J. Korean For. Soc. Vol. 105, No. 1, pp. 122~131 (2016)
http://dx.doi.org/10.14578/jkfs.2016.105.1.122

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

기후인자가 일본잎갈나무의 연륜생장에 미치는 영향 분석

임종환[1] · 성주한[2] · 천정화[3] · 신만용[4]*
[1]국립산림과학원 기후변화센터, [2]국립산림과학원 산림생산기술연구소,
[3]국립산림과학원 산림생태연구과, [4]국민대학교 산림환경시스템학과

Effect of Climate Factors on Tree-Ring Growth of *Larix leptolepis* Distributed in Korea

Jong Hwan Lim[1], Joo Han Sung[2], Jung Hwa Chun[3] and Man Yong Shin[4]*
[1]Center for Forest and Climate Change, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea
[2]Forest Practice Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea
[3]Division of Forest Ecology, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea
[4]Department of Forest, Environment, and System, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

요 약: 본 연구는 연륜기후학적 방법에 의해 기후인자가 우리나라에 분포하는 일본잎갈나무의 연륜생장에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행하였다. 본 연구에서는 먼저 일본잎갈나무의 연도별 생장특성을 분석하기 위해 제5차 국가산림자원자료에서 수집된 일본잎갈나무의 연륜생장 자료를 정리하였다. 한편 일본잎갈나무의 연륜생장과 기후변수와의 관계를 구명하기 위해 1950년부터 2010년까지 정리된 월평균 기온과 월강수량 자료를 시군단위로 정리하였다. 기후조건의 유사성에 근거하여 일본잎갈나무의 시군별 연륜생장 자료를 군집분석한 결과 6 개의 기후 군집으로 구분할 수 있었다. 이와 함께 연륜생장 자료에 대한 크로스데이팅과 표준화 절차를 통해 각 군집별 지표연대기를 제작하였다. 각 군집별 지표연대기의 적합성은 연륜생장의 평균민감도, 자기상관계수, 신호 대 잡음비, 신호강도와 같은 기초통계량 분석을 통해 점검하였다. 최종적으로 각 군집별 일본잎갈나무의 연륜생장과 기후변수 간의 관계를 구명하기 위해 반응함수 분석을 실시하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 일본잎갈나무의 지역별 생장특성의 추정뿐만 아니라 기후변화에 따른 생장패턴의 변화 예측에 필요한 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: This study was conducted to analyze the effect of climatic variables on tree-ring growth of *Larix leptolepis* distributed in Korea by dendroclimatological method. For this, annual tree-ring growth data of *Larix leptolepis* collected by the 5th National Forest Inventory were first organized to analyze yearly growth patterns of the species. To explain the relationship between tree-ring growth of *Larix leptolepis* and climatic variables, monthly temperature and precipitation data from 1950 to 2010 were compared with tree-ring growth data for each county. When tree-ring growth data were analyzed through cluster analysis based on similarity of climatic conditions, six clusters were identified. In addition, index chronology of *Larix leptolepis* for each cluster was produced through cross-dating and standardization procedures. The adequacy of index chronologies was tested using basic statistics such as mean sensitivity, auto correlation, signal to noise ratio, and expressed population signal of annual tree-ring growth. Response function analysis was finally conducted to reveal the relationship between tree-ring growth and climatic variables for each cluster. The results of this study are expected to provide valuable information necessary for estimating local growth characteristics of *Larix leptolepis* and for predicting changes in tree growth patterns caused by climate change.

Key words: *dendrochronology, annual ring growth, climate factor, cluster analysis, response function*

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

서 론

최근 범지구적 기후환경의 급격한 변화로 인해 임업분야에서도 기후변화에 따른 대응방안의 수립이 요구되고 있는 실정이다. 임목의 연륜생장은 생장기의 기후 및 환경변화와 밀접한 관련이 있어 기후변화에 대한 정확한 정보를 제공한다(Choi et al., 1992; Lee, 1993). 임목의 연륜생장이 일정 부분 환경요인에 의해 결정되는 것을 고려하면 기후인자가 연륜생장에 미치는 영향이 어느 정도인지를 구명하는 것은 임목생장과 환경요인 사이의 상호관계를 이해하는데 필요한 과정이다. 특히 기후변화를 포함한 환경변화에 따른 산림생태계의 구조적・기능적 변화를 이해하기 위해서는, 산림생태계의 주요 구성요소인 임목생장과 기후인자 간의 연관성에 대한 이해가 필요하다(Korea Forest Research Institute, 2014).

따라서 기후변화가 산림에 미치는 영향을 파악하고 적절한 대응전략을 수립하기 위해서는 주요 분포수종에 대한 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하는 작업이 선행되어야 한다. 일본잎갈나무는 우리나라를 대표하는 조림 수종으로 산림자원으로서의 비중과 가치, 그리고 활용도가 매우 높아 특별히 관리되고 있는 수종이다(Korea Forest Service, 1992). 특히 이 수종은 기후변화의 영향으로 피해를 입을 가능성이 높은 기후변화 취약 산림식물종 100종에 포함되어 있어 기후인자가 연륜생장에 미치는 영향을 구명하고 대책을 마련할 필요가 있다.

그동안 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔는데, 외국의 경우 Parish et al.(1999)은 캐나다의 아고산대 산림에서 가문비나무(*Picea engelmannii*)와 전나무(*Abies lasiocarpa*)를 대상으로 임목생장에 대한 교란 및 기후의 영향을 구명하기 위해 화분분석 및 기후변이의 분석을 통해 연륜패턴을 분석한 바 있다. 한편 Albert and Schmidt(2010)는 노르웨이 가문비나무와 너도밤나무를 대상으로 토양과 기후 변화모델을 이용한 도출한 과거 및 미래 기후변수를 사용하여 해당 임지에서의 생장 변화를 평가하였다. 우리나라의 경우 고대 유물에서 채취한 연륜생장 정보를 이용하여 고기후 복원과 관련된 연구를 수행한 바 있다(Park et al., 2001; Son et al., 2011). 최근 들어 기후변화가 산림과 임목에 미치는 영향과 그에 따른 변화를 구명하기 위해 다양한 수종과 광범위한 지역을 대상으로 연구가 수행되었지만, 연륜생장과 기후인자 간의 관계를 분석하는 연구는 양적으로나 질적으로 부족한 실정이다. 특히 연륜기후학적 기법을 적용하여 우리나라에서 수행된 연륜생장과 기후인자와의 관계분석 연구(Koo et al., 2001; Shin, 2006; Lee et al., 2008; Park et al., 2010; Seo and Park, 2010)는 주로 특정 지역에서 측정한 소규모 자료에 근거한 결과로, 기후변화와 연륜생장의 관계를 명확히 규명하는데 한계가 있었던 것이 사실이다.

