한국농림기상학회지, 제17권 제2호(2015) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 17, No. 2, (2015), pp. 85~92
DOI: 10.5532/KJAFM.2015.17.2.85
ⓒ Author(s) 2015. CC Attribution 3.0 License.

잣나무 연륜생장과 기후요소와의 상관관계 분석 및 생장예측

정준모[1]* · 김현섭[1] · 이상태[1] · 이경재[1] · 김미숙[2] · 전영우[2]
[1]국립산림과학원 산림생산기술연구소, [2]국민대학교 삼림과학대학 산림환경시스템학과
(2015년 3월 30일 접수; 2015년 4월 8일 수정; 2015년 4월 11일 수락)

Correlation Analysis and Growth Prediction between Climatic Elements and Radial Growth for *Pinus koraiensis*

Junmo Chung[1]*, Hyunseop Kim[1], Sangtae Lee[1], Kyungjae Lee[1], Meesook Kim[2] and Yongwoo Chun[2]
[1]*Forest Practice Research Center of Korea Forest Research Institute. 498, Gwangneungsumogwon-ro, Soheul-eup, Pocheon-si, Gyeonggi-do 487-821, Korea*
[2]*Department of Forestry, environment and system, Kookmin University 77, Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-702, Korea*
(Received March 30, 2015; Revised April 8, 2015; Accepted April 11, 2015)

ABSTRACT

This study was conducted to analyze the relationship among climatic factors and radial growth of *Pinus koraiensis* in South Korea. To determine climate-growth relationships, cluster analysis was applied to group climatically similar surveyed regions, and 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 dendroclimatological models were developed through climatic variables and standardized residual chronology for each climatic cluster of *P. koraiensis.* 2 to 4 climatic variables were used in the models (R^2 values between 0.35~0.49). For each of the climatic clusters for *Pinus koraiensis*, the growth simulations obtained from two RCP climate-change scenarios were used for growth prediction. The radial growth of the Clusters 2 and 3, which grow at high elevation, tend to increase. In contrast, Cluster 1, which grows at low elevation, tends to decrease with a large difference. Thus, the growth of *Pinus koraiensis*, which is a boreal species, could increase along with increasing temperature up to a certain point.

Key words*: Radial growth, Growth prediction, RCP scenario, *Pinus koraiensis

I. 서 론

지구가 생성된 이래 지구 환경변화는 계속 진행되어 왔지만 인구의 증가와 그에 따른 산업화로 최근 들어 급격한 지구 온난화를 발생시키고 있다. 지구 평균기온은 지난 100년간 0.74°C 상승했고 21세기말에는 1.8~4.0°C 상승할 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2007). 한반도에서는 지난 100년간 평균기온이 1.8°C 상승하여 지구 평균기온보다 2배가 넘는 기온상승을 보였다(Korea Meteorological Administration, 2011). 기후변화는 여러 종류의 생태계 중에서도 산림생태계에 큰 영향을 미치고 있어 식생의 분포와 생육한계선을 변화시키고 종다양성을 교란하여 산림생태계에 문제를 초래하고 있다(Kim and Kil, 1996; Cha, 1998). 최근

* Corresponding Author : Junmo Chung (zunmo@korea.kr)

Table 1. General descriptions of surveyed region for *Pinus koraiensis* stands

Region	No. of plot	No. of core	Altitude (m)	Slope (°)	Mean DBH (cm)	Mean Height (m)	Age
Gapyeong	5	18	226~646	5~29	34.5~54.3	16.9~24.0	33~74
Gwangneung	8	104	125~665	11~35	24.8~49.9	15.5~27.1	32~80
Namwon	3	39	830~980	16~35	20.0~35.7	14.9~19.7	33~48
Sancheong	3	23	777~887	16~35	26.2~44.3	15.4~23.1	61~71
Chuncheon	4	12	260~520	5~32	32.4~49.4	17.2~22.9	34~68
Hongcheon	5	45	277~555	10~27	24.5~51.3	22.6~30.0	32~76
Mt. Seorak	4	18	1200~1600	15~35	15.4~31.5	12.1~26.3	46~212
Mt. Odae	5	24	1256~1323	20~41	15.5~51.1	9.1~14.3	33~240

