

# 한반도 난온대 상록활엽수의 분포변화 및 기후조건<sup>1a</sup>

윤종학<sup>2</sup> · 김종현<sup>2</sup> · 오경희<sup>2</sup> · 이병윤<sup>2\*</sup>

## Distributional Change and Climate Condition of Warm-temperate Evergreen Broad-leaved Trees in Korea<sup>1a</sup>

Jong-Hak Yun<sup>2</sup>, Jung-Hyun Kim<sup>2</sup>, Kyoung-Hee Oh<sup>2</sup>, Byoung-Yoon Lee<sup>2\*</sup>

### 요약

본 연구는 기후변화에 따른 한반도 난온대 상록활엽수의 분포변화와 CT분석을 이용하여 난온대 상록활엽수의 분포를 규정하는 기후요인과 분포적지를 밝히는 것을 목적으로 실시하였다. CT분석을 통해 구축된 한반도 난온대 상록활엽수 분포 모델(EG-model)에서 TMC(최한월최저기온)가 분포를 규정하는 주요 요인으로 작용하였으며, TMC(최한월최저기온)의  $-5.95^{\circ}\text{C}$  이상을 난온대 상록활엽수의 분포적지로 하고 있다. 이러한 TMC값을 CMT(최한월평균기온)으로 환산한 값인  $-1.7^{\circ}\text{C}$ 는 동아시아 지역 상록활엽수림의 내성한계 온도인 최한월평균기온  $-1^{\circ}\text{C}$ 보다 약간 낮은 것으로 분석되었다. 한반도의 난온대 상록활엽수는 최한월최저기온(TMC)  $-5.95^{\circ}\text{C}$  이상의 따뜻한 지역에서는 하계강수량(PRS)이 826.5mm 이상인 지역에서, 최한월최저기온(TMC)  $-5.95^{\circ}\text{C}$  미만의 추운 지역에서는 하계강수량이 1219mm 이상인 기후조건에서 높은 분포확률을 나타내었다. 이러한 분포경향은 일본의 난온대 상록활엽수의 분포경향과 비슷하였다. 또한, 난온대 상록활엽수는 한반도의 기온상승에 따라 고위도 및 남부내륙으로 분포를 확대하고 있으며 난온대 상록활엽수의 북방한계선 변화를 시사하고 있다.

주요어: 기후변화, CT분석, 최한월최저기온, 분포적지

### ABSTRACT

The research was conducted to find optimal habitats of warm-temperate evergreen broad-leaved trees, and to investigate climate factors to determine their distribution using classification tree (CT) analysis. The warm-temperate evergreen broad-leaved trees model (EG-model) constructed by CT analysis showed that Mean minimum temperature of the coldest month (TMC) is a major climate factor in determining distribution of warm-temperate evergreen broad-leaved trees. The areas above the  $-5.95^{\circ}\text{C}$  of TMC revealed the optimal habitats of the trees. The coldest month mean temperature (CMT) equitable to  $-5.95^{\circ}\text{C}$  of TMC is  $-1.7^{\circ}\text{C}$ , which is lower than  $-1^{\circ}\text{C}$  of CMT of warm-temperate evergreen broad-leaved trees. Suitable habitats were defined for warm-temperate evergreen broad-leaved trees in Korea. These habitats were classified into two areas according to the value of TMC. One area with more than  $-5.95^{\circ}\text{C}$  of TMC was favorable to trees if the summer precipitation (PRS) is above 826.5mm; the other one with less than  $-5.95^{\circ}\text{C}$  of TMC was favorable if PRS is above 1219mm.

1 접수 2010년 11월 9일, 수정(1차: 2011년 1월 11일, 2차: 2011년 2월 15일), 게재확정 2011년 2월 16일

Received 9 November 2010; Revised(1st: 11 January 2011, 2nd: 15 February 2011); Accepted 16 February 2011

2 국립생물자원관 고등식물연구과 Vascular Plant Research Division, National Institute of Biological Resource, Incheon(404-708), Korea

a 이 논문은 2009년도 환경부 기후변화 대응 한반도 생물종 구계변화 연구 조성비에 의하여 연구되었음.

\* 교신저자 Corresponding author(bylee80@korea.kr)

These favorable conditions of habitats were similar to those of warm-temperate evergreen broad-leaved trees in Japan. We figured out from these results that distribution of warm-temperate evergreen broad-leaved trees were expanded to inland areas of southern parts of Korean peninsula, and areas with the higher latitude. Finally, the northern limits of warm-temperate evergreen broad-leaved trees might be adjusted accordingly.

**KEY WORDS:** CLIMATE CHANGE, CLASSIFICATION TREE ANALYSIS, THE MINIMUM TEMPERATURE OF THE COLDEST, OPTIMAL HABITAT

## 서론

지구의 평균 지상기온은 지난 100년 동안  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 가 상승하였으며(Houghton *et al.*, 2001), 최근의 기온 상승은 더욱 현저하여 급세기 말이면 전 지구 평균기온이  $1.4 \sim 5.8^\circ\text{C}$  상승할 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2001). 지구 온난화는 생물종의 분포 및 생육환경에 영향을 미치고 있어 생물종의 분포역 변화를 일으키며 관속식물의 개화 및 개엽시기, 철새의 도래시기, 양서류의 산란시기와 같은 생물계절 반응(phenological response)이 변화되고 있다. 기온상승으로 인한 극지방으로의 분포역 확산이 다양한 생물종에서 관찰되고 있으며, 이렇게 확산하는 이유는 생물종의 생존력을 높이기 위한 것으로 밝혀지고 있다(Parnesan and Yohe, 2003; Crozier, 2004). 식물의 분포역 변화로는 네덜란드와 노르웨이의 온대성 식물(thermophilic plants)이 30~40년 전과 비교하여 분포를 확산하고 있으며 상대적으로 한대성 식물의 분포역이 감소되고 있는 것으로 보고되었다(Tamis *et al.*, 2001). 이러한 식물의 분포변화는 아프리카 국가들에서도 조사된 바 있으며, 세네갈에 분포하고 있는 교목과 관목 126종을 대상으로 1945년부터 1993년까지 조사한 결과, 생태역(ecological zone)이 일년에 평균 600m씩 사라지고 있음이 보고된 바 있다(Gonzalez, 2001). 식물종의 고산지대로 이동에 관한 연구 역시 활발하게 진행되고 있으며 우랄산맥 지역(Moisev and Shiyatov, 2003), 불가리아 산악지역(Meshnev *et al.*, 2000), 스칸디나비아 산악지역(Kullman, 2002)에서 그 사례를 찾아볼 수 있다.

기후변화의 영향으로 한반도의 기온은 1912년 관측한 이래 평균기온은  $1.5^\circ\text{C}$  상승하였으며, 겨울철의 최저 기온이 여름철보다 크게 상승하여 겨울이 1920년대에 비하여 1990년대에 약 한 달 정도 짧아졌으며, 영하  $10^\circ\text{C}$ 이하의 일수도 감소하였다(National Institute of Environmental Research, 2010). 이러한 기후변화가 한반도 생태계에 미치는 영향을 조사하기 위해 다양한 생물군을 대상으로 국내에서 연구가 진행 중에 있으나, 기후변화에 의한 생물상의 변화 관찰은 장기간에 걸친 시계열 분석 자료를 바탕으로 하기 때문에 정보나 자료가 충분하게 축적되지 않은 경우에는 정확한

결과 도출이 어렵다.