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, 2012). 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 우리나라에 분포하는 주요 수종의 하나인 일본잎갈나무를 대상으로 기후인자가 연륜생장에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행되었다. 이를 위해 일본잎갈나무 분포지역의 기후특성을 반영한 군집분석을 실시한 후, 제5차 국가산림자원조사를 통해 수집한 목편생장 자료에 연륜기후학적 기법을 적용하여 기후-연륜생장 관계를 구명하고자 하였다. 또한 반응함수 분석을 통해 군집별 일본잎갈나무의 연륜생장에 영향을 미치는 기후인자를 도출하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 일본잎갈나무의 지역별 생장특성의 평가뿐만 아니라 기후변화에 따른 생장패턴의 변화 예측에 필요한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 연구 자료

우리나라에 분포하는 일본잎갈나무를 대상으로 기후인자와 연륜생장과의 관계를 구명하기 위해 사용한 자료는 일본잎갈나무의 연륜생장 자료와 연륜생장 자료가 채취된 시군의 1950년부터 2010년까지 61년 동안의 월별 평균기온과 강수량 자료이다. 일본잎갈나무 연륜생장 자료는 제5차 국가산림자원조사에서 전국 단위로 수집하여 측정한 자료를 사용하였으며(Korea Forest Service, 2012), 기후자료는 기상청에서 래스터 형태로 제공하는 각 연도의 일별 자료를 월별로 정리하여 사용하였다.

2. 연구 방법

1) 연구 자료의 정리

연륜생장 자료는 제5차 국가산림자원조사에서 표본점별로 선정된 표준목에서 생장추를 이용하여 채취한 목편으로, 채취과정이나 코어마운트 작업과정에서 파손 또는 부패되고 수(Pith)가 없는 부적격 샘플을 제거한 데이터를 사용하였다. 이와 같이 수집된 목편 자료는 건조 시킨 후 연마하여 연륜측정분석기(DTRS-2000)를 이용하여 1/100 mm 단위까지 측정한 후 연륜정보 DB를 구축하여 분석에 사용하였다.

Table 1. Climatic variables used to in this study.

Variable	Description	Variable	Description
X1	Mean temperature of Prior Aug.	X15	Precipitation of Prior Aug.
X2	Mean temperature of Prior Sep.	X16	Precipitation of Prior Sep.
X3	Mean temperature of Prior Oct.	X17	Precipitation of Prior Oct.
X4	Mean temperature of Prior Nov.	X18	Precipitation of Prior Nov.
X5	Mean temperature of Prior Dec.	X19	Precipitation of Prior Dec.
X6	Mean temperature of Current Jan.	X20	Precipitation of Current Jan.
X7	Mean temperature of Current Feb.	X21	Precipitation of Current Feb.
X8	Mean temperature of Current Mar.	X22	Precipitation of Current Mar.
X9	Mean temperature of Current Apr.	X23	Precipitation of Current Apr.
X10	Mean temperature of Current May.	X24	Precipitation of Current May.
X11	Mean temperature of Current Jun.	X25	Precipitation of Current Jun.
X12	Mean temperature of Current Jul.	X26	Precipitation of Current Jul.
X13	Mean temperature of Current Aug.	X27	Precipitation of Current Aug.
X14	Mean temperature of Current Sep.	X28	Precipitation of Current Sep.

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; Chung et al., 1982; Woodward, 1987; Woodward and Rochefort, 1991; Son and Chung, 1994; Shin et al., 2001). 본 연구에서 사용된 기후자료는 전년도 8월부터 금년도 9월까지의 월평균기온과 월강수량의 기후변수 28개이다(Table 1). 이 28개의 기후변수는 기상청에서 제공하는 래스터 형태의 일별 기온과 강수량을 GIS 프로그램 ArcGIS 10.1과 통계프로그램 R3.0.1을 이용하여 각 연도의 월 단위 자료로 정리하였다. 기후자료는 통계적 대표성을 확보하기 위해 일본잎갈나무의 연륜생장 자료가 30개 이상 측정된 시군을 대상으로 1950년부터 2010년까지 총 61년 동안의 자료를 월별로 정리하였다.

2) 기후 군집분석

일본잎갈나무의 연륜생장 자료가 수집된 시군의 기후 특성을 바탕으로 상호 유사성이 높은 몇 개의 지역 단위로 분류하여 각 지역 내의 기후조건의 동질성과 지역 간의 이질성을 확인하기 위해 군집분석(cluster analysis)을 실시하였다. 기후 군집분석은 연륜생장의 특성이 유사한 기후군집 범위로 구분하여 기후인자와 연륜생장과의 관계를 분석하기 위한 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 연륜생장 목편이 채취된 시군의 기후특성을 유클리디안 거리(euclidean distance)로 환산하여 군집분석을 실시하였다(Kim, 2011). 일본잎갈나무 연륜생장 자료가 30개 이상 수집된 21개 시군의 월평균기온과 월강수량의 유사성에 근거한 군집분석을 실시한 후 그 결과에 근거하여 기후권역으로 분류하였다.

