Korea, *Korean Journal of Plant Taxonomy*, 40, 202-207.
- MaCarthy, J. J., O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White, eds., 2001, *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Matsui, T., N. Tanaka, T. Yagihashi, Y. Kominami, I. Tsuyama and K. Takahashi, 2009, Prediction and impact assessment of the changes in suitable habitats for beech (*Fagus crenata*) forests under climate change scenarios, *Journal of Global Environment*, 14, 165-174.
- Matsui, T., T. Yagihashi, T. Nakaya, H. Taoda and N. Tanaka, 2004a, Climatic controls on distribution of *Fagus crenata* forests in Japan, *Journal of Vegetation Science*, 15, 57-66.

- Matsui, T., T. Yagihashi, T. Nakaya, H. Taoda S. Yoshinaga, H. Daimaru and N. Tanaka, 2004b, Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan, *Journal of Vegetation Science*, 15, 605-614.
- Metz, C. E., 1978, Basic principles of ROC Analysis, *Seminars in Nuclear Medicine*, 8, 283-298.
- Ohsawa, M., 1990, An interpretation in latitudinal patterns of limits in south and east Asian mountains, *Journal of Ecology*, 78, 326-339.
- R Development Core Team, 2011, R: A language and environment for statistical computing, R. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, URL://www.R-project.org.
- Swets, K. A., 1988, Measuring the accuracy of diagnostic systems, *Science* 240, 1285-1293.
- Tanaka, N., 2007, PRDB (Phytosociological Releve Data Base), Environment change impact team, Forestry and Forest Products Research Institute.
- Tanaka, N., E. Nakazono, I. Tsuyama and T. Matsui, 2009, Assessing impact of climate warming on potential habitats of ten conifer species in Japan, *Global Environmental Research*, 14, 153-164.
- Thuiller, W., 2003, BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential shifts under global change, *Global Change Biology*, 9, 1353-1362.
- Thuiller, W., S. Lavorel, M. B. Araujo, M. T. Sykes and I. C. Prentice, 2005, Climate Change threats to plant diversity in Europe, *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 8245-8250.
- Tsuyama, I., K. Nakao, T. Matsui, M. Higa, M. Horikawa, Y. Kominami and N. Tanaka, 2011, Climatic controls of a keystone understory species, *Sasamorpha borealis*, and an impact assessment of climate change in Japan, *Annals of Forest Science*, 68, 689-699.
- Yim, Y. J., 1977, Distribution of forest vegetation and climate in the Korea Peninsula, IV. Zonal distribution of forest vegetation in relation to thermal climate, *Japanese Journal of Ecology*, 21, 269-278.
- Zweig, M. H. and G. Campbell, 1993, Receiver-operating characteristic (ROC) Plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine, *Clinical Chemistry*, 39, 561-577.