

국가산림자원조사 자료를 활용한 소나무 연륜생장과 기후인자와의 관계분석

임종환¹ · 박고은¹ · 문나현² · 문가현² · 신만용^{2*}

¹국립산림과학원 기후변화센터, ²국민대학교 산림환경시스템학과

Analysing the Relationship Between Tree-Ring Growth of *Pinus densiflora* and Climatic Factors Based on National Forest Inventory Data

Jong-Hwan Lim¹, Go Eun Park¹, Na Hyun Moon²,
Ga Hyun Moon² and Man Yong Shin^{2*}

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

²Department of Forest, Environment, and System, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

요약: 본 연구는 국가산림자원조사에 의해 수집한 소나무의 연륜생장 목편자료에 근거하여 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하기 위해 수행되었다. 먼저 소나무의 연도별 성장패턴을 분석하기 위해 제5차 국가산림자원조사에서 수집된 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 연륜생장 자료를 정리하였다. 또한 소나무가 분포하는 시군을 대상으로 일별 평균기온과 강수량의 기상정보에 근거하여 연도별 성장도일과 표준강수지수를 산출하였다. 이 정보를 이용하여 기후조건이 소나무의 연륜생장에 미치는 영향을 분석하기 위해 연도별 온도효과지수와 강수효과지수를 추정하였으며, 이들 변수를 독립변수로 하는 소나무의 연륜생장 추정식을 개발하였다. 마지막으로 이 추정식을 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 적용함으로써 기후변화가 소나무의 연륜생장에 미치는 영향을 예측하였다. 기후변화 시나리오를 적용하여 2011년부터 2100년까지 90년 동안의 연륜생장 변화를 예측한 결과 시간이 경과하면서 연륜생장이 감소하는 것으로 분석되었다. RCP 4.5 시나리오를 적용하면 상대적으로 성장감소가 적은 반면, RCP 8.5를 적용하면 2050년 이후에는 큰 폭으로 연륜생장이 감소하는 것으로 예측되었다. 본 연구에서 얻어진 결과는 소나무의 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 relationship between tree-ring growth of *Pinus densiflora* and climate factors based on national forest inventory(NFI) data. Annual tree-ring growth data of *P. densiflora* collected by the 5th NFI were first organized to analyze yearly growth patterns of the species. Yearly growing degree days and standard precipitation index based on daily mean temperature and precipitation data from 1951 to 2010 were calculated. Using the information, yearly temperature effect index(TEI) and precipitation effect index(PEI) were estimated to analyze the effect of climate conditions on the tree-ring growth of the species. A tree-ring growth estimation equation appropriate for *P. densiflora* was then developed by using the TEI and PEI as independent variables. The tree-ring growth estimation equation was finally applied to the climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5 for predicting the changes in tree-ring growth of *P. densiflora* from 2011 to 2100. The results indicate that tree-ring growth of *P. densiflora* is predicted to be decreased over time when the tree-ring growth estimation equation is applied to the climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5. It is predicted that the decrease of tree-ring growth over time is relatively small when RCP 4.5 is applied. On the other hand, the steep decrease of tree-ring growth was found in the application of RCP 8.5, especially after the year of 2050. The results of this study are expected to provide valuable information necessary for estimating local growth characteristics of *P. densiflora* and for predicting changes in tree-ring growth patterns caused by climates change.

Key words: tree-ring growth estimation equation, growth degree days, standard precipitation index, temperature effect index, precipitation effect index, climate change scenario

* Corresponding author

E-mail: yong@kookmin.ac.kr

서론

임목의 생장과 분포범위는 다양한 기후적 그리고 비기후적 인자들이 영향을 미친다. 임목생장에 영향을 미치는 기후인자 중에서 가장 중요한 것은 기온과 강수량으로 알려져 있다(Sander, 1971; Kira, 1976; Woodward and Rochefort, 1991). 기온 및 강수량과 같은 기후인자가 임목생장에 미치는 영향을 구명하는 것은 임목과 환경요인 사이의 상호관계를 이해하는데 필수적인 과정이다. 특히 기후변화를 포함한 환경변화가 산림생태계에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 산림생태계의 주요 구성요소인 임목생장과 기후인자 간의 연관성에 대한 이해가 필요하다.

임목의 연륜생장은 생장기의 기후 및 환경변화와 밀접한 관련을 가지므로 기후변화에 대한 정확한 정보를 제공한다(Choi et al., 1992). 그동안 연륜생장과 기후와의 관계를 구명하기 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다. 특히 연륜연대학 분야에서는 고기후 복원과 고대 유물을 대상으로 한 연구가 주로 수행되어 왔다(Seo and Park, 2002; Son et al., 2011). 최근 들어 기후변화가 임목생장에 미치는 영향과 그에 따른 변화를 구명하기 위하여 다양한 수종과 광범위한 지역을 대상으로 하는 연구들이 진행되었지만, 연륜생장과 기후인자 간의 관계를 분석하는 연구는 양적으로나 질적으로 부족한 실정이다. 연륜기후학적 기법을 적용하여 우리나라에서 수행된 연륜생장과 기후인자와의 관계분석 연구는 특정 지역에서 측정된 소규모 자료에 근거한 결과로 기후변화와 연륜생장의 관계를 명확히 규명하는데 한계가 있었던 것이 사실이다.

