

기후변화가 잣나무의 연륜생장에 미치는 영향 분석

임중환¹·천정화²·박고은¹·신만용^{3*}

¹국립산림과학원 기후변화센터, ²국립산림과학원 산림생태연구과,
³국민대학교 산림환경시스템학과

Effect of Climate Change on the Tree-Ring Growth of *Pinus koraiensis* in Korea

Jong Hwan Lim¹, Jung Hwa Chun², Ko Eun Park¹ and Man Yong Shin^{3*}

¹Center for Forest and Climate Change, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

²Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

³Department of Forest, Environment, and System, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

요약: 본 연구는 기후변화가 잣나무의 연륜생장에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행하였다. 잣나무의 연도별 성장패턴을 분석하기 위해 제5차 국가산림자원조사에서 수집된 연륜생장 자료를 정리하였다. 기후조건의 유사성에 근거한 군집분석 결과 잣나무 분포지역은 5개의 군집의 분류되었다. 시군별로 정리된 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 월별 평균기온과 강수량 자료에 근거하여 각 군집의 연도별 성장도일과 표준강수지수를 산출하였다. 이 정보를 이용하여 기후조건이 생장에 미치는 영향을 분석하기 위해 각 군집에 대한 연도별 온도효과지수와 강수효과지수를 추정하였다. 온도효과지수와 강수효과지수의 곱으로 표현되는 독립변수에 의해 연륜생장을 추정할 수 있는 연륜생장 추정식을 군집별로 개발하였다. 이 추정식을 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 적용함으로써 기후변화가 군집별 잣나무의 연륜생장에 미치는 영향을 예측하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 잣나무의 지역별 성장특성의 추정뿐만 아니라 기후변화에 따른 성장패턴의 변화 예측에 필요한 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: This study was conducted to analyze the effect of climate change on the tree-ring growth of *Pinus koraiensis* in Korea. Annual tree-ring growth data of *P. koraiensis* collected by the 5th National Forest Inventory were first organized to analyze yearly growth patterns of the species. When tree-ring growth data were analyzed through cluster analysis based on similarity of climatic conditions, five clusters were identified. Yearly growing degree days and standard precipitation index based on daily mean temperature and precipitation data from 1951 to 2010 were calculated by cluster. Using the information, yearly temperature effect index (TEI) and precipitation effect index (PEI) by cluster were estimated to analyze the effect of climatic conditions on the growth of the species. Tree-ring growth estimation equations by cluster were developed by using the product of yearly TEI and PEI as independent variable. The tree-ring growth estimation equations were applied to the climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5 for predicting the changes in tree-ring growth by cluster of *P. koraiensis* from 2011 to 2100. The results of this study are expected to provide valuable information necessary for estimating local growth characteristics of *P. koraiensis* and for predicting changes in tree-ring growth patterns caused by climate change.

Key words: tree-ring growth, growing degree days, standard precipitation index, climate change scenario, *Pinus koraiensis*

서론

최근 지구의 기후환경이 급격하게 변화하고 있어 우리나라의 임업분야에서도 기후변화에 따른 대응방안의 수립이 필요한 실정이다. 기후변화에 의한 산림생태계의 구

조와 산림의 기능적 변화를 이해하기 위해서는 산림생태계의 주요 구성요소인 임목생장과 기후인자 간의 연관성에 대한 이해가 필요하다(Speer, 2010). 임목생장에 영향을 미치는 기후인자 중에서 가장 중요한 것은 기온과 강수량으로 알려져 있다(Sander, 1971; Kira, 1976; Woodward, 1987; Woodward and Rochefort, 1991). 기온은 광합성을 포함한 다양한 임목의 생리적 작용에 영향을 미치는 중요

*Corresponding author
E-mail: yong@kookmin.ac.kr

한 기후요소이며, 수분조건은 연륜을 만들어내는 형성층 활동에 크게 작용할 뿐만 아니라 수분이 부족할 경우에는 연륜 생장을 둔화시킨다(Larsen, 1963).

잣나무는 우리나라를 대표하는 침엽수종으로, 산림자원으로서의 비중과 가치, 그리고 활용도가 높은 수종이다. 특히 이 수종은 기후변화의 영향으로 피해를 입을 가능성이 높은 기후변화 취약 산림식물종 100종에 포함되어 있다(National Institute of Forest Science, 2014). 기후변화로 인한 산림의 피해를 최소화하려면 최근의 기후변화 양상을 반영하고 미래 기후변화의 영향을 평가하여 그 결과에 근거한 대책마련이 필요하다. 이를 위해서는 잣나무의 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하는 작업이 선행되어야 한다.

임목의 연륜생장은 생장기의 기후 및 환경변화와 밀접한 관련을 가지므로 기후변화에 대한 정확한 정보를 제공한다(Choi et al., 1992). 그동안 연륜생장과 기후와의 관계를 구명하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔는데, 최근 들어 기후변화가 산림과 임목에 미치는 영향과 그에 따른 변화를 구명하기 위해 다양한 수종과 광범위한 지역을 대상으로 연구들이 진행되어 왔다(Bergès et al., 2005; Nakawatase and Peterson, 2006; Albert and Schmidt, 2010). 우리나라의 경우 연륜생장과 기후인자와의 관계분석 연구는 주로 특정 지역에서 측정한 소규모 자료에 근거한 결과로 기후변화와 연륜생장의 관계를 명확히 규명하는데 한계가 있었던 것이 사실이다(Park et al., 2001; Seo and Park, 2002; Son et al., 2011).

