J. Korean For. Soc. Vol. 106, No. 1, pp. 77~86 (2017)
https://doi.org/10.14578/jkfs.2017.106.1.77

한국임학회지
JOURNAL OF KOREAN FOREST SOCIETY
ISSN 0445-4650(Print), ISSN 2289-0904(Online)
http://e-journal.kfs21.or.kr

소나무와 일본잎갈나무의 연륜생장과 기후 요소와의 상관관계 분석 및 생장예측

정준모[1*] · 김현섭[1] · 김미숙[2] · 전영우[2]
[1]국립산림과학원 산림생산기술연구소, [2]국민대학교 산림환경시스템학과

Correlation Analysis between Climatic Factors and Radial Growth and Growth Prediction for *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* in South Korea

Junmo Chung[1*], Hyunseop Kim[1], Meesook Kim[2] and Yongwoo Chun[2]
[1]*Forest Practice Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea*
[2]*Department of Forestry, Environment, and Systems, Kookmin University, Seoul 02707, Korea*

요 약: 본 연구는 소나무(*Pinus densiflora*)와 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*)의 연륜생장과 기후 요소와의 관계를 분석하고, 각 수종별 연구지역을 기후군집으로 분류하여 군집별 연륜기후학적 모델을 개발하였다. 또한 기후변화에 따른 연륜생장 변화를 RCP 기후변화 시나리오와 연륜기후학적 모델을 이용하여 예측하였다. 군집분석을 통한 소나무와 일본잎갈나무의 기후군집은 각각 4개로 분류되었다. 각 군집별 연륜기후학적 모델은 단계적 회귀분석으로 표준화된 잔차연대기와 군집별 기후변수를 이용하여 작성하였다. 소나무의 연륜기후학적 모델에는 각 4개씩의 기후변수가 사용되었고 R^2는 0.38 ~0.58로 나타났다. 일본잎갈나무 연륜기후학적 모델에는 2~5개의 기후변수가 사용되었고 R^2는 0.31~0.43으로 분석되었다. 수종별 연륜생장변화 예측은 RCP 4.5와 RCP 8.5 두 개의 기후변화 시나리오를 이용하였다. 소나무 기후군집별 연륜생장예측은 백두대간 산악지역인 군집 4에서 연륜생장이 증가하였고 평균기온이 높은 군집 2와 군집 3에서는 연륜생장이 감소하였다. 일본잎갈나무는 월평균 최저기온이 낮은 군집 1과 평균기온이 높은 군집 2에서는 기후변화가 진행됨에 따라 연륜생장이 감소하였고, 동부해안지역인 군집 3과 해발고가 높은 지역인 군집 4에서는 연륜생장이 유지되었다. 본 연구의 결과는 소나무와 일본잎갈나무의 기후변화에 따른 연륜생장의 변화 예측에 필요한 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: This study was conducted to analyze the relationship among climatic factors and radial growth of *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* in South Korea. To determine the climate-growth relationship, cluster analysis was applied to group surveyed regions by the climatical similarity, and a dendroclimatological model was developed to predict radial growth for each climate group under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios for greenhouse gases. The cluster analysis showed four climatic clusters (Cluster 1~4) from 10 regions for *P. densiflora* and *L. kaempferi*. The dendroclimatological model was developed through climatic variables and standardized residual chronology for each climatic cluster of *P. densiflora* and *L. kaempferi*. Four climatic variables were used in the models for *P. densiflora* (R^2 values between 0.38 to 0.58). Two to five climatic variables were used in the models for *L. kaempferi* (R^2 values between 0.31 to 0.43). The growth simulations with two RCP climate-change scenarios(RCP 4.5 and RCP 8.5) were used for growth prediction. The radial growth of the Cluster 4 of *P. densiflora*, the mountainous region at high elevation, tend to increase, while those of cluster 2 and 3 of *P. densiflora*, the region of the hightest average temperature, tends to decrease. The radial growth of the Cluster 1 of *L. kaempferi* the region of the lowest minimum temperature, while that of Cluster 2, the region of the highest average temperature, tends to decrease. The radial growth of Cluster 3 of *L. kaempferi*, the region in the east coast and Cluster 4, the region at high elevation, tends to hold steady. The results of this study are expected to provide valuable information necessary for predicting changes in radial growth of *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* caused by climate change.

Key words: *Radial growth*, Pinus densiflora, Larix kaempferi, *Climate change*, *RCP scenario*, *Growth Prediction*

* Corresponding author
E-mail: zunmo@korea.kr

서 론

지구의 환경은 최근 들어 인류에 의한 산업화로 범지구적인 급격한 기후환경 변화가 발생하고 있다. IPCC (2007)에 따르면 지구의 평균기온은 지난 100년간 0.74℃ 상승하였고 변화속도가 점점 가속되어 21세기말까지 1.8~4.0℃ 상승할 것으로 예측하고 있다. 한편 한반도에서는 지난 100년간 지구 평균기온 변화보다 2배가 넘는 평균기온 상승이 나타난 것으로 보고되었다(Korea Meteorological Administration, 2011). 이와 같은 기후변화는 다양한 생태계에 영향을 미치고 있으며 특히 산림생태계에 식생분포와 생육한계선 변화, 생물종다양성 등에서 다양한 문제를 초래하고 있어(Kim and Kil, 1996; Cha, 1998) 임업분야에서도 기후변화에 따른 대응방안 수립이 절실히 요구되고 있다. 산림에서의 기후변화에 따른 대응방안 마련을 위해서는 기후 요소와 산림 내 임목 생장과의 상호관계를 규명하고 그 사이의 관계를 이해하는 과정이 우선되어야 한다. 임목의 생장 중 연륜생장은 기후 및 환경변화와 밀접한 연관이 있어 기후 요소가 연륜생장에 미치는 영향을 규명하는 것을 통해 기후변화에 관련된 보다 정확하고 다양한 정보를 제공할 수 있다 (Spiecker, 2002).

