

연도별 생장도일의 변화가 신갈나무의 잠재분포와 생장에 미치는 영향

임종환¹ · 박고은¹ · 신만용^{2*}

¹국립산림과학원 기후변화센터, ²국민대학교 산림환경시스템학과
(2016년 7월 19일 접수; 2016년 8월 18일 수정; 2016년 9월 5일 수락)

Effect of Yearly Changes in Growing Degree Days on the Potential Distribution and Growth of *Quercus mongolica* in Korea

Jong Hwan Lim¹, Ko Eun Park¹ and Man Yong Shin^{2*}

¹Center for Forest and Climate Change, Korea Forest Research Institute, Seoul 02707, Korea

²Department of Forest, Environment, and System, Kookmin University, Seoul 02455, Korea

(Received July 19, 2016; Revised August 18, 2016; Accepted September 5, 2016)

ABSTRACT

This study was conducted to analyze the effect of yearly changes in growing degree days (GDD) on the potential distribution and growth of *Quercus mongolica* in Korea. Annual tree-ring growth data of *Quercus mongolica* collected by the 5th National Forest Inventory were first organized to identify the range of current distribution for the species. Yearly GDD was calculated based on daily mean temperature data from 1951 to 2010 for counties with current distribution of *Q. mongolica*. When tree-ring growth data were analyzed through cluster analysis based on similarity of climatic conditions, seven clusters were identified. Yearly GDD based on daily mean temperature data of each county were calculated for each of the cluster to predict the change of potential distribution. Temperature effect indices were estimated to predict the effect of GDD on the growth patterns. In addition, RCP 4.5 and RCP 8.5 of climate change scenarios were adopted to estimate yearly GDD and temperature effect indices from 2011 to 2100. The results indicate that the areas with low latitude and elevation exceed the upper threshold of GDD for the species due to the increase of mean temperature with climate change. It was also predicted that the steep increase of temperature will have negative influences on tree-ring growth, and will move the potential distribution of the species to areas with higher latitude or higher elevation, especially after the year of 2050. The results of this study are expected to provide valuable information necessary for estimating local growth characteristics and for predicting changes in the potential distribution of *Q. mongolica* caused by climate change.

Key words: Tree-ring growth, Growing degree days, Temperature effect index, Climate change scenario, Cluster analysis

I. 서 론

산림 내 수종분포와 생장은 다양한 환경인자의 영향

을 받아 발현되는데, 해당 지역의 온도와 강수량과 같은 기후관련 인자가 중요한 역할을 한다(Gavilán, 2005; Grigorieva *et al.*, 2010). 특히 온도는 토양온도, 일장, 그



* Corresponding Author : Man Yong Shin
(yong@kookmin.ac.kr)

리고 일사량과 같은 다른 기후지표와 직접 또는 간접적으로 연계되기 때문에 식물의 분포와 생장에 중요하다. 성장도일(Growing Degree Days, GDD)은 생장온도일수라고도 하며 식물의 생육가능온도를 적산한 값으로 지역별 기온조건에 따른 식물의 분포범위를 설정하거나 현재 분포하는 식물의 생육단계를 예측할 수 있도록 고안된 것이다(Gilmore and Rogers, 1958; Hortic and Arnold, 1965; Kim and Yun, 2008). Yim(1977)은 온량지수(Warm Index, WI)를 이용하여 우리나라에 분포하는 주요 50개 수종의 전체 생육가능 분포와 최적 생육분포를 제시한 바 있다. 온량지수는 식물생장이 유효 열량과 관계가 있으며 잠재식생분포를 결정하는 중요한 요소라는 측면에서 성장도일과 동일한 개념이다(Kira, 1945). 다만 온량지수는 일평균기온 대신 월평균기온을 사용하기 때문에 성장도일과 높은 선형적 관계가 성립된다(Lim, 1998).

임목생장에 영향을 미치는 온도의 효과를 성장도일의 포물선 함수에 의해 지수화한 것이 온도효과지수이다(Botkin *et al.*, 1972; Lim, 1998; Hassan and Bourque, 2009). 온도효과지수는 0부터 1까지의 범위 내에서 값을 갖도록 지수화한 것으로, 성장도일에 근거한 생육범위의 상한과 하한에서는 0이 되고 생육범위의 중앙값에서는 1을 갖는다. 결과적으로 이 지수의 값에 따라 온도조건이 임목생장에 영향을 미치는 정도를 평가할 수 있도록 고안된 것이다(Hassan and Bourque, 2009).

최근 지구의 기후환경이 급격하게 변화하고 있어 산림분야에서도 기후변화에 대응하기 위한 대책 수립이 필요한 실정이다. 기후변화로 인한 산림의 피해를 최소화하려면 최근의 기후변화 양상을 반영하고 미래 기후변화의 영향을 평가하여 그 결과에 근거한 대책마련이 필요하다. 이를 위해 국내외적으로 다양한 연구가 수행되어 왔는데, 우리나라의 경우 온량지수 및 최저온도지수를 이용하여 산출한 열경사도 지수(Choi *et al.*, 2010), 수문지표와 온열지표(Choi, 2010), 그리고 기온감율을 적용한 공간보간기법(Lee *et al.*, 2011)을 적용하여 기후변화가 산림식생 분포의 변화에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 외국의 경우에는 성장도일을 포함한 토양습도 지수 및 광합성유효방사와 같은 생물물리학적 변수를 종합적으로 고려하여 기후변화가 산림수종 분포에 미치는 영향을 분석함으로써 관련 정책수립에 필요한 정보를 제공하고 있다(Sykes and Prentice, 1996; Bourque and Hassan, 2008; Hassan and Bourque, 2009; Bourque *et al.*, 2010).