3) 연륜생장 자료의 분석

기후인자가 연륜생장에 미치는 영향을 구명하기 위해서는 측정된 연륜생장 자료에 대해 비기후적 요소를 제거하는 표준화가 우선되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 측정된 각 연륜에 대해 크로스데이팅(crossdating)을 실시하여 각 연륜이 생성된 정확한 연도를 부여하였다(Fritts and Swenam, 1989). 크로스데이팅은 그래프법(Park and Gong, 2001)을 이용하였으며, 크로스데이팅에 의한 연륜자료의 품질은 미국 애리조나 대학에서 제공하는 COFECHA 프로그램(Holmes, 1983)을 이용하여 통계적으로 확인하였다.

다음 단계에서는 연륜생장에 나타난 수령에 따른 생물학적 생장추세, 경쟁과 교란에 의한 변동추세 등과 같은 비기후인자의 영향을 제거하기 위해 연륜생장 자료를 표준화하였다(Fritts, 1976). 연륜생장 자료의 표준화는 수관의 울폐 정도와 임목 간의 경쟁을 고려하여 음지수곡선과 Spline 곡선을 단계적으로 사용하는 이중표준화 기법을 적용하였다(Choi et al., 1992; Koo et al., 2001; Seo and Park, 2010). 또한 ARSTAN 프로그램(Cook, 1985)의 자기회귀모형(autoregressive model)을 사용하여 생물학적 지속성을 제거하였으며, 자기상관을 제거한 잔차연대기(residual chronology)를 작성(Cook and Holmes, 1986; Speer, 2010)함으로써 최종적으로 일본잎갈나무의 군집별 지표연대기(index chronology)를 도출하였다.

이와 같이 작성된 군집별 지표연대기는 기초통계 분석을 통해 적합성을 평가하였다. 군집별 지표연대기의 정규성 검정과 내포하고 있는 기후신호의 정도 및 유효성 등을 파악하기 위해 일반적인 통계자료인 평균(mean), 분산(variance), 첨도(kurtosis), 왜도(skewness)와 그밖에 평균민감도(mean sensitivity), 자기상관계수(autocorrelation coefficient), 상호상관계수(crosscorrelation coefficient), 신호 대 잡음비(SNR; signal to noise ratio), 신호강도(EPS; expressed population signal) 등을 산출하였고, 이를 통해 일본잎갈나무의 군집

별 지표연대기의 적합성을 평가하였다.

4) 군집별 연륜연대기 작성

지표연대기는 각 임목에서 채취한 목편을 대상으로 각 연륜이 생성된 연도와 표준화지수를 정리한 것이다. 또한 특정 수종이나 지역의 지표연대기를 통합하여 연륜이 생성된 연도별 평균 표준화지수를 정리한 것을 연륜연대기(annual ring chronology)라고 부른다. 본 연구의 경우 일본잎갈나무를 대상으로 기후 군집분석 및 연륜생장 자료의 분석을 통해 얻어진 결과를 군집별로 정리하여 연륜연대기를 작성하였다.

5) 반응함수 분석

본 연구에서는 반응함수(response function) 분석을 통하여 일본잎갈나무의 군집별 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하고자 하였다. 반응함수는 기후와 연륜생장의 관계를 표현하는 생물학적 모델로 1970년대 초 Fritts (1976)가 개발하였다. 반응함수는 주성분분석을 이용한 다중회귀기법의 일종으로, 기후요소들이 연륜변화를 얼마나 설명할 수 있는지 알려주는 통계적 기법으로 종속변수로 표준화된 연대기를 사용하였으며 독립변수는 월 평균기온과 월 강수량을 이용하였다.

분석에 사용된 기후자료는 그 기간이 길지 않기 때문에 부스트랩 시뮬레이션 기법으로 1,000회 반복하여 결과를 산출하였다(Guiot, 1991). 반응함수 분석에 사용된 독립변수는 전년도 8월부터 당년도 9월까지의 월별 기후요소인 평균기온과 강수량의 총 28개 변수이다. 한편 종속변수는 표준연대기의 잔차를 자기회귀모델로 계산한 잔차연대기를 사용하였다(Cook and Holmes, 1986). 반응함수를 이용한 기후인자와 연륜생장과의 관계 분석은 미국 애리조나 대학의 DPL(Dendrochronology Program Library) 프로그램 중 RESPO(correlation and response function)를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 기후군집 분석 결과

일본잎갈나무의 생장목편이 30개 이상 측정된 21개 시군을 대상으로 유클리디안 거리지수를 이용하여 군집분석을 실시한 결과 6개의 기후군집으로 분류되었다(Figure 1). 기후군집 분석 결과 군집 1은 강원도 인제, 정선, 평창의 3개 지역, 군집 2는 강원도 영월, 충청북도 단양, 그리고 경상북도 봉화의 3개 시군, 군집 3은 경기도 가평, 강원도 춘천, 홍천, 횡성의 4개 시군, 군집 4는 경기도 양평, 강원도 원주, 충청북도 제천, 괴산, 충주의 5개 시군으로 분류되었다. 또한 군집 5는 경상북도 상주와 의성의 2개 시군이며, 군집 6은 전라북도 고창, 무주, 장수와 함께 경상북도 김천의 4개 시군으로 구성되었다. 각 군집의 지리적 특성에 따라 각 군집에 명칭을 부여하여 구분하였는데, 군집 1은 강원동부 산악권역, 군집 2는 강원남부 산악권역, 군집 3은 강원서부 산악권역, 군집 4는 중부내륙권역, 군집 5는 경상내륙권역, 그리고 권역 6은 남부내륙권역으