하지만 최근까지 우리나라에서 이루어진 임목의 연륜생장에 관한 연구는 고기후 복원과 과거 유물에 사용된 목재를 이용한 연구가 대부분이었고 대상수종과 대상지역도 한정적이었다. 최근 들어 기후변화에 따른 영향을 규명하기 위해 생태학적 측면에서의 연구가 다방면에서 이루어지고 있다. 하지만 기후와 임목생장과의 관계를 보다 명확히 보여줄 수 있는 연륜생태학적 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구는 현재 우리나라에 많은 분포면적을 가지고 있으면서 목재 생산을 위한 주요 산림자원으로 이용되고 있는 소나무(*Pinus densiflora* Siebold and Zucc.)와 일본잎갈나무(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carriére)를 대상으로 기후 요소와 연륜생장과의 관계를 규명하여 연륜기후학적 모델을 개발하고 RCP 기후변화 시나리오를 이용한 기후변화에 따른 소나무와 일본잎갈나무의 연륜생장 변화를 예측하고자 시행되었다. 본 연구의 결과는 기후 요소에 따른 소나무와 일본잎갈나무의 연륜생장 변화를 예측하여 향후 지속될 기후변화에 대한 효과적인 대응책을 마련하는데 필요한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

연구대상지는 제4차 국가산림자원조사에서 나타난 소나무와 일본잎갈나무의 분포지역 중 대상수종의 분포면적이 넓으며 대상수종의 생육상태가 양호하고 해당 임분에 우세목으로 분포하고 있는 곳을 선정하였다. 소나무 조사지역은 강원도 양구, 인제, 정선, 평창, 횡성, 경기도 광릉시험림, 충청남도 서천, 예산, 경상북도 영덕, 울진의 10개 지역이다. 소나무 표준지는 총 34개소를 조사하였고 채취한 연륜시료는 분석 가능한 213개를 사용하였다. 소나무 조사지의 개황은 Tabel 1과 같다.

Table 1. General descriptions of surveyed region for *Pinus densiflora*.

Region	No. of plot	No. of used core	z (m)	y (°)	x (cm)	w (m)	v (yrs)
Gwangneung	3	15	440~575	6~33	30.3~40.3	18.0~21.3	64~81
Seocheon	3	9	563~645	10~31	14.2~19.6	11.5~14.2	30~42
Yanggu	3	10	377~459	13~31	24.2~30.8	15.2~17.6	30~56
Yeongdeok	3	9	61~94	5~21	11.9~15.7	6.2~8.9	31~69
Yesan	3	15	945~1036	3~15	14.7~17.0	13.0~17.4	30~42
Uljin	6	86	648~674	5~32	21.8~34.0	16.5~19.0	33~144
Inje	4	21	456~482	23~27	35.2~40.4	24.5~26.9	33~62
Jeongseon	3	20	395~493	21~33	18.9~34.3	22.9~24.5	44~58
Pyeongchang	4	22	520~692	10~38	34.2~53.9	18.1~27.0	40~79
Hoengseong	2	6	693~704	3~19	32.1~35.5	19.5~21.2	45~55
Total	34	213					

z: Range of study site altitude
y: Range of study site slope
x: Range of mean DBH on study site
w: Range of mean tree height on study site
v: Range of mean tree-age on study site

Table 2. General descriptions of surveyed region for *Larix kaempferi*.

Region	No. of plot	No. of used core	z (m)	y (°)	x (cm)	w (m)	v (yrs)
Gangneung	2	7	838～862	12～14	36.7～44.4	25.7～28.3	36～48
Gwangneung	4	31	128～222	8～30	19.5～33.4	17.7～25.8	37～87
Muju	7	97	890～960	8～33	26.2～37.7	21.8～26.8	36～50
Yangpyeong	4	23	169～270	14～38	21.8～32.8	22.3～28.8	35～47
Inje	4	51	426～454	13～45	20.1～23.4	19.4～20.5	30～32
Taebaek	3	9	925～947	27～34	17.8～33.2	17.2～24.1	34～41
Pyeongchang	3	16	924～1016	10～15	24.6～30.7	25.1～26.3	30～41
Hongcheon	3	76	250～395	11～43	21.1～24.0	25.7～29.4	30～32
Hoengseong	2	4	656～663	18～23	48.2～53.3	29.6～31.6	61～71
Total	32	314					

z: Range of study site altitude
y: Range of study site slope
x: Range of mean DBH on study site
w: Range of mean tree height on study site
v: Range of mean tree-age on study site

일본잎갈나무 조사지역은 강원도 강릉, 인제, 태백, 평창, 홍천, 횡성, 경기도 광릉시험림, 양평, 전라북도 무주의 9개 지역이다. 일본잎갈나무 표준지는 총 32개소를 조사하였고 채취한 연륜시료는 분석 가능한 314개를 사용하였다. 일본잎갈나무의 조사지 개황은 Table 2와 같다.