에는 기후변화 속도가 과거에 비해 더욱 가속되고 있어 전세계적으로 기후변화의 대응방안 마련이 중요한 관심사가 되고 있다. 이 같은 시류에 따라 우리나라에서도 기후변화에 대한 산림 분야에서의 대응방안 마련과 새로운 산림경영계획 수립을 추진하고 있다. 이를 위해서 기후와 임목생장과의 관계규명에 대한 연구의 필요성도 증대되고 있지만 지금까지 국내에서 이루어진 연구는 연륜을 이용한 고기후 복원과 과거 유물을 대상으로 한 연구가 대부분이었고 연구대상과 연구지역도 극히 제한적이었다. 최근 들어 기후변화가 산림과 임목에 미치는 영향과 그에 따른 변화를 구명하기 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있지만 기후와 임목간의 상관관계를 보다 정확히 분석할 수 있는 생태학적 측면에서의 연륜연대학 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 한반도의 주요 산림자원이며 대표적인 한대수종으로 기후변화에 따른 영향이 크게 나타날 것으로 예상되는 잣나무(*Pinus koraiensis*)를 대상으로 기후요소와 연륜생장과의 관계를 구명과 연륜기후학적 모델을 개발하고 RCP 기후변화 시나리오로 기후변화에 따른 잣나무의 연륜생장 변화를 예측하여 향후 지속될 기후변화에 따른 효과적인 대응책을 마련하기 위해 시행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

연구대상지는 제4차 국가산림자원조사의 잣나무 분포지역 중 잣나무의 임목축적량이 많고 분포면적이 넓은 지역을 대상으로 생장상태를 고려하여 잣나무가 우세목과 준우세목으로 분포하는 곳에서 선정하였다. 조사지역은 강원도 춘천, 홍천, 설악산, 오대산, 경기도 가평, 광릉, 전라북도 남원, 경상남도 산청 등 8개 지역으로 조사지 개황은 Table 1과 같다. 표준지는 37개소를 조사하였고 채취한 연륜시료 중 이용 가능한 283개를 분석하였다.

2.2. 연구 방법

2.2.1. 연륜측정 및 기초통계 분석

연륜시료는 압축이상재에 의한 변이를 제거하기 위하여 경사와 수직방향으로 지상으로부터 1.2m 높이에서 채취하였다(Fritts, 1976). 채취된 연륜은 건조시킨 후 연마하여 연륜측정분석기(Digital Tree System DTRS-2000)를 이용하여 1/100mm 단위까지 측정하였다. 측정된 연륜은 크로스데이팅(Crossdating)을 실시하여 각 연륜에 정확한 연도를 부여하였다(Fritts and Swetnam, 1989). 크로스데이팅은 COFECHA 프로그램(Holmes, 1983)을 이용하여 통계적으로 재확인하였다. 측정된 연륜은 수령에 따른 생물학적 생장추세, 경쟁과 교란에 의한 변동추세와 비기후인자에 의한 저주파변동을 제거하기 위하여 이중표준화법을 사용하여 표준화를 실시하였다. 1차로 음지수곡선으로 수령에 따른 생물학적 생장추세를 제거하고, 2차로 스플라인곡선(50%, 반응주기: 60년)으로 임분 경쟁과 교란에 따른 변동추세를 재표준화하였다(Fritts, 1976; Cook and Kairiukstis, 1990; Seo, 1999). 표준화된 연대기는 자기상관을 제거하기 위하여 ARSTAN 프로그램(Cook, 1985)을 사용하여 자기상관을 제거한 잔차연대기(residual chronology)를 작성하였다(Cook and Holmes, 1986; Speer, 2010). 연륜연대기의 기초통계자료는 평균, 연속된 두 연륜폭간 변이 크기를 나타내는 평균민감도(Mean Sensitivity), 전년도의 환경이 얼마나 수목의 생장에 영향을 주는가를 나타내는 자기상관계수

(Auto-correlation), 임목내와 임목간의 차이를 나타내는 상호상관계수(Correlation coefficient), 연대기의 기간별 신호강도를 나타내는 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio), 모집단에 대한 지역연대기의 신호강도를 나타내는 모수신호설명(Expressed Population Signal)을 산출하였다(Fritts, 1976; Wigley *et al*., 1984; Cook and Kairiukstis, 1990; Seo, 1999).

