

국내산 소나무 연륜생장과 기후요소와의 관계

The Relationship between Tree-Ring Growth in *Pinus densiflora* S. et Z. and the Corresponding Climatic Factors in Korea

Kwang Hee LEE^{1,†} · Sang Yoon JO² · Soo Chul KIM³

¹Research Institute of Wooden Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo 33115, Korea

²Department of Heritage Conservation and Restoration, Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo 33115, Korea

³Department of Conservation Science, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo 33115, Korea

초록 : 국내에 자생하는 소나무의 연륜생장과 기후요인(월평균 기온과 총 강수량)과의 관계를 분석하기 위해 국립공원 13곳에서 20본의 소나무를 각각 채취하였다. 연륜분석에는 크로스데이팅에 성공한 수목만을 사용하였으며, 최소 11본이 포함되었다. 북한산에서 가장 짧은 기간인 1917-2016년(100년)의 연륜연대기가 작성되었고, 설악산에서 가장 긴 1687-2017년(331년)의 연륜연대기가 작성되었다. 기후와의 상관분석에 필요한 지수연륜연대기는 1차로 지수곡선, 2차로 spline(50% 반응주기 50년)으로 표준화하는 이중표준화 방법으로 작성하였다. 기후와 연륜생장과 관계는 반응함수 분석을 통해 진행하였다. 분석 결과, 대부분 지역에서 소나무의 연륜 생장은 당해 2~3월 기온 및 5월 강수량에 유의한 양의 상관관계가 나타나는 것으로 확인하였다. 이를 통해 국내에 생장하는 소나무의 연륜 생장에는 형성층 활동 전 초봄의 높은 온도와 강수량이 중요하다는 것으로 판단할 수 있다.

1. 서론

국내 산림의 총면적은 655만 ha로 대부분 태백산맥과 소백산맥을 따라 산림이 분포하고 있으며, 위도 조건에 따라 난대림, 온대남부림, 온대중부림으로 구성되어 있고, 대표 수종으로는 참나무속(*Quercus* spp.)과 소나무(*Pinus densiflora*)가 있다(Park *et al.*, 2003). 이처럼 다양한 산림에서 자생하고 있는 수목의 생장은 환경인자와 유전인자에 의해 영향을 받으며, 매년 신장생장과 비대생장을 한다. 대표적인 환경인자인 기후요소는 수목의 생장과 밀접한 관계를 가진다(Park *et al.*, 2003; Schweingruber, 1988). 따라서 수목이 생장하고 있는 기후조건에 의해 세포의 마이크로피브릴 각도를 비롯한 해부학적 특성이 지역적으로 차이가 존재하며(Kim *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020), 세포로 이루어진 연륜도 지역에 따라 독특한 연륜 패턴을 지니게 된다. 이러한 지역적 차이는 수목의 연륜을 연구하는 연륜연대학으로 규명할 수 있다.

국내에서 연륜연대학은 주로 소나무를 대상으로 진행되고 있으며, 현재부터 고려시대까지 제작된 소나무 표준 연륜연대기로 목재유물에 대한 연대측정 연구가 활발히 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2021). 또한, 기후와 연륜생장과 관계를 분석한 연구도 진행되었다. 특히 소나무 연륜과 기후와의 관계를 연구한 대표적인 연구 사례로는 월악산 소나무 직경생장과 기후인자와의 관계를 지형적 특성에 따라 분석한 연구(Seo *et al.*, 2000)가 있으며, 이후로 군집분석을 활용한 지역별 소나무 연륜생장에 기후인자가 미치는 영향에 대한 연구(Lee *et al.*, 2008), 백두대간 마루금 일대 소나무 연륜생장과 기후와의 관계 연구(Park *et al.*, 2010) 등이 있다. 또한 강원도, 경상북도, 충남지역에서 소나무뿐만 아니라, 일본잎갈나무를 포함하여 연륜생장과 기후와의 상관관계를 분석한 연구도 있다(Chung *et al.*, 2017). 하지만 대부분이 지역 단위이거나, 충청도 이북지역에 국한되고, 100년 이내의 짧은 연대기를 활용하여 연구가 진행되었다. 앞으로 기후복원 및 예측연구를 진행하기 위해서는 지역별로 기후와 연륜 생장과 관계에 대한 결과와 기후복원에 활용될 수 있는 긴 기간의 지역별 표준연대기 확보가 필요하다.