신갈나무는 우리나라를 대표하는 활엽수종으로 산림자원으로서의 비중과 가치, 그리고 활용도가 매우 높은 수종이다. 특히 이 수종은 기후변화의 영향으로 피해를 입을 가능성이 높은 기후변화 취약 산림식물종 100종에 포함되어 있어(National Institute of Forest Science, 2014), 기후변화와 관련하여 관심을 가져야 할 수종 중의 하나이다. 지난 2006년부터 시작된 제5차 국가산림자원조사에서는 계통적추출법에 의해 전국을 4km 격자로 구분한 후, 각 격자의 교차점에 표본점을 설치하여 다양한 항목의 임목조사를 실시하여 왔다(Korea Forest Service, 2005). 이 자료에는 전국 규모의 수종별 연륜생장 정보가 포함되어 있어 신갈나무의 분포 현황을 파악할 수 있다. 따라서 신갈나무 분포지역에 대한 연도별 성장도일을 산출하여 평가한다면 기후변화가 우리나라를 대표하는 활엽수종 중의 하나인 신갈나무의 잠재분포 범위에 미치는 영향을 예측하는 것이 가능하다.

본 연구는 신갈나무의 분포 지역을 대상으로 기후특성을 반영한 군집분석을 실시한 후, 각 군집을 대상으로 기상관측소로부터 수집된 일평균기온 자료를 기반으로 연도별 성장도일을 산출하여 신갈나무 분포 지역의 온도조건을 분석함으로써 현재 분포 범위의 적합성과 잠재분포의 변화 가능성을 평가하고자 하였다. 이와 함께 기후변화 시나리오를 적용하여 신갈나무 분포지역에 대한 연도별 성장도일의 변화를 예측함으로써 기후변화가 신갈나무의 잠재분포 및 생장에 미치는 영향을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구자료

본 연구에서는 연도별 성장도일의 변화가 신갈나무의 잠재분포 및 생장에 미치는 영향을 예측하기 위해 제 5차 국가산림자원에서 5년 동안 전국 단위로 수집한 연륜생장 자료(Korea Forest Service, 2012)와 기상청에서 제공하는 레스터 형식의 시군별 기상자료 및 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5 자료를 이용하였다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 자료의 정리

본 연구에서는 현재 신갈나무가 분포하고 있는 시군을 대상으로 연륜생장 자료를 정리하였다. 국가산림자원조사에서는 표본점별로 10분 내외의 표준목을 선정

하고 연륜생장 목편을 채취하였는데, 본 연구에서는 통계적 효율성을 고려하여 30분 이상의 신갈나무 연륜생장 목편이 채취된 시군을 신갈나무 분포지역으로 간주하였으며 대상 시군은 76개인 것으로 분석되었다.

신갈나무가 분포하고 있는 76개 시군의 연도별 생장도일을 산출하기 위해 기상청에서 레스터 형식으로 제공하는 일별 평균기온 자료를 1951년부터 2010년까지 정리하였다. 또한 기후변화에 따른 연도별 생장도일의 변화를 파악하기 위해 기상청에서 제공하는 RCP 4.5와 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 근거하여 2011년부터 2100년까지 신갈나무가 분포하는 해당 시군에 대한 일별 평균기온 자료를 정리하였으며, 기후변화에 따른 신갈나무 분포 지역의 생장도일 변화 추정에 사용하였다.

2.2.2. 기후 군집분석

기후 군집분석은 신갈나무 생장목편이 채취된 시군의 기후 특성을 바탕으로 상호 유사성이 높은 몇 개의 군집으로 분류하는 통계적 방법이다. 이는 각 군집 내의 동질성과 군집 간의 이질성을 파악함으로써 연륜생장의 특성을 유사한 기후군집 범위에서 분석하기 위한 조치이다. 기후 군집분석을 위해 연륜생장 목편이 채취된 시군의 기후특성에 대한 측정치를 유클리디안 거리(euclidean distance)로 환산하여 분석하였다(Kim, 2011). 본 연구에서는 신갈나무 연륜생장 자료가 30개 이상 수집된 시군의 월평균기온과 월강수량의 유사성에 근거한 기후군집을 분석한 후 기후권역을 분류하였다. 기후 군집분석을 통해 분류된 자료를 기반으로 연도별·군집별 생장도일을 산출함으로써 신갈나무의 잠재분포와 생장에 미치는 영향을 규명하였다.

2.2.3. 생장도일에 근거한 분포범위 설정

Lim(1998)은 우리나라의 87개 기후 관측소 자료에 근거하여 온량지수(warm index; WI)와 생장도일(growing degree days; GDD)은 $GDD=30.838WI$ 의 선형적 관계에 있음을 밝힌 바 있다. 본 연구에서는

Yim(1977)의 수종별 온량지수와 Lim(1998)이 제시한 관계식에 의해 생장도일에 근거한 신갈나무의 전체 잠재분포 범위와 최적 분포범위를 설정하였다(Table 1).

2.2.4. 연도별·군집별 생장도일 및 온도효과지수의 산출

신갈나무가 분포하고 있는 76개 시군의 기후특성에 따라 분류된 군집을 대상으로 연륜생장이 측정된 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 연도별 생장도일을 식 (1)에 의해 산출하였다.

$$GDD = \sum (T_i - T_b), \text{ when } T_i - T_b > 0 \quad (1)$$

여기서, T_i = 해당 연도의 i 번째 날의 일평균기온, T_b = 생장임계온도로 본 연구의 대상은 산림 수종인 신갈나무이기 때문에 5°C를 적용하였다. 즉, 해당 연도의 생장도일은 일평균기온이 5°C 이상인 날의 일평균기온에서 5를 빼준 값을 누적하여 산출한 것이다.

