

기후변화에 따른 우리나라 미선나무의 분포변화 예측

이상혁¹ · 최재용^{2*} · 이유미³

¹충남대학교 대학원, ²충남대학교 산림환경자원학과, ³국립수목원

Projection of climate change effects on the potential distribution of *Abeliophyllum distichum* in Korea

Sanghyuk Lee¹, Jaeyong Choi^{2*}, You Mi Lee³

¹Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Dept. of Environment and Forest Resources, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³Korea National Arboretum, Soheul-eup, Pocheon-si, Gyeonggi-do 487-821, Korea

Received on 9 April 2011, revised on 25 April 2011, accepted on 20 June 2011

Abstract : Changes in biota, species distribution range shift and catastrophic climate influence due to recent global warming have been observed during the last century. Since global warming affects various sectors, such as agriculture and vegetation, it is important to predict more accurate impact of future climate change. The purpose of this study is to examine the observed distribution of *Abeliophyllum distichum* in the Korean peninsula. For this purpose, two period (present and future) climate data were used. Mean data between 1950 and 2000, were used as the present value and the year 2050 and 2080 data from A1B senario in IPCC SRES were used for the future value. Potential habitation is analyzed by MaxEnt(Maximum Entropy model), and *Abeliophyllum distichum*'s coordinates data were used as a dependent variable and independent variables are composed of environmental data such as BioClim, altitude, aspect and slope. The result of six types GCM mean calculation, the potential habitability decreased by 40-60% of the average existing distribution. The methodologies and results of this resarch can be applicable to the climate changing adaptation strategies for the biodiversity conservation.

Key words : Global Warming, Climate change, Korea Endemic Plants, MaxEnt, Projection, GCM

I. 서론

최근 지구온난화에 따른 급격한 기후변화와 이로 인한 자연재해, 환경, 해양, 수산, 농업, 생태계 보고, 상업 등에 미치는 다양한 영향에 대한 과학적 증거들이 제시되면서 기후변화가 전지구적으로 중요한 화두로 떠오르고 있다. 기후 변화에 관한 정부간 패널(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)이 2007년에 발표한 제 4차 평가 보고서는 “지구온난화는 의심의 여지가 없다”라고 판정하였으며, “1970년 이후 지구적 평가 자료에 의하면 인위적 온난화는 물리적·생물적 시스템에 뚜렷한 영향을 주고 있는 것으로 보인다.”라고 결론을 내렸다(IPCC, 2007). 기후변화의 영향을 평가하기 위해서는 영향 예측의

목적에 적합한 모형을 선정하고, 기후시나리오를 설계하여 기후변화에 따른 영향평가를 실시하게 된다(Ahn 등, 2008). 시나리오는 가능한 미래의 상태에 대한 일관성 있는 기술로써(Carter 등, 1994) 기후변화 영향, 적응 및 취약성 평가를 할 때 반드시 필요하다. 시나리오는 크게 기후 시나리오와 비기후 시나리오로 나눌 수 있고, 비기후 시나리오는 다시 사회·경제적 시나리오, 토지이용시나리오, 환경 시나리오, 해수면 상승 시나리오 등으로 구분된다(Han 등, 2007).

한반도는 단위면적 대비 비교적 다양한 식물상을 보유하고 있는데, 이 중 우리나라 특산식물(Korean Endemic Plants)은 한반도의 자연환경에서 적응, 진화 해온 세계적으로 우리나라에만 분포하는 유일하고도 독특한 식물로 우리나라만이 가지고 있는 귀중한 유전자원이다. 생물다양성 협약에 의한 자국 식물자원 배타적 권리 인정으로 자생 식

*Corresponding author: Tel: +82-42-821-5750

E-mail address: jaychoi@cnu.ac.kr

물자원의 수집 및 보존 등에 있어 국가 관리 강화 추세에 따라 종 다양성 확보와 증진을 위한 생물종 현황 파악 및 변화 추적 필요성이 제기되고 있다.