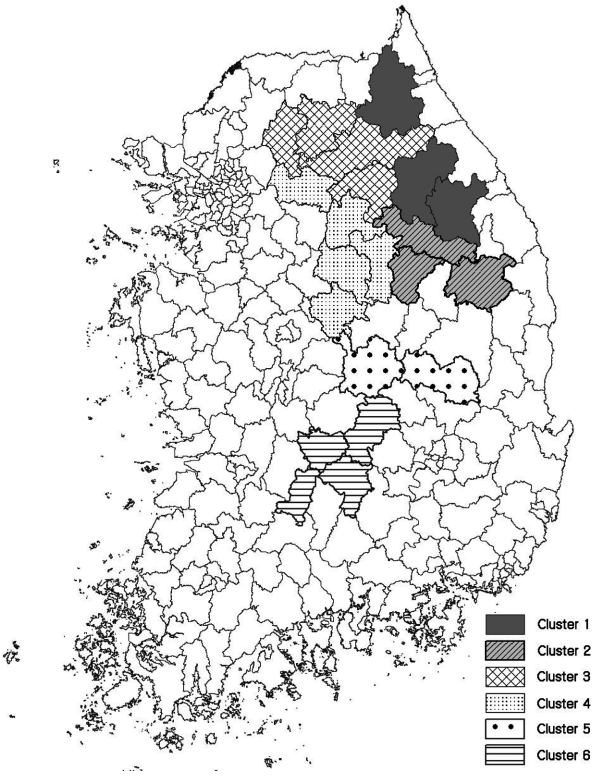

Figure 1. Spatial distribution of counties based on cluster analysis of *Larix leptolepis*.

Table 2. Summary of climatic characteristics by cluster of *Larix leptolepis*.

Cluster	Annual Mean Temperature (°C)	Maximum Monthly Mean Temperature (°C)	Minimum Monthly Mean Temperature (°C)	Annual Total Precipitation (mm)
1	7.3	21.4	-9.2	1,163.8
2	8.8	22.7	-7.1	1,153.9
3	9.1	23.3	-7.6	1,212.8
4	10.1	24.1	-6.1	1,176.7
5	10.6	24.2	-4.6	1,007.5
6	9.8	23.2	-5.3	1,114.4

로 명명하였다.

Table 2는 일본잎갈나무 6개 군집의 연간 기후특성을 요약한 결과이다. 군집별 기후특성은 시군별로 기후자료가 정리된 1950년부터 2010년까지 총 61년 동안 측정된 기온 및 강수량 자료를 각 군집별로 통합하여 요약한 자료이다. 전체 6개 군집 중에서 강원동부 권역의 군집 1은 연평균 기온, 월평균 최고기온, 월평균 최저기온의 모든 항목에서 가장 낮은 값을 보여 해발고도가 높은 특성을 반영하고 있다. 하지만 연 총강수량은 다른 권역과 큰 편차가 없는 것으로 분석되었다. 이러한 기후특성은 강원남부 산악권역과 강원서부 산악권역을 대표하는 군집 2와 군집 3에서도 비슷한 경향을 보이고 있다. 이들 권역은 모두 연평균기온이 10 이하로 낮은 편이며, 월평균 최고기온이나 월평균 최저기온도 상대적으로 낮아 산악권역의 특성을 보이고 있다. 하지만 이들 군집 간에도 일부 기온의 차이를 보이고 있다. 연 총강수량의 경우 강원서부 산악권역인 군집 3이 가장 많은 것으로 평가되었지만 다른 군집과의 차이가 크지는 않다.

한편 중부내륙과 경상내륙 지역을 대표하는 군집 4와 군집 5의 기후특성을 보면 다른 군집에 비해 온도가 다소 높은 것으로 분석되었다. 특히 군집 5의 경상내륙 권역은 전체 6개 군집 중에서 연 총강수량이 가장 적은 것으로 평가되어 수분조건이 다른 군집에 비해 상대적으로 불량한 것으로 평가되었다. 군집 6의 남부내륙 권역은 위도가 가장 낮은 지역이지만 온도는 높지 않은 것으로 분석되었다. 이 군집의 연 평균기온은 9.8°C이고, 월평균 최고기온과 월평균 최저기온은 각각 23.2°C와 -5.3°C로 분석되어 전체 6개 군집 중에서 월평균 최저기온을 제외하면 중간 정도의 수준을 유지하고 있다. 이러한 결과는 이 군집에 포함된 시군의 지리적 위치가 위도는 상대적으로 낮지만 백두대간에 인접하여 있어 해발고도의 영향을 받은 것으로 해석된다.

2. 군집별 기초통계량

일본잎갈나무의 6개 군집별 지표연대기에 대한 기초통계량은 Table 3과 같다. 일본잎갈나무의 실측된 평균 연륜생장량은 군집별로 3.095~3.578 mm이었는데, 가장 생장이 좋은 군집 1은 연평균 연륜생장량이 0.357 mm이지만, 지리적으로 인접한 권역 2의 강원남부 산악권역은 3.095 mm의 연간 생장량을 보여 대조를 이루고 있다. 이들 연간 생장량의 변이를 나타내는 분산을 보면 1.425~1.896으로 군집 간에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 연륜생장의 정규성을 평가하는 지표인 왜도와 첨도의 경우 각각 0.633~1.217과 0.972~3.762를 나타내 연륜의 정규성에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

군집별 평균민감도는 모두 0.25 이상인 것으로 나타났는데 이는 Park et al.(2001)의 연구 결과와 유사한 경향을 보인 것이다. 평균민감도는 0.2 이상일 경우 연륜연대기 연구에 사용하여도 무리가 없는 것으로 알려져 있다(Fritts, 1976; Speer, 2010). 결과적으로 본 연구를 통해 얻어진 일본잎갈나무의 군집별 지표연대기를 활용하여 연륜연대기 작성이 가능한 것으로 평가되었다. 또한 자기상관계수는 군집별로 -0.006~0.058의 범위에 있어 연륜생장의 생물학적 지속성이 확보됨과 동시에 자기상관이 대부분 제거된 것으로 확인되었다(Box et al., 1994). 한편 각 군집의 임목간 상관계수는 0.113~0.532로 추정되었는데, 군집 1, 3, 4는 임목간 상관계수가 상대적으로 낮고 군집 6은 비교적 높은 임목간 상관계수를 보였다. Seo and Park(2010)은 월악산 신갈나무를 대상으로 실시한 연구에서 임목간 상관계수는 0.397로 보고하였으며, Koo et al.(2001)의 한라산 구상나무 연구에서는 임목간 상관계수는 0.269인 것으로 추정하였다. 또한 Koo et al.(2000)이 내장산 굴거리나무를 대상으로 실시한 연구에서 임목간 상관계수는 0.326인 것으로 보고하였다. 이상의 연구 결과와 비교하면 본 연구에서 추정한 일본잎갈나무의 군집별 임목간 상관계수는 군집별로 편차를 보이고 있지만 평균적인 관점에서는 거의 유사한 결과를 보였다. 신호 대 잡음비의 경우 남부내륙 권역에 속하는 군집 6이 7.972로 가장 높았으며, 군집 1, 3, 그리고 4는 2 이하로 상대적으로 낮게 추정되었다.