한편 온도가 임목생장에 영향을 미치는 영향의 정도를 나타내는 온도효과지수는 생장도일의 포물선 함수(Botkin *et al.*, 1972)인 식 (2)에 의해 산출하였다.

$$M_T = \frac{4(GDD - GDD_{min})(GDD_{max} - GDD)}{(GDD_{max} - GDD_{min})^2} \quad (2)$$

여기서, GDD=해당 연도의 생장도일, GDD_{min} = 전체 생육범위의 최저 생장도일, 그리고 GDD_{max} = 전체 생육범위의 최고 생장도일이다.

2.2.5. 기후변화 시나리오에 의한 연도별·군집별 잠재분포의 변화 예측

본 연구에서는 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 기후변화가 신갈나무의 잠재분포와 생장에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 2011년부터 2100년까지 90년 동안의 연도별·군집별 생장도일과 온도효과지수를 산출하였다. 이 결과를 기후변화 시나리오를 적용하기 이전인 과거 60년(1951~2010년) 동안의 연도별·군집별 생장도일의 변화와 비교함으로써 기후변화에 따른 신갈나무의 잠재분포 범위의 변화와 생장에 미치는 영향을 평가하였다.

Table 1. Ranges of growing degree days appropriate for the distribution of *Quercus mongolica*

Species	Growing Degree Days	
	Total Range	Optimal Range
<i>Q. mongolica</i>	555.1~3,423.0	1,418.5~2,775.4

III. 결과 및 고찰

3.1. 기후군집 분석 결과

신갈나무가 분포하는 76개 시군을 대상으로 유클리디안 거리지수를 이용하여 군집분석을 실시한 결과 7개의 기후군집으로 분류되었으며, 이들의 공간분포는 Fig. 1과 같다. 우리나라에 분포하는 신갈나무는 생육범위가 상당히 넓은 편이며, 그로 인해 시군에 따라서는 기후조건 차이가 큰 것으로 평가되었다. 군집분석 결과를 보면 신갈나무는 경기도 북동지역, 강원도, 그리고 경상북도를 중심으로 주로 우리나라의 서부지역보다는 동쪽에 많이 분포하는 것을 알 수 있다.

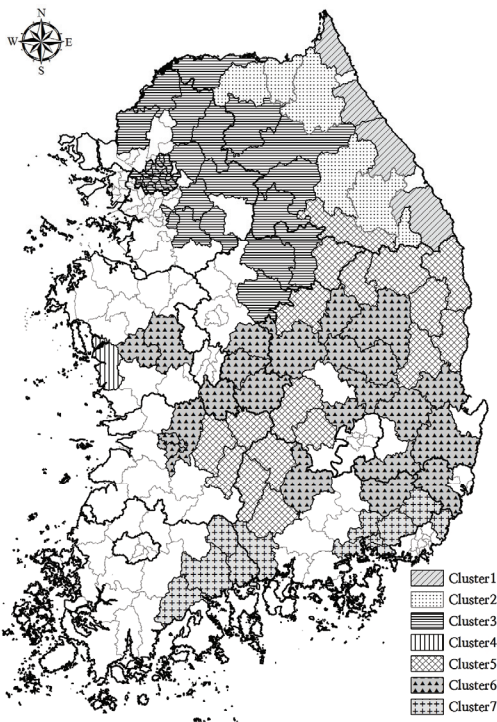


Fig. 1. Spatial distribution of *Quercus mongolica* based on climate cluster analysis.

군집별 기후특성을 보면 특징적인 차이를 보이고 있다. 강원동부 해안지역에 분포하는 군집 1은 다른 군집에 비해 상대적으로 온도가 낮지만 연 총강수량은 가장 많은 것으로 분석되었다. 또한 강원산악 지역의 군집 2도 지형적인 영향으로 기온이 낮았는데, 특히 월평균 최저기온은 7개 군집 중에서 가장 낮은 것으로 분석되었으며 연 총강수량은 군집 1에 비해 상대적으로 적은 것으로

파악되었다. 그밖에 나머지 군집의 기후특성도 각 군집에 포함된 시군의 지리적 또는 지형적 특성을 잘 반영하는 것으로 평가되었다.

3.2. 연도별 · 군집별 성장도일과 온도효과지수의 변화

3.2.1. 연도별 · 군집별 성장도일의 산출결과

일반적으로 활엽수종은 침엽수종에 비해 상대적으로 좁은 성장도일의 범위 내에서 생육이 가능한 것으로 알려져 있다(Yim, 1977). 성장도일의 관점에서 침엽수종인 소나무, 일본잎갈나무, 잣나무의 생육범위는 각각 925~3762, 1079~3793, 647~3731으로 넓은 편이다. 반면에 우리나라의 대표적인 활엽수인 상수리나무, 신갈나무, 그리고 졸참나무의 생육범위는 각각 1788~3453, 551~3423, 1233~3762로 신갈나무를 제외하면 범위가 상대적으로 좁다(Lim, 1998; Choi *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011; National Institute of Forest Science, 2015). 신갈나무는 다른 수종에 비해 성장도일의 상한이 3,423으로 상대적으로 낮지만, 분포범위가 넓어 하한은 551으로 상당히 낮은 편이다. 이는 신갈나무가 한랭한 기온조건에 적합한 수종임을 나타내는 결과로 해석할 수 있다(National Institute of Forest Science, 2014).

신갈나무의 7개 군집을 대상으로 1951년부터 2010년까지 60년 간 연도별 성장도일을 산출한 결과를 보면 최근 30년 동안의 군집별 성장도일은 이전 30년에 비해 증가한 것으로 나타났다. 특히 남해해안 권역인 군집 7은 최근 30년 동안의 평균 성장도일이 3,059로 가장 높았는데, 기후변화의 추세를 고려할 때 이 지역을 포함한 일부 권역의 경우 시간이 경과하면 신갈나무의 전체 생육 가능 범위를 벗어날 가능성이 높은 것으로 평가된다.