2. 연구 방법

1) 연륜측정 및 기초통계 분석

연륜시료는 생장추를 사용하여 지상으로부터 1.2 m 높이에서 압축이상재의 영향을 줄이기 위해 경사와 직각방향으로 채취하였다(Fritts, 1976). 채취한 시료는 자연 건조 후 목재마운트에 고정하여 연마하였다. 연륜생장량은 연륜측정분석기(DTRS-2000)로 1/100mm 단위까지 측정하였다. 측정된 연륜생장 자료는 연륜에 정확한 연도를 부여하기 위하여 크로스데이팅(Crossdating)을 실시하였고, 기후인자 이외의 생물학적 생장추세를 음지수곡선(Negative exponential curve)으로 제거하고 교란에 의한 변동추세와 비기후인자에 의한 저주파변동을 스플라인 곡선(Spline curve)으로 제거하는 이중표준화를 실시하였다(Fritts, 1976; Cook and Kairiukstis, 1990: Seo, 1999). 표준화된 연대기는 자기상관을 제거하여 잔차연대기(Residual chronology)로 만들었다(Cook and Holmes, 1986). 연륜연대기 기초통계는 연속된 두 연륜폭간 변이를 나타내는 평균민감도(Mean Sensitivity), 전년도 환경이 연륜 생장에 미치는 영향을 나타내는 자기상관계수(Auto-correlation), 동일 임목내의 차이와 인접한 임목간의 차이를 나타내는 상호상관계수(Correlation coefficient), 연대기의 기간별 신호강도를 보여주는 SNR(Signal to Noise Ratio), 모집단에 대한 지역연대기의 신호강도를 보여주는 EPS(Expressed Population Signal)를 분석하였다(Fritts, 1976; Wigley et al., 1984; Cook and Kairiukstis, 1990).

2) 기후자료

연륜연대학 연구에서 기후자료는 일반적으로 개별 기상관측소의 자료보다는 기상관측소가 없는 지역까지 연구범위를 확대할 수 있는 지역평균값을 사용한다(Fritts, 1976). 본 연구에서도 연륜생장과 기후요소와의 상관관계 분석을 위하여 원기가 형성되는 전년도 8월부터 금년도 9월까지의 14개월의 월평균기온과 월강수량 그리고 이 기간을 수목 생장기와 비생장기로 구분한 34개 기후변수의 시·군 단위 지역평균 값을 산출하여 사용하였다(Table 3). 기후자료는 기상청의 전국 일별 기온과 강수량 자료를 GIS프로그램 ArcGIS 10.1과 통계프로그램 R 3.0.1을 이용하여 계산하였다.

3) 기후군집 분석

소나무와 일본잎갈나무 조사지역을 기후자료를 이용하여 유사성이 높은 몇 개의 기후군집으로 분류하기 위하여 군집분석(Cluster analysis)을 실시하였다. 수종별 기후군집은 각 조사지역의 월평균기온과 월강수량을 유클리디안 거리(Euclidean distance)로 환산하여 분류하였다. 본 연구에서는 분류된 기후군집에 따라 기후군집별 연륜연대기를 작성하였고, 각 기후군집별 연륜연대기는 연륜기후학적 모델 개발과 기후변화에 따른 미래의 연륜생장 변화 예측에 사용하였다.

Table 3. Climatic variables.

Variable	Description	Variable	Description
c1	Mean temperature of Prior Aug.	c18	Precipitation of Prior Aug.
c2	Mean temperature of Prior Sep.	c19	Precipitation of Prior Sep.
c3	Mean temperature of Prior Oct.	c20	Precipitation of Prior Oct.
c4	Mean temperature of Prior Nov.	c21	Precipitation of Prior Nov.
c5	Mean temperature of Prior Dec.	c22	Precipitation of Prior Dec.
c6	Mean temperature of Current Jan.	c23	Precipitation of Current Jan.
c7	Mean temperature of Current Feb.	c24	Precipitation of Current Feb.
c8	Mean temperature of Current Mar.	c25	Precipitation of Current Mar.
c9	Mean temperature of Current Apr.	c26	Precipitation of Current Apr.
c10	Mean temperature of Current May.	c27	Precipitation of Current May.
c11	Mean temperature of Current Jun.	c28	Precipitation of Current Jun.
c12	Mean temperature of Current Jul.	c29	Precipitation of Current Jul.
c13	Mean temperature of Current Aug.	c30	Precipitation of Current Aug.
c14	Mean temperature of Current Sep.	c31	Precipitation of Current Sep.
c15	(C1+C2+C3)/3	c32	(C18+C19+C20)/3
c16	(C4+C5+C6+C7+C8)/5	c33	(C21+C22+C23+C24+C25)/5
c17	(C9+C10+C11+C12+C13+C14)/6	c34	(C26+C27+C28+C29+C30+C31)/6

4) 연륜기후학적 모델 개발

소나무와 일본잎갈나무의 기후군집별 기후와 연륜생장과의 상관관계 분석 및 기후변화에 따른 연륜생장 예측을 위해 연륜기후학적 모델을 개발하였다. 연륜기후학적 모델은 기후 요소를 독립변수로 연륜생장을 종속변수로 하여 단계적 회귀분석(Stepwise regression analysis)으로 기후-연륜생장 관계식을 작성하였다. 독립변수의 다중공선성은 분산팽창계수(VIF)로 제거하고 검증하였다. 기후-연륜생장 관계식의 적합성은 기후-연륜생장 관계식 작성에 사용되지 않은 기간의 연륜연대기를 사용하여 검증하였고, 적합성 검증을 위해 사용한 평가 통계량은 모형의 추정편의(model's estimation bias), 모형의 정도(model's precision), 및 모형의 표준오차(Standard Error of Difference)를 사용하였다(Shin, 1990; Arabatzis and Burkhart, 1992; Shin et al, 1996).