그동안 한국의 고유한 지적자산인 특산식물들이 자연환경을 무분별하게 개발하는 경제발전 정책으로 말미암아 급속도로 사라져, 대부분 멸종위기 및 희귀식물이 되어버렸다. 이들 특산식물들의 종다양성과 유전적 다양성에 관한 정보들은 세계적으로 우리만이 가지고 있는 귀중한 정보이기 때문에 신물질을 탐색하고 신품종을 개발하여 고부가가치를 창출하는데 아주 중요한 정보가 된다(Kim, 2004). 또한, 1992년 리오에서 국제적으로 '생물다양성협약'이 제정되어 국가마다 자국의 식물자원을 보존하는데 노력을 경주하고 있는 상황에서 이러한 특산식물은 미세한 환경요인의 변화에도 민감하게 반응하기 때문에 우선적으로 관리·보전되어야 한다. 이에 따라, 특산식물의 보전과 관리에 대한 중요성 문제로 인식되고 있지만, 기존의 특산식물에 관한 연구는 현재 분포지의 환경적 특성에 대한 연구에 주목하고 있으며, 많은 분포지 예측 연구는 개개의 수종별 보다는 침·활엽수 구분이 주를 이루고 있어 특산식물에 주목하지 못하고 있다. 따라서 특산식물의 미래분포에 대한 연구가 요구되며, 신뢰성 높은 관리정책 수립을 위해 분포지 예측의 불확실성을 고려한 연구가 요구된다.

이와 같이, 기후변화로 인해 더욱 극심한 기후 재난이 예상되고 있는 가운데, 기후변화의 영향으로 생물종은 현재 새로운 종이 진화하는 속도의 1,000배 속도로 사라지고 있다(Lester R. Brown, 2008). 2007년 IPCC 보고서에는 지구평균기온이 1.5~2.5°C 상승할 경우 동식물의 20~30%가 멸종하고, 4°C 이상 상승하면 40% 이상의 종이 멸종하는 등의 많은 변화가 있을 것으로 예측하였다. Jung 등(2002)의 연구에서 한반도에서 산림소실지역은 발생하지 않는 것으로 예측되었으나 인위적 개입이 없는 경우 고사 위험이 높은 지역은 남한의 경우 남한 총 면적의 14%를 차지하였고, 북한은 18% 정도의 면적이 고사 위험이 있는 것으로 나타났다. 이러한 가운데 한반도에서만 자생하는 1종 1속의 유전적 가치가 높은 한국의 특산식물 중 멸종위험에 처한 미선나무에 대하여, 현재의 자생지의 잠재적 분포 가능지역을 분석한다. 기후변화 시나리오 및 모델을 적용하여 추후 기후변화로 인한 영향의 정도를 파악하여 서식처 분포 및 면적의 변화를 예측한다. 이를 통해, 자연적 이동속도보다 빠른 기후변화로 인한 피해를 최소화하여 미선

나무 보전전략수립의 기초자료로 활용될 수 있도록 한다.

II. 범위 및 방법

1. 연구의 범위

연구의 대상은 물푸레나무과 내에 1속 1종으로 유일하게 한반도에서만 자생하는 미선나무속의 잠재적 분포 예상지역을 알아보기 위해 현재 미선나무(*Abeliophyllum distichum* Nakai)가 자생하고 있는 지역의 위치 데이터를 천연기념물로 지정된 위치좌표와 국립수목원의 표본수집자료의 위치좌표 및 기타 문헌자료에서 제시된 좌표를 이용하여 10곳의 위치자료로 구성하였다(Fig. 1). 연구의 공간적 범위는 북위 33°~43.5°, 동경 123.5°~131°의 한반도가 완전히 포함되는 범위로 제한하며, 시간적 범위로는 1950년~2000년 평균 기후데이터를 현재로 적용하였고, WorldClim¹⁾에서 제공하는 2050년대와 2080년대 A1B시나리오의 GCM별 기후예측데이터를 미래로 하여 분포 변화를 모의하고자 한다.