지난 2006년에 시작된 제5차 국가산림자원조사에서는 계통적추출법에 의해 전국을 4 km 격자로 구분한 후, 각 격자의 교차점에 표본점을 설치하여 다양한 항목의 임목조사를 실시하여 왔는데(Korea Forest Service, 2005) 이 항목 중에는 연륜생장 자료가 포함되어 있다. 이 자료는 수종별 그리고 입지조건별로 전국 규모의 연륜생장 정보를 제공하기 때문에 연륜기후학적 방법을 적용하면 기후변화가 우리나라에 분포하는 주요 수종의 연륜생장에 미치는 영향을 평가하는 것이 가능하다. 소나무는 우리나라를 대표하는 수종으로, 산림자원으로서의 비중과 가치, 활용도가 매우 높아 특별히 관리되고 있는 수종이다. 소나무는 우리나라 산림에서 차지하는 비중이 매우 높지만, 기후변화가 진행됨에 따라 생육분포 범위가 북쪽으로 이동하거나 고산지대로 축소될 것으로 예측되기도 하고 지구온난화의 영향으로 피해를 입을 가능성이 높은 것으로 예측된다(National Institute of Forest Science, 2015). 따라서 기후변화로 인한 산림의 피해를 최소화하기 위해서는 대책 마련이 필요한데, 이를 위해서는 소나

무에 대한 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하는 작업이 선행되어야 한다. 이와 함께 기후-연륜생장 관계식을 개발한 후 기후변화 시나리오에 적용하여 기후변화가 소나무의 연륜생장에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

본 연구는 소나무를 대상으로 기후인자가 연륜생장에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행되었다. 이를 위해 제5차 국가산림자원조사를 통해 수집한 소나무의 목편생장 자료에 연륜기후학적 기법을 적용하여 크로스데이팅, 표준화, 기초통계량 산출, 그리고 연륜연대기를 작성하였다. 이와 같이 작성된 수종별 연륜연대기에 근거하여 기후인자에 의해 연륜생장을 추정할 수 있는 회귀식을 개발하고, 이 연륜생장 추정식을 기후변화 시나리오에 적용함으로써 시간 경과에 따른 소나무의 연륜생장 변화를 예측하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 기후변화에 따른 소나무의 증장기 생장변화 예측에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

재료 및 방법

1. 연구 자료

본 연구는 소나무의 연륜생장과 기후인자와의 관계를 분석하기 위해 제5차 국가산림자원조사에서 전국 단위로 수집한 소나무의 연륜생장 자료(Korea Forest Service, 2012)와 기상청에서 래스터 형태로 제공하는 1951년부터 2010년까지의 시군별 일 단위 기상정보를 사용하였다. 또한 증장기 연륜생장의 변화를 예측하기 위해 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 따른 2011년부터 2100년까지의 일 단위 기상자료를 이용하였다.

2. 연구 방법

1) 자료의 정리

연륜생장과 기후인자와의 관계 분석을 위해 사용된 기후변수는 일평균기온과 일강수량이다. 기상청에서 제공하는 래스터 형태의 기상자료에 근거하여 연륜이 생성된 1951년부터 2010년까지 총 60년 동안의 기온 및 강수량 자료를 월단위로 변환하여 정리하였다. 이를 위해 연륜목편이 채취된 지역을 시군 단위로 분류한 후, GIS프로그램 ArcGIS 10.1과 통계프로그램 R 3.0.1을 사용하여 해당 시군의 월평균기온과 월강수량을 산출하였다.

한편 소나무가 분포하고 있는 시군을 대상으로 연륜생장 자료를 정리하였다. 국가산림자원조사에서는 표본점별로 10분 내외의 표준목을 선정하여 연륜생장 목편을 채취하였는데, 본 연구에서는 통계적 효율성을 고려하여 30분 이상의 소나무 연륜생장 목편이 채취된 시군을 소나무 분포지역으로 간주하여 연륜생장 자료를 정리하였

으며, 대상 시군은 117개인데 인천광역시와 제주특별자치도를 제외한 모든 시도에 골고루 분포하는 것으로 분석되었다.

2) 연륜연대기 작성

목편 성장자료에 근거하여 연도별 연륜생장량을 파악하기 위해서는 크로스데이팅과 표준화 절차를 거쳐야 한다. 먼저 크로스데이팅은 연륜이 생성된 정확한 연도를 부여하는 절차로(Fritts and Swetnam, 1989), 이를 위해 본 연구에서는 그래프법(Holmes, 1983)을 사용하였다. 다음 단계는 표준화를 통해 수령에 따른 생물학적 추세와 경쟁과 교란에 의한 연륜 폭의 변동추세, 그리고 유전적 차이에서 나타나는 비기후인자를 제거하였다(Fritts, 1976). 목편 성장자료의 표준화를 위해 이중표준화법(Choi et al., 1992)을 적용하였는데 1차적으로 음지수곡선에 의해 수령에 따른 생물학적 성장추세를 제거하였으며, 다음 단계에서 Spline 곡선을 이용하여 임분 경쟁과 교란에 따른 변동추세를 재표준화하였다(Cook and Peter, 1981; Blasing et al., 1983).