신호강도의 경우 군집별로 0.536~0.664의 범위로 추정

Table 3. Summary of basic statistics for the standardized chronologies by cluster of *Larix leptolepis*.

Cluster	n	Mean diameter growth (mm/yr)	SD	Skewness	Kurtosis	Mean sensitivity	Auto correlation	Between tree correlation coefficient	SNR[z]	EPS[y]
1	224	3.578	1.758	1.002	1.263	0.277	-0.026	0.115	1.323	0.569
2	76	3.095	1.739	1.155	3.565	0.284	0.058	0.223	5.379	0.580
3	317	3.310	1.868	1.178	1.662	0.295	-0.006	0.113	1.868	0.651
4	179	3.160	1.848	1.217	3.762	0.295	-0.039	0.114	1.156	0.536
5	35	3.185	1.425	0.633	0.972	0.255	0.060	0.358	4.836	0.647
6	77	3.474	1.896	1.046	2.864	0.260	0.061	0.532	7.972	0.664

[z]SNR: Signal to noise ratio
[y]EPS: Expressed population signal

되었는데, 이는 지역연대기가 통계적으로 신뢰성을 가질 수 있는 기준인 0.85에 비해 낮은 것으로 분석되었다. 하지만 본 연구에서 사용한 연륜생장 자료는 임분 단위가 아니라 넓은 면적의 시군을 기반으로 자료를 수집하여 연대기를 작성한 것이다. 따라서 지역연대기가 통계적으로 큰 신뢰성을 갖기 위해서는 신호강도가 0.85 이상이 바람직하다는 기준(Briffa, 1984; Wigley et al., 1984; Briffa and Jones, 1990)은 본 연구에서 사용한 자료의 경우 적용하기 어려운 것이 사실이다. 소백산 주목을 대상으로 수행한 Park et al.(2001)의 연구에서도 신호강도가 0.75로 지표연대기 자료로 사용하는데 지장이 없는 것으로 평가된다. 결과적으로 본 연구에서 얻은 일본잎갈나무의 군집별 신호강도 추정치는 다소 낮지만 연대기 분석을 위해 사용하여도 문제가 없는 것으로 판단된다.

3. 군집별 연륜연대기 작성

일본잎갈나무의 6개 군집에 대한 연륜연대기 분포는 Figure 2와 같다. 군집 1, 3, 그리고 4는 1951년부터 2009년까지 총 59년 동안의 연도별 연륜지수의 변화를 보여주고 있다. 군집 2는 1963년부터 49년 간, 군집 5는 1973년부터 37년 간, 그리고 군집 6은 1966년부터 44년 간의 연도별 연륜지수의 변화를 나타내고 있다. 모든 군집에서 생육 초기의 연륜지수는 1을 중심으로 심한 등락을 보이고 있어 생육에 적합한 환경조건의 변화가 심했음을 알 수 있다. 이러한 현상은 중부내륙 권역인 군집 4에서 가장 두드러지게 나타났는데, 강원남부 산악권역인 군집 2와 남부 내륙권역인 군집 6도 상대적으로 연도별 연륜지수의 변화가 큰 것으로 분석되었다. 한편 연륜지수의 연도별 변이는 군집별로 다소 다른 경향을 보이고 있다. 군집 1, 3,

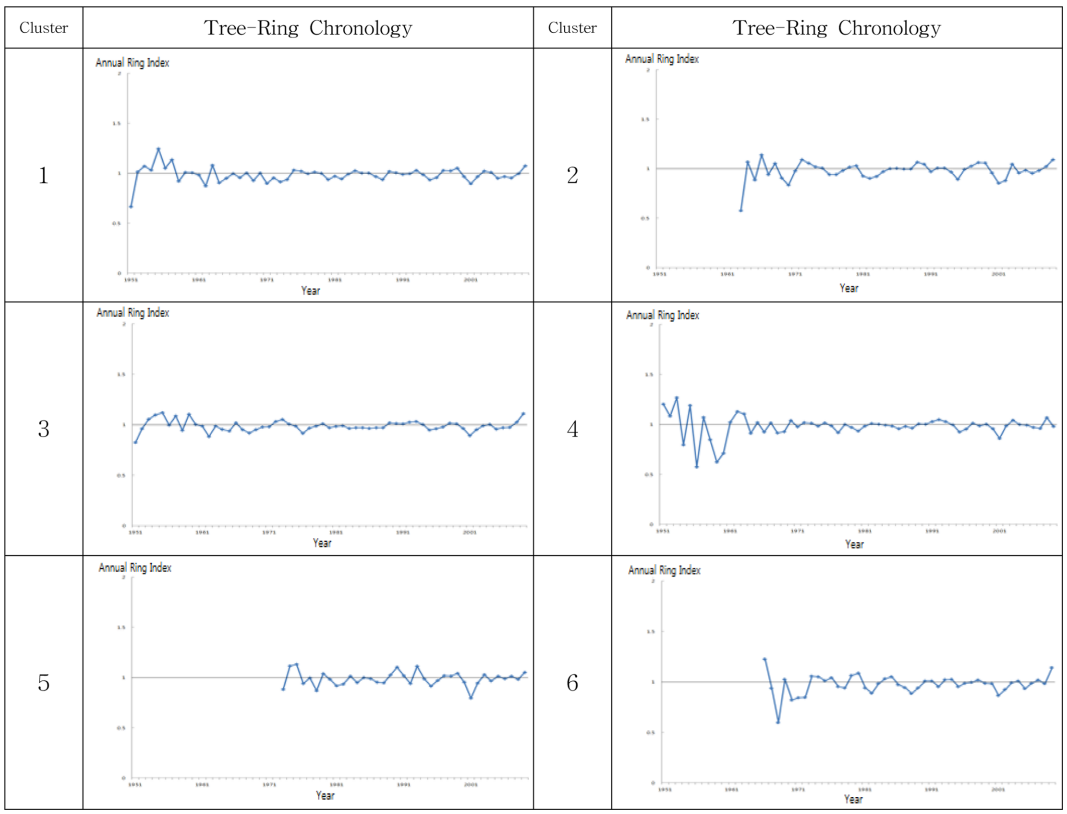

Figure 2. Comparison of tree-ring chronology by cluster of *Larix leptolepis*.