지난 2006년부터 시작된 제5차 국가산림자원조사에서는 계통적추출법에 의해 전국을 4 km 격자로 구분한 후 표본점을 설치하여 다양한 항목의 임목조사를 실시하여 왔는데 이 항목 중에는 연륜생장 자료가 포함되어 있다(Korea Forest Service, 2005). 이 자료는 수종별 그리고 입지조건별로 전국 규모의 연륜생장 정보를 제공하기 때문에 연륜기후학적 방법을 적용하면 기후변화가 우리나라에 분포하는 주요 수종의 연륜생장에 미치는 영향을 평가하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 잣나무를 대상으로 기후인자가 연륜생장에 미치는 영향을 구명하기 위해 연륜기후학적 방법을 적용하였다. 이를 위해 잣나무 분포지역의 기후특성을 반영한 군집분석을 실시한 후, 군집별로 기후인자를 독립변수로 하는 수종별 연륜생장 추정식을 개발하고자 하였다. 이 추정식의 독립변수는 온도와 강수량에 의해 산출된 성장도일과 표준강수지수를 기반으로 연도별 온도효과지수와 강수효과지수를 추정 후 이들의 상호작용인 곱에 의해 표현되는 기후인자를 사용하였다. 마지막으로 잣나무의 군집별 연륜생장 추정식에 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 연륜생장의 연도별 변화 추이를 예측하였다.

재료 및 방법

1. 연구 자료

본 연구에서는 잣나무 분포지역의 월별 평균기온과 강수량 정보에 근거하여 기후변화에 따른 연륜생장의 변화를 추정하고자 하였다. 이를 위해 제5차 국가산림자원조사에서 측정한 잣나무의 연륜생장 자료(Korea Forest Service, 2012)와 기상청에서 래스터 형태로 제공하는 일 단위 기상정보를 이용하였다. 한편 기후변화 시나리오 자료는 기상청에서 제공하는 RCP 4.5와 RCP 8.5를 사용하였다.

2. 연구 방법

1) 자료의 정리

국가산림자원조사에서는 표본점별로 10분 내외의 표준목을 선정하고 연륜생장 목편을 채취하였는데, 본 연구에서는 통계적 효율성을 고려하여 30분 이상의 잣나무 연륜생장 목편이 채취된 시군을 잣나무 분포지역으로 간주하였으며 대상 시군은 16개인 것으로 파악되었다. 본 연구에서는 이들 16개 시군을 대상으로 연륜생장 자료를 정리하였다. 한편 잣나무가 분포하고 있는 16개 시군의 연도별 성장도일과 표준강수지수를 산출하기 위해 기상청에서 래스터 형식으로 제공하는 일별 평균기온과 강수량 자료를 1951년부터 2010년까지 정리하여 사용하였다. 또한 기후변화에 따른 연도별 성장도일과 표준강수지수의 변화를 파악하기 위해 기상청에서 제공하는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways; RCP) 4.5와 8.5의 기후변화 시나리오에 근거하여 2011년부터 2100년까지 잣나무가 분포하는 해당 시군의 일별 평균기온과 강수량 자료를 정리하였다.

2) 기후 군집분석

기후 군집분석은 잣나무 생장목편이 채취된 시군의 기후특성을 바탕으로 상호 유사성이 높은 몇 개의 군집으로 분류하는 통계적 방법이다. 이는 기후조건에 대한 각 군집 내의 동질성과 군집 간의 이질성을 파악함으로써 연륜생장의 특성을 유사한 기후군집 범위에서 분석하기 위한 조치이다. 기후 군집분석을 위해 연륜생장 목편이 채취된 시군이 가지고 있는 기후특성 측정치를 유클리디언 거리(euclidean distance)로 환산하여 분석하였다(Kim, 2011). 본 연구에서는 잣나무가 분포하는 16개 시군의 월평균기온과 월강수량의 유사성에 근거한 기후 군집분석을 실시하였으며, 이 결과에 근거하여 기후특성과 연륜생장과의 관계를 구명하였다.

3) 기온과 연륜생장과의 관계 분석

(1) 성장도일의 산출 및 분포 범위의 설정

본 연구에서는 일평균기온에 근거하여 산림의 수종별 분포범위 및 성장과 밀접한 연관이 있는 성장도일(Growing Degree Days; GDD)을 식 1에 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 = 성장 임계온도로 산림 수종의 경우 5°C를 적용한다. 즉, 해당 연도의 성장도일은 일평균기온이 5°C 이상인 날의 일평균기온에서 5를 빼준 값을 누적하여 산출하였다.

Yim (1977)은 온량지수(Warm Index; WI)를 이용하여 우리나라에 분포하는 주요 수종의 전체 생육분포와 최적 생육분포를 제시한 바 있다. 온량지수는 식물생장이 유효 열량과 관계가 있으며 잠재식생분포를 결정하는 중요한 요소(Kira, 1945)라는 측면에서 성장도일과 동일한 개념이다. 다만 온량지수는 일평균기온 대신 월평균기온을 사용하기 때문에 성장도일과 높은 선형적 관계가 성립된다. Lim(1998)은 우리나라의 87개 기후 관측소 자료에 근거하여 온량지수와 성장도일은 $GDD = 30.838WI$ 의 선형적 관계에 있음을 밝힌바 있다. 본 연구에서는 Yim(1977)의 수종별 온량지수와 Lim(1998)이 제시한 온량지수와 성장도일의 관계식에 근거하여 잣나무의 생육가능 범위와 최적 생육범위를 산출하였다(Table 1).

(2) 군집별 온도효과지수의 산출

임목생장에 영향을 미치는 온도의 효과는 성장도일의 포물선 함수에 의해 결정되는데(Botkin et al., 1972), 본 연구에서는 식 2에 의해 산출된 값을 온도효과지수(M_T)라고 명명하였으며 그 값은 0에서 1의 범위에 있다. 온도효과지수가 1에 가까우면 생장에 적합한 온도조건을 가지며, 반대로 0에 가까우면 생장에 부적합한 온도조건을 갖는 것을 의미한다.