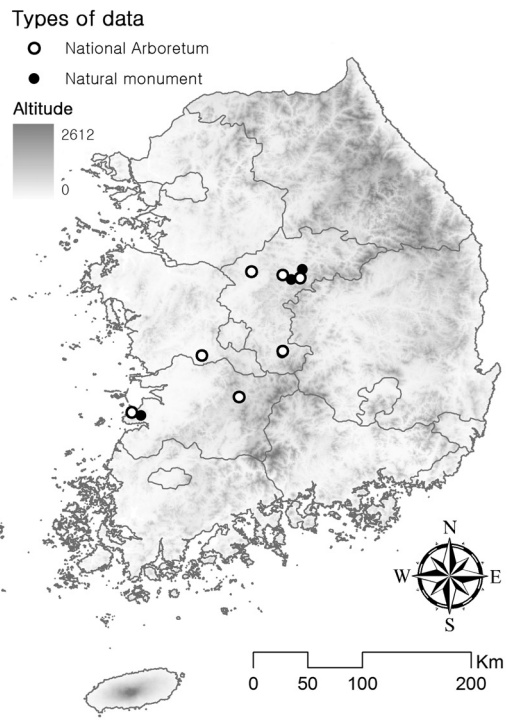


Fig. 1. Location of *Abeliophyllum distichum*.

1) <http://www.worldclim.org>

Table 1. List of environment variations.

Value Name	Description
Bio_01	Annual mean temperature
Bio_02	Mean diurnal range
Bio_03	Isothermality
Bio_04	Temperature seasonality
Bio_05	Max temperature of warmest period
Bio_06	Min temperature of coldest period
Bio_07	Temperature annual range
Bio_08	Mean temperature of wettest quarter
Bio_09	Mean temperature of driest quarter
Bio_10	Mean temperature of warmest quarter
Bio_11	Mean temperature of coldest quarter
Bio_12	Annual precipitation
Bio_13	Precipitation of wettest period
Bio_14	Precipitation of driest period
Bio_15	Precipitation seasonality
Bio_16	Precipitation of wettest quarter
Bio_17	Precipitation of driest quarter
Bio_18	Precipitation of warmest quarter
Bio_19	Precipitation of coldest quarter
nb_alt	Altitude
nB_asp	Aspect
nB_slo	Slope

2. 연구의 방법

본 연구에서의 종의 출현정보만 이용하여 예측정확도가 높으며, 모형의 우수성이 여러 선행연구에서 입증된 MaxEnt 모형을 사용하였다(Phillips 등, 2006; Elith 등, 2006; Song, 2011). MaxEnt모형은 회귀분석을 기반으로 하는 모형으로 출현정보를 바탕으로 최대 엔트로피 접근법(Maximum Entropy Approach)을 통해 잠재적 서식가능 분포지를 확률적으로 제시한다(Phillips 등, 2004). 비출현정보는 출현정보와 함께 이용되어 보다 정확한 분포특성을 추출할 수 있으나, 비출현정보의 획득 한계로 인해 출현자료만으로 구성되어 있는 한계가 존재한다. 이에 따라, 종속변수를 대상종의 출현자료(위치좌표)만을 요구함으로써 비출현정보 혹은 임의출현정보자료가 필요한 타 모델과는 달리 MaxEnt모형을 통해 더욱 높은 예측력을 바탕으로 결과를 도출 할 수 있다(Song, 2011).

연구 대상인 미선나무 서식 지역의 제한적 공간정보와 이에 상응하는 각종 환경정보, 즉 고도, 경사, 기후정보 등

Table 2. GCM of A1B scenario used in this study.

Acronym - Model	Country	Reference
NCAR - CCSM30	USA	Collins et al.(2006)
CCCma - CGCM31	Canada	Scinocca et al.(2008)
IPSL - CM4	France	Marti et al.(2005)
MPI - ECHAM5	Germany	Jungclaus et al.(2005)
UKMO - HadCM3	UK	Gordon et al.(2002)
UKMO - HadGEM1	UK	Johns et al.(2006)
CSIRO - MK30	Australia	Gordon et al.(2002)

- NCAR: National Center for Atmospheric Research
- CCCma: Canadian Center for Climate Modelling and Analysis
- IPSL: Institut Pierre-Simon Laplace
- MPI: Max Planck Institute for Meteorology
- UKMO: United Kingdom Met Office
- CSIRO: Australia;s Commonwealth Scientific and Industrial
- CCSR: Center for Climate Systems Research