본 문서는 출판된 영문논문의 국문서입니다. 출판된 영문논문은 아래의 DOI를 통해서 확인하실 수 있습니다.
Journal of The Korean Wood Science and Technology 50(2): 81-92. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2022.50.2.81>

본 연구에서는 인간간섭이 비교적 적어 긴 기간의 표준연대기를 확보할 수 있는 국내 국립공원에서 자생하는 소나무를 대상으로 지역별 연륜생장 차이를 연륜연대학적 방법으로 비교하고, 기후자료와의 반응함수를 통해 국내에 자생하는 소나무의 연륜생장에 영향을 주는 기후요인을 확인하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지 및 시료채취

소나무는 우리나라 전역에 자생하는 주요 수종 중 하나로 해발 1,300 m 이하 지역에 분포하며, 양지를 좋아하는 수목이다(Lee, 1997). 본 연구를 위해 서울·경기도, 강원도, 충청도, 전라도, 경상도 등 지역별 주요 국립공원 13곳에 자생하는 소나무를 대상으로 시료를 채취하였다(Fig. 1). 연륜연대학적 분석을 통한 연구를 위해 최소 50년 이상의 연륜이 필요하므로 각 국립공원에서 수고 7-20 m, 흉고직경 39-72 cm 이상의 성숙목 20본씩을 선별하였다. 대부분 50년 이상의 연륜을 가지고 있었지만, 50개가 넘지 않는 유령목이 일부 확인되어 연륜분석에서 제외하였다. 따라서 각 국립공원에서 연륜분석에 이용된 수목은 연륜수에 따라 11~20본이었다. 시료는 이상재를 피할 수 있는 흉고의 양방향에서 성장추를 이용하여 코어 시료 형태로 채취하였다(Fig. 2 and Table 1).

2.2. 분석방법

2.2.1. 연륜폭 측정 및 크로스 데이팅(Cross-dating)

각 지역에서 채취한 연륜코어 시료를 U자형 시료대에 접착해 고정시키고, 벨트샌더로 연마하여 연륜의 경계가 선명하게 관찰될 수 있도록 하였다. 각 연륜의 폭은 컴퓨터에 연결된 연륜폭측정기(LINTAB)를 이용하여 0.01 mm 정확도로 측정하였고, 정확한 생육연대를 각 연륜에 부여하기 위해 크로스데이팅을 실시하였다. 또한 각 국립공원의 소나무들의 생장 차이를 확인하고자 지역별 연륜연대기에 대해서도 크로스데이팅을 실시하였다. 크로스데이팅은 생장경향을 비교하는 그래픽방법(graphic method)과 상관계수를 이용한 t 값(eq. 1) 및 부호검정을 응용한 G 값(gleichläufigkeit)(eq. 2)을 활용하는 통계방법으로 실시하였다(Rinn, 2011; Schweingruber, 1988; Baillie and Pilcher, 1973; Eckstein and Bauch, 1969). 이상의 방법을 이용하기 위해 연륜연대학에서 자주 사용되는 TSAP-Win 프로그램을 사용하였다.

$$t = |r| \frac{\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

(r : correlation coefficient)

$$\begin{aligned} \Delta_i &= (X_{i+1} - X_i) \text{ when } \Delta_i > 0: G_{ix} = +\frac{1}{2} \\ \Delta_i &= 0: G_{ix} = 0 \\ \Delta_i &< 0: G_{ix} = -\frac{1}{2} \\ \text{for two curves } G_{(x,y)} &= \frac{1}{n-1} \sum |G_{ix} + G_{iy}| \end{aligned} \quad (2)$$

2.2.2. 표준화(Standardization) 및 잔차연대기(Residual chronology)