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

여기서, GDD=특정 지역 해당 연도의 성장도일, GDD_{min} = 해당 수종의 전체 생육범위의 최저 성장도일, 그리고 GDD_{max} = 해당 수종의 전체 생육범위의 최고 성장도일이다.

4) 강수량과 연륜생장과의 관계 분석

(1) 표준강수지수의 산출

McKee et al.(1993)은 가뭄을 정의하고 모니터링할 목적으로 새로운 개념의 강수지수인 표준강수지수(Standard

Table 1. Ranges of growing degree days appropriate for the distribution of *Pinus koraiensis*.

Species	Growing Degree Days	
	Total Range	Optimal Range
<i>P. koraiensis</i>	647.6 ~ 3,731.4	1,387.7 ~ 2,497.9

Table 2. Classification system of Standard Precipitation Index(SPI).

SPI	Classification	SPI	Classification
-2.0 ≤	Extremely Dry	1.0 ~ 1.49	Moderately Wet
-1.99 ~ -1.5	Severely Dry	1.5 ~ 1.99	Very Wet
-1.49 ~ -1.0	Moderately Dry	2.0 ≤	Extremely Wet
-0.99 ~ 0.99	Near Normal		

Precipitation Index; SPI)를 개발하였다. 많은 연구를 통해 SPI는 이전에 개발된 다른 가뭄지수와 비교하여 가뭄의 현재 상태를 진단하고 모니터링하는데 개선된 결과를 제시하는 것으로 보고되었다(Hayes et al., 1999; Szalai and Szinell, 2000; Lloyd-Hughes and Saunders, 2002; Colorado Climate Center, 2004). 표준강수지수는 특정 지역의 강수량이 감마 누적확률분포에 의해 잘 설명된다는 사실에 근거하여 감마 누적확률분포를 표준정규분포로 변환한 것으로 -3에서 3까지의 범위에서 값을 갖는 지수이다(Thom, 1966). 표준정규분포의 경우 평균이 0이고 표준편차가 1이기 때문에 어떤 지역에서 특정 기간 동안의 강수의 조건은 표준편차의 값으로 표현되는 표준강수지수의 값에 의해 상대적으로 비교가 가능하게 된다. 따라서 표준강수지수는 특정 기간 동안의 상대적인 수분조건을 의미하며 수분조건에 따라 Table 2와 같이 분류할 수 있다(McKee et al., 1993).

본 연구에서는 연도별 SPI를 산출하기 위해 미국 콜로라도 기후센터에서 개발한 SPI 분석 프로그램을 이용하였다(Colorado Climate Center, 2004). 연도별 SPI는 임목생장에 영향을 미치는 수분 조건인 전년도 9월부터 당년도 5월까지의 9개월을 기준으로 산출하였다.

(2) 군집별 강수효과지수의 산출

표준강수지수는 -3에서 3까지의 값을 갖는 표준화된 지수로 감마 누적확률분포를 표준정규분포로 변환한 지수이다. 표준강수지수의 값이 클수록 수분 조건이 좋기 때문에 본 연구에서는 이 지수의 누적확률을 기준으로 강수효과지수를 산출하여 잣나무의 군집별 생장에 미치는 영향을 평가하였다. Table 3은 표준강수지수별 누적확률을 나타낸 것으로(Wu et al., 2005), 표에 나와 있지 않은 표준강수지수의 값은 내삽에 의해 추정하였다.

5) 기후인자에 의한 군집별 연륜생장 추정식의 개발

임목의 연륜생장에 영향을 미치는 기후인자는 광조건, 온도, 토양수분, 토양 내 질소량, 그리고 이산화탄소 농도 등과 같이 다양한데, 연륜생장은 이들 생물물리학적인 변수들의 곱에 의해 발현되는 것으로 알려져 있다(Hassan and Bourque, 2009). 본 연구에서는 잣나무 군집별로 기후인자에 의한 연륜생장 추정식을 개발하기 위해 기후인자

Table 3. Standard Precipitation Index and its cumulative probability.

SPI	Cumulative Probability	SPI	Cumulative Probability	SPI	Cumulative Probability
-3.0	0.0014	-0.5	0.3085	2.0	0.9772
-2.5	0.0062	0.0	0.5000	2.5	0.9938
-2.0	0.0228	0.5	0.6915	3.0	0.9986
-1.5	0.0668	1.0	0.8413		
-1.0	0.1587	1.5	0.9332		

의 곱을 독립변수로 하는 추정모델을 사용하였다. 온도와 강수량을 기반으로 산출된 온도효과지수와 강수효과지수를 이용하여, 이들 기후요인의 곱을 독립변수로 하는 식 3과 같은 직선회귀 모형을 사용하였다. 즉, 이 식에서 독립변수는 군집별 그리고 연도별로 추정된 온도효과지수 (M_T)와 강수효과지수(M_P)의 상호작용으로 두 변수를 곱한 값이다.

$$GI = b_0 + b_1(M_T \times M_P) \tag{3}$$

여기서 GI=연륜생장지수, M_T =온도효과지수, M_P =강수효과지수, 그리고 b_0, b_1 =추정해야할 회귀계수이다.

6) 기후변화 시나리오에 의한 연륜생장 변화 예측

본 연구에서는 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 의해 2011년부터 2100년까지 90년 간 각 군집의 일평균 기온과 일강수량 자료를 정리한 후, 각 연도의 생장도일과 표준강수지수를 산출하였다. 이와 같이 산출된 생장도일과 표준강수지수를 사용하여 각 연도의 온도효과지수와 강수효과지수를 군집별로 추정하였다. 이상과 같이 얻어진 자료를 앞에서 개발한 잣나무의 군집별 연륜생장 추정식에 적용하여 기후변화 시나리오에 따른 수종별 연륜생장 변화를 예측하였다.