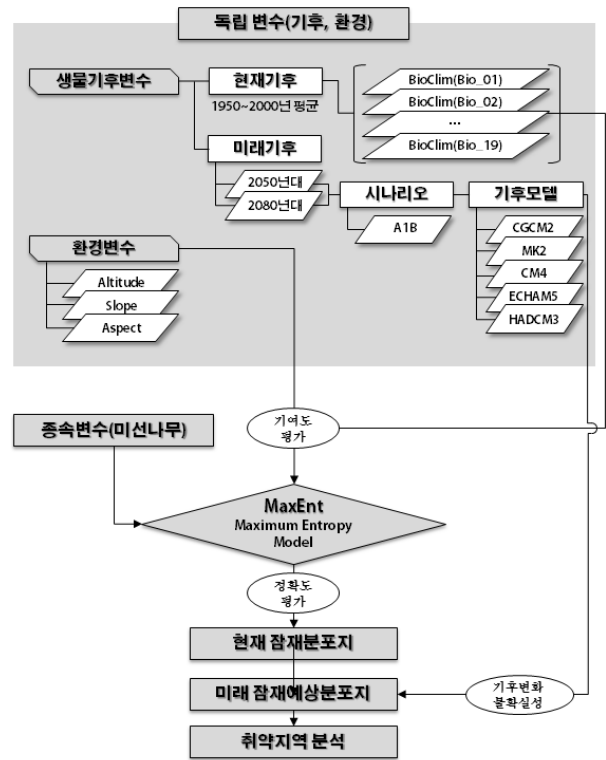


Fig. 2. Flow of this study.

과의 통계적 상관성을 바탕으로 WorldClim에서 제공하는 해상도가 30”(약 1 km)인 자료를 바탕으로 이들의 현재 환경변수(Table 1)를 독립변수로 사용하였다. 이를 바탕으로 현재의 잠재적 식생분포를 MaxEnt를 이용해 분석한 후, Table 2와같이 SRES(Special Report on Emission Scenarios) A1B 시나리오를 바탕으로한 여러 GCM(Global Climate Model)의 downscaling된 자료의 적용을 통한 미

선나무의 미래 서식가능지역의 변화를 예측하였다. 모형의 설명력 검증은 ROC(Receiver operating characteristics) 곡선의 AUC(Area under the curve)를 통해 실시되었으며, 각 환경변수별로 잠재적 서식지 분포 영향에 미치는 정도를 평가하기 위해 Jackknife test를 수행하였다. 분석에 이용된 프로그램은 Java 6, Maximum Entropy Species Distribution Modeling 3.3.3e, DIVA-GIS 7.3 및 ArcGIS Desktop 9.3을 이용하였으며, Fig. 2와 같은 흐름으로 진행된다.

III. 결과 및 고찰

1. 기온 및 강수량 변화

A1B 시나리오에서 연평균기온과 연평균강수량 추세의 정도가 GCM모델별로 비슷한 증가추세가 보이지만, 그 정도가 각각 다르게 나타난다. 연평균기온은 Fig. 3과 같이 UKMO-HadGEM모델이 가장 높은 증가율을 보이고, CCCMa-CGCM3모델이 가장 낮은 증가율을 보이며, NCAR-CCSM3 모델이 각 모델의 평균정도와 비슷한 것을 알 수 있다. 연평균강수량은 NCAR-CCSM3모델이 가장 큰 결과를 나타내며, UKMO-HadGEM1모델이 가장 낮은 증가율을 나타냈다(Fig. 4).

2. 현재의 잠재적 서식 가능성

1) 변수별 중요도 평가

미선나무의 경우 가장 높은 중요도 값을 갖는 변수는 기온과 관련된 변수로서, 최저강수분기의 평균기온(Bio_9)변

수가 75.4%, 최고강수분기의 평균기온(Bio_8)이 6.2%, 최난월의 최고기온(Bio_5) 4.5% 순으로 높은 중요도를 보인 변수였다.