최근 기후변화에 직면하여 생물종의 분포와 환경요인과의 관계를 밝히는 것은 생태학 분야의 중요한 과제 중의 하나이며(Woodward, 1987), 종 보전 및 종의 생태적 지위(niche)를 파악하기 위해 종분포에 대한 정량적 예측을 위한 다양한 통계적 방법이 시도되고 있다. 특히, 기후변화에 따른 생물종의 관리를 위해 통계적 회귀방법을 이용한 다양한 종분포 모델(Species distribution models; SDMs)들이 개발되어 적용되고 있다(Austin, 2007). 종분포 통계모델 중 식물종의 분포예측을 위해 널리 이용되고 있는 classification tree model(CT-model)은 일본의 대표적 낙엽활엽수인 너도밤나무(*Fagus crenata*)의 기후적인 생육성립조건 분석(Matsui *et al.*, 2004b), 분포적지 예측(Matsui *et al.*, 2004a, Matsui *et al.*, 2007), *Sasa kurilensis*의 잠재적 분포역 예측(Tsuyama *et al.*, 2008), 눈잣나무(*Pinus pumila*)의 잠재적 분포역 예측(Horikawa, 2009), 일본산 침엽수 10종의 잠재생육역의 영향예측(Tanaka *et al.*, 2009), 상록성 참나무과 2종(*Quercus acuta*, *Q. salicina*)의 분포와 기후조건 분석(Nakao *et al.*, 2009) 등 기후변화에 따른 식물분포와 환경요인에 대한 영향평가 연구에 유용하게 사용되고 있다.

본 연구에서는 1941년 일본학자 植木(Uyeki)가 한반도 난온대 상록활엽수의 북방한계선을 설정하기 위해 선정한 난온대 상록활엽수종을 대상으로 약 60~70년 동안 식물종의 분포변화를 검토함과 동시에 현재 기후 하에서 한반도에 분포하는 난온대 상록활엽수의 분포를 규정하는 기후조건과 분포적지를 종분포 통계모델을 이용하여 정량적으로 밝히는 것을 목적으로 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구대상지

동아시아 대륙의 동북쪽 끝에 놓여 있는 한반도는 지리적으로 북위  $33^\circ \sim 38^\circ$ , 동경  $124^\circ \sim 132^\circ$ 에 위치하고 있으며, 대표적인 부속 섬으로 남쪽에 제주도, 동쪽에 울릉도가 위치하고 있다. 한반도의 기후는 전반적으로 연교차가 큰 대

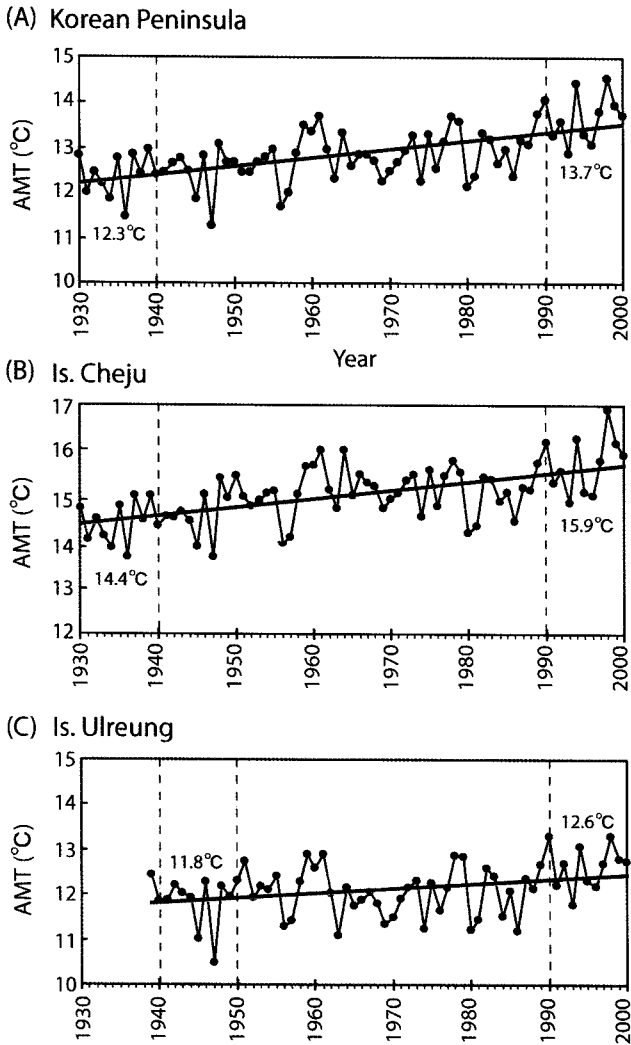


Figure 1. A trend in annual mean temperature(AMT) of the Korean peninsula and two major islands during 1931-2000. AMT of the Korean peninsula was calculated from average temperature of six regions, Incheon, Jeonju, Mokpo, Gangneung, Daegu and Busan.

특성 기후의 지배를 받고 있으며, 태평양 남단인 필리핀에서 타이완과 일본의 류큐제도를 지나 흐르는 따뜻한 해류인 쿠로시오 해류가 한반도 남해안과 동해안의 연평균 기온 등의 기후요소에 영향을 주고 있다(Hur *et al.*, 1999; Na *et al.*, 1999). 한국 기상청이 제공하고 있는 자료(Korea Meteorological Administration, 2001)를 통하여 한반도의 지난 60년 동안의 기온상승을 살펴보면, 한반도의 10년 평균기온 평년값은 12.3°C(1931-1940년)에서 13.7°C(1991-2000년)로 1.4°C상승하였으며, 제주도는 14.4°C(1931-1940년)에서 15.9°C(1991-2000년)로, 울릉도는 11.8°C