결과 및 고찰

1. 기후 군집분석 결과

잣나무가 분포하고 있는 시군은 우리나라 중부 이상 지역으로 내한성이 강한 잣나무의 생장특성을 보여주고 있다. 이들 16개 시군을 대상으로 유클리디안 거리지수를 이용하여 기후조건 유사성에 근거한 군집분석을 실시한 결과 5개의 기후군집으로 분류되었다(Figure 1). 군집 1은 강원도 양양군의 1개 시군, 군집 2는 충청북도 청원군의 1개 시군, 군집 3은 강원도 인제군, 정선군, 그리고 평창군의 3개 시군, 군집 4는 강원도의 4개 시군과 경기도의 4개 시군 등 총 8개 시군이 포함되며 마지막으로 군집 5는 영월군, 경상북도 봉화군, 그리고 충청북도 단양군의 3개 시군으로 분류되었다.

각 군집의 기온과 강수량 분포를 보면 군집별로 특징적

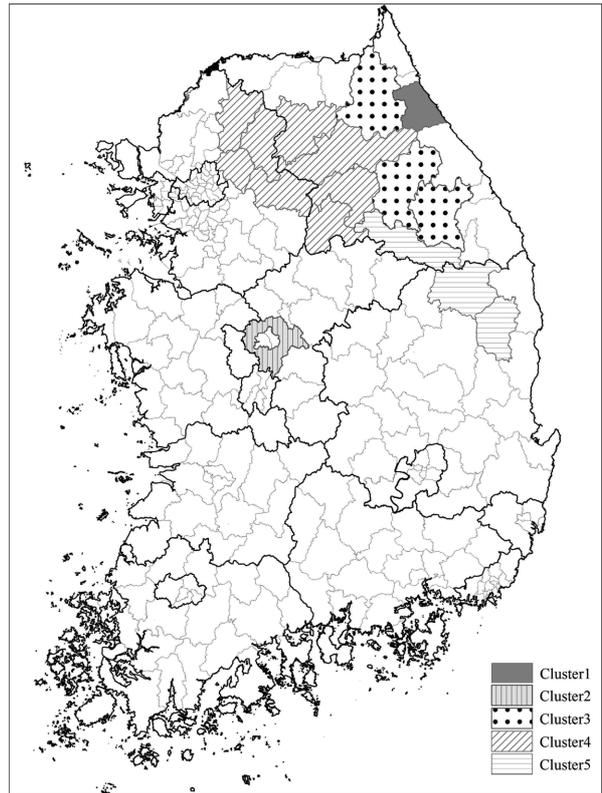


Figure 1. Spatial distribution of *Pinus koraiensis* based on climate cluster analysis.

인 차이를 보이고 있는데, 이는 지리적 그리고 지형적 조건에 의한 기후조건 차이로 해석할 수 있다. 잣나무 연륜생장이 측정된 시군별 기후 군집분석을 통해 분류된 5개의 군집은 군집별 기후특성을 잘 반영하는 것으로 확인되었다.

2. 생장도일과 온도효과지수의 산출 결과

1) 연도별 생장도일의 산출

잣나무는 침엽수 중에서 우리나라를 대표하는 한랭수종으로 알려져 있는데, Yim(1977)의 보고에 의하면 온량지수에 근거한 잣나무의 전체 생육범위와 최적 생육범위는 비교적 넓은 편이다(Table 1). 잣나무 5개 군집에 대한 생장도일을 1951년부터 2010년까지 60년 동안 연도별로 산출한 결과, 각 군집의 지리적 위치에 따라 연도별

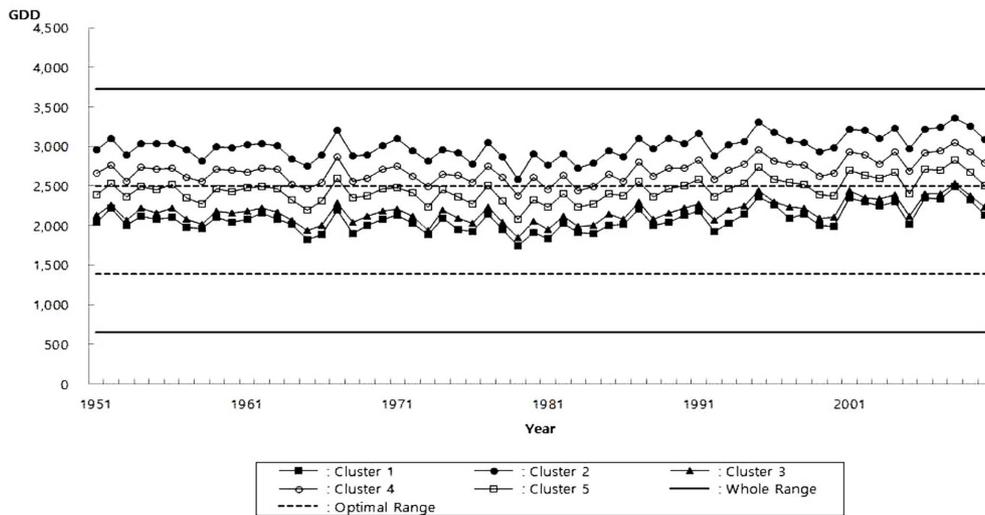


Figure 2. Changes of yearly growing degree days by cluster of *Pinus koraiensis*.