군집별 · 연도별 성장도일의 변화를 보면(Fig. 2) 연도별 변이는 있지만 전반적으로 시간이 경과함에 따라 군집별 성장도일은 증가하는 추세를 알 수 있다. 해발고도가 상대적으로 높아 성장도일이 작은 강원동부지역의 군집 1, 강원산악지역의 군집 2, 그리고 경상북부와 지리산 자락의 남부내륙 권역인 군집 5를 제외하면 군집 간의 연도별 성장도일의 변이가 크지 않은 것으로 파악되었다. 전체 분석 기간인 60년 동안의 군집별 성장도일은 모두 신갈나무의 전체 생육가능 범위 내에 있지만 일부 군집의 경우 2010년에 가까울수록 생육가능 범위의 상한에 근접하고 있음을 알 수 있다. 반면에 강원산악 권역인 군집 2는 이 기간 동안에 최저 생육범위를 벗어나지 않아 한랭성 수종인 신갈나무의 적지임을 알 수 있다.

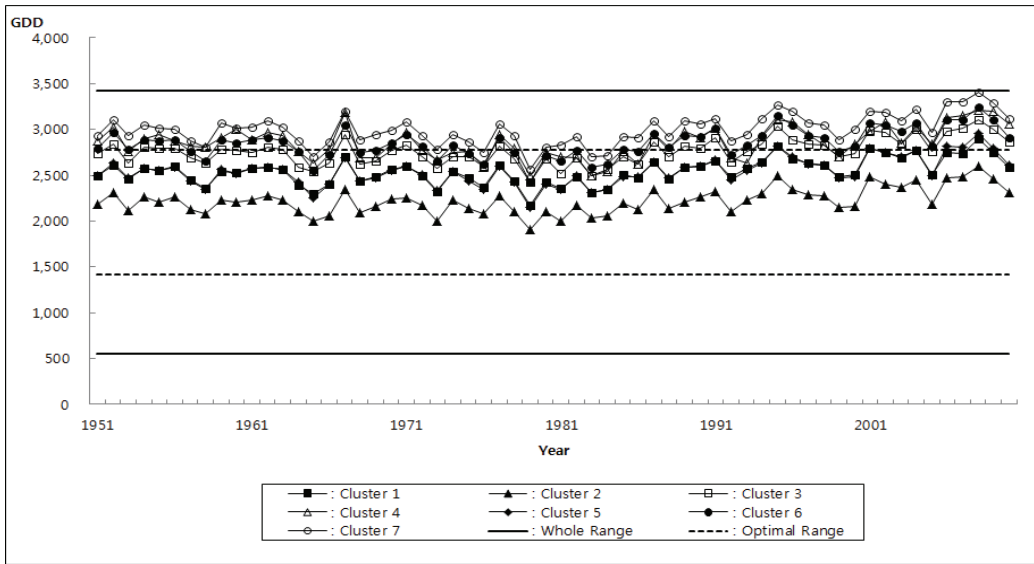


Fig. 2. Changes of yearly growing degree days by cluster of *Quercus mongolica*.

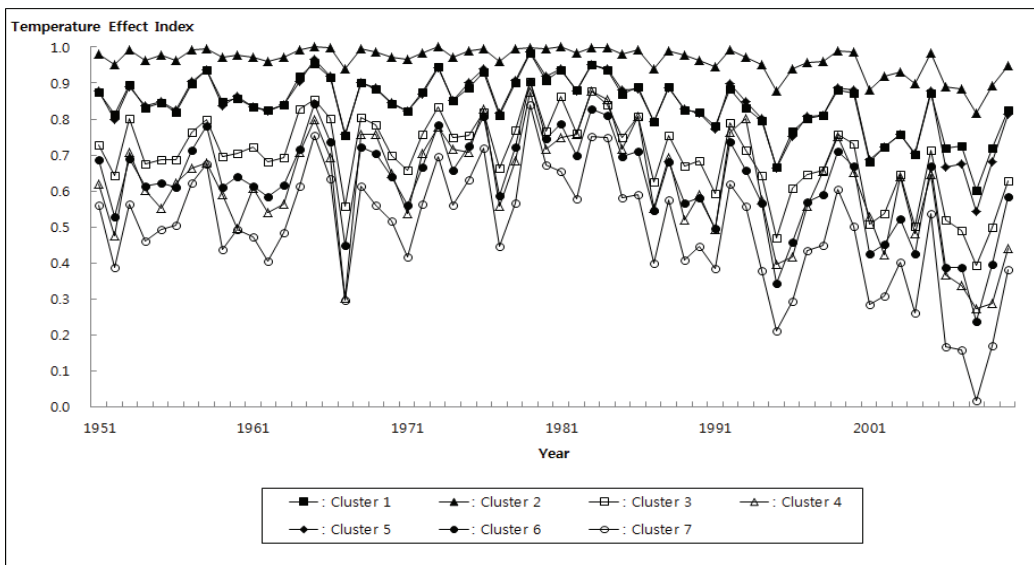


Fig. 3. Changes of yearly temperature effect index by cluster of *Quercus mongolica*.

3.2.2. 연도별 · 군집별 온도효과지수의 비교

연도별 · 군집별 온도효과지수의 변화를 보면 큰 폭의 변이를 확인할 수 있다(Fig. 3). 전체적으로 해발고도가 높은 군집 1의 강원동부 해안지역과 군집 2의 강원산악 지역, 그리고 백두대간에 포함된 남부내륙 및 경상북부 권역인 군집 5는 평균 온도효과지수도 높고 연도별 변이가 작은 것으로 분석되었다. 하지만 위도와 해발고도가 낮은 나머지 권역은 연도별 온도효과지수도 낮고 변

이도 큰 것으로 나타나 군집 간에 차이를 보였다. Guan *et al.*(2009)은 대만의 가문비나무 숲을 대상으로 성장도 일과 임목생장과의 관계를 분석한 결과, 월별 성장도일의 차이에 따라 지역별 생장에 유의미한 영향을 미치는 것으로 보고하여 본 연구의 결과와 일치한다.