2.2.2. 기후자료

연륜연대학 연구에 있어서 기후자료는 개별 측후소의 자료보다 측후소가 없는 지역까지 연구범위를 확장할 수 있고 신뢰성이 높은 지역평균값을 사용한다(Fritts, 1976). 본 연구는 당년의 원기가 형성되는 전년도 8월부터 금년도 9월까지 14개월의 월평균기온, 월강수량과 이 기간을 생장기와 비생장기로 구분한 34개 기후변수의 시군 단위 지역평균값을 사용하였다(Table 2). 시군 단위의 월평균기온과 월강수량은 기상청에서 래스터형 데이터로 제공한 전국의 일별 기온과 강수량을 GIS프로그램 ArcGIS 10.1과 통계프로그램 R 3.0.1을 이용하여 계산하였다.

2.2.3. 기후군집 분석

잣나무 조사지역을 기후 특성을 바탕으로 상호 유사성이 높은 몇 개의 군집으로 분류하여 각 군집내의 동질성과 군집간의 이질성을 알아보기 위하여 군집분석(Cluster analysis)을 실시하였다. 권역분류는 각 조사지역의 월평균기온과 월강수량을 유클리디안 거리(Euclidean distance)로 환산하여 분류하였다. 본 연구에서는 미래의 연륜생장 변화를 예측하기 위하여 군집분석을 통해 분류한 기후군집별 연륜연대기를 이용하였다.

2.2.4. 연륜기후학적 모델 개발

기후와 연륜생장과의 상관 분석을 실시하여 기후변화에 따른 연륜생장 예측을 위하여 연륜기후학적 모델을 개발하였다. 연륜기후학적 모델은 기후변수를 독립변수로 사용하여 단계적 회귀(Stepwise regression)분석으로 기후-연륜생장 관계식을 작성하였다(Fritts and Xiangding, 1986). 기후변수들 사이에 존재하는 다중공선성은 분산팽창계수(VIF)를 사용하여 제거하고 검증하였다. 생장지수 추정식은 추정식 작성에 사용되지 않은 기간의 연륜연대기를 이용하여 그 적합성을 검증하였다. 적합성 검증을 위한 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; Shin *et al*., 1996).

2.2.5. 기후변화에 따른 연륜생장 예측

기후변화에 따른 잣나무 연륜생장 변화를 본 연구의

Table 2. Climatic variables

Var.	Description	Var.	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

기후-연륜생장 관계식과 RCP 기후변화 시나리오를 이용하여 예측하였다. 연륜생장 변화 예측에 사용한 기후자료는 기상청 기후변화정보센터의 한반도 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 2011년부터 2100년까지의 기후변화 시나리오 별 월평균기온과 월강수량을 군집분석으로 분류한 기후군집에 맞추어 산출하였고, 산출한 기온과 강수량 추정치를 연륜기후학적 모델 개발을 통해 얻어진 잣나무의 기후군집 별 생장 추정식에 적용하여 연륜생장 변화를 예측하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 잣나무 연륜생장 기초 통계량

각 지역에서 채취한 잣나무 표준목의 평균 연륜생장량은 1.43~4.52mm으로 잣나무 인공림에 비해 설악산과 오대산 천연림의 연륜생장이 저조하였다(Table 3). 평균민감도는 0.184~0.625로 지역간 편차가 크게 나타났으며, 자기상관계수는 -0.062~0.099로 자기상관이 적음을 알 수 있다(Box *et al*., 1994)(Table 3).