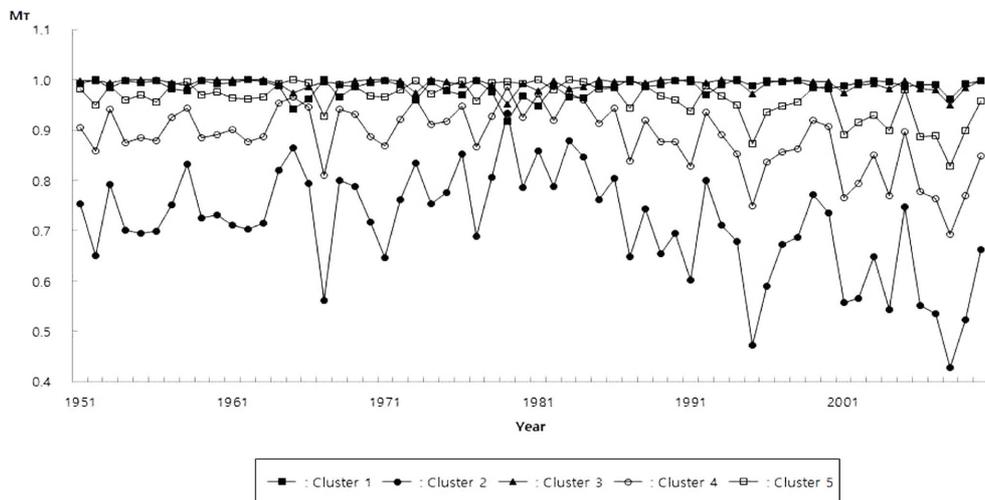


Figure 3. Changes of yearly temperature effect index by cluster of *Pinus koraiensis*.

생장도일의 변화는 일정한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 조사 기간 동안인 1951년부터 2010년까지 각 군집의 연도별 성장도일은 잣나무의 생육범위를 벗어나지 않는 것으로 파악되었다. 특히 위도와 해발고도가 상대적으로 높은 군집 1, 3, 그리고 5의 연도별 성장도일은 해당 기간 동안 지속적으로 최적 생육범위에 포함되는 것으로 나타났다. 반면에 해발고도와 위도가 상대적으로 낮은 중부내륙 권역인 군집 2와 중북부 권역인 군집 4의 성장도일은 전체 생육범위 내에는 포함되지만 최적 생육범위를 벗어나는 것으로 분석되었다(Figure 2). 이러한 추세를 감안하면 앞으로 시간이 경과하면서 일부 군집의 성장도일은 잣나무의 생육범위를 벗어날 것으로 예상된다.

2) 연도별 온도효과지수의 추정

Figure 3은 잣나무의 군집별 연도별 온도효과지수의 변

화를 비교한 결과이다. 군집 간의 연도별 온도효과지수는 다소 차이를 보이고 있지만, 전체적으로 시간이 경과하면서 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 잣나무의 5개 군집 중에서 해발고도와 위도가 상대적으로 높은 강원북부 해안권역인 군집 1과 강원산악 권역인 군집 3의 온도효과지수는 1951년부터 2010년까지 60년 동안 거의 차이가 없는 것으로 분석되었다. 하지만 나머지 3개 권역은 시간이 경과하면서 연도별 온도효과지수가 감소한 것으로 나타났다. 기후변화에 의한 기온 상승으로 인해 연도별 GDD가 증가했기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 모든 지역의 GDD가 상승하였지만 해발고도가 높은 강원 지역의 경우에는 잣나무의 최적 생육범위에 포함되어 있다. 따라서 이 지역은 시간이 경과하여도 온도효과지수의 차이가 없거나 상대적으로 작은 폭의 감소를 나타낸 것이다. 하지만 해발고도가 낮은 군집 2와 군집 4는 온도효과지수의 감소폭이 상대적으로 큰 것으로 분석되었다.

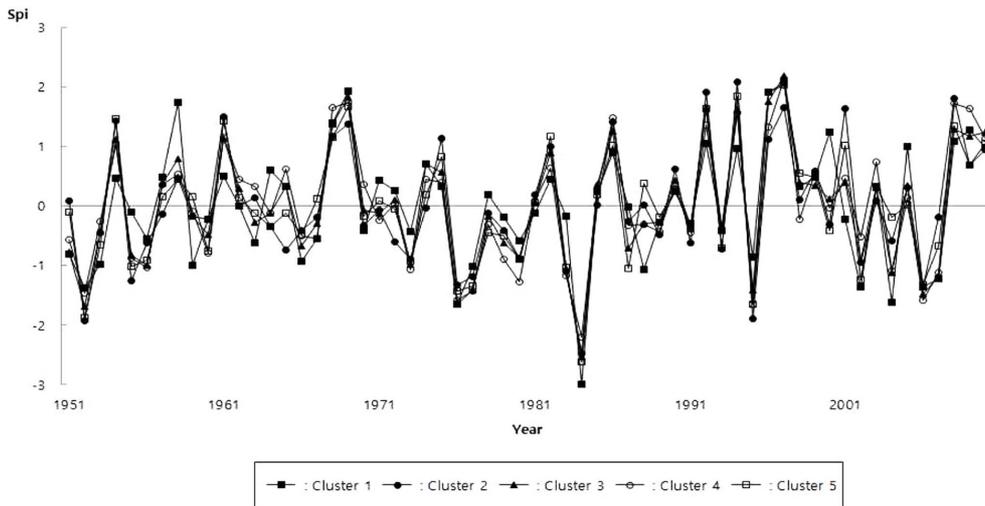


Figure 4. Changes of standard precipitation index by cluster of *Pinus koraiensis*.