연륜생장이 측정된 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 군집별 온도효과지수를 보면 시간이 경과함에 따라 온도효과지수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는

이 기간 동안 온도 상승에 따라 각 군집의 생장도일이 증가하였기 때문에 나타난 결과이다(Fig. 2). 전체 기간 동안 각 군집의 평균 온도효과지수를 보면 0.492~0.964로 군집별 변이가 크게, 남해해안 지역인 군집 7의 경우 기온 상승으로 인해 생장에 필요한 온도조건이 불리한 방향으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 해발고도가 상대적으로 높은 군집의 경우 2010년까지는 상대적으로 생육에 적합한 온도조건을 보이고 있지만, 해발고도가 낮은 나머지 지역은 시간이 경과하면서 기온상승으로 인해 점차 생장에 불리한 조건을 갖는 것으로 확인되었다.

3.3. 기후변화 시나리오에 의한 잠재분포와 생장의 변화 예측

3.3.1. 생장도일에 의한 잠재분포의 변화 예측

Table 2는 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 의해 2011년부터 2100년까지 90년 간 신갈나무의 각 군집의 연도별 생장도일(GDD)을 산출한 후, 30년 간격으로 각 기간의 생장도일에 대한 최소, 최대, 평균, 그리고 표준편차를 정리하여 비교한 결과이다. 군집별로 다소 차이가 있지만 시간이 경과하면서 기후변화 시나리오별로 생장도일에 근거한 신갈나무 생육가능 범위의 상한인 3,423에 접근하거나 이를 벗어나는 것으로 예측되었다.

군집별로 보면 위도와 해발고도가 낮은 군집 4, 6, 7의 경우에는 첫 번째 기간(2011년~2040년) 동안에 기후변화 시나리오에 관계없이 생장도일의 상한인 3,423을 넘는 것으로 분석되었다. 따라서 위도가 낮고 상대적으로 저지대에 분포하는 신갈나무는 기후변화에 의한 기온 상승으로 인해 생육이 어려울 것으로 예상된다. 반면에 상대적으로 해발고도가 높은 강원 해안지역의 군집 1과 강원 산악지역의 군집 2에서는 세 번째 기간인 2071년에서 2100년까지 분포하거나 또는 이 기간 동안에 생장도일의 상한의 범위를 벗어나는 것으로 추정되었다. Bourque *et al.*(2010)은 캐나다 북동부 지역을 대상으로 기후변화 시나리오를 적용한 잠재수종분포의 변화를 예측한 결과 참나무류의 잠재분포 지역은 2071년 이후에 감소하는 것으로 예측한 바 있어 본 연구의 결과와 유사함을 알 수 있다.

상대적으로 기온 상승의 폭이 낮은 시나리오인 RCP 4.5를 적용하면 군집 1은 3번째 기간(2017년~2100년)에 이르면 연간 생장도일의 범위를 벗어나지만 군집 2에서는 2100년까지도 생육범위를 벗어나지 않는 것으로 분석되었다. 하지만 극한 기후변화 시나리오인 RCP 8.5를 적용하면 군집 1은 2번째 기간(2041년~2070년), 그리고 군집 2는 세 번째 기간(2017년~2100년) 동안에 생육범위를 상회할 것으로 예측되었다. 나머지 군집인

Table 2. Comparison of periodic growing degree days by cluster of *Quercus mongolica* based on climate change scenarios

Cluster	RCP	Years from 2011 to 2040				Years from 2041 to 2070				Years from 2071 to 2100			
		Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
1	4.5	2495	3074	2787	145	2836	3340	3069	154	2900	3570	3221	137
	8.5	2414	3197	2862	211	2843	3793	3328	221	3603	4394	3954	201
2	4.5	2196	2631	2404	99	2434	2840	2658	120	2553	3149	2789	122
	8.5	2170	2765	2484	172	2485	3239	2876	192	3130	3743	3414	155
3	4.5	2841	3199	3029	106	3020	3523	3292	122	3210	3787	3443	117
	8.5	2736	3377	3107	181	3125	3943	3535	213	3824	4459	4129	176
4	4.5	2994	3551	3293	137	3336	3962	3590	154	3554	4098	3764	116
	8.5	2957	3670	3364	191	3389	4291	3841	230	4133	4924	4507	205
5	4.5	2668	3200	2927	121	2974	3473	3196	132	3083	3667	3351	123
	8.5	2667	3352	3025	182	3039	3826	3446	192	3778	4472	4050	181
6	4.5	3022	3557	3286	133	3331	3907	3563	144	3472	4059	3728	123
	8.5	3016	3742	3390	191	3409	4210	3833	201	4163	4954	4479	197
7	4.5	3256	3836	3529	149	3565	4152	3826	144	3729	4271	4007	123
	8.5	3220	3986	3632	200	3709	4538	4124	202	4498	5241	4787	200