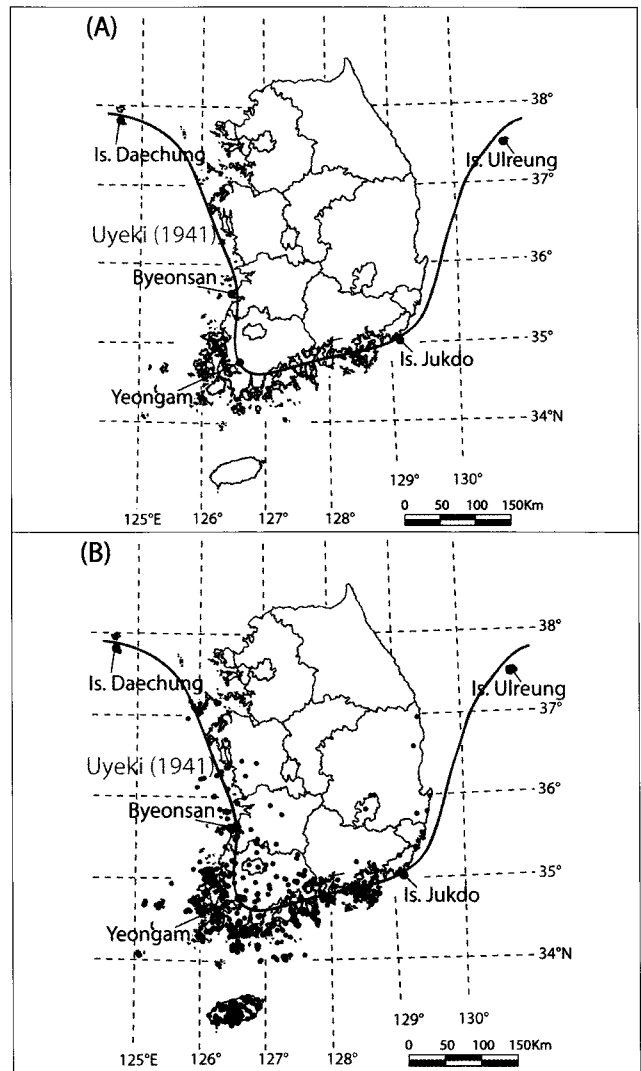


Figure 2. (A) Upper tree line of warm-temperate evergreen broad-leaved trees (Uyeki, 1941); Is. Daechung-Byeonsan-Yeongam-Is. Jukdo-Is. Ulreung. (B) Actual distribution of warm-temperate evergreen broad-leaved trees(1913-2009)

(1941-1951년)에서 12.6°C(1991-2000년)로 각각 1.5°C, 0.8°C상승하여 기후변화에 따른 한반도의 기온상승의 추이를 나타내고 있다(Figure. 1).

## 2. 식물분포자료

본 연구에 이용한 자료는 1941년 Uyeki(植木)가 한반도 난온대 상록활엽수의 북방한계선을 설정하기위해 선정한 64종에서 Flora of Korea Editorial Committee(2007)의 The genera of Vascular Plants of Korea에 준하여 식물명이 현

Table 1. Distributional change of warm-temperature evergreen broad-leaved trees

No.	Korean name	Species name	(La.) 1941	(La.) 2009	Period of collection
1	후추등	<i>Piper kadzura</i> (Choisy) Ohwi	33°08'	33°25'	1978-2007
2	죽절초	<i>Chloranthus glaber</i> (Thunb.) Nakai	33°08'	33°29'	1991-2005
3	소귀나무	<i>Myrica rubra</i> Siebold & Zucc.	33°08'	33°21'	1991
4	검은재나무	<i>Symplocos prunifolia</i> Siebold & Zucc.	33°08'	33°27'	2008
5	가시나무	<i>Quercus myrsinaefolia</i> Blume	33°08'	34°58'	1956-2007
6	참가시나무	<i>Quercus salicina</i> Blume	33°08'	34°58'	1913-2007
7	개가시나무	<i>Quercus gilva</i> Blume	33°08'	34°04'	1991-2008
8	녹나무	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Siebold	33°08'	34°32'	1924-2008
9	새덕이	<i>Neolitsea aciculata</i> (Blume) Koidz.	33°08'	34°42'	1984-2009
10	조록나무	<i>Distylium racemosum</i> Siebold & Zucc.	33°08'	34°47'	1991-2008
11	겨울딸기	<i>Rubus buergeri</i> Miq.	33°08'	34°51'	1984-2009
12	좁굴거리나무	<i>Daphniphyllum teijsmannii</i> Kurz ex Teijsm. & Binn.	33°08'	34°04'	1972-2009
13	담팔수	<i>Elaeocarpus sylvestris</i> v. <i>ellipticus</i> (Thunb.) H. Hara	33°08'	34°21'	1991-2009
14	후피향나무	<i>Ternstroemia gymnanthera</i> (Wight & Arn.) Sprague	33°08'	34°30'	1935-2009
15	산유자나무	<i>Xylosma congestum</i> (Lour.) Merr.	33°08'	34°09'	1955-2009
16	백서향나무	<i>Daphne kiusiana</i> Miq.	33°08'	34°42'	2001-2005
17	녹보리풍나무	<i>Elaeagnus maritima</i> Koidz.	33°08'	34°48'	1967-2008
18	백량금	<i>Ardisia crenata</i> Sims	33°08'	34°39'	1958-2008
19	산호수	<i>Ardisia pusilla</i> A. DC.	33°08'	34°17'	1971-2009
20	당광나무	<i>Ligustrum lucidum</i> W. T. Aiton	33°08'	34°47'	1991-2006
21	호자나무	<i>Damnacanthus indicus</i> C. F. Gaertn.	33°08'	34°41'	1979-2009
22	비쭈기나무	<i>Cleyara japonica</i> Thunb.	33°08'	35°03'	1969-2003
23	아왜나무	<i>Viburnum odoratissimum</i> v. <i>awabuki</i> (K.Koch) Zabel ex Rümpler	33°08'	35°27'	1935-2009
24	큰보리장나무	<i>Elaeagnus submacrophylla</i> Servett.	33°08'	36°07'	1949-2008
25	종가시나무	<i>Quercus glauca</i> Thunb.	33°08'	36°18'	1978-2009
26	모람	<i>Ficus oxyphylla</i> Miq. ex Zoll.	33°08'	36°07'	1919-2008
27	나도은조롱	<i>Marsdenia tomentosa</i> C. Morren & Decne.	33°08'	37°10'	1969-2008
28	까마귀쪽나무	<i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss.	34°10'	35°00'	1953-2008
29	우묵사스레피나무	<i>Eurya emarginata</i> (Thunb.) Makino	34°10'	34°43'	1962-2009
30	영주치자	<i>Gardneria insularis</i> Nakai	34°20'	34°32'	1922-2003
31	센달나무	<i>Machilus japonica</i> Siebold & Zucc.	34°28'	34°47'	1953-2009
32	붓순나무	<i>Illicium anisatum</i> L.	34°30'	34°47'	1955-2008
33	육박나무	<i>Actinodaphne lancifolia</i> (Siebold & Zucc.) Meisn.	34°50'	34°50'	1953-2007
34	팔손이	<i>Fatsia japonica</i> (Thunb.) Decne. & Planch.	34°50'	34°56'	1999-2006
35	생달나무	<i>Cinnamomum japonicum</i> Siebold	34°50'	34°59'	1955-2009
36	모새나무	<i>Vaccinium bracteatum</i> Thunb.	35°02'	35°26'	1918-2008
37	광나무	<i>Ligustrum japonicum</i> v. <i>japonicum</i> Thunb.	35°02'	35°37'	1978-2008
38	다정큼나무	<i>Rhaphiolepis indica</i> v. <i>umbellata</i> (Thunb.) Ohashi, J.	35°15'	35°09'	1951-2008
39	참식나무	<i>Neolitsea sericea</i> (Blume) Koidz.	35°12'	37°03'	1952-2009
40	굴거리나무	<i>Daphniphyllum macropodium</i> Miq.	35°37'	36°28'	1935-2008
41	호랑가시나무	<i>Ilex cornuta</i> Lindl. ex Paxton	35°37'	36°15'	1955-2006
42	개산초	<i>Zanthoxylum planispinum</i> Siebold & Zucc.	35°37'	37°05'	1971-2009
43	남오미자	<i>Kadsura japonica</i> (L.) Dunal	35°51'	36°07'	1921-2008
44	왕모람	<i>Ficus thunbergii</i> Maxim.	36°10'	35°01'	1954-1972
45	황칠나무	<i>Dendropanax trifidus</i> (Thunb.) Makino ex H.Hara	36°10'	35°37'	1914-2009
46	모밀잣밤나무	<i>Castanopsis cuspidata</i> (Thunb.) Schottky	36°10'	36°13'	1971-2009
47	멸꿀	<i>Stauntonia hexaphylla</i> (Thunb.) Decne.	36°10'	36°13'	1921-2009
48	돈나무	<i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W. T. Aiton	36°10'	36°13'	1950-2008
49	감탕나무	<i>Ilex integra</i> Thunb.	36°10'	36°13'	1916-2009
50	사스레피나무	<i>Eurya japonica</i> Thunb.	36°10'	36°24'	1935-2009
51	보리장나무	<i>Elaeagnus glabra</i> Thunb.	36°10'	36°10'	1919-2009
52	자금우	<i>Ardisia japonica</i> (Thunb.) Blume	36°10'	36°07'	1935-2009
53	붉가시나무	<i>Quercus acuta</i> Thunb.	36°10'	37°04'	1915-2009
54	후박나무	<i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc.	36°10'	37°03'	1936-2009
55	보리밥나무	<i>Elaeagnus macrophylla</i> Thunb.	36°10'	37°56'	1928-2009
56	송악	<i>Hedera rhombea</i> (Miq.) Bean	36°10'	37°01'	1953-2009
57	식나무	<i>Aucuba japonica</i> Thunb.	37°50'	35°37'	1928-2009