5) 기후변화 시나리오를 이용한 연륜생장 예측

기후변화에 따른 소나무와 일본잎갈나무의 연륜생장 변화를 본 연구의 연륜기후학적 모델과 IPCC 제5차 보고서에 사용된 RCP(Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오를 이용하여 예측하였다. RCP 시나리오는 온실가스 농도와 기후변화 대응정책을 연계하여 4가지로 나누어지며 본 연구에서는 기후변화에 따른 기후 예측 자료로 2100년의 CO_2 농도 538 ppm으로 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우인 한반도 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 CO_2 농도 936 ppm으로 현재 추세로 온실가스가 배출되어 농도가 지속적으로 증가하는 경우인 RCP 8.5 시나리오에서 2011～2100년까지의 기후군집별 기후를 월별 기후로 산출하였다. 미래의 연륜생장 변화는 RCP 기후변화 시나리오에서 산출한 월별 기후자료를 소나무와 일본잎갈나무 각각의 연륜기후학적 모델에 적용하여 예측하였다.

결과 및 고찰

1. 연륜생장 기초 통계

각 조사지에서 수집된 소나무 표준목의 평균 연륜생장량은 1.74～3.46 mm로 정선이 가장 높았고 영덕이 가장 저조하였다. 평균민감도는 0.236～0.754로 지역 간 차이가 나타났다(Table 4). Seo(1999)이 보고한 월악산 소나무의 평균민감도 0.159～0.278와는 유사하거나 높게 나타났으며 연륜연대학 연구에 활용 가능한 것으로 평가되었다. 자기상관계수는 –0.170～0.105로 자기상관이 대부분 제거되었다(Box et al., 1994).

일본잎갈나무 표준목의 평균 연륜생장량은 3.10～4.26 mm로 평창이 가장 높았고 광릉시험림지역이 가장 저조하였다(Table 5). 평균민감도는 0.274～0.820으로 지역 간 차이가 나타났지만 시베리아잎갈나무(*Larix sibirica*)의 평균민감도 0.4 보다 대부분 지역에서 높게 나타났고 연륜연대학 연구에 활용 가능한 것으로 평가되었다(Louis et al., 2011). 자기상관계수는 –0.006～0.106로 자기상관이 대부분

Table 4. Summary statistics of tree-ring measurements and chronologies for *Pinus densiflora*.

Region	Time Span	Mean tree-ring growth (mm)	Mean Sensitivity	1st Autocorrelation
Gwangneung	1930～2010	2.41	0.441	0.105
Seocheon	1968～2008	2.64	0.411	-0.170
Yanggu	1953～2008	2.99	0.338	-0.041
Yeongdeok	1942～2010	1.74	0.236	0.080
Yesan	1969～2010	2.32	0.372	-0.076
Uljin	1864～2010	3.40	0.389	-0.062
Inje	1941～2008	3.23	0.420	-0.088
Jeongseon	1950～2007	3.46	0.350	-0.125
Pyeongchang	1932～2010	2.95	0.286	0.039
Hoengseong	1956～2010	3.05	0.754	0.066

Table 5. Summary statistics of tree-ring measurements and chronologies for *Larix kaempferi*.

Region	Time span	Mean tree-ring growth (mm)	Mean Sensitivity	1st Autocorrelation
Gangneung	1962～2009	3.17	0.577	0.106
Gwangneung	1965～2010	3.10	0.274	-0.011
Muju	1961～2010	3.51	0.488	-0.025
Yangpyeong	1963～2009	3.40	0.559	0.026
Inje	1979～2010	3.57	0.674	-0.155
Taebaek	1969～2009	3.27	0.366	-0.006
Pyeongchang	1970～2010	4.26	0.488	-0.010
Hongcheon	1978～2010	3.99	0.509	-0.051
Hoengseong	1939～2009	3.62	0.820	0.010

Table 6. Summary statistics of residual chronologies for *Pinus densiflora*.

Region	Correlation coefficient		SNR	EPS
	Within tree (r_{wi})	Between tree (r_{bi})		
Gwangneung	0.608	0.326	4.353	0.828
Seocheon	0.594	0.341	3.622	0.799
Yanggu	0.410	0.220	3.602	0.795
Yeongdeok	0.651	0.283	3.158	0.765
Yesan	0.682	0.366	7.505	0.886
Uljin	0.777	0.592	76.902	0.988
Inje	0.824	0.553	14.846	0.941
Jeongseon	0.762	0.541	20.037	0.955
Pyeongchang	0.463	0.226	5.840	0.858
Hoengseong	0.795	0.484	4.690	0.830
Mean	0.657	0.399	14.46	0.825

SNR : Signal to Noise Ratio
EPS : Expressed Population Signal

제거되었다(Box et al., 1994).

소나무의 임목내 상관계수는 0.410～0.824로 임목 내 상관계수 평균은 0.657이었으며, 임목간 상관계수는 0.220～0.592으로 평균은 0.399이었다(Table 6). 월악산 소나무를 대상으로 한 연구(Seo et al., 2000)의 임목 내 상관계수 0.572 보다는 높고 임목간 상관계수 0.411 보다는 낮게 나타났다. 소나무 연대기의 SNR이 가장 높게 나타난 지역은 울진으로 20.037이었다. 울진의 신호강도가 높

Table 7. Summary statistics of residual chronologies for *Larix kaempferi*.

Region	Correlation coefficient		SNR	EPS
	Within tree (r_{wi})	Between tree (r_{bi})		
Gangneung	0.530	0.352	3.259	0.776
Gwangneung	0.724	0.568	28.926	0.969
Muju	0.677	0.381	33.853	0.974
Yangpyeong	0.746	0.576	23.094	0.963
Inje	0.755	0.504	27.435	0.969
Taebaek	0.820	0.567	9.166	0.907
Pyeongchang	0.681	0.580	17.952	0.952
Hongcheon	0.728	0.519	43.160	0.980
Hoengseong	0.602	0.635	5.219	0.865
Mean	0.696	0.520	21.340	0.928

SNR : Signal to Noise Ratio
EPS : Expressed Population Signal

게 나타난 것은 울진의 연륜시료 수가 다른 지역에 비해 많기 때문이다. 지역연대기의 EPS가 0.85 이상이면 통계적으로 높은 신뢰도를 가지는 것으로 알려져 있는데 울진은 0.988로 신뢰도가 높았고 소나무 지역연대기의 EPS 평균은 0.825로 연륜연대기의 변동을 80%이상 설명할 수 있는 것으로 나타났다(Speer, 2010).