한편 지표연대기는 각 임목에서 채취한 목편을 대상으로 각 연륜이 생성된 연도와 표준화지수를 정리한 것을 말한다. 이 과정에서 지표연대기의 정규성 검정, 정도, 그리고 유효성을 평가하기 위해 기초통계량을 산출함으로써 연륜연대기 작성 가능성을 평가하였다. 또한 지표연대기를 통합하여 연륜이 생성된 연도별 평균 표준화지수를 정리한 것이 연륜연대기이다(National Institute of Forest Science, 2015). 표준화지수인 연륜생장지수는 실측 연륜생장량과 표준화곡선에 의해 예측된 성장량의 비를 말하며, 1을 기준으로 성장에 필요한 기후조건 양부를 나타내는 지표이다. 본 연구에서는 소나무 연륜생장 자료가 수집된 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 연도별 연륜생장지수인 연륜연대기를 작성하였다.

3) 기후인자와 연륜생장과와의 관계 분석

(1) 기온과 연륜생장과와의 관계

성장도일은 지역별 기온조건에 근거하여 식물의 분포범위 및 생육단계를 예측할 수 있도록 고안된 지수로 식 1에 의해 산출한다.

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

여기서, T_i = 해당 연도의 i 번째 날의 일평균기온, T_b = 성장임계온도이다. 본 연구의 경우 산림 수종을 대상으로 하기 때문에 성장임계온도를 5°C 로 적용하였다.

Yim(1977)은 온량지수(warm index)를 이용하여 우리나라

에 분포하는 50개 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. 따라서 Lim(1998)은 우리나라의 87개 기후 관측소 자료에 근거하여 온량지수와 성장도일은 $GDD = 30.838 WI$ 의 선형적 관계에 있음을 밝힌바 있다. 본 연구에서는 Yim(1977)의 수종별 온량지수와 Lim(1998)이 제시한 온량지수와 성장도일의 관계식에 근거하여 소나무의 전체 생육 가능 범위와 최적 생육범위를 산출하여 적용하였다. 성장도일에 근거한 소나무의 전체 생육범위는 $925.1 \sim 3,762.2$ 이며, 최적 생육범위는 $1,850.3 \sim 2,929.6$ 인 것으로 알려져 있다. 이 범위는 다른 침엽수종인 일본잎갈나무에 비해서는 다소 넓지만, 한랭수종인 잣나무보다는 생육범위가 상대적으로 좁은 것이다(National Institute of Forest Science, 2016).

한편 임목생장에 영향을 미치는 온도의 효과는 아래의 식 2와 같은 성장도일의 포물선 함수에 의해 결정된다(Botkin et al., 1972). 본 연구에서는 이 식에 의해 산출된 값을 온도조건에 근거한 성장능력을 나타내는 온도효과지수(M_T)라고 명명하였으며 그 값은 0에서 1의 범위에 있는데, 이 값이 1에 가까울수록 성장에 최적의 온도조건을 갖는 것이다.

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

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

(2) 강수량과 연륜생장과와의 관계

표준강수지수(Standard Precipitation Index: SPI)는 가뭄을 정의하고 모니터링할 목적으로 개발된 새로운 개념의 가뭄지수이다(McKee et al., 1993). 또한 표준강수지수는 특정 지역의 강수량은 감마 누적확률분포에 의해 잘 설명된다는 사실에 근거하여 개발된 가뭄지수의 일종이다(Thom, 1966). 많은 연구를 통해 SPI는 이전에 개발된 다른 가뭄지수와 비교하여 개선된 추정능력을 보이는 것으로 보고되었다(Lloyd-Hughes and Saunders, 2002; Colorado Climate Center, 2004).

표준강수지수는 감마 누적확률분포를 표준정규분포로 변환한 것으로 -3에서 3까지의 범위에서 값을 갖는다. 따라서 표준강수지수에 의해 표현되는 수분조건은 Table 1과 같이 분류할 수 있다(McKee et al., 1993). 표준강수지

Table 1. 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		

수의 값이 -3에 가까울수록 해당 기간의 다른 연도와 비교하여 상대적으로 가뭄의 정도가 심한 것을 의미하며, 반대로 3에 가까이 갈수록 다른 연도에 비해 수분조건이 양호한 것을 말한다.

본 연구에서는 소나무의 목편성장 자료가 수집되어 있는 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 연도별 표준강수지수를 산출하기 위해 미국 콜로라도 기후센터(Colorado Climate Center)에서 개발한 SPI 분석 프로그램을 이용하였다. 연도별 표준강수지수는 임목생장에 영향을 미치는 수분 조건인 전년도 9월부터 당년도 5월까지의 9개월 동안의 강수량을 기준으로 산출하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 표준강수지수는 -3에서 3까지의 값을 갖는 표준화된 지수이다. 표준강수지수의 값이 클수록 수분 조건이 좋기 때문에 본 연구에서는 이 지수의 누적확률을 기준으로 강수효과지수(M_P)를 산출하여 수분조건이 연륜생장에 미치는 영향을 평가하였다(Wu et al., 2005).