연도별로 온도효과지수의 변이와 차이는 있지만 지난 60년 동안에는 모든 잣나무 군집이 적합한 생육 조건을 유지하고 있는 것으로 평가되었다. 그러나 기후변화로 인한 기온 상승이 지속될 경우 군집 간에 정도의 차이는 있지만 생육에 필요한 온도조건이 악화되어 생장이 감소할 가능성이 높은 것으로 예상된다. 캐나다의 경우 기후변화가 산림의 수종분포에 미치는 영향을 분석한 결과 기온상승으로 인해 침엽수종은 쇠퇴하고 온대성 활엽수종이 그 자리를 대체할 것으로 예상하였다(Boureqe and Hassan, 2008). 이러한 사실을 감안하면 우리나라의 잣나무 분포는 기후변화로 인해 감소하고 생장도 둔화될 가능성이 높다.

3. 표준강수지수와 강수효과지수의 산출 결과

1) 연도별 표준강수지수의 산출

잣나무 분포지역의 수분조건을 평가하기 위해 각 군집의 연도별 표준강수지수를 산출한 결과(Figure 4), 동일한 연도에서는 잣나무 5개 군집 간의 표준강수지수의 변이가 매우 작지만 연도별 변이는 매우 큰 것으로 확인되었다. 이는 기온과는 달리 강수량은 연도별 변이가 심한 기후조건임을 확인할 수 있는 결과이다. 시간 경과에 따른 잣나무 5개 군집에 대한 1951년부터 2010년까지의 표준강수지수 변화를 보면, 모든 군집에서 전반부보다는 후반부의 평균 표준강수지수가 다소 상승하여 수분 조건이 개선된 것으로 분석되었다. 하지만 후반부 표준강수지수의 연도별 변이는 오히려 더 증가한 것으로 확인되어, 특정한 연도의 수분 조건은 잣나무 생장에 지장을 줄 정도로 악화될 것을 알 수 있다.

2) 연도별 강수효과지수의 추정

표준강수지수에 근거하여 추정한 잣나무의 군집별 강수효과지수의 변화를 연도별로 비교한 결과는 Figure 5와

같다. 잣나무의 군집별 강수효과지수의 변이는 연도별로 차이가 크지만 동일한 연도의 군집 간에는 변이가 크지 않은 것으로 분석되었다. 잣나무 생장목편이 측정된 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 군집별 강수효과지수의 변이를 파악하기 위해 전반부와 후반부로 각각 30년씩 구분하여 분석한 결과, 후반부의 강수효과지수 평균치가 전반부에 비해 모든 군집에서 더 높은 것으로 파악되었다. 이는 잣나무 분포지역에 대한 최근 30년 동안의 수분조건이 이전에 비해 개선된 것을 의미하는 결과이다. 이러한 현상은 중부내륙 권역인 군집 2에서 가장 두드러지게 나타났다. 잣나무 군집 2의 경우 전반부에는 평균 강수효과지수가 가장 낮은 0.439이었지만, 후반부에는 0.549로 가장 큰 평균치를 보여 큰 폭으로 수분 조건이 개선된 것을 확인할 수 있다. 한편 전체 기간 동안의 통계량을 보면 군집 간의 강수효과지수는 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

4. 군집별 연륜생장 추정식의 개발

Table 4는 식 3의 연륜생장 추정모형에 의해 개발한 잣나무의 군집별 연륜생장 추정식을 정리한 결과이다. 연륜생장 추정식의 설명력인 결정계수를 보면 군집별로 0.29~0.51로 다소 차이를 보이고 있다. 군집별 모형의 설명력이 그다지 높지 않은데, 이 모형으로부터 설명되지 못한 나머지 부분은 식 3에 적용된 기후인자인 온도 및 강수량 이외에 연륜생장에 미치는 광조건, 토양 질소, 대기 중의 이산화탄소 농도 등의 기후요인과 기타 오차로 간주된다. 결과적으로 군집별 추정식의 결정계수는 다소 낮지만 본 연구에서 고려하지 못한 연륜생장에 미치는 다른 요인을 감안하면 큰 무리가 없는 추정식으로 평가된다.

5. 기후변화 시나리오에 의한 연륜생장 변화의 비교

기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 근거하여 연

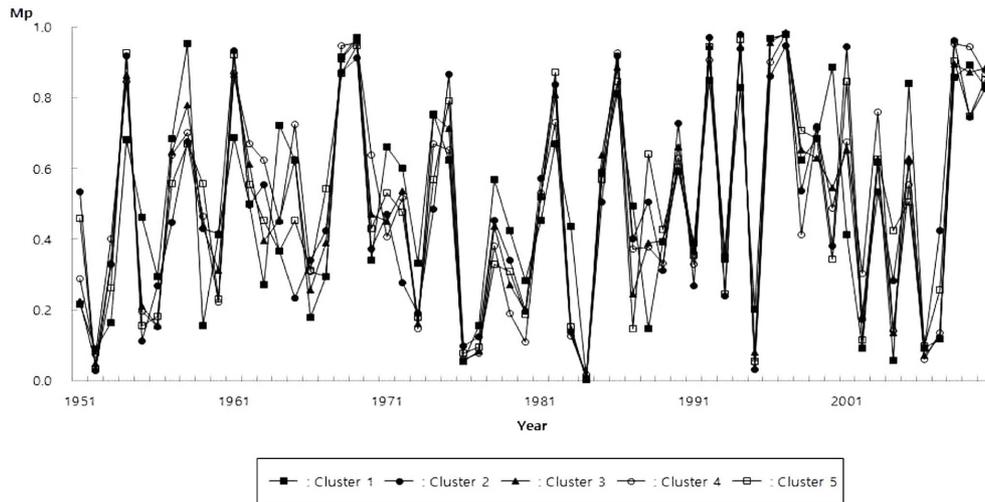


Figure 5. Changes of yearly precipitation effect index by cluster of *Pinus koraiensis*.