측정된 시료의 수령에 따라 수목 고유의 생물학적 생육추세(Biological trend)를 제거하기 위해 표준화를 실시하였다. 연륜연대학에서 표준화란 수령에 따른 임목 고유의 생물학적 생육추세와 오랜 기간에 걸친 경쟁과 교란에 따른 생육추세를 제거하는 것으로, 통계함수를 이용하여 획득된 생육추세선과 실측된 연륜폭 간 비례를 이용하여 지수연대기(index chronology)를 만드는 것이다(Fritts, 1976). 본 연구에서는 이중표준화법(double detrending method)이 사용되었는데, 1차로 지수곡선을 이용한 생물학적 생육추세를 제거하고, 2차로 spline(50% 반응주기 50년)을 이용한 임분 경쟁과 교란에 따른 생육추세를 예측하여 재표준화하는 방법이다(Seo, 1999). 표준화된 지수연대기에는 생육 이전 연도들에 만들어진 영양물질이 전이(carry-over)되는 자기상관(autocorrelation)이 존재하는데, 본 연구에서는 자기상관이 제거된 잔차연대기(residual chronology)를 사용하였다. 잔차연대기는 ARSTAN 프로그램(Cook, 1985)을 이용하여 구하였다.

2.2.3. 연륜연대기 통계분석

표준화를 통하여 획득된 연대기들의 연륜연대학적 가치를 평가할 수 있는 통계학적 자료인 평균민감도(MS: mean sensitivity)와 하위표본신호강도(SSS: subsample signals strengths)를 분석하였다. 평균민감도 분석(eq. 3)은 연속된 두 연륜 폭간의 변이 크기, 즉, 고주파 변동(high-frequency fluctuation)을 측정하는 통계인자로 각 연대기가 갖는 연간변동을 의미한다(Cook and Kairiukstis, 1990). 하지만 평균민감도는 자기상관 및 표준편차에 크게 의존하기 때문에 연륜성장의 변화를 설명하는 데 일부 부족한 통계이므로 하위표본신호강도(eq. 4)를 분석하였다(Bunn et al., 2013). 하위표본신호강도(SSS)는 각 수목의 연륜폭 측정으로 작성된 연륜연대기들 상호간 상관관계와 표본의 수를 기초로 계산된 값으로 연륜을 이용한 기후복원 및 기후정보 분석 시 활용 자료의 적합성을 결정하는 데 기준으로 사용된다. 일반적으로 평균민감도는 0.20 이상을 요구하며, 하위표본신호강도는 0.85 이상을 요구한다(Speer, 2010; Akkemik et al., 2005; Buras, 2017). 분석은 ARSTAN 프로그램(Cook, 1985)을 이용하였다.

$$MS_x = \frac{1}{n-1} \sum \left| \frac{2(X_{t+1} - X_t)}{X_{t+1} + X_t} \right| \quad (3)$$

(X_t = tree-ring index at t year, X_{t+1} = tree-ring index at $t+1$ year)

$$SSS = \frac{t'(1+(t-1)r)}{t(1+(t'-1)r)} \quad (4)$$

(r : mean interseries correlation for the chronology, t : No. of cores in the full set, t' : No. of cores in a subset of the whole population)

2.2.4. 기후와의 반응함수

표준화된 각 국립공원 연륜연대기와 기후인자와의 관계를 분석하고자 반응함수(response function) 분석을 실시하였다. 반응함수 분석은 독립변수들간 존재하는 다중공선성(multicollinearity)을 제거한 후에 종속변수와 독립변수간 연관성을 분석하기 때문에 종속변수와 독립변수의 관계를 보다 정확히 파악할 수 있다(Fritts, 1976; Seo, 1999). 본 논문에서는 월평균기온과 월 총강수량이 독립변수로 사용되었으며, 연륜지수가 종속변수로 사용되었다. 반응함수 분석을 위하여 DENDROCLIM 2002(Biondi and Waikul, 2004)프로그램이 사용되었다. 임목생장과 기후와의 관계를 조사하기 위해서는 연구지와 인접한 측후소에서 측정된 기후자료가 필요하다. 하지만 각 국립공원의 경우 측후소가 없기 때문에 CRU-TS(Climate Research Unit gridded Time Series)의 기후 데이터를 이용하였다. CRU-TS는 남극 대륙을 제외한 세계의 모든 육지 영역에 걸쳐 위도 $0.5^\circ \times$ 경도 0.5° 그리드로 구분되어 1901년부터 현재까지 구축되어 있는 기후 데이터 세트이다(Harris et al., 2020). 반응함수에 사용된 독립변수는 전년도 10월부터 당년 10월까지의 월 평균기온과 월 총강수량이었으며, 분석에 포함된 기간은 각 국립공원에서 제작된 연대기의 SSS 값이 0.85 이상인 연대구간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지역별 연륜연대기의 크로스데이팅(Cross-dating)