2) 모형의 정확도 평가

ROC(Receiver Operating Characteristics)곡선의 AUC(Area Under the Curve)는 최소 0.5를 기준으로 분류의 정확도가 완벽할 경우 1.0을 나타내게 되는데, AUC값이 약 0.7이상일 때 모형이 설명하는 잠재력이 의미를 갖는다고 판단한다(Phillps 와 Dudik, 2008). 따라서, 미선나무의 현재 잠재적 분포가능성 평가결과 0.973으로 모형 적용이 가능한 것으로 분석되었다.

3) 현재의 미선나무 잠재 분포지

현재 자생지 위치와 함께 현재 잠재적 서식 가능 지역을 분석된 결과를 비교하여 보았다. Fig. 5와 같이 잠재적 서식가능 확률 70~80%로 분석된 지역에 현재의 자생지가 위치하고 있는 것으로 나타났다. 검은색 포인트는 미선나무의 현재 위치를 나타내며, 각 셀(격자)의 음영색이 진할수록 분포가능성이 높은 것을 나타낸다.

3. 미래의 잠재적 예상분포지

한반도 전체로 봤을 때 미선나무의 분포적지는 평균적으로 증가추세를 보이나, 이는 북한지방에 분포 가능면적이 증가함에 따라 나온 결과이며, 남한에서는 세가지 시나리오에서 GCM간 평균적으로 75%이상의 분포적지가 모두 소멸하는 것으로 예상되었다(Table 3, Fig. 6). 특히, GCM 중 HADCM3 모델에서 미선나무의 잠재적 서식가능지역은

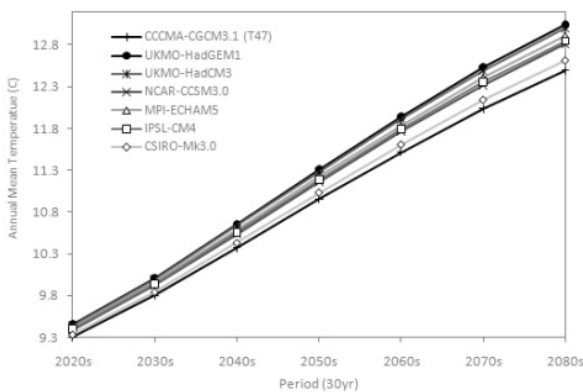


Fig. 3. Annual mean temp. change in the GCMs.

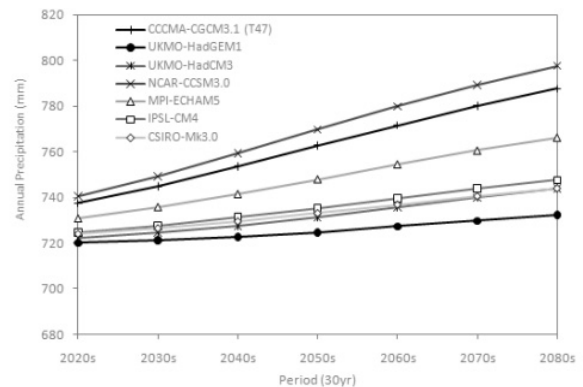


Fig. 4. Annual mean precip. change in the GCMs.

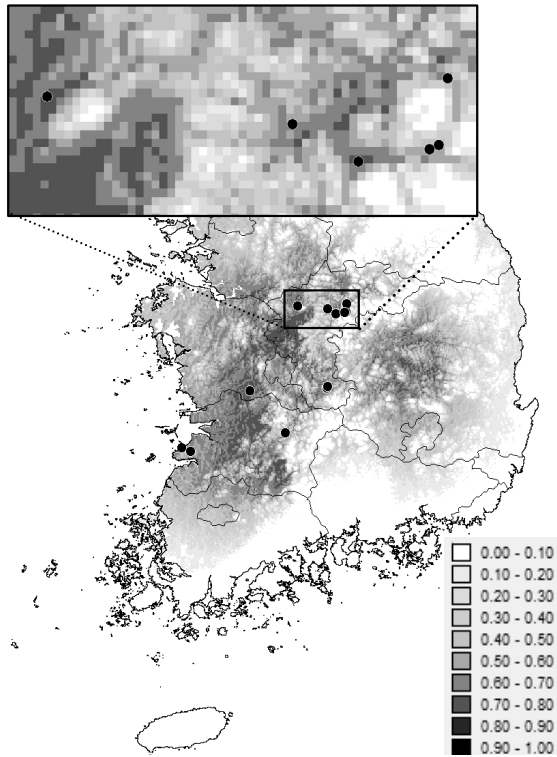


Fig. 5. The potential geographic current distribution of *Abeliophyllum distichum*.