재 이명으로 처리된 3종(등근잎다정큼나무, 좁팍팍나무, 줄사철나무), 식재로 인하여 인위적으로 분포가 확대된 4종(동백나무, 사철나무, 먼나무, 마삭줄)을 제외한 57종(Table 1)을 선정하였다. 선정된 난온대 상록활엽수 57종의 생육지 확인을 위하여 국립생물자원관(KB), 국립수목원(KH), 고려대학교(KUS), 경북대학교(KNU), 대전대학교(TUT), 서울대학교(SNU), 순천대학교(SNUH), 영남대학교(YNUH), 인하대학교(IUI), 전남대학교(CNU), 전북대학교(JNU), 한남대학교(HNHM)에서 소장되고 있는 1913년부터 2009년까지 채집된 표본 4,670점의 채집정보를 수집하였으며, 식물표본의 채집지 지명과 해발, 지형 등의 기재사항을 참고하여 난온대 상록활엽수의 위치정보 자료를 구축 및 도식화하였다(Figure 2). Table 1에서 난온대 상록활엽수의 분포의 최북단을 나타내는 위도(La.: Latitude)는 Uyeki(1941)

의 문헌과 수집된 표본자료(1913-2009)의 구축과 도식화를 통하여 현재(2009)의 최북단을 나타냈다.

## 2. 기후자료

연구대상지역의 기후값은 전지구 모델을 사용하여 기후값을 제공하는 Worldclim(www.worldclim.org)에서 동아시아 지역의 기후값을 추출하여 한반도 지역에 대한 1km<sup>2</sup> 격자에 대한 30년(1961~1990년) 평균기온과 강수량의 값을 산출하여, 최한월최저기온(Mean minimum temperature of the coldest month; TMC), 온량지수(Warmth Index; WI), 하계강수량(Summer precipitation; PRS), 동계강수량(Winter precipitation; PRW)의 4개 기후값을 난온대 상록활엽수 분포 모델에 대한 기후값으로 이용하였다(Figure 1).

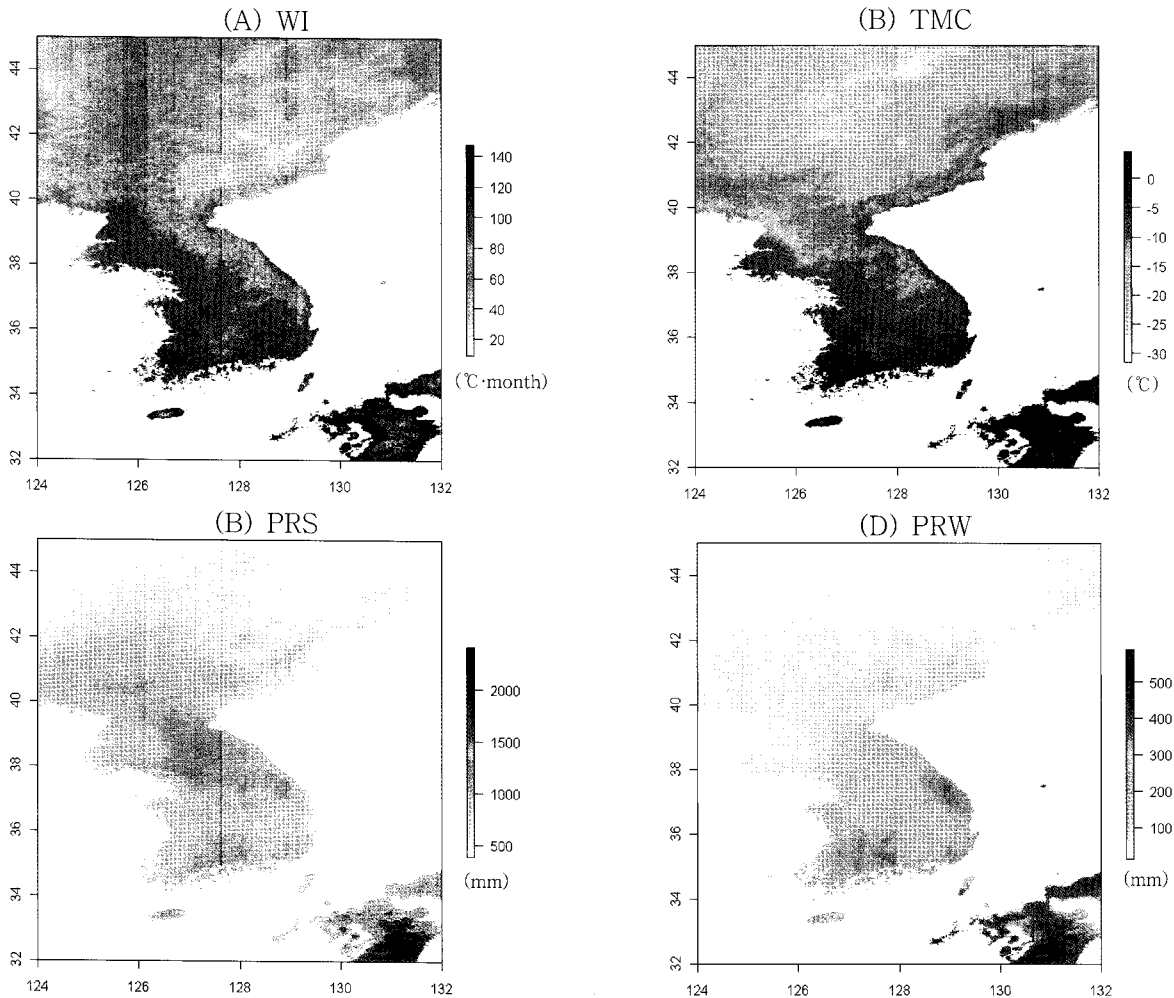


Figure 3. Spatial distribution of four climate factors in average for 30 years (1961-1990) derived from Worldclim-Global climate data. (A) WI: Warmth index. (B) TMC: Mean minimum temperature of the coldest month. (C) PRS: Summer precipitation. (C) PRW: Winter precipitation.