13곳의 국립공원에서 채취한 소나무 시료들을 대상으로 t 값과 G 값을 이용하여 크로스데이팅을 실시하였다(Table 2). 서울·경기지역, 강원도, 충청도, 경상도 국립공원에서 자생하는 소나무들의 연륜패턴은 같은 지역끼리 비교적 높은 통계값을 나타내어 유사한 연륜패턴을 가지고 있었다. 하지만 전라도 국립공원에서 자생하는 소나무들의 연륜패턴은 같은 지역임에도 불구하고 비교적 낮은 통계값을 가지고 있었으며, 덕유산은 다른 국립공원과 매우 낮은 통계값을 보여주어 지역적인 연륜패턴이 강한 것으로 판단되었다. 또한 서울·경기, 강원도와 충청도의 국립공원에서 자생하는 소나무들은 서로간에 높은 통계값을 나타내어 비슷한 연륜패턴을 가지고 있는 것이 확인되었다. 경상도의 가야산은 전 지역의 국립공원들과 t 값 3.5 전후로 확인되어 전 지역의 소나무와 유사한 패턴을 나타내는 것으로 판단되었고 주왕산은 같은 태백산맥에 위치하고 있거나 가까운 지역(월악산, 속리산)의 국립공원 소나무들과 연륜패턴이 일치하고 있었다. 하지만 소백산은 다른 지역과 비교적 낮은 통계값을 나타내고 있어 지역적인 연륜패턴이 강한 것으로 판단되었다. 전라도 지역의 국립공원 중 변산반도와

덕유산은 다른 지역들과 낮은 통계값을 나타내어 지역적인 연륜패턴이 강한 것으로 판단되며, 지리산과 무등산은 중부 이남의 충청도와 경상도 국립공원에 자생하는 소나무들과 유사한 연륜패턴을 나타내는 것으로 판단되었다. 이는 이전 연구에서 북부지방과 중부지방의 소나무 연대기들 간에는 높은 t 값으로 유사한 연륜패턴을 가지지만, 남부지방의 소나무의 연륜패턴과는 유사성이 떨어진다는 결과와 일치한다(Park et al., 2010). 또한 현재 남부지방의 소나무들에 대한 연륜패턴 연구는 거의 진행되지 않았으므로 이후 연구가 추가적으로 진행된다면 북·중부지역과 남부지역의 소나무 연륜패턴의 차이에 대한 정확한 결론을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

작성된 연대기 중 설악산에서 331년으로 가장 긴 연대기가 확인되었고, 북한산에서 100년의 가장 짧은 연대기가 확인되었으며, 200년 이상의 노령목들은 주로 강원도와 충청도 월악산에서 많이 채취되었다(Fig. 3). 이전 유사한 연구들에서도 태백산맥의 산악지역에 자생하는 소나무들이 충남과 경북의 해안가와 대구시와 원주시 등 인위적인 영향을 받은 지역보다 많은 연륜이 채취된 것으로 보아, 해안가에 비해 인위적인 영향이 비교적 적은 산악지역에 고수령의 소나무들이 분포하고 있는 것으로 판단할 수 있다(Chung et al., 2017; Lee et al., 2008).

3.2. 지역별 연륜연대기의 통계학적 특징

전국의 국립공원에서 작성된 연륜연대기의 평균민감도와 하위표본신호강도를 분석하였다(Table 3). 대부분 국립공원 연대기들의 평균민감도는 0.14-0.26이었다. 이는 대체로 높은 민감도에 해당하며, 연륜연대학적 분석이 가능한 연대기인 것으로 이전 연구에서 확인된 바 있다(Seo et al., 2000). 또한 대부분의 국립공원 연대기들은 0.2 이상을 나타내었으나, 많은 연륜이 관찰되는 설악산, 오대산, 월악산은 0.2 이하를 나타내었다. 이는 수령이 증가함에 따라 연륜폭이 좁아지게 되며, 연륜폭의 차이가 크지 않기 때문에 평균민감도가 낮게 나온 것으로 판단된다.