4) 수종별 연륜성장 추정식의 개발

기후인자에 의해 임목의 연륜생장을 추정하는 방법은 온도 및 수분조건 등과 같은 기후인자의 상호작용에 의하여 생장을 표현하는 독립변수의 곱하기 원칙이 사용된다(Hassan and Bourque, 2009). 이는 생장에 영향을 미치는 요소들의 곱을 독립변수로 사용하여 연륜성장량을 추정하는 방법으로, 본 연구에서는 연륜생장에 영향을 미치는 기후인자의 조합을 독립변수로 하는 추정모델을 사용하였다. 즉, 온도와 강수량을 기반으로 하는 온도효과지수(M_T)와 강수효과지수(M_P)를 이용하여 이들 기후요인의 곱($M_T \times M_P$)과 기후변수 곱의 제곱을 포함한 이들 변수의 조합을 통해 최적의 연륜성장 추정식을 개발하였다. 결과적으로 소나무 연륜성장 추정식을 개발하기 위해 Table 2와 같은 총 4개의 모형이 사용되었다. 이 모형에서 GI =연륜성장지수, M_T =온도효과지수, M_P =강수효과지수, 그리고 b_0, b_1, b_2 =추정해야 하는 회귀계수이다.

회귀기법에 의해 추정식을 개발하려면 조사 자료를 회귀모형에 적용하여 회귀추정식을 작성한 후, 독립자료를 사용하여 추정식의 적합성을 평가하는 것이 일반적인 방

Table 2. Model forms used for the tree-ring growth estimation of *Pinus densiflora* in this study.

Model No.	Model Form
1	$GI = b_0 + b_1 (M_T \times M_P)$
2	$GI = b_0 + b_1 M_T + b_2 (M_T \times M_P)$
3	$GI = b_0 + b_1 (M_T \times M_P)^2$
4	$GI = b_0 + b_1 M_T + b_2 (M_T \times M_P)^2$

법이다. 하지만 검증을 위한 독립자료의 수집은 현실적으로 제약이 있기 때문에 본 연구에서는 사용 가능한 자료를 추정자료(fit data)와 검증자료(test data)로 분류하는 방법을 사용하였다(Snee, 1977). 이를 위해 연도별 연륜성장지수 자료 중에서 최근 70% 연도의 자료(1969~2010년)를 추정자료로 그리고 나머지 30%인 이전 연도(1951~1968년)의 연륜성장지수를 검증자료로 사용하였다. 한편 추정자료에 의해 작성된 연륜성장 추정식의 효용성 검증은 3가지 평가통계량에 의해 수행하였다. 본 연구에서 사용한 평가 통계량은 모형의 추정편의(model's estimation bias), 모형의 정도(model's precision), 그리고 측정치에 대한 오차의 평균평방화(mean square error type of measure)인 모형의 표준오차이다(Shin, 1990; Arabatzis and Burkhart, 1992). 한편 검증자료에 의해 이미 작성된 추정식의 적합성이 인정된 경우, 최종적으로 추정식을 조제하기 위해 추정자료와 검증자료를 통합하여 최종 추정식을 도출한다. 본 연구에서는 검증절차에 문제가 없을 경우 연도별로 정리된 추정자료와 검증자료를 합친 통합자료(pooled data)에 근거하여 최종적으로 소나무의 연륜성장 추정식을 개발하였다.

5) 기후변화 시나리오에 의한 연륜성장 변화 예측

기후변화 시나리오에 의한 소나무의 연륜성장 변화를 예측하기 위해 소나무가 분포하는 시군을 대상으로 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 적용하여 2011년부터 2100년까지 90년 동안의 일평균기온과 일강수량 자료를 정리하였다. 이 자료에 근거하여 각 연도의 생장도일과 표준강

수지수를 산출하였으며, 이 정보에 근거하여 각 연도의 온도효과지수와 강수효과지수를 추정하였다. 이 자료를 앞에서 개발한 소나무의 최종 연륜생장 추정식에 적용하여 기후변화 시나리오별 각 연도의 연륜생장량을 추정함으로써 시간 경과에 따른 소나무의 연륜생장 변화를 예측하였다.

결과 및 고찰

1. 소나무 연륜생장 자료의 기초통계량

소나무 연륜자료를 대상으로 크로스데이팅 및 표준화를 실시한 후 산출한 지표연대기 기초통계량은 Table 3과 같다. 실측된 소나무의 연평균 연륜생장량은 2.533 mm이고 분산은 1.333인 것으로 추정되었다. 연속된 두 연륜폭 간의 변이를 나타내는 평균민감도는 0.315인 것으로 분석되었는데, 평균민감도는 연륜계열에서 연속된 두 연륜폭이 나타내는 변이의 크기를 측정하는 통계량이다. 평균민감도의 범위는 0에서 1인데 평균민감도가 0.2 이상일 경우 연륜연대기 연구에 사용하여도 무리가 없는 것으로 알려져 있다(Fritts, 1976; Speer, 2010). 본 연구를 통해 얻은 평균민감도는 0.315로 연륜연대기 작성에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 특히 본 연구의 결과는 소나무를 대상으로 수행된 다른 연구의 결과(Lee et al., 2008)에 비해서도 높은 값이다.

자기상관은 연륜생장의 생물학적 지속성을 나타내는 지표이다. 소나무 연륜의 자기상관을 분석한 결과 0.031로 추정되었는데, 이 결과에 의하면 자기상관은 대부분 제거된 것으로 해석할 수 있다(Box et al., 1994). 또한 임목간 상호상관계수를 이용하여 연대기의 신호와 잡음의 기간별 신호강도를 나타내는 신호 대 잡음비(Briffa and Jones, 1990)의 경우 5.546으로 비교적 높은 값을 나타냈다. 또한 모집단에 대한 지역연대기의 신호강도는 0.875로 모집단에 대한 신호강도를 보여주는데 충분한 신뢰성을 가지고 있는 것으로 평가되었다. 일반적으로 신호강도가 0.85 이상일 경우 지역연대기가 통계적으로 큰 신뢰성을 갖는 것으로 알려져 있다(Wigley et al., 1984; Briffa and Jones, 1990). 따라서 본 연구에서 얻은 기초통계량 추정치에 따르면 소나무 연륜생장 자료는 연륜연대기 분석에 적합한 것으로 판단된다.