일본잎갈나무의 임목내 상관계수는 0.530～0.820으로 임목내 상관계수 평균은 0.696이었고, 임목간 상관계수는 0.352～0.635으로 임목간 상관계수 평균은 0.520이었다(Table 7). 일본잎갈나무 연대기의 SNR이 가장 높은 지역은 홍천으로 43.160이었다. 홍천의 임목간 상관계수가 횡성지역보다 낮지만 SNR이 높게 나타나는 것은 시료의 수가 다른 지역 보다 많기 때문이다. EPS는 홍천지역이 0.980로 가장 높고 광릉지역 이외의 모든 지역에서 통계적으로 높은 신뢰도를 가지는 0.85 이상이었다(Speer, 2010).

2. 수종별 기후군집 분석

소나무 조사지 10개 지역의 월평균기온과 월강수량으로 기후 군집분석을 실시한 결과, 4개의 기후군집으로 구분되었다. 소나무 군집 1은 울진, 영덕으로 동부해안지역, 군집 2는 횡성, 광릉의 중부내륙지역, 군집 3은 예산, 서천으로 중서부지역, 그리고 군집 4는 양구, 정선, 인제, 평창의 백두대간산악지역으로 구분되었다(Figure 1).

일본잎갈나무 조사지 9개 지역의 기후 군집분석을 실시한 결과, 4개의 기후군집으로 구분되었다. 군집 1은 인제, 평창의 백두대간 산악지역지역, 군집 2는 홍천, 광릉, 양평, 횡성으로 중부내륙지역, 군집 3은 강릉의 동부해안지역, 그리고 군집 4는 태백, 무주로 중남부내륙지역으로 구분되었다(Figure 2).

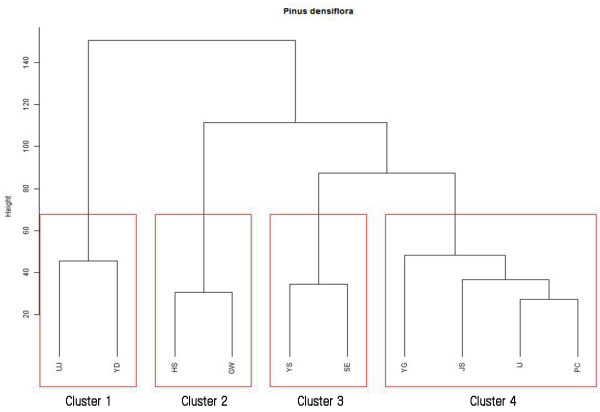

Figure 1. Cluster analysis by calculating the euclidean distance between each *Pinus densiflora* site. (UJ: Uljin, YD: Yeongdeok, HS: Hoengseong, GW: Gwangneung, YS: Yesan, SE: Seocheon, YG: Yanggu, JS: Jeongseon, IJ: Inje, PC: Pyeongchang).

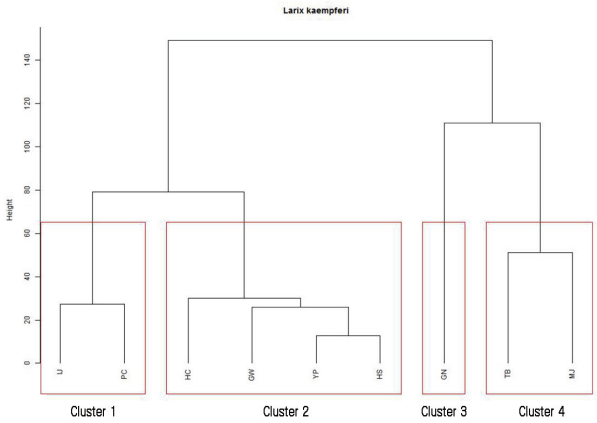

Figure 2. Cluster analysis by calculating the euclidean distance between each *Larix kaempferi* site. (IJ: Inje, PC: Pyeongchang, HC: Hongcheon, GW: Gwangneung, YP: Yangpyeong, HS: Hoengseong, GN: Gangneung, TB: Taebaek, MJ: Muju).

3. 기후군집별 연륜기후학적 모델 개발

소나무와 일본잎갈나무의 기후군집별 연륜연대기와 Table 3에 명시한 34개의 기후변수를 이용한 단계적 회귀분석을 실시하여 수종별·기후군집별 연륜기후학적 모델을 개발하였다(Table 8). 소나무의 4개 기후군집별 연륜기후학적 모델에는 각각 4개의 기후변수가 사용되었고, 결정계수는 0.38～0.58로 나타났다. 일본잎갈나무의 4개 기후군집별 연륜기후학적 모델에는 각각 2～5개의 기후변수가 사용되었고, 결정계수는 0.31～0.43으로 나타났다. 캐나다 뱅쿠버섬의 5개 수종을 대상으로 한 연륜생장 모형의 결정계수 0.55～0.68이나(Laroque and Smith, 2005), Seo(1999)의 월악산 소나무 반응함수 분석의 결정계수 0.528～0.569와 비교하여 결정계수가 유사하거나 낮게 나타났지만 군집분석으로 구분된 기후군집의 면적이 상대적으로 크고 연륜생장에는 다양한 생물학적, 비생물학적 인자가 관여하는 사실을 감안하면 모형의 추정능력은 문제가 없을 것으로 사료된다.