서울·경기지역의 북한산 연륜연대기에 포함된 16본의 소나무들 중 9본에서 1939년 이후부터 SSS 값이 0.85 이상을 나타내어 1939년-2016년의 연륜연대기는 기후와의 관계 연구에 사용할 수 있는 것으로 확인되었다. 강원지역과 충청지역에서 획득한 연륜연대기들은 모두 SSS값이 0.85 이상을 나타내는 연대구간이 확인되어 기후와의 관계 연구에 사용하기 적합한 것으로 확인되었고, 특히 북한산, 설악산, 월악산 국립공원은 0.90 이상을 나타내는 구간이 확인되어 기후 복원 연구에 활용될 수 있는 가능성이 충분한 것으로 확인되었다. 경상도와 전라도지역에서 획득한 연륜연대기들도 대부분 SSS값이 0.85 이상을 나타내었다. 하지만 경상지역의 주왕산 연륜연대기에서는 6본의 소나무들에서 1937년 이후 SSS값이 0.80, 덕유산 연륜연대기에서는 6본의 소나무들에서 1943년 이후 0.75로 확인되어 기후와의 관계연구에 제외하였고, 60-70년의 연륜을 가지는 시료를 추가적으로 확보한다면 추가 연구에 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

3.3. 반응함수

각 국립공원의 표준화된 소나무 연륜연대기들 중 SSS값이 0.85 이하로 확인된 주왕산, 덕유산을 제외한 11곳의 국립공원 소나무 연대기들을 대상으로 반응함수 분석을 실시하였다(Table 4 and 5).

분석결과, 대부분의 국립공원에 자생하는 소나무들은 공통적으로 생장이 시작할 무렵인 2-3월 기온이 다른 기간보다 높은 정의 관계($p < 0.05$)를 나타내었다. 이러한 결과는 ‘식물의 생산량은 생육에 필요한 최소한의 양분에 의해 결정’된다는 리비히의 최소량의 법칙을 통해 형성층 개시 직전 또는 초기 시기의 온도가 소나무의 연륜생장(형성층 활동)을 지배하는 것으로 판단할 수 있다(Fritts, 1976). 이는 계절적 변화가 뚜렷한 온대 및 아한대 지역에 위치한 침엽수의 형성층 형성 또는 종료가 대부분 온도 조건에 의해 결정된다는 선행 연구에서 도출된 결론과 유사하다(Park et al., 2015; Ross et al., 2008; Seo et al., 2008).

변산반도, 소백산, 가야산, 북한산에 자생하는 소나무들에서는 생장 휴지기인 전해 11월부터 당해 1월까지 겨울철 온도와 긍정적인 반응이 확인되었다. 월악산의 고지대에서 자생하는 소나무는 생육전년도 겨울 기온에 대하여 가장 민감한 영향을 받는 것으로 이전 연구에서 확인되었고(Seo et al., 2000), 그 외에 국내 소나무를 대상으로 진행된 이전 연구들에서도 겨울철 기온이 연륜생장에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 확인만 되었을 뿐, 원인에 대해서는 언급되지 않았다(Park et al., 2010; Lee, 2003; Yoon et al., 2013). Lee는 ‘침엽수는 연중 광합성을 수행하며, 특히 묘고소나무의 경우 설탕함량은 1월에 최고치를 기록했다가 4-7월 사이 새순이 자라는 동안 최저치를 보인다.’라고 서술하였다(Lee, 2018). 따라서 본 연구자는 소나무가 고정생장(생장하는 해의 가지의 잎의 수가 전년도에 형성된 겨울 눈 속의 엽원기의 수로 고정되어 있는 것)을 하는 대표적인 목본식물이지만, 겨울철 기온의 상승은 광합성을 통해 비축된 탄수화물이 증가되고, 이는 형성층 활동 개시에 영향을 줄 것으로 추정하였다. 다만 이는 추정일 뿐 추가적인 연구를 통해 확인이 필요할 것으로 판단된다.