2. 연륜연대기 추정

표준화지수인 연륜생장지수는 실측 연륜생장량에 대한 표준화곡선에 의해 예측된 성장량의 비를 말한다. 따라서 연륜생장지수가 1에 가까우면 생장에 영향을 미치는 비기후인자인 수령, 경쟁, 그리고 교란의 영향을 배제하고 기대되는 성장량과 실제 성장량이 거의 같다는 것을 의미한다(Fritts, 1976; Rigling et al., 2001). 수종별 연륜연대기의 연도별 연륜생장지수 분포는 Figure 1과 같다. 소나무의 연륜생장지수는 연도별 변이가 크지 않은 것으로 분석되었는데, 이는 소나무가 분포하는 시군이 117개로 연도별로 측정된 연륜생장 목편의 개수가 많은 것이 영향을 미친 것으로 해석된다. 즉, 분석에 사용된 표본의 개수가 많은 것이 연도별 연륜생장지수의 변이 폭을 감소시킨 것으로 평가된다. 연륜연대기의 분포를 보면 연도별 연륜생장지수는 1을 중심으로 등락을 거듭하고 있는 것으로 알 수 있다.

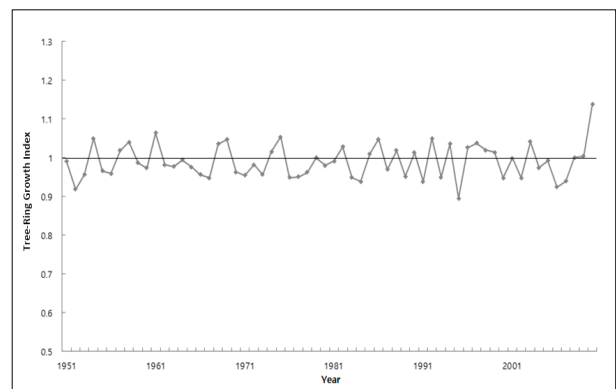


Figure 1. Distribution of tree-ring chronology for *Pinus densiflora*.

소나무 연륜연대기 분포에 나타난 연도별 연륜생장지수의 변이와 등락은 기온 및 강수량을 포함한 임목생장에 영향을 미치는 다양한 기후인자들의 복합적인 작용에 의해 발현된 것이지만, 그 중에서도 강수량의 변이가 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 연륜연대기 분포를 보면 연도별 온도의 변화보다는 강수량의 변이와 유사한 것을 알 수 있다. 강수량은 온도와는 달리 연도별 변이가 심한 기후변수로 연도별로 등락이 심한 변이를 보이는 특성이 연륜연대기 분포와 유사하다. 이는 기후요인 중에서 강수

Table 3. Summary of basic statistics for tree-ring data of *Pinus densiflora*.

No. of tree-ring	Mean of tree-ring width (mm)	Variance of tree-ring width (mm)	Mean sensitivity	Autocorrelation coefficient	Signal to noise ratio	Expressed population signal
8,949	2.533	1.333	0.315	0.031	5.546	0.875

량이 연륜생장에 가장 큰 영향을 주는 기후변수라는 사실과 부합하는 결과이다(Zobel and Van Buijtenen, 1989).

3. 연도별 온도효과지수의 추정

Figure 2는 소나무 분포 시군을 대상으로 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 연도별 온도효과지수 변화를 비교한 것이다. 연도별 온도효과지수는 1960년 초반까지는 큰 차이가 없이 연도별 변이가 작은 편이다. 하지만 그 이후에는 연도별로 등락을 거듭하면서 큰 변이를 보이고 있다. 1980년대 중반까지는 온도효과지수가 0.9 이상인 연도가 많지만, 그 이후에는 큰 폭의 감소와 상승을 반복하고 있어 시기별 온도효과지수는 다른 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 전체적으로 보면 조사 기간인 60년 동안의 연도별 온도효과지수는 모두 0.6 이상으로 추정되었다. 이는 소나무가 분포하는 시군의 온도조건은 생육에 비교적 적합하였다는 것을 나타내는 결과이다. 하지만 연도별 온도효과지수는 시간이 경과하면서 감소하는 추세를 보이고 있어, 기후변화에 따른 지속적인 온도상승을 감안하면 이러한 경향은 앞으로 더욱 뚜렷해질 것으로 예상된다.

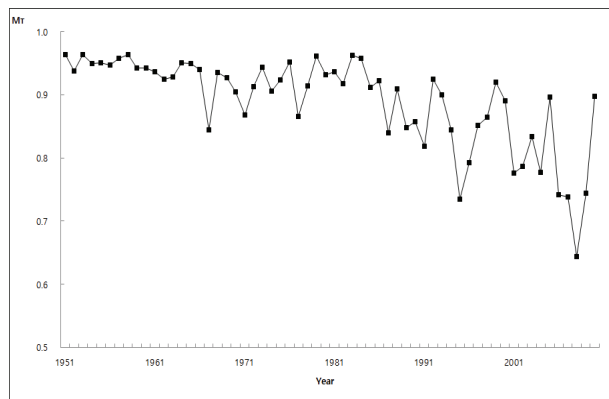


Figure 2. Yearly changes of temperature effect index for *Pinus densiflora*.