Table 4. Summary of tree-ring chronology statistics by cluster of *Larix leptolepis*.

Cluster	Year	n	Tree-ring growth index			
			Mean	S.D.	Min.	Max.
1	1951~2009	59	0.986	0.073	0.666	1.246
2	1963~2009	47	0.979	0.089	0.576	1.140
3	1951~2009	59	0.988	0.053	0.824	1.121
4	1951~2009	59	0.989	0.149	0.575	1.391
5	1973~2009	37	0.987	0.069	0.796	1.321
6	1966~2009	44	0.975	0.096	0.596	1.224

4는 생육 초반에는 변이가 심하지만 시간이 경과되면서 등락의 폭이 안정적으로 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 반면에 군집 2, 5, 6은 생육 초기보다 연륜지수의 변이가 작지만 시간이 경과해도 여전히 일정 부분 등락을 반복하는 연도별 변이를 보이고 있다.

이러한 사실은 Table 4의 군집별 연륜연대기 통계를 통해서 확인할 수 있다. 일본잎갈나무의 군집별 연륜지수의 평균치는 모두 1 이하이다. 이는 일본잎갈나무의 군집별 생육환경이 기대치에 비해 낮은 것을 의미하는 결과이다. 하지만 모든 군집에서 기대치를 만족시키는 1에 근접한 연륜지수의 평균치를 보이고 있어 생장에 필요한 생육환경이 크게 나쁘지는 않았던 것으로 평가된다. 군집별 연륜지수의 표준편차를 보면 군집 4가 가장 크고 다음은 군집 6이 상대적으로 연도별 생육지수의 변이가 심한 것으로 분석되었다. 군집 4는 생육 초기의 변이가 큰 영향을 미친 것으로 보이지만, 군집 6는 초기의 변이 이외에도 연도별로 일정 부분 연륜지수 등락이 유지된 것에 기인한 결과로 판단된다(Figure 2). 전체 6개 군집 중에서 연도별 연륜지수의 변이가 가장 큰 것으로 판명된 군집 4는 다른 군집에 비해 연륜지수의 최대치는 가장 크고 최소치는 가장 적은 값을 나타냈다.

4. 반응함수 분석 결과

연륜생장에 미치는 기후인자의 영향은 지역과 수종에 따라 다른 경향을 보이는데, 침엽수가 활엽수에 비해 기후에 더 예민하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Huang et al., 2010). 반응함수 분석을 통해 일본잎갈나무의 군집별 기후인자와 연륜생장과의 관계를 확인한 결과 군집별로 뚜렷한 경향을 확인할 수 없었다(Figure 3). 하지만 전체적으로 보면 전년도 12월의 평균기온이 높을 경우 연륜생장에 부정적인 영향을 미치는 것으로 평가되었으며, 당년도 1월의 강수량은 정의 상관을 보여 1월의 강수량이 많을수록 연륜생장이 증가하는 것으로 파악되었다.

전체 3개 시군이 포함된 강원동부 산악권역인 군집 1은 전년도 12월과 당년도 8월의 평균기온이 연륜생장과 유의적인 부의 상관을 보이지만 나머지 기후인자는 모두 상관이 없는 것으로 나타났다. 여름철의 높은 온도와 적은 강수량은 형성층 생성을 감소시켜 연륜생장에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Vieira et al., 2009). 군