소나무와 일본잎갈나무 기후군집별 연륜기후학적 모델의 적합성 검정 결과는 Table 9와 같다. 수종별·기후군집별 연륜기후학적 모델의 평균편의(Mean Difference)는 –0.0365～0.0985로 대부분의 경우 상당히 낮은 평균편의를 보였다. 소나무 군집 4와 일본잎갈나무 군집 4의 경우는 상대적으로 다소 높게 평균편의가 추정되었지만 각각 0.0949와 0.0985로 10% 미만으로 나타났다. 모형의 정도(Standard Deviation of Difference)와 모형의 표준오차(Standard Error of Difference)도 작은 값을 보여 연륜생장을 예측하는데 본 연구의 연륜기후학적 모델이 사용가능한 것으로 평가되었다.

4. 기후변화에 따른 연륜생장 예측

기후군집별 연륜기후학적 모델과 한반도 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5의 기후추정치를 이용한 2011～2100년까지의 소나무 연륜생장변화 예측은 Figure 3과 같다. 군집 1은 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용했을 때 큰 생장 변화를 보이지 않았다. 군집 2는 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 모두 4개의 소나무 기후 군집 중에서 가장 큰 연륜

Table 8. Regression prediction equations of growth index.

Tree species	Cluster	Regression prediction equations	R^2
Pinus densiflora	1	GI=1.5467-0.0144×c13-0.0009×c20-0.0007×c25-0.0009×c30	0.50
	2	GI=1.5299-0.0464×c3-0.0380×c5-0.0669×c8+0.0011×c32	0.58
	3	GI=1.7271-0.0268×c13-0.0022×c24+0.0003×c26-0.0018×c33	0.50
	4	GI=0.6225+0.0211×c11-0.0011×c22+0.0015×c24-0.0004×c28	0.38
Larix kaempferi	1	GI=0.9713-0.0345×c4+0.003×c18-0.0012×c20-0.0040×c23 +0.0046×c33	0.40
	2	GI=1.5671-0.0346×c2-0.0179×c4+0.0031×c24+0.0007×c25	0.43
	3	GI=1.2033+0.0090×c7-0.0011×c34	0.31
	4	GI=0.3729-0.0225×c5+0.0267×c11+0.0002×c28	0.39

Cluster information refers to Figure 1 for *P. densiflora*, and Figure 2 for *L. kaempferi*.
Climatic variables information refers to Table 3.

Table 9. Verification result of Regression prediction equations.

Tree species	Cluster	Year	MD	SDD	SED
Pinus densiflora	1	1951～1977	-0.0362	0.1823	0.1859
	2	1951～1977	-0.0365	0.2056	0.2058
	3	1968～1977	0.0741	0.2456	0.2566
	4	1968～1977	0.0949	0.1150	0.1491
Larix kaempferi	1	1971～1977	0.0251	0.1526	0.1547
	2	1951～1977	0.0170	0.2492	0.2498
	3	1967～1977	0.0410	0.1786	0.1832
	4	1962～1977	0.0985	0.1758	0.2016

Cluster information refers to Figure 1 for *P. densiflora*, and Figure 2 for *L. kaempferi*.
MD : Mean Difference
SDD : Standard Deviation of Difference
SED : Standard Error of Difference

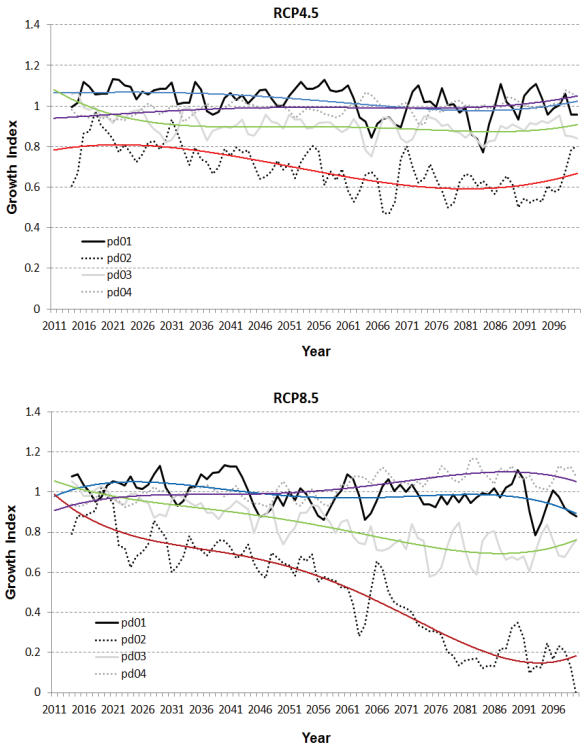

Figure 3. Predicted radial growth index of *Pinus densiflora* according to RCP 4.5 and RCP 8.5. (Information of Clusters 1, 2, 3 and 4 is on Figure 1.)

생장 감소 경향을 보였다. 군집 3은 RCP 시나리오에 따라 서로 다른 연륜생장 경향이 나타났다. RCP 4.5의 경우 생장의 감소가 일부 나타나지만 큰 감소없이 생장이 지속되었고 RCP 8.5에서는 시간이 지남에 따라 연륜생장량이 꾸준히 감소하는 경향을 보였다. 군집 4는 RCP 4.5와 RCP 8.5 모두 생장 감소 없이 유지되거나 증가하는 경향을 보였다.