완전히 소실될 것으로 예측되었으며, 미래 분포가능 예상지 최대면적을 나타낸 ECHAM5모델의 경우 잠재적 분포가능 확률이 75%이상인 지역이 충청북도, 경기도 및 강원도 일부지역에서 4,563 km²로 분석되었다(Fig. 7). 또한, 북한의 황해도와 평안도일대에 잠재적 분포지역이 미래에 분포가능성이 높은 지역으로 판단되었다.

기후변화로 인한 분포적지의 이동에 따라 남한지역의 잠재적 분포적지면적 변화를 분석하여 서식지의 소멸에 따른 위험지역과 추가 서식가능지역을 예측하였다. 미선나무의 경우 A1B 시나리오의 GCM간의 평균값을 바탕으로 분석한 결과, 우리나라에서 분포 가능성이 75%이상인 지역이 잠재적 서식 가능 지역이 전부 소멸되어 분포 가능성 40~60%로 감소할 것으로 예상되었으며, 이와는 반대로 북한지역에서 황해도 및 평안도를 중심으로 분포 가능성이 크게 증가할 것으로 나타났다(Table 3, Fig. 6).

IV. 결론

본 연구는 기후변화가 우리나라 생물다양성 및 생태계에

Table 3. Changes in the potential distribution area (up to 75%) of GCMs mean (unit: km²).

Region	Present	2050's			2080's		
		Min	Mean	Max	Min	Mean	Max
Korean Peninsula	851	519	4,593	30,723	0	3,461	46,010
North Korea	0	519	4,593	18,046	0	3,461	41,447
South Korea	851	0	0	12,677	0	0	4,563

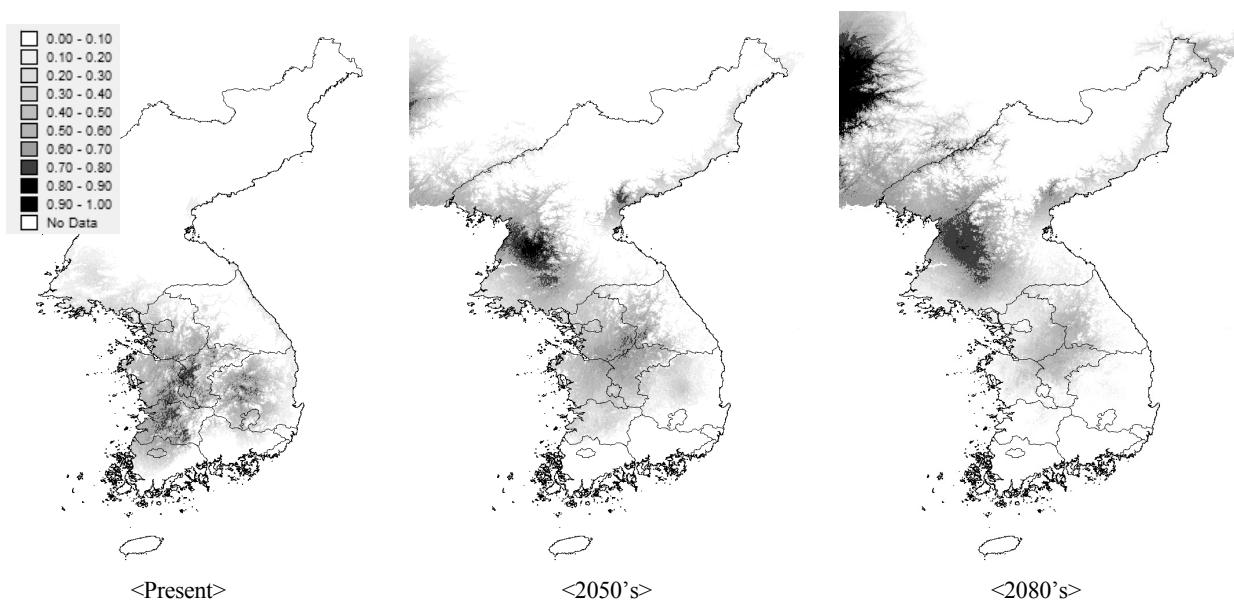


Fig. 6. Projection of potential distribution using by 6 type of GCM mean. Black color is high distribution probability.