4. 연도별 강수효과지수의 추정

소나무가 분포하는 시군을 대상으로 추정된 연도별 표준강수지수에 근거하여 누적확률로 환산하여 산출한 강수효과지수의 분포는 연도별 변이가 매우 큰 것으로 확인되었다(Figure 3). 연도별 강수효과지수를 보면 큰 폭의 등락을 거듭하고 있는데, 초반 30년 동안보다는 후반 30년의 강수효과지수의 평균치가 더 큰 것으로 분석되었다. 성장목편 자료가 측정된 1951년부터 2010년까지 60년 동안의 평균 강수효과지수는 약 0.5로 추정되었으며, 전반부 30년과 후반부 30년의 평균 강수효과지수는 각각 0.4585와 0.5475로 후반부의 수분조건이 더 양호한 것으

로 파악되었다. 하지만 후반부 강수효과지수의 연도별 변이가 전반부보다 더 큰 것으로 나타나 평균은 커졌지만 연도별 변이는 오히려 더 증가한 것을 알 수 있다. 전체적으로 보면 지난 60년 동안 생장에 영향을 미치는 수분조건은 시간이 경과하면서 다소 개선되었지만 큰 차이는 없는 것으로 평가되었다.

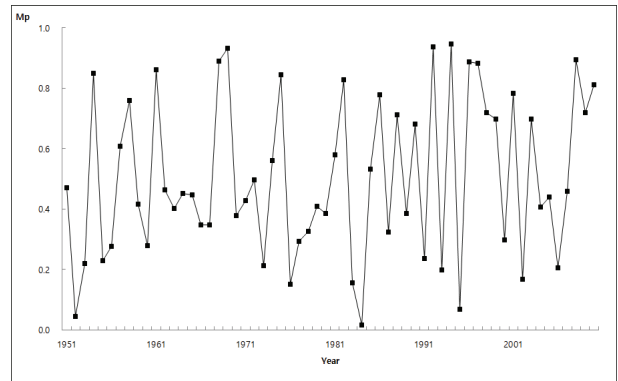


Figure 3. Yearly changes of precipitation effect index for *Pinus densiflora*.

5. 연륜생장 추정식의 개발

1) 추정자료에 의한 수종별 연륜생장 추정식의 조제
Table 4는 추정자료에 근거하여 조제한 4개 소나무 연륜생장 추정식의 회귀계수와 결정계수를 비교한 결과이다. 모형의 설명력인 결정계수를 보면 온도효과지수(M_T)와 온도효과지수 및 강수효과지수의 곱인 $M_T \times M_P$ 를 독립변수로 하는 모형 2가 가장 높은 것으로 평가되었다. 하지만 각 모형의 결정계수는 0.57~0.62의 범위로 추정되어 모형 간에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 모형별로 비교적 양호한 설명력을 보였지만 온도 및 강수량에 의해 설명하지 못하는 변이가 약 40% 내외인 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 4개 모형에 의해 설명되지 못한 나머지 변이는 온도 및 강수량 이외에 연륜생장에 미치는 광조건, 토양 질소, 대기 중의 이산화탄소 농도 등의 기후요인과 기타 오차 등으로 간주된다.

Table 4. Results of tree-ring growth estimation equations for *Pinus densiflora* using fit data.

Model	Regression Coefficients			R^2
	b_0	b_1	b_2	
1	0.9108	0.1774	-	0.61
2	0.8443	0.0752	0.1758	0.62
3	0.9466	0.1729	-	0.57
4	0.8951	0.0582	0.1710	0.58

2) 연륜생장 추정식의 검증

Table 5는 검증자료를 소나무 연륜생장 추정식에 적용하여 산출한 평가통계량을 요약한 결과이다. 각 모형의 평균편의인 절대평균편차(MAD)를 보면 모두 0.012 이하로 본 연구에서 조제한 4가지 연륜생장 추정식의 추정능력에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 한편 다른 평가통계량인 모형의 정도(SDD)와 모형의 표준오차(SED) 추정치의 경우에도 모든 추정식이 비교적 작은 값을 나타내고 있어, 본 연구에서 개발된 소나무의 4가지 연륜생장 추정식은 기후인자와 연륜생장과의 관계를 비교적 잘 표현하는 것으로 분석되었다.

Table 5. Validation results of tree-ring growth estimation equations for *Pinus densiflora* using test data.

Model	Validation Statistics			Ranking
	MAD	SDD	SED	
1	0.0115 (3)	0.0071 (2)	0.0135 (2)	2
2	0.0113 (1)	0.0053 (1)	0.0125 (1)	1
3	0.0113 (2)	0.0124 (4)	0.0168 (4)	3
4	0.0119 (4)	0.0102 (3)	0.0157 (3)	4

모형의 적합성을 평가하기 위해 사용한 통계량이 복수일 경우 각 평가통계량의 결과에 근거하여 순위를 정한 후, 각 모형별로 평가통계량의 순위를 합산하여 합이 적은 순서대로 최종 순위를 부여하는 방법을 사용하는 것이 일반적이다(Shin, 1990). 본 연구에서는 4가지 연륜생장 추정모형에 적용한 3가지 평가통계량의 결과에 근거하여 평가통계량별로 순위를 부여한 후, 이들 3가지 평가통계량에 대한 순위의 합에 의해 소나무 연륜생장 추정식의 순위를 결정하였다. 그 결과 4가지 연륜생장 추정모형 중에서 모형 2가 가장 적합한 것으로 판명되었다.