소나무는 현재 일부 고산 지역을 제외하면 전국적으로 분포하고 있어 기후 차이에 대한 적응범위가 넓은 수종으로 알려져 있다(Chun, 2012). 하지만 기후변화에 따른 연륜생장 예측에서는 기후 군집에 따른 서로 다른 연륜생장 경향을 보이고 있다. 연륜생장이 큰 변화 없이 유지되는 군집 1은 동부 해안지역으로 연평균기온, 연강수량, 월평균최고기온, 월평균최저 기후 요소들이 다른 소나무 기후 군집들의 중간 정도의 값을 보이는 지역이다. 시간이 지남에 따라 증가 경향을 보이는 군집 4는 다른 군집에 비해 기온이 가장 낮으며 해발고도가 높은 백두대간 산악지역으로 기후변화가 진행되어도 연륜생장이 증가하는 고산지대의 잣나무(Chung et al., 2015)와 한라산의 구상나무(Koo et al., 2001)와 유사한 경향을 보였다. 연륜생장 감소 경향을 보인 군집 2와 군집 3은 군집 1과 군집 4에 비해 기온이 높은 지역이고 가장 많은 연륜생장량 감소 경향을 보인 군집 2는 다른 3개 군집과 비교하여 강수량이 가장 많은 지역이다. 따라서 기후변화에 따른 기온 상승과 강수량 변화의 영향이 빠르게 나타나는 것을 소나무의 연륜생장 감소 경향을 통해 군집 2와 군집 3에서 볼 수 있었고 RCP 8.5 시나리오에서 보다 큰 변화를 보이는 것으로 나타났다(Tabel 10).

일본잎갈나무의 2011~2100년까지의 연륜생장변화 예측은 Figure 4와 같다. 백두대간 산악지역에 위치한 군집 1은 연평균 기온과 월평균 최저기온이 가장 낮은 지역으로 다른 군집에 비해 연륜생장은 상대적으로 좋지만 한대수종인 일본잎갈나무의 특성으로 기후변화에 민감하게 반응하여 연륜생장의 변화 주기가 상대적으로 크게 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서는 기후변화가 진행됨에 따라 2050년대 이후에는 연륜생장이 감소하는 것으로 나타났다. 중부내륙지역에 위치한 군집 2는 다른 군집에 비해 기온이 가장 높은 지역으로 군집 1에 비해 변화폭은 작지만 기후변화가 진행됨에 따른 연륜생장 감소 경향이 지속적으로 나타났다. 동부해안 지역인 군집 3은 연륜생장 경향은 감소 없이 지속되는 것으로 나타났다. 하지만 RCP 8.5에서 RCP 4.5보다 연륜생장량과 연륜생장 변동폭이 큰 것으로 나타났고 이러한 결과는 기후변화에 따른 동해안 해류와 해양성 기후의 변화 등 지리적 위치에 따른 영향으로 판단된다. 군집 4는 가장 낮은 위도에 위치하고 있지만 해발고가 높은 지역으로 기후변화에 의한 영향이 다른 군집에 비해 적은 것으로 판단된다. RCP 4.5와 RCP 8.5 모두에서 시간이 경과해도 연륜생장 변동 없이 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다(Table 11).

Table 10. Annual temperature and precipitation during 1978~2010 in cluster of *Pinus densiflora*.

Cluster	Annual mean temperature (℃)	Annual precipitation (mm)	Maximum monthly temperature (℃)	Minimum monthly temperature (℃)
1	9.6	1,111.3	21.9	-4.7
2	9.7	1,253.9	23.4	-6.8
3	11.6	1,069.7	23.8	-2.4
4	7.6	1,185.8	21.2	-8.9

Cluster information refers to Figure 1.

Table 11. Annual temperature and precipitation during 1978～2010 in cluster of *Larix kaempferi*.

Cluster	Annual mean temperature (℃)	Annual precipitation (mm)	Maximum monthly temperature (℃)	Minimum monthly temperature (℃)
1	7.4	1,211.5	21.0	-9.2
2	9.6	1,258.7	23.2	-7.0
3	7.5	1,412.1	20.3	-7.9
4	8.2	1,129.4	21.4	-7.3

Cluster information refers to Figure 2.

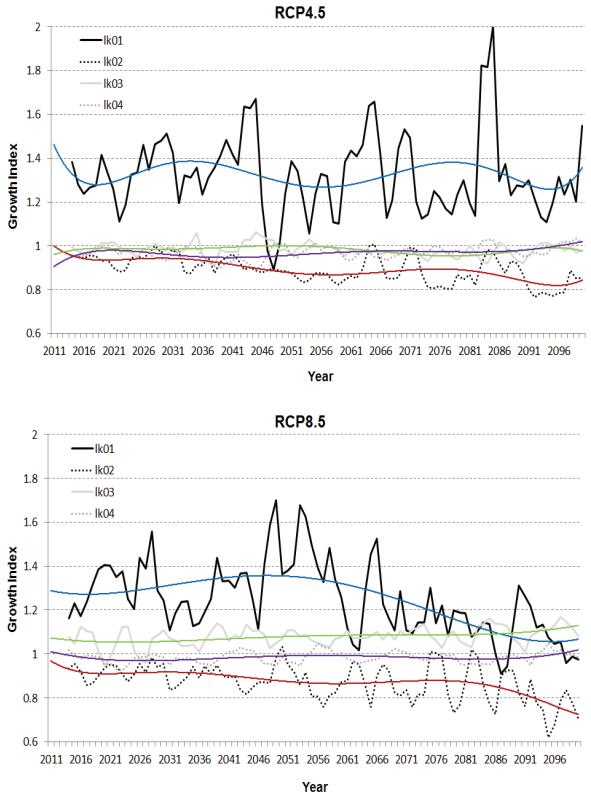

Figure 4. Predicted radial growth index of *Larix kaempferi* according to RCP 4.5 and RCP 8.5. (Information of Clusters 1, 2, 3 and 4 is on Figure 2.)