온량지수(WI)는 식물 성장기의 열량 지표로서 한국과 일본을 포함한 동아시아지역의 광역적 식물분포를 이해하는데 중요한 기후요인이다(Kira, 1977; Ohsawa, 1990). 온도 지표에는 연평균기온이 있지만 식물의 생육에는 생육기간에 이용되는 열량이 중요하므로 본 연구에서 온량지수(WI)를 이용하였다. 또한, 난온대 상록활엽수의 분포에 대한 제한요인으로 최저기온의 극한값이 중요하므로(Ohsawa, 1991; Ohsawa, 1993) 월평균기온이 최저인 달의 최저기온의 값인 최한월최저기온(TMC)을 이용하였다. 최한월평균기온(the coldest month mean temperature; CMT)은 최한월최저기온(TMC)과의 단회귀분석을 이용하여 해석하였다. 강수요인으로는 성장기 수분량의 지표인 5월부터 9월까지 총강수량으로 하는 하계강수량(PRS; 5-9월)과 12월부터 3월까지의 총강수량으로 하는 동계강수량(PRW; 12-3)을 각각 계산하여 이용하였다.

## 2. 통계해석

통계해석은 난온대 상록활엽수 57종의 분포 유/무(有/無)를 종속변수로 하였으며, 4개 기후값(TMC, WI, PRS, PRS)을 독립변수로 하여 CT-Model(Classification tree model)을 통해 분석을 실시하였다. CT-Model은 독립변수를 최대한 균등하게 반복하여 2분할되도록 구축된 통계모델(Breiman *et al.*, 1984)로써, 독립변수간의 복잡한 상호작용에 대한 모델화가 가능하여 해석이 용이하다(De'Ath and Fabricius, 2000). CT-Model 구축에 영향을 미치는 기후요인 정도를 확인하기 위해 공헌도 지표로서 분리공헌도(DWS; Deviance weighted score)(Matsui *et al.*, 2004a)를 적용하였다. DWS는 CT-Model에 대한 각 매개변수(Parameter)의 공헌도를 분기(分岐)전의 우리도(尤離度)와 분기(分岐)후의 우리도(尤離度)와의 합계의 차(差)로 계산되며, 모델 전체에 대한 독립변수의 공헌도를 나타낸다. 모델의 예측정도(豫測精度)평가는 ROC(Receiver operating characteristic)해석에 의해 얻은 AUC(Area under the curve)(Hanley and McNeil, 1982; Zweig and Campbell, 1993)을 적용하였다. ROC의 해석은 모델에서 얻은 분포확률을 임의의 역치에서 구분하는 것으로 ROC곡선과 AUC값을 가지고 평가하는 방법이다. ROC곡선의 하부면적을 AUC값으로 하여 예측정도(豫測精度)를 평가하였다. 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). 또한 역치(閾值)이상의 출현 확률이 나타난 지역을 분포적지로 하였으며, 해석 프로그램으로 R2.4.1(R Development Core Team, 2006)을 사용하였다.

## 결 과

### 1. 기후요소 분석

본 연구에서 한반도에 분포하는 난온대 상록활엽수의 57종에 대한 분포와 기후요소의 관계를 CT-model을 이용하여 EG-model(난온대 상록활엽수 모델)을 작성한 결과 총 5개의 terminal node(TN)가 생산되었다(Figure 4). 5개의 terminal node는 최한월최저기온(TMC)  $-5.95^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 크게 제 1그룹(TN①, TN②)과 제 2그룹(TN③, TN④, TN⑤)으로 나뉘어졌다. 제 1그룹은 다시 하계강수량(PRS) 1219mm 기준으로 TN①과 TN②로 나뉘어졌다. 제 2그룹은 최한월최저기온(TMC)  $-4.55^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 node ③, ④와 node ⑤로 구분되어지며, node ③, ④는 하계강수량

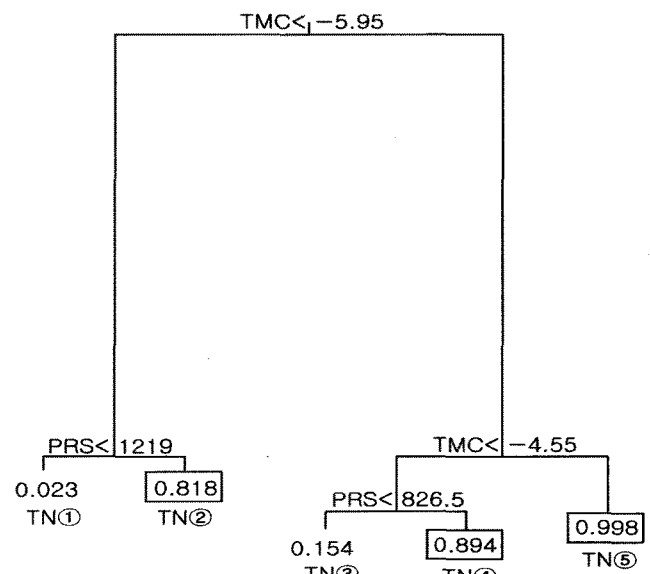


Figure 4. Diagram of classification tree (CT) model for warm-temperate evergreen broad-leaved trees based on the four climatic variables. Climatic conditions, occurrence probabilities of warm-temperate evergreen broad-leaved trees are shown at all nodes. If the condition shown on the top of a branch is met, follow the left branch; otherwise follow the right branch, resulting in 5 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) and PRS (summer precipitation) were used, but other climatic variables were not used in the model.

(PRS) 826.5mm를 기준으로 다시 분리되어 각 TN①~TN⑤에 대한 기후조건이 산출되었다(Figure 4).