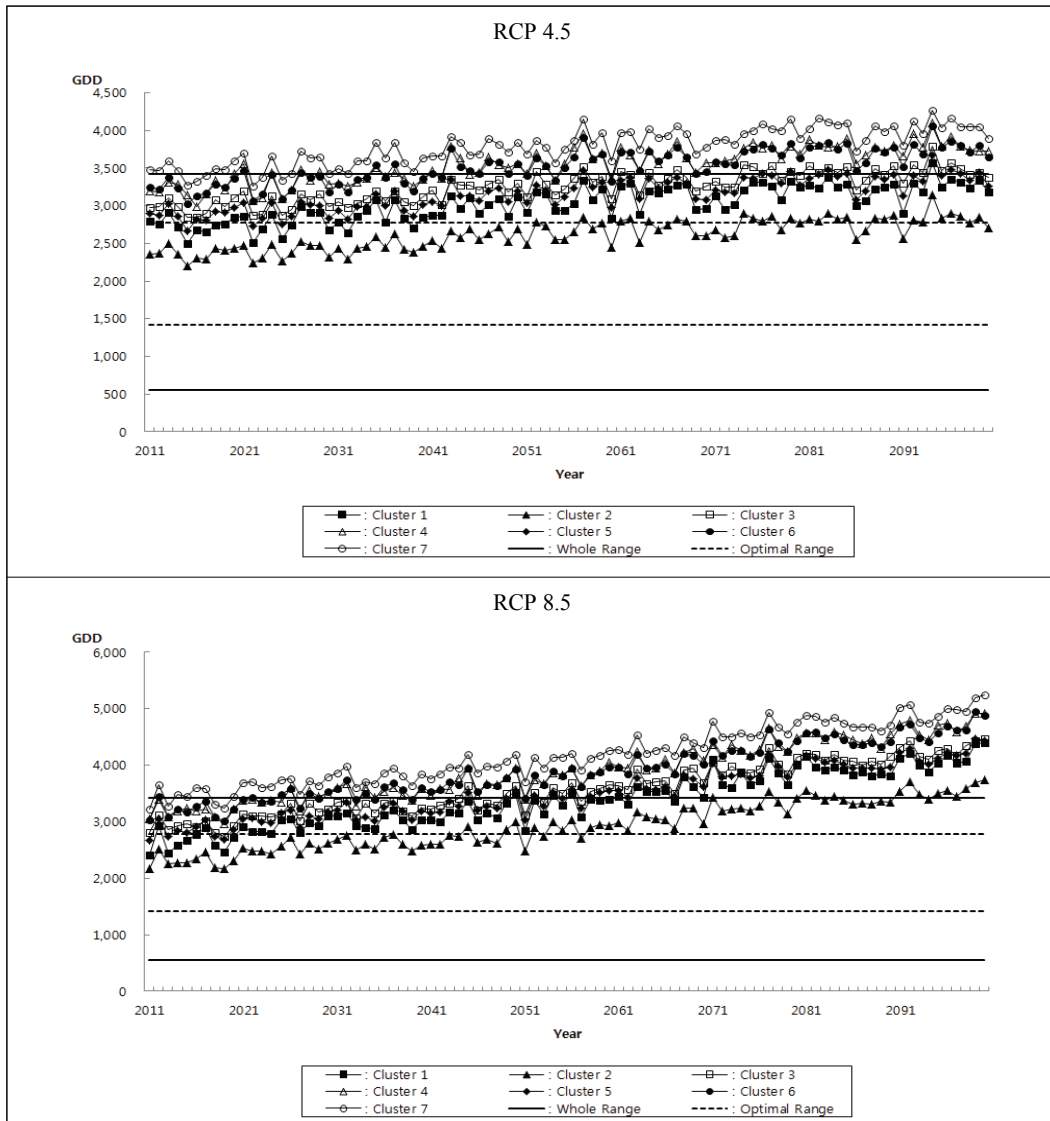


Fig. 4. Distribution of yearly growing degree days by cluster of *Quercus mongolica* based on climate change scenarios.

중북부 내륙지역인 군집 3과 경상북부 및 남부내륙 지역인 군집 5는 RCP 4.5와 RCP 8.5 모두에서 두 번째 기간(2041년~2070년)에 도달하면 성장도일이 분포 범위를 벗어나는 것으로 추정되었다. Nitschke과 Innes(2008)는 캐나다 서부지역에 분포하는 17개 수종을 대상으로 시간 경과에 따른 성장도일의 변화를 분석한 결과, 기후변화에 의해 2085년에는 현재보다 성장도일의 한계치를 벗어나는 수종이 48% 더 증가하는 것으로 보고하여 유사한 추세를 보이고 있다.

기후변화 시나리오에 따라 연도별 성장도일의 변화

를 비교한 결과(Fig. 4)를 보면 RCP 4.5의 경우 군집별·연도별 성장도일의 변화가 상대적으로 완만하다. 하지만 RCP 8.5를 적용하면 시간 경과에 따른 성장도일의 증가 속도가 큰 것을 알 수 있다. 군집별 성장도일은 RCP 8.5를 적용할 경우 RCP 4.5에 비해 연간 308~394가 증가하는 것으로 분석된 결과에서도 이를 확인할 수 있다.

결과적으로 기후변화 시나리오를 감안하면 해발고도가 높은 강원 일부 지역을 제외한 현재의 신갈나무 분포 지역은 점차 사라질 것으로 예상된다. 특히 이 수종이 한랭성 특성을 가진 것을 고려할 때 분포 범위가 위도가 높