잣나무 조사 대상지의 지역별 임목내 상관계수는 0.444~0.732의 범위로 추정되었으며 설악산지역이 0.732로 가장 높았고 산청지역이 0.444로 가장 낮은 것으로 분석되었다. 임목간 상관계수는 0.190~0.458로 가평지역이 가장 높은 것으로 분석되었다. 설악산 지역의 경우 Choi *et al.*(1992)의 연구에서는 임목내 상관계수가 0.664로 보고되어 본 연구의 결과가 높았으나 임목간 상관계수는 0.252로 추정하여 본 연구의 결과와 유사하였다. 한편 지역별 SNR은 가평지역이 13.520으로 가장 높았고 춘천지역은 2.802로 가장 낮은 신호강도를 보였다. EPS는 잣나무 조사 대상지 지역 전체 평균이 0.867로 연대기 분석에 이용 가능한 것으로 나타났다(Table 4).

Table 4. Summary characteristics of correlation analysis, SNR and EPS of *Pinus koraiensis* for each region

Region	Correlation coefficient		SNR	EPS
	Within tree(r_{wi})	Between tree(r_{bi})		
Gapyeong	0.640	0.458	13.520	0.934
Gwangneung	0.536	0.236	8.031	0.937
Namwon	0.463	0.244	8.714	0.912
Sancheong	0.444	0.237	4.659	0.853
Chuncheon	0.559	0.203	2.802	0.742
Hongcheon	0.662	0.227	9.103	0.906
Mt. Seorak	0.732	0.204	4.101	0.808
Mt. Odae	0.689	0.190	5.160	0.840
Mean	0.591	0.250	7.010	0.867

SNR : Signal to noise ratio
EPS : expressed population signal

3.2. 잣나무 기후군집 분석

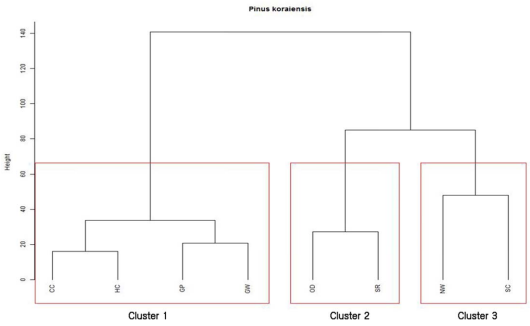
잣나무 조사지 8개 지역의 기후 특성을 알아보기 위해 유클리디안 거리지수를 이용한 군집분석을 실시한 결과 3개의 기후군집으로 분류되었다(Fig. 1). 군집 1은 춘천, 홍천, 가평, 그리고 광릉 등 중부내륙지역, 군집 2는 오대산과 설악산의 백두대간 산악지역, 그리고 마지막으로 군집 3은 남원과 산청의 남부내륙지역으로 분류되었다.

3.3. 군집별 연륜생장 예측모델의 개발

Table 5는 Table 2에 제시한 34개의 기후변수들 중에서 잣나무의 기후군집별 지표연대기에 의해 도출한 생장지수의 예측에 적합한 독립변수의 조합을 단계

Table 3. Summary statistics of the index chronology for each region

Region	Span	Mean tree-ring growth (mm)	SD	Mean Sensitivity	1st auto-correlation
Gapyeong	1934-2007	4.43	2.42	0.610	0.099
Gwangneung	1924-2010	2.77	1.37	0.346	-0.021
Namwon	1963-2008	3.60	1.95	0.398	-0.062
Sancheong	1939-2008	3.05	1.72	0.376	0.079
Chuncheon	1962-2008	4.52	1.67	0.625	-0.005
Hongcheon	1938-2009	3.20	1.74	0.360	0.041
Mt. Seorak	1797-2008	2.04	1.17	0.192	-0.047
Mt. Odae	1778-2009	1.43	0.66	0.184	0.001



CC: Chuncheon, HC: Hongcheon, GP: Gapyeong, GW: Gwangneung,
OD: Odaesan, SR: Seoraksan, NW: Namwon, SC: Sancheong

Fig. 1. Dendrogram of each region by cluster analysis.

적 회귀분석을 이용해 개발한 생장지수 추정식이다.