EG-model의 작성 시 이용된 4개의 독립변수 중에 한반도 상록활엽수의 분포역을 결정하는 변수는 최한월최저기온(TMC), 온량지수(WI), 동계강수량(PRW)이었다. EG-model에서 terminal node 분리에 공헌한 독립변수별 분리공헌도(分離貢獻度, DWS)는 TMC(최한월최저기온)가 73%, PRS(하계강수량)가 2.17%이었다. 모델에서 TMC(최한월최저기온), PRS(하계강수량)의 3개 기후요인으로 설명하지 못하는 비율을 나타내는 잔차尤離度(RMD)는 0.027로 나타났다. 난온대 상록활엽수 모델(EG-model)의 예측정도를 확인하기 위해 ROC 분석을 실시한 결과, AUC 값이 0.9이상인 값이 산출되었다(Figure 5). ROC곡선에서 모델의 적합도가 최고점일 경우의 분포확률을 역치(閾值)로 한 값(MinROCdistance)은 0.485로 계산되며, EG-Model에서 출현확률이 0.485이상의 terminal node(TN)를 분포적으로 판단하였다. 난온대 상록활엽수 57종에 대한 분포적으로 TN②, TN④, TN⑤가 예측되었다(Figure 6). TN⑤에 해당하는 지역은 서해안 백령도, 전라남도 영광, 나주 등의 내륙 지역, 남해안 해안도시지역, 동해안 해안지역이며, TN④는

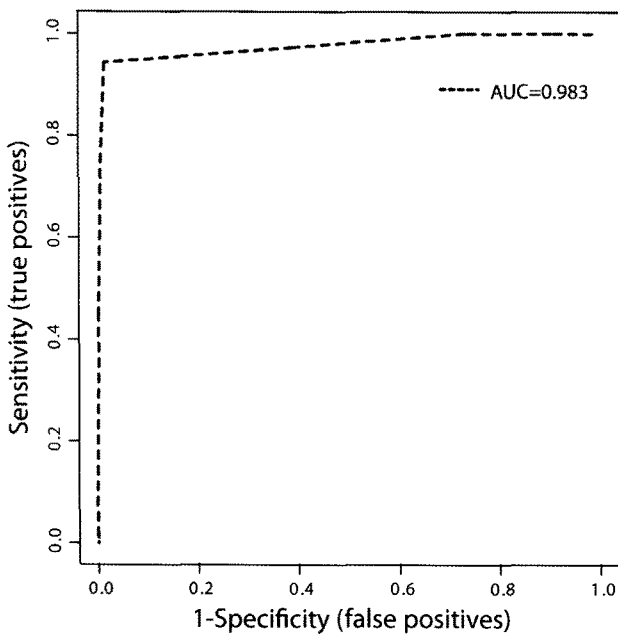


Figure 5. ROC(Receiver operating characteristic) curve of classification tree model (EG-model) was generated by plotting the sensitivity(true positive) along the Y-axis and 1-specificity (false positive rate) on the X-axis. The area under the ROC curve(AUC) showed excellent accuracy(0.98) in ROC analysis for EG-model.

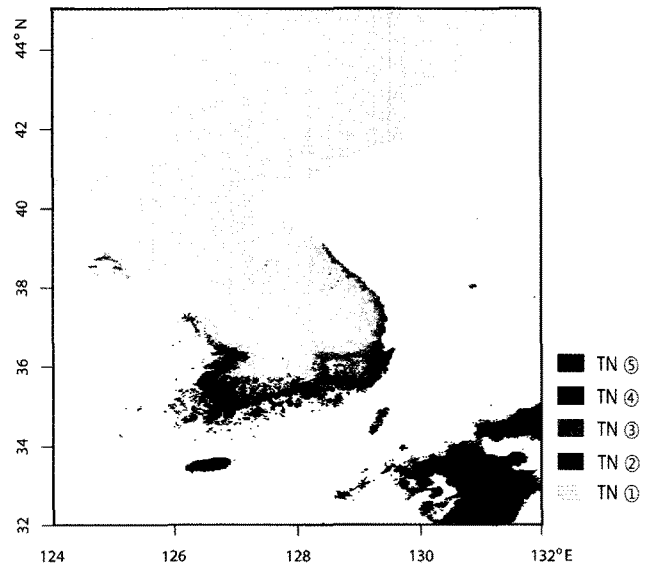


Figure 6. Predicted probability distributions of warm-temperate evergreen broad-leaved trees based on the EG-model under the current climate

충청남도 태안, 전라북도 이리, 전주 등의 서부내륙지역과 경상남도 고성, 마산 등의 남부내륙지역, 동해안 일부 해안 지역으로 예측되었다. TN②는 경상남도 하동일대의 지리산 남부지역이 해당되었다.

## 고찰

### 1. 난온대 상록활엽수의 이동

한반도 및 부속도서에 분포하는 난온대 상록활엽수 57종의 북상은 60~70년(1941~2009)동안 기후변화로 인한 기온 상승의 직·간접적 영향으로 판단된다. 식물종은 기후변화에 따라 각각 다르게 반응하기 때문에 이동 거리는 식물종간에 차이를 나타내었다. 한반도 및 부속도서에 분포하는 난온대 상록활엽수들 중 후추등·죽절초·소귀나무·검은재나무는 생육지에서 크게 벗어나지 못하고 있다. 이와 같이 먼 거리로 이동하지 못하는 꽃가루 및 종자분산, 산포하는 거리가 짧기 때문으로 추정하고 있으며, 종자분산이 작은 식물들이 기후변화에 가장 취약한 것으로 밝혀지고 있다(Morse *et al.*, 1993). 이러한 종들은 먼 거리로의 이동에 성공할 수 없기 때문에 기후변화에 의해 변화되는 환경조건에 머무를 수 밖에 없어 결국 멸종 될 것으로 추정된다. 우리나라 환경부에서 법적 보호종으로 지정되어 보호받고 있을 정도로 이들 종들의 생육지가 극히 적어 적절한 환경조건을 찾지 못해 이동하지 못하는 것인지, 아니면 이동 능력이 극히 뛰어나지만 개체군의 크기가 워낙 작아 이동 현상이 관찰되지