3) 최종 연륜생장 추정식의 개발

본 연구에서 사용한 4가지 연륜생장 모형 중에서 최적으로 판명된 모형 2에 추정자료와 검증자료를 합친 통합자료를 적용하여 개발한 소나무의 최종 연륜생장 추정식은 $GI = 0.8506 + 0.0713 M_T + 0.1701 M_T \times M_p$ ($R^2 = 0.64$)인 것으로 판명되었다. 이 최종 연륜생장 추정식은 추정자료와 검증자료를 통합한 자료에 의해 개발되었기 때문에 앞에서 추정자료에 의해 조제한 연륜생장 추정식과 비교하여 회귀계수와 결정계수가 달라졌다. 하지만 실제적으로는 결정계수가 약간 증가하였고 회귀계수는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 최종 연륜생장 추정식의 설명력을 나타내는 결정계수는 0.64로 추정되었는데, 이는 추정자료만을 사용한 추정식에 비해 설명력이 약간 개선된 것이다.

4. 기후변화 시나리오에 의한 연륜생장 변화의 비교

기후변화 시나리오인 RCP 4.5와 RCP 8.5에 의한 연도별 평균기온의 변화를 보면 RCP 4.5는 2100년까지 완만한 증가를 보이는 반면, RCP 8.5를 적용하면 시간이 경과하면서 평균기온이 지속적으로 비교적 큰 폭의 상승을 나타내는 것으로 예측되었다. 반면에 연 강수량은 기후변화 시나리오에 관계없이 연도별 변이가 심한데, RCP 4.5와 RCP 8.5 간에 연도별로 특징적인 차이가 없는 것으로 분석되었다(National Institute of Forest Science, 2016). Figure 4는 소나무가 분포하는 지역을 대상으로 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 예측한 연도별 연륜생장의 변화를 비교한 결과이다. RCP 4.5를 적용할 경우 소나무 분포지역의 연도별 연륜생장은 시간이 경과하면서 점차 감소하는 추세를 보이지만 전체적으로 감소량은 작은 것으로 예측되었다. 상대적으로 기후변화의 강도가 큰 RCP 8.5를 적용할 경우에도 2055년까지는 RCP 4.5에 의한 결과와 연륜생장의 변화 측면에서 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다. 하지만 RCP 8.5의 경우 2055년 이후에는 시간이 경과하면서 큰 폭으로 연륜생장이 감소함과 동시에 연도별 변이가 심한 것으로 추정되었다. 특히 2070년 이후에는 확연한 연륜생장의 감소를 확인할 수 있다. 이는 연륜생장 추정식에 포함된 온도효과지수와 강수효과지수의 연도별 변이가 복합적으로 영향을 미친 결과로 판단된다.

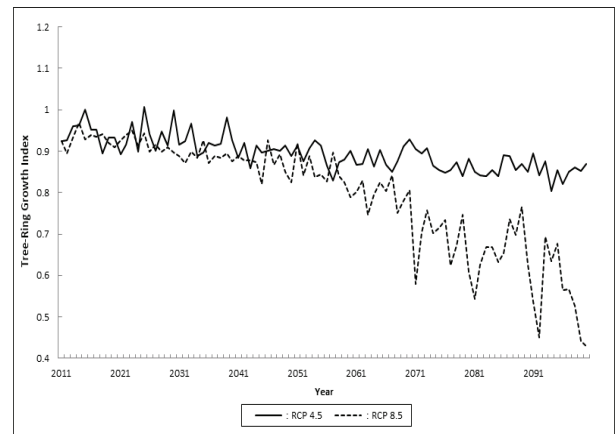


Figure 4. Comparison of yearly tree-ring growth index for *Pinus densiflora* based on climate change scenarios.

결과적으로 소나무 분포지역의 경우 기후변화 시나리오를 적용할 경우 시간이 경과하면서 연륜생장이 감소하지만 강도가 낮은 기후변화 시나리오인 RCP 4.5의 경우에는 상대적으로 성장감소가 적은 것으로 추정되었다. 반면에 극한 기후변화 시나리오인 RCP 8.5를 적용하면 2050년 이후에는 연륜생장이 큰 폭으로 감소할 것으로

예상되었는데, 이는 연도별 강수량의 변이뿐만 아니라 시간 경과에 따른 기온의 상승이 복합적으로 작용한 결과로 평가된다. 따라서 현재 소나무가 분포하는 임분은 어느 정도의 성장감소와 함께 분포지역은 위도가 높거나 해발고도가 상대적으로 높은 고산지역으로 이동할 것으로 예측된다.