잣나무의 3개 군집을 대상으로 개발한 생장지수 추정식에는 2~4개의 월평균기온 및 월강수량 독립변수가 사용되었으며, 결정계수는 0.35~0.49로 나타났다. Laroque and Smith(2005)가 캐나다 뱅쿠버섬에서 *Tsuga mertensiana, Chamaecyparis nootkatensis, Thuja plicata, Pseudotsuga menziesii*, 그리고 *Tsuga heterophylla*를 대상으로 한 연륜생장 모형의 결정계수 0.55~0.68이나 Seo(1999)의 월악산 소나무 반응함수 분석의 결정계수 0.528~0.569, Koo *et al*.(2001)의 한라산 구상나무 연구에서의 결정계수 0.54와 0.71에 비해 결정계수가 유사하거나 낮게 나타났지만 다양한 생물학적, 비생물학적 인자가 연륜생장에 관여하는 사실을 감안하면 모형의 추정능력은 문제가 없을 것으로 판단된다.

Table 6은 잣나무 군집별 생장지수 추정식의 적합성 검정 결과로 각 추정식의 평균편의(MD)는 -0.0300~0.0315으로 상당히 낮은 평균편의를 보이고 모형의 정도(SDD)와 모형의 표준오차(SED)도 비교적 작은 값을 보여 본 연구에서 개발한 생장지수 추정식을 사용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

3.4. 기후변화에 따른 잣나무 연륜생장 예측

기후군집 별 잣나무 생장지수 추정식에 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5의기후추정치를 대입하여 2011년부터 2100년까지의 잣나무 연륜생장변화 예측은 Fig. 2와 같다. 중부내륙지역인 군집 1의 경우 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 모두 2100년까지 생장이 지속적으로 감소하였다. 특히 RCP 8.5에서는 2050년까지는 생장이 서서히 감소하다가 그 이후에는 급격히 감소하여 2100년에는 2010년보다 생장률이 29.6% 감소하는 것으로 예측되었다. 군집 2와 군집 3에서는 기후변화에 따라 생장이 2100년까지 지속적으로 증가하는 것으로 예측되었다. 군집 2에서는 RCP 4.5에서 7.9%, RCP 8.5에서 13.1% 생장률이 증가하였다. 군집 3은 RCP 4.5에서 14.7% 증가하였고 RCP 8.5에서 2100년에 생장률이 22.4% 증가하여 최대생장률 증가를 보였다(Table 6). 기후군집별 잣나무 연륜생장 예측결과 기후변화가 진행됨에 따라 군집 1은 연륜생장이 감소하는 경향을 보였으나 군집 2와 군집 3은 연륜생장이 증가하는 것으로 예측되었다. 기후변화 시나리오에 따

Table 5. Regression prediction equations of growth index

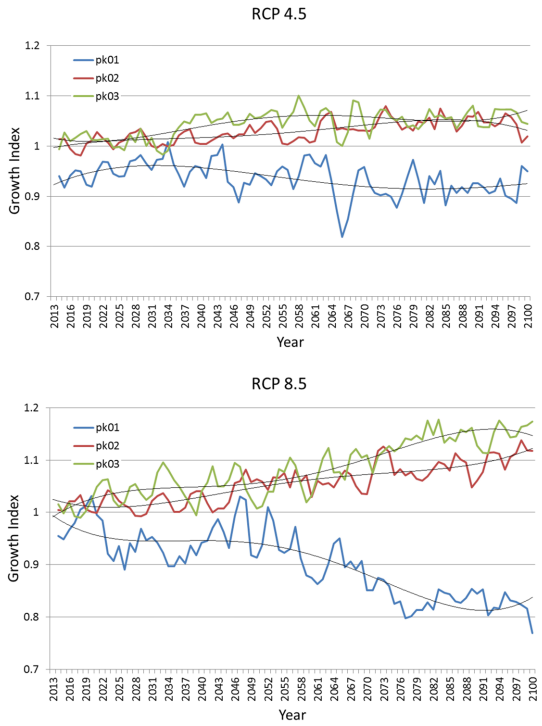
Species	Cluster*	No.	Regression prediction equations	R^2
Pinus koraiensis	1	33	GI=1.4132–0.0285 · C10–0.0007 · C25+0.0005 · C30	0.49
	2	32	GI=0.8256+0.0101 · C4+0.0075 · C10+0.0009 · C23+0.0002 · C26	0.35
	3	31	GI=0.6320+0.0368 · C9-0.0004 · C19	0.38

*Cluster information refers to Fig. 1.
Climatic variables information refers to Table 2.