Table 4. Results of final tree-ring growth estimation equations by cluster of *Pinus koraiensis*.

Cluster	Regression Coefficients		r ²
	b ₀	b ₁	
1	0.9160	0.2259	0.29
2	0.8677	0.2408	0.44
3	0.9494	0.1453	0.51
4	0.8911	0.1711	0.31
5	0.9427	0.1500	0.41

도별 온도효과지수와 강수효과지수를 추정한 후, 앞에서 개발한 잣나무의 군집별 연륜생장 추정식에 적용함으로써 기후변화에 따른 잣나무의 연륜생장 변화를 예측하였다. Table 5는 잣나무 5개 군집을 대상으로 최근 30년 동안의 평균 연륜생장지수 추정치와 기후변화 시나리오를 적용하여 추정된 2011년부터 2100년까지의 연륜생장지수를 30년 간격의 기간별 평균으로 비교한 결과이다.

잣나무 5개 군집의 최근 30년 동안의 연륜생장은 군집별로 다소 차이가 있지만 비교적 양호한 것으로 평가되었다. 이는 잣나무의 경우 생장도일에 근거한 생육범위가 넓고, 지난 30년 동안의 강수조건이 이전에 비해 개선되어 잣나무 생장에 유리한 기후조건이 형성된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 특히 잣나무 5개 군집에 포함된 시군은 16개에 불과하며 지리적으로 중북부 이상의 지역에 편중되어 있다. 군집별 연륜생장지수 평균치를 보면 강원북부 해안권역의 군집 1, 강원산악 권역의 군집 3, 그리고 강원남부 산악권역의 군집 5는 위도 및 해발고도가 상대적으로 높은 강원지역에 분포해 모두 연륜생장지수가 1 이상으로 양호한 성장조건을 갖는 것으로 분석되었다. 반면에 충청북도 청원군의 군집 2는 평균 연륜생장지수가 0.9494로 가장 낮고, 8개 시군으로 구성된 중북부 권역의 군집 4가 그 다음으로 낮은 0.9642로 추정되었다.

이러한 특성은 기후변화 시나리오를 적용하여 2100년까지 연도별로 예측한 연륜생장지수 추정치에서도 나타

Table 5. Comparison of periodic tree-ring growth index estimates by cluster of *Pinus koraiensis* based on climate change scenarios.

Cluster	1981~2010	Climate Change Scenario	Estimates of mean tree-ring growth index		
			2011~2040	2041~2070	2071~2100
1	1.0488	4.5	1.0081	0.9806	0.9878
		8.5	0.9919	0.9703	0.8701
2	0.9494	4.5	0.9254	0.8933	0.8735
		8.5	0.9050	0.8626	0.7170
3	1.0170	4.5	1.0177	1.0061	1.0263
		8.5	1.0071	1.0100	0.9875
4	0.9642	4.5	0.9527	0.9357	0.9406
		8.5	0.9453	0.9269	0.8612
5	1.0149	4.5	1.0042	0.9918	0.9967
		8.5	0.9909	0.9843	0.9368

났다. 상대적으로 기후변화의 강도가 낮은 RCP 4.5를 적용하였을 경우 군집 2를 제외한 나머지 군집에서는 기간별로 연륜성장지수의 변화가 거의 없는 것으로 분석되었다. 군집 2의 경우에도 2011년~2040년에는 현재보다 2.4%의 감소가 예상되며, 2041년~2070년에는 5.6%, 그리고 2071년~2100년에는 약 7.6% 정도 감소하는 것으로 예측되어 비교적 작은 변화가 있을 것으로 분석되었다. 반면에 기후변화의 강도가 높은 RCP 8.5를 적용하면 대부분의 군집에서 큰 폭의 성장감소가 예상되는데, 특히 마지막 기간인 2071년~2100년의 연륜성장 감소가 이전 기간보다 훨씬 클 것으로 예상되었다. 강원산악 권역인 군집 3을 제외하면 현재보다 군집별로 8~23% 정도의 연륜성장 감소가 있을 것으로 예측되었다. 하지만 군집 3은 RCP 8.5를 적용해도 3% 정도의 성장감소에 그치는 것으로 평가되었다. 기후변화 시나리오에 의하면 시간이 경과할수록 기온은 지속적으로 상승하지만 강수량은 연도별 변이가 심한 것으로 분석되어(National Institute of Forest Science, 2015) 이들의 상호작용에 의한 효과가 연도별 연륜생장의 변화에 반영된 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 잣나무 분포지역을 대상으로 기후인자에 의한 군집별 연륜성장 추정식을 개발하고, 이를 통해 기후변화 시나리오에 적용함으로써 기후변화에 따른 군집별 연륜생장의 변화를 추정하였다. 본 연구를 통해 연륜생장에 미치는 기후변화의 영향은 몇 가지 특징적인 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 먼저 기후변화 시나리오를 적용하여 시간 경과에 따른 연륜생장의 변화를 예측한 결과 시간이 지날수록 연륜생장이 감소하는 것으로 분석되었다. 특히 기후변화의 강도가 낮은 RCP 4.5보다는 RCP 8.5를 적용할 경우 시간 경과에 따른 연륜생장의 감소 정도가 큰 것으로 나타났다. 하지만 예측기간의 중반인 2050년~2060년까지는 두 시나리오 간에 군집별 잣나무의 연륜성장지수는 차이가 거의 없는 것으로 예측되었다. 이 기간 이후에는 시나리오별로 차이를 보이는데, RCP 4.5의 경우에는 연도별로 큰 편차가 없이 연륜생장이 완만하게 감소하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 하지만 RCP 8.5를 적용할 경우 2060년 이후에는 연도별로 큰 폭의 등락을 보이면서 연륜생장의 감소폭도 매우 큰 것으로 나타났다.