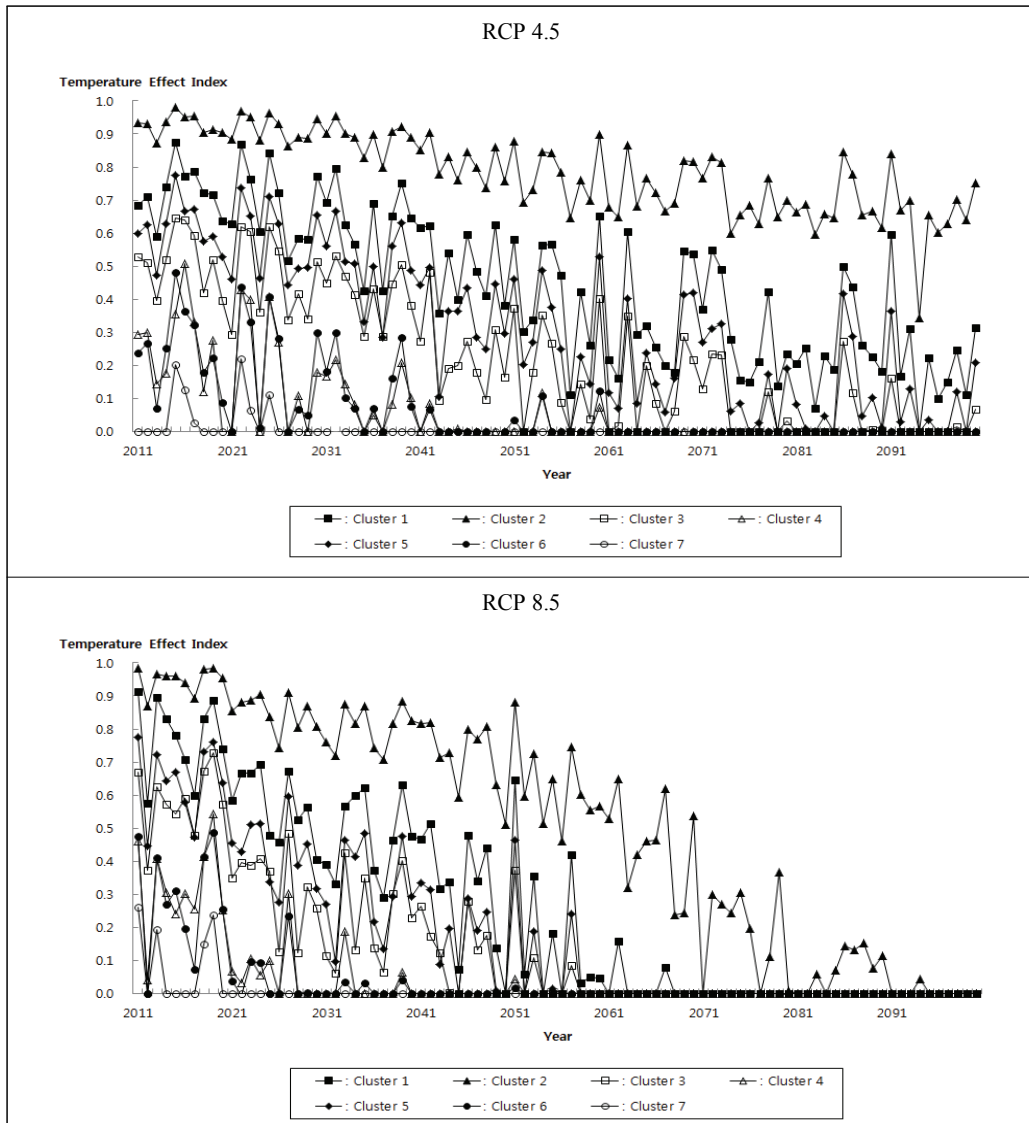


Fig. 5. Distribution of yearly temperature effect index by cluster of *Quercus mongolica* based on climate change scenarios.

평가되었다. 하지만 임목의 생장은 온도 외에도 강수량과 광조건 등과 같은 다른 기후인자가 복합적으로 작용하기 때문에 온도효과만으로는 생장의 변화를 온전히 설명할 수 없다. 특히 임목생장은 온도 외에도 수분조건이 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있어(Fritts, 1976; Zobel and Van Buijtenen, 1989; Zahner, 1968), 연도별 강수량에 따라 성장 조건이 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 기후변화 시나리오에 의하면 시간이 경과할수록 기온은 지속적으로 상승하지만 강수량은 연도별 변이가

심한 것으로 분석되어(National Institute of Forest Science, 2015) 이들의 상호작용에 의한 효과를 본 연구를 통해서서는 확인할 수 없다. 본 연구의 한계는 있지만 기후변화 시나리오를 적용하여 산출한 연도별 성장도일과 온도효과지수에 의하면 신갈나무의 잠재분포는 위도가 낮은 지역과 저지대를 중심으로 점차 줄어들면서 위도가 높은 북쪽이나 고지대로 생육가능 분포가 이동할 것으로 예상된다.

외국에서는 연도별 성장도일 분포도를 제작하여 시

간 경과에 따른 수종별 잠재분포의 변화를 예측할 수 있는 정보를 제공하고 있다(Hassan *et al.*, 2007). 우리나라의 경우에도 농업분야에서는 작물 단위의 경영에 필요한 정보를 제공하기 위해 성장도일 분포도를 제작한 바 있다(Kim and Yun, 2008). 본 연구는 신갈나무 분포 시군을 대상으로 연도별 성장도일을 산출하여 잠재분포 및 생장의 변화를 예측하였기 때문에 전국에 대한 성장도일 정보가 없는 상태이다. 앞으로 추가 연구를 통해 전국 단위의 성장도일 분포도를 작성하여 시간 경과에 따른 수종별 잠재분포의 변화를 예측할 필요가 있다.