연륜생장은 다양한 기후인자에 의해 영향을 받아 발현되지만 본 연구에서 개발한 소나무의 연륜생장 추정식에 반영된 기후인자는 온도와 강수량에 국한되어 있다. 이로 인해 기후변화 시나리오에 적용한 소나무의 연륜생장 추정식은 연륜생장 변화를 정확하게 평가하는데 한계가 있는 것이 사실이다. 이는 온도와 강수량 이외의 기후요인에 의해 설명될 수 있는 소나무의 연륜생장의 변화를 오차로 간주하였기 때문이다. 앞으로 연륜생장에 미치는 다른 기후요인에 대한 정보를 전국 단위로 수집한다면 좀 더 정확도가 높은 연륜생장 추정식을 개발할 수 있고, 이를 통해 기후변화에 따른 연륜생장의 변화를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

결론

본 연구는 우리나라의 대표 수종인 소나무를 대상으로 기후인자가 연륜생장에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행하였다. 이를 위해 국가산림자원조사를 통해 수집한 소나무 연륜 생장 자료에 대해 연륜기후학적 방법을 적용하여 크로스데이팅과 표준화 과정을 거쳐 기초 통계량을 산출 한 후 연륜연대기를 작성하였다. 또한 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하기 위해 기후인자를 독립변수로 하는 연륜생장 추정식을 개발하였다. 이와 함께 소나무 연륜생장 추정식을 기후변화 시나리오에 적용하여 기후변화에 따른 소나무 분포 지역의 연도별 연륜생장 변화 추이를 예측하였다. 소나무의 최적 연륜생장 추정식은 온도효과지수(M_T)와 온도효과지수 및 강수효과지수의 곱인 $M_T \times M_P$ 를 독립변수로 하는 모형 2가 가장 적합한 것으로 분석되었다.

한편 기후변화 시나리오를 적용하여 2011년부터 2100년까지 90년 동안의 연륜생장 변화를 예측한 결과, 시간이 경과함에 따라 소나무의 연륜생장은 감소하는 것으로 예측되었다. 기후변화의 강도가 낮은 RCP 4.5 시나리오를 적용할 경우에는 상대적으로 성장감소가 적은 반면, 극한 기후변화 시나리오인 RCP 8.5를 적용하면 2050년 이후에는 큰 폭으로 연륜생장이 감소하는 것으로 평가되었다. 이는 기후변화에 따른 연도별 강수량의 변이와 함께 지속적인 기온 상승이 연륜생장에 부정적인 영향을 미친 결과로 판단된다. 결과적으로 현재와 같은 기후변

화가 지속될 경우 소나무가 분포하는 지역은 시간이 경과하면서 일정한 정도의 성장감소와 함께 분포지역은 높은 위도 또는 고산지역으로 이동할 것으로 예측된다.

감사의 글

본 논문은 2016년 국립산림과학원 기후변화센터 위탁연구과제 ‘연륜해석에 의한 주요 수종의 성장과 기후와의 관계 조사(2)’ 연구 결과의 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Arbatzis, A.A. and Burkhart, H.E. 1992. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantation. *Forest Science* 38(1): 192-198.
- Blasing, T.J., Duvick, D.N., and Cook, E.R. 1983. Filtering the effects of competition from ring-width series. *Tree-Ring Bulletin* 43: 19-29.
- 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.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., and Reinsel, G.C. 1994. *Time series analysis-forecasting and control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs. N.J. pp. 297.
- Briffa, K.R. and Jones, P.D. 1990. Basic chronology statistics and assessment. pp. 137-152.
- 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/standardizedprecipitation.php>.
- Cook, E.R. and Peter, K. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41: 45-53.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press. New York (USA). pp. 567.
- Fritts, H.C. and Swetnam, T.W. 1989. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. In: M. Begon, A.H. Fitter, E.D. Ford, and A. Macfadyen, eds., *Advances in Ecological Research*, Vol. 19. Academic Press, London. pp. 111-188.
- 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.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Kira, T. 1945. A new classification of climate in eastern Asia as the basis for agricultural geography. Horticultural Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan. pp. 28.
- 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).
- Lee, S.T., Park, M.S., Jun, H.Y., Park, J.Y. and Chou, H.S. 2008. The effects of climate factors on the tree ring growth of *Pinus densiflora*. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 10(4): 177-186.
- Lim, J.H. 1998. A forest dynamics model based on topographically-induced heterogeneity in solar radiation and soil moisture on the Kwanfneung 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: 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, 179-184.
- 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)
- National Institute of Forest Science. 2016. Relationships between growth of main tree species and climatic factors based on tree-ring analysis(2). pp. 148. (in Korean)
- Rigling, A., Waldner, P.O., Forster, T., Braker, O.U., and Pouttu, A. 2001. Ecological interpretation of tree-ring width and intraannual density fluctuations in *Pinus sylvestris* on dry sites in the central Alps and Siberia. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 18-31.
- 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. (in Korean with English abstract)
- Shin, M.Y. 1990. The use of ridge regression for yield prediction models with multicollinearity. *J. of Korean Forest Society* 79(3): 260-268.
- Snee, R.D. 1977. Validation of regression models: Methods and Examples. *Technometrics* 19: 415-428.
- 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. (in Korean with English abstract)
- Speer, J.H. 2010. *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. Arizona (USA). pp. 368.
- Thom, H.C.S. 1966. *Some methods of climatological analyses*. World Meteorological Organization, Geneva, pp. 53.
- Wigley, T.M.L., Briffa, K.R. and Jones, P.D. 1984. On the average value of correlated time series with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23(2): 201-213.
- 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.
- Zobel, B.J. and Van Buijtenen, J.P. 1989. *Wood variation: Its causes and control*. Springer Verlag, Berlin. pp. 363.