이러한 경향은 각 군집의 해발고도와 위도의 차이가 심할 경우에는 군집별로 기후변화의 영향이 다르게 나타난 것을 확인할 수 있다. 남부지역이나 해발고도가 낮은 군집에서는 기후변화로 인한 연륜생장의 감소가 큰 것으로 분석되었다. 반면에 강원지역에 속하는 군집이나 위도 높

은 군집, 그리고 중남부 지역이지만 백두대간에 포함되어 해발고도가 높은 군집의 경우에는 기후변화로 인한 성장 감소가 적은 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 기후변화 시나리오의 특성과 연관이 있다. 기후변화 시나리오별로 정도의 차이는 있지만 기온은 시간이 지날수록 지속적으로 상승하지만, 강수량은 연도별 변이가 커서 온도에 비해 특징적인 경향을 보이지 않는다. 평균기온이 상대적으로 낮은 산악지역이나 위도가 높은 지역은 기후변화에 의해 기온이 상승하여도 성장도일의 관점에서 생육범위를 크게 벗어나지 않기 때문에 연륜성장 감소가 적은 것으로 추정되었다.

감사의 글

본 논문은 2015년 국립산림과학원 기후변화센터 위탁 연구과제 '연륜해석에 의한 주요 수종의 성장과 기후와의 관계 조사' 연구 결과의 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Albert, M. and Schmidt, M. 2010. Climate-sensitive modeling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management* 259: 739-749.
- Bergès, L., Chevalier, R., Dumas, Y., Franc, A., and Gilbert, J.M. 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Annals of Forest Science* 62: 91-402.
- Bourque, C.P.A. and Hassan, Q.A. 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.
- Botkin, D.B., Janak, J.F., and Wallis, J.R. 1972. Some consequence of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology* 60: 849-873.
- Choi, J.N., Yu, K.B., and Park, W.K. 1992. Paleoclimate reconstruction for Chungbu Mountainous Region using tree-ring chronology. *The Korean Journal of Quaternary Research* 6(1): 21-32.
- Colorado Climate Center. 2004. Colorado Climate Center Web Page. <http://ulysses.atomos.colostate.edu/standardized-precipitation.php>
- Hassan, Q.K. and Bourque, C.P.A. 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.
- Hayes, M., Wilhite, D., Svoboda, M., and Vanyarkho, O. 1999.

- Monitoring the 1996 drought using the standard precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(3): 429-438.
- Kim, C.R. 2011. SAS Data Analysis. 21th Century Book Co. pp. 663. (in Korean)
- Kira, T. 1945. A new classification of climate in eastern Asia as the basis for agricultural geography. Horticultural Institute, Kyoto University, Kyoto.
- Kira, T. 1976. *Terrestrial Ecosystem: A General Survey*. Kyoritsu Publication. Tokyo, Japan. pp. 166.
- Korea Forest Service. 2005. A study on the reformation of national forest inventory system by the changes of domestic and international conditions(IV). pp 290. (in Korean)
- Korea Forest Service. 2012. Tree-ring DB Construction. pp. 299. (in Korean)
- Larsen, C.P.R. 1963. Stem form development of forest trees. *Forest Science Monographs* pp. 42.
- 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. pp. 145.
- Lloyd-Hughes, B. and Saunders, M.A. 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22(13): 1571-1592.
- Mckee T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceeding of the Ninth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society: Boston; 179-184.
- Nakawatase, J.M. and Peterson, D.L. 2006. Spatial variability in forest growth-climate relationships in the Olympic Mountains, Washington. *Canadian Journal of Forest Research* 36(1): 77-91.
- National Institute of Forest Science. 2014. Analyzing relationships between annual ring growth of main forest tree species and climatic factors. pp. 125. (In Korean)
- National Institute of Forest Science. 2015. Relationships between growth of main tree species and climatic factors based on tree-ring analysis. pp. 165. (in Korean)
- Park, W.K., Seo, J.W., Liu, Y., Kim, Y.J. and Han, S.W. 2001. Reconstruction of April–August precipitation in Mt. Sorak region from tree rings. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 15(1): 47-52. (in Korean with English abstract)
- Sander D. H. 1971. Soil properties and siberian elm tree growth in Nebraska wind-break. *Soil Science*. 112(5): 357-363.
- Seo, J.W. and Park, W.K. 2002. Reconstruction of May precipitation (317 years: AD 1682-1998) using tree rings of *Pinus densiflora* S. et. Z. in western Sorak Mt. *The Korean Journal of Quaternary Research* 16(1): 29-36.
- Son, B.H., Kim, J.H., Nam, T.K., Lee, K.H., and Park, W.K. 2011. Species identification and tree-ring analysis of wood elements in Daesungjeon of Jipyeong Hyanggyo, Yangpyeong, Korea. *Mokchae Konghak* 39(3): 213-220.
- Speer, J.H. 2010. *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. pp. 368.
- Szalai, S. and Szinell, C. 2000. Comparison of two drought indices for drought monitoring in Hungary – a case study. In *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Vogt JV, Spmma F (eds). Kluwer: Dordrech. pp. 161-166.
- Thom, H.C.S. 1966. *Some methods of climatological analyses*. World Meteorological Organization, Geneva, pp. 53.
- Woodward, F.I. 1987. *Climate and Plant Distribution*. Cambridge University Press. Cambridge, England. pp. 174.
- Woodward, F.I. and Rochefort, L. 1991. Sensitivity analysis of vegetation diversity to environmental change. *Global Ecology and Biogeography Letters* 1: 7-23.
- Wu, H., Hayes, M, Wilhite, D.A., and Svoboda, M.D. 2005. The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Climatology* 25: 505-520.
- 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.