Table 6. Verification result of regression prediction equations

Species	Cluster*	No.	Year	MD	SDD	SED
Pinus koraiensis	1	27	1951~1977	-0.0134	0.1018	0.1026
	2	27	1951~1977	-0.0300	0.0707	0.0768
	3	27	1951~1977	0.0315	0.0969	0.1019

MD : Mean Difference
SDD : Standard Deviation of Difference
SED : Standard Error of Difference
*Cluster information refers to Fig. 1.



Pk1: Climatic cluster1, Pk2: Climatic cluster2, Pk3: Climatic cluster3

Fig. 2. Rate of change growth index of Pinus koraiensis according to RCP 4.5 and RCP 8.5.

른 연륜생장 변화도 생장과 감소에서 모두 RCP 4.5에 비해 RCP 8.5에서 큰 변화를 보였다.

기후변화로 한반도의 기온이 상승하면 고산지대 및 한랭한 기후를 선호하는 한대수종인 잣나무는 생육지의 기온 상승에 따른 온도 스트레스로 부정적인 영향을 받을 것으로 예상되고 있다. 하지만 본 연구에서는 군집 1은 기후변화가 진행됨에 따라 연륜생장이 지속적으로 감소하여 부정적인 생장 경향을 보였지만 군집 2와 군집 3에서는 2100년까지 현재보다 연륜생장이 증가하는 것으로 예측되어 잣나무 분포지역에 따라 상반된 결과가 나타났다. 기후군집별 잣나무 생장지수 추정식에 사용된 기후변수의 기후값은 Table 8과 같다. 생장이 왕성한 시기인 4~5월의 기온변화를 보면 군락 1의 경우 5월의 평균기온은 현재 15.8°C에서 2100년에는 RCP 4.5는 18.1°C, RCP 8.5는 21.1°C로 상승하였다. 군락 2의 5월의 평균기온은 현재 13.2°C에서 RCP 4.5는 15.5°C, RCP 8.5는 18.3°C로 상승하고 남쪽 지역에 위치하여 생장이 일찍 시작되는 군락 3의 4월 평균기온은 현재 10.4°C에서 RCP 4.5는 12.8°C로 RCP 8.5는 15.9°C로 나타났다. 기후변화에 따라 모든 군락에서 생장기 4월과 5월의 평균 기온이 상승하였지만 연륜생장이 증가하는 것으로 예측된 군락 2와 군락 3은 현재의 평균기온과 2100년까지의 기후 추정치 모두 연륜생장이 감소하는 것으로 나타난 군락 1에 비하여 낮게 나타났다. 월강수량은 기온과 다르게 경년·공간 변동성이 크고 상대적으로 증가 추세는 약하게 나타나 기온과 비교해 연륜생장에 미치는 영향이 작은 것으로 사료된다.

이러한 결과로 군집 2와 군집 3의 경우 설악산과 오대산, 그리고 지리산 지역으로 해발고도가 높으며 현재의 평균기온 또한 해발고도가 낮은 지역에 비해 상대적으로 낮기 때문에 일정 범위까지의 기온상승은 오히려 연륜생장에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 유추된다. 반면에 경기 북부와 강원 지역인 군집 1의 연륜생장 감소는 군집 2와 군집 3에 비해 상대적으로 해발고도가 낮은 지역에 위치하고 있어 기후변화의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. Chun(2012)이 보고한 기후변화에 따른 주요 산림수종의 분포변화 연구에서도 잣나무는 기후변화가 진행됨에 따라 분포지역이 강원도 산악지역과 지리산 부근으로 축소되고 이후에는 강원도 고산지대로 잔존지역이 좁아진다고

Table 7. Rate of change growth index of *Pinus koraiensis* according to RCP scenarios

Tree species	Cluster*	RCP scenarios	Change rate of Growth index(%)			
			2020	2050	2070	2100
Pinus koraiensis	1	4.5	-5.7	-4.0	-8.5	-11.6
		8.5	+8.3	+0.2	-18.3	-29.6
	2	4.5	+0.6	+2.3	+4.0	+7.9
		8.5	0.0	+2.8	+5.4	+13.1
	3	4.5	+0.9	+7.1	+1.2	+14.7
		8.5	+5.7	+4.4	+16.1	+22.4