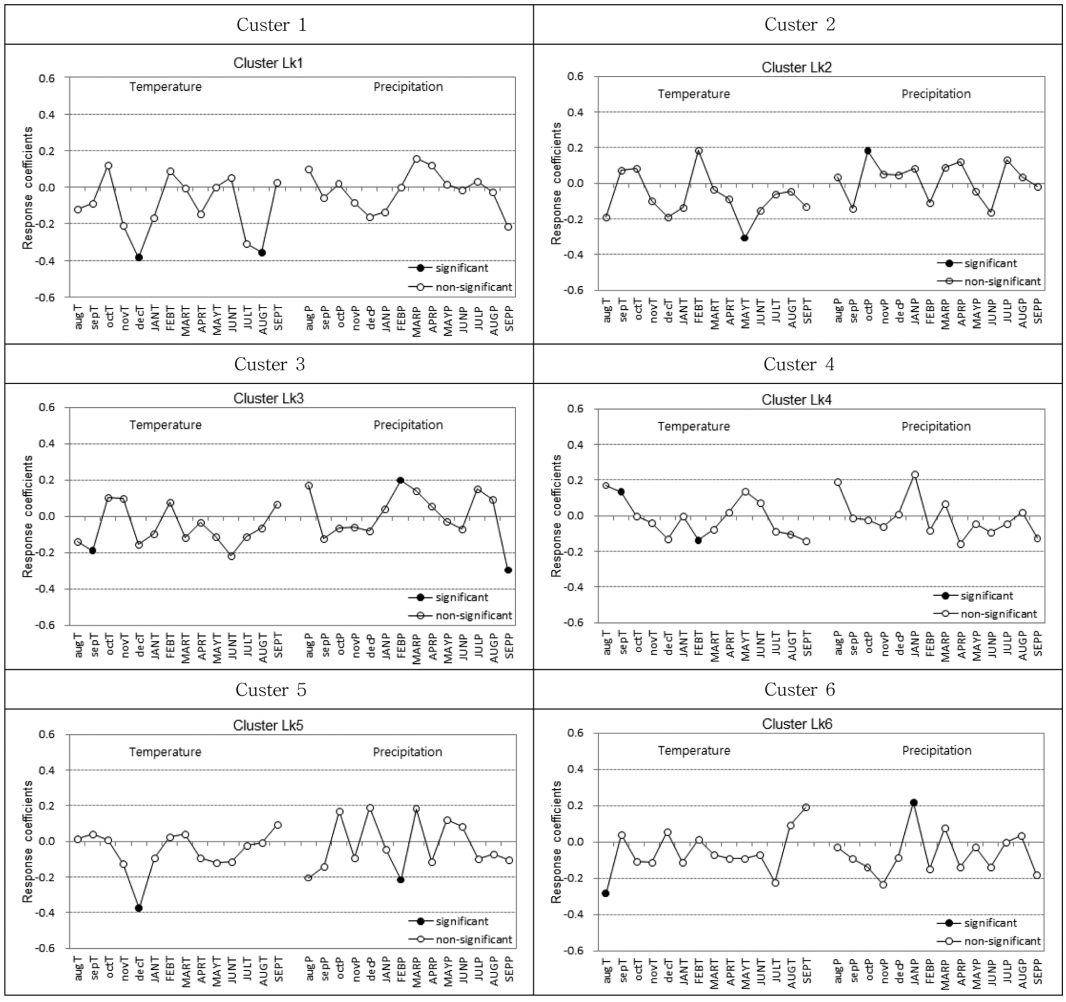

Figure 3. Results of response function analysis by cluster of *Larix leptolepis*.

집 1은 강원동부 산악권역으로 다른 군집에 비해 상대적으로 여름철 온도가 낮지만 강수량은 충분하여 연륜생장에 필요한 형성층 생성의 제약조건을 완화시킨 것으로 판단된다. 군집 2는 당년도 5월의 평균기온은 부의 상관이 인정되었으며 전년도 10월의 강수량은 정의 상관관계가 있는 것으로 확인되었다. 당년도 5월의 평균기온이 높으면 연륜생장에 부정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었는데, 이는 봄철의 높은 온도는 광합성에 필요한 수분 스트레스를 가져오기 때문으로 해석할 수 있다(Baquedano and Castillo, 2007). 하지만 Cook and Cole(1991)은 북미 헴록을 대상으로 연륜생장과 기후인자와의 관계를 분석한 결과 봄철 기온과 연륜생장은 정의 상관을 보인다고 보고하여 다른 결과를 나타냈다. 이는 연륜생장과 기후인자와의 관계에서 대상 수종 및 지역에 따라 다른 경향을 보일 수도 있음을 나타내는 결과이다.

군집 3의 경우 반응함수 분석결과 연륜생장에 영향을 미치는 기후인자로 전년도 9월의 평균기온과 당년도 1월과 9월의 강수량이 선정되었다. 전년도 9월의 평균기온과 당년도 9월의 강수량은 부의 상관을 보이는 반면 당년도 1월의 강수량은 정의 상관이 인정되어 기후변수별로 다른 경향을 나타내고 있다. 지중해성 기후 지역에 서식하는 가문비나무에 대한 연구(Haston et al., 1988)에서는 전년도 12월부터 당년도 4월까지의 강수량이 많을수록 생장기에 수분을 충분히 공급하여 연륜생장에 긍정적인 영향을 주는 것으로 보고하여 본 연구의 결과와 유사한 결과이다. 한편 군집 4는 전체적으로 평균기온은 연륜생장과 유의적인 상관을 보이는 달이 있지만, 월별 강수량은 연륜생장과 통계적으로 유의적 관계를 찾을 수 없었다. Szeicz and MacDonald(1994)가 북미 가문비나무를 대상으로 수행한 연구에서도 강수량은 온도에 비해 연륜생장 미치는 영향이 상대적으로 작은 것으로 보고한바 있다.

반응함수 분석 결과 군집 5는 전년도 12월의 평균기온과 당년도 2월의 강수량이 부의 상관을 보였다. 이는 전년도 12월의 평균기온이 높으면 생장이 저조하고 또한 당년도 2월의 강수량이 많은 경우에도 연륜생장에 적어지는 것으로 해석된다. 일반적으로 전년도 12월부터 당년도 봄철의 강수량이 많을 경우 생장기의 수분공급이 충분하여 연륜생장에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있지만(Haston et al., 1988) 군집 5는 상반된 결과를 보였다. 한편 남부내륙 권역으로 총 4개의 시군이 포함된 군집 6은 전년도 8월의 평균기온은 부의 상관이 인정되었고, 강수량의 경우에는 당년도 1월의 강수량이 정의 상관을 보였다.

결 론

본 연구는 연륜기후학적 방법에 의해 기후인자가 일본잎갈나무의 연륜생장에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행하였다. 이를 위해 제5차 국가산림자원조사의 임목조사자료에 포함된 일본잎갈나무의 연륜생장 자료를 활용하였다. 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하기 위해 월평균 기온과 월강수량 자료를 연도별로 정리한 후 연륜생장 자료를 수집된 시군별로 분류하여 정리하였다. 일본잎갈나무가 분포하는 지역에 대한 기후조건의 유사성에 근거하여 연륜생장 자료의 군집분석을 실시한 결과 6개의 군집으로 분석되었다. 또한 크로스데이팅과 표준화를 실시하여 일본잎갈나무의 군집별 지표연대기를 작성한 후 기초통계량을 산출하여 지표연대기의 적합성을 검정하였으며, 군집별 연륜생장과 기후인자와의 관계 구명을 위해 반응함수 분석을 실시하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 기후변화에 따른 산림생태계의 영향평가 자료로 활용할 수 있을 뿐만 아니라 기후변화 시나리오를 적용할 경우 기후변화에 의한 일본잎갈나무의 생장을 예측할 수 있어 중장기적인 대책 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이와 함께 전국 규모의 일본잎갈나무 연륜생장과 기후인자의 통계적 연관성 분석 결과를 통해 향후 기후변화로 인한 생산성 변화를 예측할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것으로 평가된다.