않는 것인가에 대한 추론을 내리기가 어려운 상황이다. 이와는 반대로 제주지역에 고립되어 생육하던 가시나무·참가시나무·비쭈기나무·아왜나무·모람 등의 식물종은 제주도와 한반도사이의 바닷길을 뛰어 넘어 수백 km를 이동한 것으로 관찰되고 있어 북미 동부지역 수목의 이동과 유사한 결과가 도출되었다. 북미 동부지역의 경우 과거 식물체의 이동 분석에 의해 산출된 이동 속도는 일 년에 1 Km인 것으로 추측하고 있으며, 이러한 속도는 5대호와 같은 거대한 호수 등의 장애물도 뛰어 넘을 정도로 빠른 속도인 것으로 판단하고 있다(Woods and Davis, 1989). 이러한 빠른 속도의 목본식물 이동을 새나 포유류의 이동 범위에 기초한 실험을 통해 종자의 산포 거리를 측정하고자 한 실험들이 시도된 바 있으나 이러한 빠른 이동속도를 밝히는 데 한계가 있어 왔다(Pitelka *et al.*, 1997). 동물에 의한 종자 산포보다는 대기권의 강력한 상승작용에 의해 편승하여 종자가 대류현상에 의해 제주도에서 바다를 건너 한반도의 남쪽 또는 서쪽지역으로 이동되었을 가능성이 훨씬 설득력이 있어 보인다. 대류현상에 의해 수백 Km 떨어져 나와 소규모로 정착하여 생육하던 난온대 상록활엽수가 적합한 환경이 마련되자 급속하게 번성한 것으로 추론할 수 있다. 이러한 현상은 북부 유럽의 가문비나무 생육분포 변화를 통해 찾아 볼 수 있다. 북부유럽의 가문비나무는 꽃가루 분석을 통해 서부 스웨덴 지방을 3,000여년전에 통과한 것으로 밝혀졌으나 8,000여년전에 생육하였던 화석 조각이 발견되면서 가문비나무의 우점 군락이 생성되기 훨씬 전에 소규모의 가문비나무군락이 서부 스웨덴에 생육하였음을 밝혀주고 있다(Bradshaw and Zackrisson, 1990). 이들과는 전혀 반대로 본 조사 연구 결과, 생육지역이 남으로 후퇴하고 있는 난온대 상록활엽 수종의 이동은 흥미롭다. 예를 들어, 식나무는 분포역이 37°50'에서 35°37'까지 남으로 후퇴한 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 식나무의 최북단 생육지역의 분포지 파괴로 인한 절멸이거나 과거 Uyeki(1941)가 연구 조사자료 획득 시 오동정에 의한 결과로 인한 오류가 아닌가 고려되어진다. 이와 같이 상록활엽수가 60~70년(1941~2009)동안에 걸쳐 일부 종은 분포역을 남쪽으로 이동한 경우도 관찰되었지만 대다수의 종은 북으로 이동한 것으로 추론할 수 있다. 물론 한반도 및 부속도서의 상록활엽수의 뚜렷한 북방한계선이 약 60여년전 Uyeki(1941)에 의해 제시되었다 하더라도 산악지역이 70% 이상을 차지하고 있는 한반도와 무인도서를 포함한 3,000여개의 섬이 부속도서로 있는 전 지역을 당시에 조사하여 상록활엽수의 북방한계선이 제시되었다고 보기는 어렵다. 그러나 과거의 기록과 현재 보관 중인 표본 자료를 이용하여 현재의 북방한계선을 기후요인에 적용하여 새롭게 제시하는 것은 향후 IPCC SRES 시나리오에 의한 한반도 난온대 상록활엽수종

의 향후 분포 예측에 귀중한 자료가 될 것이다.

## 2. 분포역을 규정하는 기후조건

한반도에 생육하고 있는 상록활엽수 57종은 각각 다른 분포역의 특징을 가지고 있으며, 생태계 내에서의 지위도 각각 다르기 때문에 공통된 분포역을 결정하는 것은 불가능하다. 그러나, 본 연구에서 난온대 상록활엽수에 대하여 4개의 기후값(TMC, WI, PRS, PRW)들 중에 어느 변수가 상록활엽수의 분포에 영향을 주며, 상록활엽수 분포를 규정하는 기후조건을 확인할 수 있었다. CT-model의 예측정도를 확인하기 위한 ROC 분석에서 ROC곡선은 X축의 1-특이도(1-specificity), Y축의 감도(sensitivity)로서 작성되며 곡선의 하부면적이 1에 가까울수록 모델의 적용이 용이하다고 할 수 있다. 본 연구에서 구축된 한반도 난온대 상록활엽수 분포예측모델(EG-model)의 AUC값은 0.983(±0.0026)로서 AUC의 평가기준(Swets, 1988; Thuiller, 2003)인 0.9~1(excellent), 0.8~0.9(good), 0.7~0.8(fair), 0.6~0.7(poor), 0.5~0.6(fail)과 비교하였을 때, 우수(excellent)한 것으로 판명됨에 따라 본 모델 구축 시 각 독립변수의 공헌도가 높았음이 확인되었다.

난온대 상록활엽수의 분포적지로 판단되는 TN②는 TMC<-5.95℃와 PRS≥1219mm의 기후조건을 가지며, TN④는 -4.55℃>TMC≥-5.95℃와 PRS≥826.5mm를 기후조건으로 하는 지역에서 높은 출현확률은 나타낸다. 또한 가장 높은 출현확률을 나타내는 TN⑤는 TMC≥-4.55℃를 기후조건으로 하는 지역을 분포적지로 하고 있다(Figure 4). TN②, ④, ⑤는 EG-model에서 높은 출현확률이 예측되어지는 지역으로 한반도 난온대 상록활엽수의 분포적지로서 서해안의 백령도에서 남부내륙의 전주, 하동, 대구, 동부해안 지역의 속초를 잇는 선을 경계로 분포적지가 예측되었다.

EG-model의 구축 시 이용된 4개의 독립변수(TMC, PRS, PRW, WI)중에서 분리공헌도(分離貢獻度, DWS)가 가장 높은 TMC(최한월최저기온)가 한반도 상록활엽수의 분포역을 결정하는 제 1요인으로 판단되었다. 최한월최저기온(TMC)에 대한 최한월평균기온(CMT)의 기후값을 얻기 위해 단회귀분석으로 관계식 ( $y=0.815x+3.384$   $r^2=0.99$ )을 구하였다(Figure 6). EG-model에서 분포확률이 높은 TN④, ⑤와 다른 TN(terminal node)을 구분하는 요인으로 최한월최저기온(TMC) -5.95℃는 최한월평균기온(CMT) -1.7℃에 대응된다. 또한, node②, ④와 같이 최한월최저기온(TMC)이 낮은 조건에서도 하계강수량이 많은 기후조건에서 분포확률이 높은 것으로 나타나고 있으며 이러한 경향은 일본의 난온대 상록활엽수의 분포경향과 비슷하다



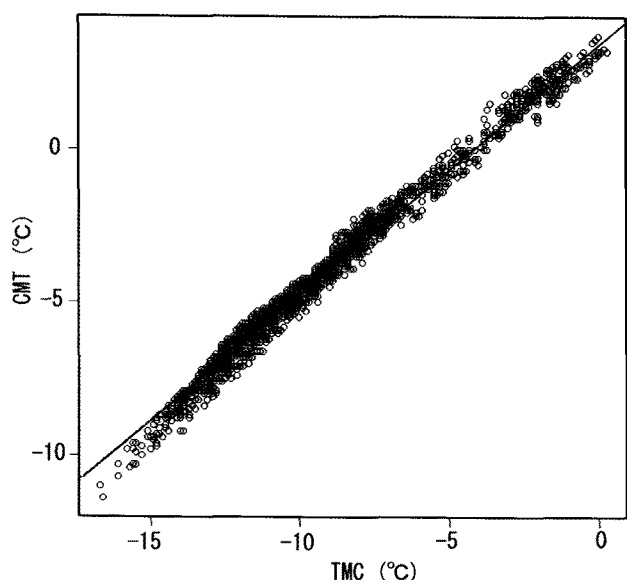


Figure 7. Correlation between TMC(the minimum temperature of the coldest month) and CMT(the coldest month mean temperature);  $y=0.815x+3.384$  ( $r^2=0.99$ ).