*Cluster information refers to Fig. 1

Table 8. Climate Normal data and Predicted data of Climatic variables in Regression prediction equations of growth index

RCP scenarios	Cluster*	Climatic variables	Year				
			Current	2020	2050	2070	2100
4.5	1	C10(Current Temp. May)	15.8	17.8	18.5	18.0	18.1
		C25(Current Prec. Mar.)	63.7	65.8	58.8	53.4	56.7
		C30(Current Prec. Aug.)	171.2	117.0	199.8	188.6	185.1
	2	C4(Prior Temp. Nov.)	1.6	1.5	3.4	3.1	4.1
		C10(Current Temp. May)	13.2	15.1	15.9	15.6	15.5
		C23(Current Prec. Jan.)	27.1	32.6	24.3	39.6	21.4
		C26(Current Prec. Apr.)	128.3	139.7	127.6	105.5	88.2
	3	C9(Current Temp. Apr.)	10.4	11.0	12.2	12.2	12.8
		C19(Prior Prec. Sep.)	108.7	62.3	57.6	93.8	148.1
8.5	1	C10(Current Temp. May)	15.8	16.3	18.9	19.7	21.1
		C25(Current Prec. Mar.)	63.7	57.4	67.9	60.1	122.8
		C30(Current Prec. Aug.)	171.2	244.4	170.5	80.2	83.4
	2	C4(Prior Temp. Nov.)	1.6	2.1	5.7	5.3	8.9
		C10(Current Temp. May)	13.2	14.2	16.3	17.2	18.3
		C23(Current Prec. Jan.)	27.1	29.9	46.5	8.5	59.4
		C26(Current Prec. Apr.)	128.3	98.1	127.4	83.8	122.3
	3	C9(Current Temp. Apr.)	10.4	11.2	11.6	14.4	15.9
		C19(Prior Prec. Sep.)	108.7	33.2	91.4	195.2	93.6

*Cluster information refers to Fig. 1

예측되어 본 연구의 결과와 유사성을 보이고 있다. 전나무속(*Abies*) 한대 수종인 구상나무는 기후변화에 적응하지 못하고 생장쇠퇴를 보고되고 있으나 한라산 구상나무의 기후변화에 따른 생장 예측 연구에서 연간 기온이 2°C와 4°C 상승했을 때 연륜생장이 증가하는 것으로 나타났다(Koo *et al.*, 2001). 이러한 결과들로 보아 수목의 생장에는 다양한 요소들이 연관되지만 해발고도가 높은 지역에서 기후변화에 의한 일정범위의 기온상승은 한대수종의 연륜생장을 촉진시킬 수 있는 것으로 판단된다. 잣나무는 현재 분포지역이 넓고 대부분의 지역에서 양호한 생장상태를 유지하고 있지만 기후변화가 진행됨에 따라 상당한 생장변화가 뒤따를 것으로 예측되었다. 따라서 추후 기후변화에 따른 보다 구체적인 대응책 마련을 위해서는 연륜기후학과 연륜생태학적 연구를 통한 수종별, 지역별 기후와 연륜생장과의 관계 구명이 필요하다고 사료된다. 또한 기후변화의 영향이 가시화되고 있는 현실에서 임목의 생장예측은 산림경영과 시업에 있어 의사결정을 위해 필수적으로 요구되는 기본자료 중 하나로 그 활용가치가 매우 높다. 하지만 수많은 요소들이 상호작용한 결과인 기후나 생장과 같은 현상은 하나의 수식으로 완벽하게 표현되지 않아 미래를 항상 예측할 수는 없다는 어려움을 가지고 있어 정기적이고 장기적인 모니터링과 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다. 이와 같은 이유로 본 연구는 기후변화에 대응하기 위한 산림경영 목표의 수립과 관리 방법의 개선에 필요한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