적 요

본 연구는 우리나라의 대표 활엽수종 중의 하나인 신갈나무를 대상으로 기후변화에 의한 연도별 성장도일의 변화가 잠재분포 및 생장에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행하였다. 이를 위해 신갈나무 분포 지역의 기후특성을 반영한 군집분석을 실시하였으며, 그 결과 7개의 기후군집으로 분류되었다. 각 군집에 포함된 시군에서 수집된 일평균기온 자료를 기반으로 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 연도별 성장도일과 기온효과지수를 산출함으로써 시간 경과에 따른 신갈나무의 잠재분포 범위와 생장의 변화 추이를 평가하였다. 이와 함께 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 2011년부터 2100년까지 연도별 성장도일과 온도효과지수를 산출하여, 기후변화에 의한 신갈나무의 잠재분포 범위와 생장의 변화를 예측하였다. 신갈나무가 현재 분포하고 있는 지역의 성장도일을 연도별로 산출하여 비교한 결과 위도와 해발고도가 낮은 지역은 시간이 경과함에 따라 신갈나무에 적합한 생육가능 범위를 벗어나는 것으로 분석되었다. 특히 기후변화 시나리오를 적용할 경우 지속적인 기온의 상승으로 인해 2050년 이후에는 잠재분포의 변화뿐만 아니라 성장에도 큰 지장을 주는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 논문은 2015년 국립산림과학원 기후변화센터 위탁연구과제 ‘연륜해석에 의한 주요 수종의 성장과 기후와의 관계 조사’ 연구 결과의 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Botkin, D. B., J. F. Janak, and J. R. Wallis, 1972: Some consequence of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology* **60**, 849-873.
- Bourque, C.P.A., and Q.K. Hassan, 2008: Projected impacts of climate change on species distribution in the Acadian forest region of eastern Nova Scotia. *The Forestry Chronicle* **84**(4), 553-557.
- Bourque, C.P.A., Q.K. Hassan, and D.E. Swift, 2010: Modelling potential species distribution for current and projected future climates for the Acadian forest region of Nova Scotia, Canada. NOVA SCOTIA Research Report 46pp.
- Choi, S.H., 2010: Assessment of climate change impact on forest cover distribution using the hydrological and thermal indices in Korea. Master Thesis, Korea University 68pp.
- Choi, S.H., W.K. Lee, Y.H. Son, S.J. Yoo, and J.H. Lim, 2010: Changes in the distribution of South Korean forest vegetation simulated using thermal gradient indices. *Science China Life Science* **53**(7), 784-797.
- Fritts, H.C., 1976: Tree Rings and Climate. Academic Press, New York, USA 567pp.
- Gavilán, R.G., 2005: The use of climatic parameters and indices in vegetation distribution. A case study in the Spanish Sistema Central. *International Journal of Biometeorology* **50**(2), 111-120.
- Gilmore, E.C. and J.S. Rogers, 1958: Heat unit as a method of measuring maturity in corn. *Agronomy Journal* **50**, 611-615.
- Grigorieva, E.A., A. Matzarakis, and C.R. Freitas, 2010: Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude. *Climate Research* **42**, 143-154.
- Guan, B.T., C.H. Chung, S.T. Lin, and C.W. Shen, 2009: Quantifying height growth and monthly growing degree days relationship of plantation Taiwan Spruce. *Forest Ecology Management* **257**, 2270-2276.
- Hassan, Q.K., and C.P.A. Bourque, 2009: Potential species distribution of Balsam Fir based on the integration of biophysical variables derived with remote sensing and process-based methods. *Remote Sensing* **1**, 393-407.
- Hassan, Q.K., C.P.A. Bourque, F.R. Meng, and W. Richards, 2007: Spatial mapping of growing degree days: an application of MODIS-based surface temperature and enhanced vegetation index. *Journal of Applied Remote Sensing* **1**, 1-11.

- Hortic, H.J. and C.Y. Arnold, 1965: Temperature and the rate of development of sweet corn. *American Society of Horticulture Science* **87**, 303-312.
- Kim, C. R., 2011: *SAS Data Analysis*. 21th Century Book Co. 663pp. (in Korean)
- Kim, J.H. and J.I. Yun, 2008: On mapping growing degree-days (GDD) from monthly digital climatic surfaces for South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(1), 1-8. (in Korean with English abstract)
- Kira, T., 1945: A new classification of climate in eastern Asia as the basis for agricultural geography. Horticultural Institute, Kyoto Univ., Kyoto.
- Korea Forest Service, 2005: *A study on the reformation of national forest inventory system by the changes of domestic and international conditions(IV)*. 290pp. (in Korean)
- Korea Forest Service, 2012: *Tree-ring DB Construction*. 299pp. (in Korean)
- Lee, S.C., S.H. Choi, W.K. Lee, S.J. Yoo, and J.G. Byun, 2011: The effect of climate data applying temperature lapse rate on prediction of potential forest distribution. *Korean Society for Geospatial Information System* **19**(2), 19-27. (in Korean with English abstract)
- Lim, J.H., 1998: *A forest dynamics model based on topographically-induced heterogeneity in solar radiation and soil moisture on the Kwangneung experimental forest*. Ph.D. Dissertation. Seoul National University 145pp.
- National Institute of Forest Science. 2014: *Analyzing relationships between annual ring growth of main forest tree species and climatic factors*. 125pp. (in Korean)
- National Institute of Forest Science. 2015: *Relationships between growth of main forest tree species and climatic factors based on tree-ring analysis*. 165pp. (in Korean)
- Nitschke, E.R. and J.L. Innes, 2008: A tree and climate assessment tool for modelling ecosystem response to climate change. *Ecological Modelling* **210**, 263-277.
- Sykes, M.T. and I.C. Prentice, 1996: Climate change, tree species distributions and forest dynamics: A case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of northern Europe. *Climatic change* **34**, 161-177.
- Yim, Y.J., 1977: Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula. III. Distribution of tree species along the thermal gradient. *Japanese Journal of Ecology* **27**, 177-189.
- Zahner, R., 1968: Water deficits and growth of trees. *Water Deficits and Plant Growth* **2**, 191-254.
- Zober, B.J. and J.P. Van Buijtenen, 1989: *Wood Variation: Its Causes and Control*. Springer Verlag, Berlin, 363pp.