(Nakao *et al.*, 2009). Ohsawa(1990, 1991, 1993)은 동아시아 지역의 상록활엽수림의 경계가 북위 $20^{\circ}$ ~ $30^{\circ}$ 지역에서 내성한계인 최한월평균기온(CMT)  $-1^{\circ}\text{C}$ 로 제안하였다. EG-mode의 한반도 난온대 상록활엽수의 분포에 대한 최한월평균기온(CMT)이  $-1.7^{\circ}\text{C}$ 로 상대적으로 온도가 낮은 지역을 분포적으로 나타내고 있는 것은 상록활엽수림과 상록활엽수종의 분포에 대한 차이로서 식물군락과 식물개체에 대한 분포범위의 한계에 대한 차이로 판단된다. 한편, 한반도 난온대 상록활엽수림의 분포에 영향을 주는 기후요인으로 온도 다음으로 강수요인으로는 동계강수량 보다는 하계강수량이 상록활엽수림 분포에 주요요인으로 작용하였다.

본 연구에서는 한반도 난온대 상록활엽수의 분포를 규정하는 기후조건과 분포적지를 제시하였지만, 향후 각 식물종별로 기후조건과 최적의 분포역을 산출함과 동시에 미래 기후변화 시나리오에 의한 분포예측을 통하여 기후변화에 민감한 식물종들의 이동통로 확보 및 보전 전략 수립에 중요한 역할을 담당할 것으로 생각된다.

## 인용문헌

- Austin, M.(2007) Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling* 200: 1-19.
- Bradshaw, R.H. and O. Zackrisson(1990) A two thousand year history of a northern Swedish boreal forest stand. *J. Veg. Sci.* 1:

519-528.

- 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.
- Crozier, L.(2004) Warmer winters drive butterfly range expansion by increasing survivorship. *Ecology* 85: 231-241.
- De'Ath, G., and K.E. Fabricius(2000) *Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis*. *Ecology* 81(11): 3178-3192.
- Flora of Korea Editorial Committee(2007) *The genera of Vascular Plants of Korea*. Academy Publishing co., Seoul, 1482pp.
- Gonzalez, P.(2001) Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Climate Res.* 17: 217-228.
- Hanley, J. and B. McNeil(1982) The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology* 143: 29-36.
- 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 Ecol.* 24: 115-128.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguier, P.J. Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson(2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hur, H.B., G.A. Jacobs and W.J. Teague(1999) Monthly variation of water masses in the Yellow and East China Seas. *J. Oceanography* 55: 171-184.
- IPCC(2001) *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the Intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 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. (in Japanese)
- Korea Meteorological Administration(2001) *Climatological stand normals of Korea*.
- Kullmann L.(2002) Rapid recent range-margins rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of Ecology* 90: 68-77.
- Matsui, T., N. Tanaka and T. Yagihashi(2007) Predicting changes in suitable habitats for beech (*Fagus crenata* Blume) forests under climate warming in Shirakami Mountains world natural heritage area, Northern Japan. *J. Jpn. For. Soc.* 89: 7-13.
- 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 change in Japan, *Journal of Vegetation*

- Science 15: 605-614.
- Matusi, T., T. Nakaya, T. Yagihashi, H. Taoda and N. Tanaka(2004a) Comparing the accuracy of predictive distribution models for *Fagus crenata* forests in Japan. *Jpn. J. For. Environment* 46(2): 93-102.
- Meshinev, T., I. Apostolova and E. S. Koleva(2000) Influence of warming on timberling rising: a case study on *Pinus peuce Griseb.* in Bulgaria. *Phytocoenologia* 30: 431-438.
- Moiseev, P.A. and S.G. Shiyatov(2003) Vegetation dynamics at the treeline ecotone in the Ural highlands, Russia, in alpine biodiversity in Europe, Nagy, L., Grabherr, G., and Thompson, D. B. A., eds., *Ecol. Stud.* 167: 423-435.
- Morse, L.E., L.S. Kutner, G.D. Maddox, J.T. Kartesz, L.L. Honey, C.M. Thurman and S.J. Chaplin(1993) The potential effects of climate change on the native vascular flora of North America: a preliminary climate-envelopes analysis. Rep. TR-103330, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- Na, J.Y., J.W. Seo and H.J. Lie(1999) Annual and seasonal variation of the sea surface heat flux in the East Asian marginal seas. *J. Oceanography* 55: 257-270.
- Nakao, K., T. Matusi, N. Tanaka and T. Hokusima(2009) Climatic controls of the distribution and abundance of two evergreen *Quercus species* in Japan. *Jpn. J. For. Environment* 51(1): 27-37. (in Japanese with English abstract)
- National Institute of Environmental Research(2010) Korean Climate Change Assessment Report 2010. (eds. S. Lee, Y. Hong, C.-G. Song, J. A. Yu, and S.-Y. Kim), 186pp. Incheon, Korea.
- Ohsawa, M.(1990) An interpretation in latitudinal patterns of limits in south and east Asian mountains. *J. Eco.* 78: 326-339.
- Ohsawa, M.(1991) Structural comparison of tropical mountain rain-forests along latitudinal and altitudinal gradients in south and east-Asia. *Vegetatio* 97:1-10.
- Ohsawa, M.(1993) Latitudinal pattern of mountain vegetation zonation in southern and eastern Asia. *Journal of Vegetation Science* 4: 13-18.
- Parmesan, C. and G. Yohe(2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.
- Pitelka, L.F., R.H. Gardner, J. Ash, S. Berry, H. Gitay, I.R. Noble, A. Saunders, R.H.W. Bradshaw, L. Brubaker, J.S. Clark, M.B. Daviis, S. Sugita, J.M. Dyer, R. Hengeveld, G. Hope, B. Huntley, G.A. King, S. Lavorel, R.N. Mack, G.P. Malanson, M. McGlone, I.C. Prentice and M. Rejmanek(1997) Plant migration and climate change. *Am. Sci.* 85: 464-473.
- R Development Core Team(2006) 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.
- Tamis, W.L.M., M. Van't Zelfde and R. Van der Meijden(2001) Changes in vascular plant biodiversity in the Netherlands in the 20th century explained by climatic and other environmental characteristics. In: Long-term effects of climate change on biodiversity and ecosystem processes(eds. H. Van Oene, W. N. Ellis, M. M. P. D. Heijmans, D. Mauquoy, W. L. M. Tamis, F. Berendse, B. Van Geel, R. Van der Meijden and S. A. Ulenberg), 23-51. NOP, Bilthoven, The Netherlands.
- 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(2): 153-164.
- Thuiller, W.(2003) BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential shifts under global change. *Global Change Biology* 9: 1353-1362.
- Tsuyama, I., T. Matsui, M. Ogawa, Y. Kominami and N. Tanaka(2008) Habitat prediction and impact assessment of climate change on *Sasa kurilensis* in eastern Honshu, Japan. *Theory and applications of GIS* 16(2): 11-25.
- Uyeki, H. (1941) On the northern limit of evergreen broad-leaved tree in Korea *Acta. Phytotax. Geobot.* 10(2): 89-93. (in Japanese)
- Woods, K.D. and M.B. Davis(1989) Paleoecology of range limits: Beech in the upper peninsula of Michigan. *Ecology* 70: 681-696.
- Woodward, F.I.(1987) Climate and plant distribution. Cambridge University Press, Cambridge.
- Zweig, M.H. and G. Campbell(1993) Receiver-operating characteristic (ROC) Plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry* 39: 561-577.