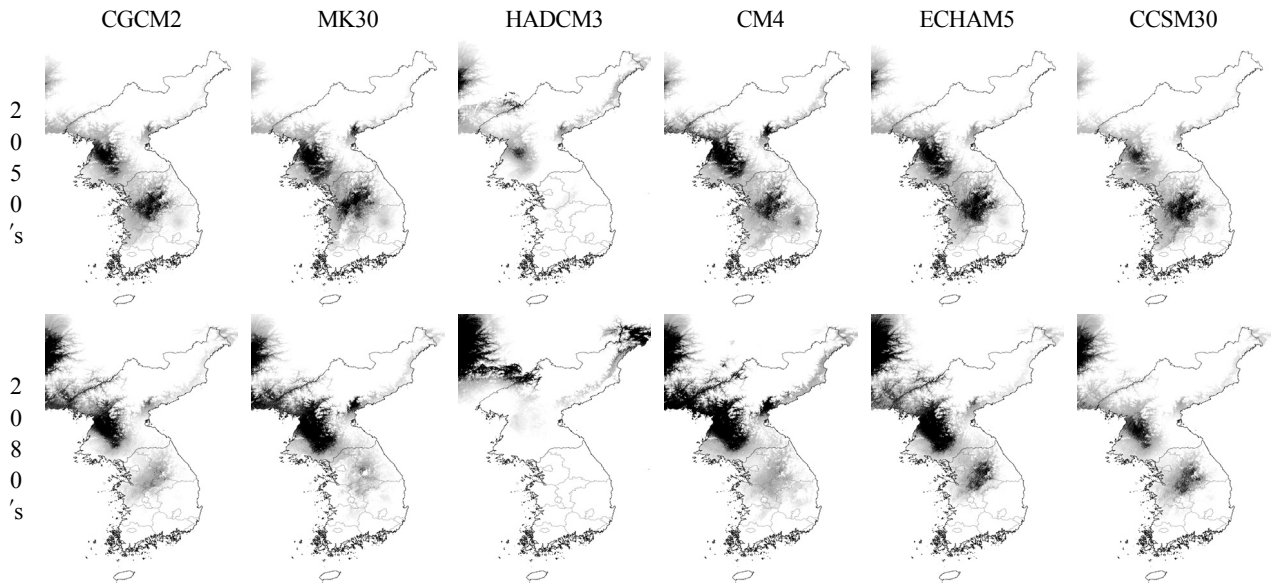


Fig. 7. Projection of distribution using by 6 type of GCM (2050's & 2080's).

미치는 영향을 파악하기 위하여 멸종위기종에 포함된 미선나무를 대상으로, 현재의 잠재적인 분포지를 기후변화 시나리오에 따른 미래 예상분포역으로 모델링하였다. 이를 통해, 기후변화의 취약성을 검토하여 향후 현지내(In-situ) 보전을 위한 보전가능지역을 찾아 서식지 증가, 감소, 보존 정도 및 자생지의 이동추이를 살펴 서식지 보전을 위한 기초자료 수립을 목적으로 하고 있다.

생물기후변수의 상대적 중요성을 검토한 결과, 미선나무는 기온의 영향이 현재의 분포패턴에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 현존하는 SRES A1B시나리오의 GCM 중 어느 모델을 사용하는가에 따라서 결과값이 크게 달라지는 것을 알 수 있었으며, 모델간 분포가능성 값을 평균적으로 계산하였을 때 우리나라에 충청북도, 경기도, 강원도 일부지역의 기존 분포지로부터 잠재적 서식가능성이 평균 40~60%정도로 낮아졌다. 추후 기후변화현상이 지속될 경우 우리나라에서의 자생지는 소멸될 위험이 큰 것으로 나타났으며, 북한의 황해도와 평안도주변에 잠재적 분포확률이 증가함에 따라 대체 자생지를 마련 할 수 있을 것으로 판단되었다.