V. 적 요

본 연구는 잣나무를 대상으로 연륜생장과 기후와의 관계를 구명하기 위해 군집분석을 통해 기후 군집을 분류하였고 기후인자에 의해 연륜생장을 예측할 수 있는 생장모델을 개발하여 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 이용하여 연륜생장의 변화를 예측하였다. 연륜기후학적 모델은 잣나무 기후군집별 기후변수와 표준화된 잔차 연대기를 이용하여 개발하였다. 개발된 생장지수 추정식에는 2~4개의 기후변수가 사용되었고 결정계수는 0.35~0.49의 범위에 있는 것으로 분석되었다. 잣나무 기후군집별 생장예측은 두 개의 RCP 기후변화 시나리오를 이용해 예측되었다. 해발고도가 높은 곳에 위치한 군집 2와 군집 3에서는 연륜

생장이 증가하였지만 대조적으로 해발고도가 낮은 지역에 위치한 군집 1에서는 연륜생장이 감소할 것으로 예측되었다. 따라서 잣나무는 한대수종이지만 일정범위내의 기온 상승 조건에서는 연륜생장이 증가하는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 논문은 국립산림과학원 리서치펠로우 지원프로그램에 의하여 수행된 연구결과의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

Arabatzis, A. A., and H. E. Burkhart, 1992: An Evaluation of Sampling Methods and Model Forms for Estimating Height-Diameter Relationship in Loblolly Pine Plantation, *Forest Science* **38**, 192-198.

Box, G. E. P., G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel, 1994: Time series analysis – forecasting and control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (USA), 297pp.

Cha, G. S., 1998: Estimation of Changes in Potential Forest Area under Climate Change, *Journal of Korean Forest Society* **87**(3), 358-365. (in Korean with English abstract)

Choi, J. N., K. B. Yu, and W. K. Park, 1992: Paleoclimate Reconstruction for Chungbu Mountainous Region Using Tree-ring Chronology, Korean journal of quaternary research **6**(1) 21-32. (in Korean with English abstract)

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), 190pp. (in Korean with English abstract)

Cook, E. R., 1985: A Time Series Analysis Approach to Tee Ring Standardization, University of Arizona, Arizona (USA), 171pp.

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

Fritts, H. C., 1976: *Tree Rings and Climate*, Academic Press, New York (USA), 567pp.

Fritts, H. C., and T. W. Swetnam, 1989: *Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments.*, Begon, M., A. H. Fitter, E. D. Ford and A. Macfadyen, (Eds), Advances in Ecological Research Vol.19, Academic Press, London, 111-188pp.

Fritts, H. C., and W. Xiangding. 1986: A comparison between response-function analysis and other regression techniques, *Tree-ring bulletin* **46**, 31-46.

Holmes, R. L. 1983: Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* **43**, 69-78.

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

Kim, J. U., and B. S. Kil, 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. (in Korean with English abstract)

Koo, K. A., W. K. Park, and W. S. Kong, 2001: Dendrochronological Analysis of Abies koreana W. at Mt. Halla, Korea: Effects of Climate Change on the Growths, *Journal of Ecology and Environment* **24**(5), 281-288. (in Korean with English abstract)

Korea Meteorological Administration, 2011: *Case studies to understand and take advantage of climate change scenarios*, Korea Meteorological Administration, 39pp. (in Korean)

Laroque, C. P., and D. J. Smith, 2005: Predicted short-term radial-growth changes of trees based on past climate on Vancouber Island, British Columbia. *Dendrochronologia* **22**(3), 163-168.

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

Shin, M. Y., 1990: The Use of Ridge Regression for Yield Prediction Models with Multicollinearity Problems, *Journal of Korean Forest Society* **79**(3), 260-268.

Shin, M. Y., J. W. Yun, and D. S. Cha, 1996: Local Correction of Tree Volume Equation for *Larix leptoloepis* by Ratio-of Means Estimator, *Journal of Korean Forest Society* **85**(1), 56-65. (in Korean with English abstract)

Speer, J. H., 2010: *Fundamentals of tree-ring research,* University of Arizona Press, Arizona (USA), 368pp.

Wigley, T. M. L., K. R. Briffa, and P. D. Jones, 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.