감사의 글

본 논문은 2014년 국립산림과학원 산림생태연구과 위탁연구과제 '주요 산림수종의 연륜생장과 기후인자와의 관계분석' 연구 결과의 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Albert, M. and Schmidt, M. 2010. Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). Forest Ecology and Management 259: 739-749.

Baquedana, F.J. and Castillo, E.J. 2007. Drought tolerance in the Mediterranean species, Quercus coccifera, Quercus ilex, Pinus halepensis, and Juniperus phoenicea. Photosynthetica 45: 229-238.

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. 1984. Tree-climate relationships and dendroclimatological reconstruction in the British Isles. University of East Anglia Ph.D Dissertation pp. 148.

Briffa, K.R. and Jones, P.D. 1990. Basic chronology statistics and assessment. pp. 137-152. In : E.R. Cook and L.A. Kairiukstis, ed. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Academic Publish-

ers, Dordecht (Netherlands) pp. 486.

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. (in Korean with English abstract)

Chung, Y.G., Lee, B.W., and Park, N.C. 1982. The influence of Meteorological factors on survival percent, diameter growth and height growth for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* –A case of Jinhae-gu- Gyeongsang National University Proceedings 21: 117-120. (in Korean with English abstract)

Cook, E.R., 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. Ph.D Dissertation, University of Arizona, Tucson. pp. 171.

Cook, E.R. and Cole, J. 1991. On predicting the response of forests in eastern North America to future climatic change. Climatic Change 19: 271-282.

Cook, E.R. and Holmes, R.L. 1986. Users manual for program ASTAN. pp. 50-65. In : R.L. Holmes, R., K. Adams and H. C. Fritts, ed. Tree-ring chronologies of southern North America: California eastern Oregon and Northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN, Chronology series VI. Laboratory of tree-ring research. The University of Arizona. Arizona (USA). pp. 182.

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: Begon, M., A. H. Fitter, E. D. Ford, and A. Macfadyen, eds., Advances in Ecological Research, Vol. 19. Academic Press, London. pp. 111-188.

Guiot, J. 1991. The bootstrapped response function. Tree-Ring Bulletin 51: 39-41.

Haston, L., Davis, F.W., and Michaelsen, J. 1988. Climate response functions for bigcone spruce: A mediterranean climate conifer. Physical Geography 9: 81-97.

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

Huang, J., Tardif, J.C., Bergeron, Y., Denneler, B., Berninger, F., and Giraedins, M.P. 2010. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the estern Canadian boreal forest. Global Change Biology 16: 711-731.

Kim, C.R. 2011. SAS Data Analysis. 21th Century Book Co. pp. 663. (in Korean)

Kira, T. 1976. Terrestrial Ecosystem. Kyoritsu Shuppan. Tokyo (Japan). pp. 166.

Koo, K.A., Park, W.K., and Kong, W.S. 2000. Growth of *Daphniphyllum macropodum* and climatic factors at Mt. Maejang, Korea. Korean Journal of Quaternary Research 14(1): 65-71. (in Korean with English abstract)

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. Korean Journal of Environment and Ecology 24(5): 281-288. (in Korean with English abstract)

Korea Forest Research Institute. 2014. Analyzing relationships between annual ring growth of main forest tree species and climatic factors. pp. 125. (in Korean)

Korea Forest Service. 1992. Trees of Korea. Sumok Book Co. pp. 562. (in Korean)

Korea Forest Service. 2012. Tree-ring DB Construction. pp. 299. (in Korean)

Lee, G.J. 1993. Tree Physiology. Seoul National University Press. pp. 504. (in Korean)

Lee, S.T., Park, M.S., Jun, H.M., Park, J.Y., and Cho, H.S. 2008. The effects of climatic factors on the tree ring growth of *Pinus densiflora*. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 10(4): 177-186. (in Korean with English abstract)

Parish, R., Antos, J.A., and Hebda, R.J. 1999. Tree-ring patterns in an old-growth, subalpine forest in southern interior British Columbia. pp. 231-248. In : Wimmer, R. and R.E. Vetter ed. Tree-ring analysis: biological, methodological and environmental aspects. CABI. New York, USA pp. 345.

Park, S.G., Joo, S.H., Lee, K.H., and Park, W.K. 2010. Relationships between climate and tree-rings of *Pinus densiflora* in the ridges of Baekdudaegan, Korea. Journal of Agriculture & Life Science 44(5): 35-43. (in Korean with English abstract)

Park, Y.A. and Kong, W.S. 2001. The Quaternary Environmental aspects of Korea. Seoul National University press. pp. 564. (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. 2010. Relationships between climate and tree-ring growths of mongolian oaks with various topographical characteristics in Mt. Worak, Korea. Korean Journal of Environmental Restoration Technology 13(3): 36-45. (in Korean with English abstract)

Shin, C.S. 2006. Pattern and correlation of climatic factors with diameter growth for *Quercus* species based on tree-ring measurement. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 8(3): 145-151. (in Korean with English abstract)

Shin, M.Y., Chung, S.Y., and Lee, D.K. 2001. Estimation of microclimate by site types in natural deciduous forest and

relation between periodic annual increment of diameter and the microclimatic estimates -A case study on the national forest in Pyungchung, Kangwon province-. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 3(1): 44-54. (in Korean with English abstract)

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. Journal of Korean Wood Science Technology 39(3): 213-220. (in Korean with English abstract)

Son, Y.M. and Chung, Y.G. 1994. The Effects of the topographical, Soil and Meterological Factors on the Tree Height Growth in the *Pinus thunbergii* Stands. Journal of Korean Forest Society 83(3): 380-390. (in Korean with English abstract)

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

Szeicz, J. and MacDonald, G.M. 1994. Age-dependent tree-ring growth responses of subarctic white spruce to climate. Canadian Journal of Forest Research 24: 120-132.

Vieira, J., Campelo, F., and Nabis, C. 2009. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of Pinus pinaster to Mediterranean climate. Trees 23: 257-265.

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. 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.

(Received: May 1, 2015; Accepted: September 10, 2015)