현재 분석되어진 결과는 우리나라의 분포자료만 포함하고 있어, 북한의 현재 미선나무 분포를 전혀 고려하지 않았다. 결국, 분포자료의 한계로 최적 잠재 서식지역을 과소평가하고 있어서 분포자료의 보정이나 편중자료를 고려한 분석방법은 적용하지 않고서는 적절한 분석이 어려운 것으로 나타났다. 또한, 기후변화 시나리오 및 관련 모델들의 모든

부분을 완벽하게 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상당한 불확실성이 포함될 수밖에 없다. 따라서, 이러한 특성상 확률론적인 방법의 접근이 이루어져야하는데, 본 논문에서는 강수량관련 변수와 기온관련 변수, 지형 등의 환경적 변수만을 사용하여 예측하였기 때문에 적지분포 예측에 영향이 클 것으로 판단되며, 기후변화의 시나리오별 모델에 따른 예측 불확실성이 존재한다. 이에 따라, 신뢰성 높은 미래기후를 전망(projection)하기 위해 분포지 예측의 불확실성을 고려한 추후 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 산림청‘산림과학기술개발사업(과제번호: S211011L010330)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고 문헌

- Ahn SR, Lee YJ, Park GA, Kim SJ. 2007. Analysis of Future Land Use and Climate Change Impact. Journal of Civil Engineering 28(2B): 315-224. [in Korean]
- Collins WD, Bitz CM, Blackmon ML, Bonan GB. 2006. The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). Journal of Climate 19(11): 2122-2143.
- Elith J, Ferrier S, Huettmann F, Leathwick J. 2006. The evaluation strip : A new and robust method for plotting predicted responses from species distribution models. Ecol. Model. 186(3): 280-289.

- Gordon HB, Rotstayn LD, McGregor JL, Dix MR, Kowalczyk EA, O'Farrell SP, Waterman LJ, Hirst AC, Wilson SG, Collier MA, Watterson IG, Elliott TJ. 2002. *The CSIRO MK3 Climate System Model*. [Electronic publication]. Aspendale: CSIRO Atmospheric Research. (CSIRO Atmospheric Research technical paper, no. 60). 130 pp.
- Han WJ, Ahn SE. 2007. *Climate Change Impact Assessment and Development of Adaptation Strategies in Korea III*. KEI (Korea Environment Institute) RE-01. pp. 1-2. [in Korean]
- IPCC. 2007. *Climate Change: Physical Science Basis*. Paris, France. pp. 2-21.
- Johns TC, Durman CF, Banks HT, Roberts MJ, McLaren AJ. 2006. The new Hadley centre climate model HadGEM1: Evaluation of coupled simulations. *Journal of climate* 19(7): 1327-1353.
- Jungclaus JH, Botzet M, Haak H, Keenlyside N, Luo JJ, Latif M, Marotzke J, Mikolajewics U, Roeckner E. 2005. Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate* 19(16): 3592-3972.
- Jung HC, Jeon SW, Lee DK. 2002. Impact assessment on the forest systems of the Korean peninsula due to the global warming. *J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech* 5(5): 1-10.
- Kim MY. 2004. *Korean Endemic Plants*. Solgwahak Publishing, Korea. [in Korean]
- Laster RB. 2008. *Plan B 3.0*. pp. 103-140.
- Marti O, Braconnot P, Bellier J, Benshila R, Bony, S. 2005. *The new IPSL climate system model: IPSL-CM4*. Institute Pierre Simon Laplace, technical report.
- Phillips SJ, Dudik M, Schapire RE. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*. pp. 655-662.
- Phillips S, Anderson R, Schapire R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Phillips SJ, Dudik M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31(2): 161-175.
- Scinocca JF, McFarlane NA, Lazare M, Li J, Plummer D. 2008. The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8: 7055-7074.
- Song WK. 2011. *Habitat network modeling of Leopard cat (*Prionailurus bengalensis*) based on the spatial graph theory*. Ph.D. dissertation, Seoul National Univ., Seoul, Korea. [in Korean]