이와 같은 결과는 현재 우리나라의 넓은 면적에 분포하고 있는 소나무와 잣나무가 기후변화가 진행됨에 따라 점차 강원도 산악지역과 일부 해발고도가 높은 지역으로 분포지역이 축소될 것이라는 연구보고와도 연관성이 있는 것을 알 수 있다(Chun, 2012).

결 론

본 연구는 소나무와 일본잎갈나무를 대상으로 연륜생장과 기후요소와의 관계를 규명하고 생장모델을 개발하여 기후 요소에 의한 연륜생장의 변화를 예측하기 위해 시행되었다. 생장모델에는 수종별·기후군집별로 각각 2～5개의 기후변수가 사용되었고 연륜생장 추정에 사용가능한 것으로 판단되었다. 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 이용한 한반도 기후변화 추정치와 개발된 생장모델을 이용하여 소나무와 일본잎갈나무의 연륜생장 변화를 예측한 결과, 수종별, 기후군집별, 기후변화 시나리오별 다양한 연륜생장 변화 경향을 나타내었다. 일반적으로 해발고가 높고 기온이 낮은 지역에서는 현재의 연륜생장이 유지되거나 좋아지는 경향이 나타났고 현재 기온이 상대적으로 높거나 기후변화가 진행됨에 따라 기후변화가 빠르게 나타날 것으로 추정되는 지역에서는 연륜생장의 감소 경향이 확연히 나타났다. 또한 기후변화 정도가 큰 RCP 8.5에서는 연륜생장 변화 경향도 빠르고 크게 나타났다. 기후변화와 생장 같은 현상은 수많은 요소들이 상호작용한 결과로 하나의 수식으로 설명하고 예측할 수 는 없는 불확실성을 내재하고 있다. 따라서 기후변화의 영향이 가시화되고 있는 현실에서 기후변화에 따른 구체적인 대응책 마련을 위해서는 장기적인 모니터링과 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 국립산림과학원의 지원을 통해 이루어진 연구 결과입니다. RCP 기후변화 시나리오에 따른 한반도 기후변화 자료는 기후변화정보센터에서 제공받았습니다. 지원에 감사드립니다.

References

Arabatzis, A.A. and Burkhart, H.E. 1992. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relation-ships in loblloly pine plantations. Forest Science 38(1): 192-198.

Box, G.E.P., Jenkins, G.M. and Reinsel, G.C. 1994. Time series analysis - forecasting and control. Prentice Hall, Englewood Cliffs. New Jersey, U.S.A. pp. 297.

Cha, G.S. 1998. Estimation of changes in potential forest area under climate change. Journal of Korean Forest Society 87(3): 358-365.

Chun, J.H. 2012. Assessing the Effects of Climate Change on the Geographic Distribution of Major Tree Species in Korea using Ecological Niche Model. Kookmin University. Seoul, Korea. pp. 190.

Chung, J.M., Kim, H.S., Lee, S.T., Lee, K.J., Kim, M.S. and Chun, Y.W. 2015. Correlation analysis and growth prediction between climatic elements and radial growth for *Pinus koraiensis*. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 17(2): 85-92.

Cook, E.R. and Holmes, R.L. 1986. Users Manual for program ASTAN. University of Arizona. Arizona, U.S.A. pp. 182.

Cook, E.R. and Kairiukstis, L.A. 1990. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands. pp. 394.

Fritts, H.C. 1976. Tree Rings and Climate. Academic Press. New York, U.S.A. pp. 567.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. IPCC Fourth Assessment Report. Geneva, Switzerland. pp. 104.

Kim, J.U. and Kil, B.S. 1996. Estimation for changes of net primary productivity and potential natural vegetation in the Korean peninsula by the global warming. Journal of Ecology and Environment 19(1): 1-7.

Koo, K.A., Park, W.K. and Kong, W.S. 2001. Dendrochronological analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea: Effects of climate change on the growths. Jounal of Ecology and Environment 24(5): 281-288.

Korea Meteorological Administration. 2011. Case studies to understand and take advantage of climate change scenarios. Korea Meteorological Administration. Seoul, Korea. pp. 44.

Laroque, C.P. and Smith, D.J. 2005. Predicted short-term radial-growth changes of trees based on past climate on Vancouber Island, British Columbia. Dendrochronologia 22: 163-168.

Louis, De Grandpré, Tardif, J.C., Hessl, A., Pederson, N., Conciatori, F., Green, T., Oyunsanaa, B. and Baatarbileg, N. 2011. Seasonal shift in the climate responses of *Pinus sibirica*, *Pinus sylvestris*, and *Larix sibirica* trees from semi-arid, north-centrial Mongolia. Canadian Journal of Forest Research 41(6): 1242-1255.

Seo, J.W. 1999. Spatiotemporal Analysis of Tree-Ring Variations in *Pinus densiflora* from Mt. Worak, Central Korea, Chungbuk National University Cheongju, Korea. pp. 59.

Seo, J.W., Kim, J.S. and Park, W.K. 2000. Analysis of heterogeneous tree-ring growths of *Pinus densiflora* with various topographical characterisitecs in Mt. Worak using GIS. Journal of Ecology and Environment 23(1): 25-32.

Shin, M.Y. 1990. The use of ridge regression of yield prediction models with multicollinearty problems. Journal of Korean Forest Society 79(3): 260-268.

Shin, M.Y, Yun, J.W. and Cha, D.S. 1996. Local correlation of tree volume equation for *Larix leptolepis* by ratio of means estimator. Journal of Korean Forest Society 85(1): 56-65.

Speer, J.H. 2010. Fundamentals of tree-ring research. University of Arizona Press. Arizona, U.S.A. pp. 368.

Spiecker, H. 2002. Tree rings and forest management in Europe. Dendrochronologia 20(1-2): 191-202.

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.

(Received: October 13, 2016; Accepted: February 9, 2017)