그 외에도 지역에 따라 일정 달(month)의 기온이 소나무의 생장에 영향을 주는 것으로 확인되었으나, 지역적으로 공통적인 특징이 나타나지는 않았다. 동일수종이더라도 임목간의 기후반응이 다르게 나타나는 것은 환경 및 입지적 요인도 작용한 것으로 판단된다(Hofgaard *et al.*, 1999; Larsen and Macdonald, 1995). 또한 형성층의 활동에 대해 평균온도보다는 적산온도를 이용하여 진행한 연구들도 다수 있어 형성층 활동을 통해 결정되는 연륜폭과 지역별 적산온도와와의 관계에 대한 추가적인 연구도 필요할 것이다(Sarvas, 1972; Seo *et al.*, 2008; Seo *et al.*, 2017; Yoo *et al.*, 2021).

강수량의 경우에는 경상도지역과 전라도의 변산반도를 제외한 모든 지역에서 5월의 강수량이 소나무의 연륜생장에 긍정적인 영향을 주는 것으로 확인되어 소나무의 초기 생장기에 수분의 공급이 중요한 것으로 조사되었다. 특히 연구대상 소나무들은 대부분 경사지 또는 바위가 많은 지역에서 자생하고 있었으므로 생장 당시의 수분 공급은 연륜을 생성하는 데 매우 중요할 것이다. 이러한 결과는 ‘사면 또는 암석지에 노출된 소나무들은 생장 개시(5월) 강수량이 형성층 활동에 영향을 준다’는 이전 연구와 일치하고 있다(Seo *et al.*, 2000). 반면, 경상도 일부 국립공원 소나무들은 대부분 계곡 주변 또는 평지(소백산: 희방폭포, 금계천, 가야산: 가야천)에서 자생하는 것으로 확인되어 강수량이 연륜생장에는 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단된다.

소백산의 6-7월, 속리산의 7월과 같이 장마기간의 강수량과 변산반도의 10월 강수량과는 부의 상관관계가 확인되었다. 이전 연구에서 나무의 성장 과정에서 강수는 오히려 일조량의 감소를 동반하게 되어 광합성의 감소를 가져온다는 결과로 이해할 수 있다(Park and Seo, 1999). 변산반도의 경우, 1-3월, 9월 강수량이 연륜생장 증가에 긍정적인 영향을 주는 것으로 확인되어 변산반도에 자생하는 소나무들은 비교적 저지대에서 자생하고 있기 때문에 온도보다는 강수량의 영향을 더 받는 것으로 판단되며, 그 영향은 생장 개시 전(1-2월), 생장 시작(3월) 및 생장 과정(9월)까지 지속적으로 이어지는 것으로 조사되었다.

그 외에도 북한산과 설악산, 가야산, 무등산의 경우, 전해의 11-12월, 당해 1월 등 겨울철 강수량이 소나무 생장에 긍정적인 영향을 주는 것으로 확인되었다. 겨울철 강수량, 즉 적설량의 증가는 봄철 수목생장에 필요한 수분을 공급하여 연륜생장에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것이다. 또한 이전 연구에서 ‘토양의 온도가 생장하지 못할 정도로 낮지 않다면 전년도 11-12월 강수량이 겨울철 소나무 뿌리의 성장을 촉진시켜 다음해에 연륜생장을 촉진한다는 것으로 판단한다’라고 하여 겨울철 강수량이 뿌리 성장에 따른 연륜생장에 긍정적인 영향도 주는 것으로 판단하였다(Yoon *et al.*, 2013). 다만 북한산의 경우, 당해 1월의 강수량과 부의 상관관계가 확인되었는데, 이는 다른 지역에서는 확인되지 않아 뿌리 노출 및 과잉 수분에 따른 수분 스트레스와 같은 생육 조건이 영향을 준 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

국립공원 13곳에서 자생하는 소나무를 채취하여 연륜연대학적 분석을 통해 지역별 연륜생장차이와 기후와의 관계연구를 진행하였다. 서울, 강원도, 충청도 국립공원에서 자생하는 소나무들의 연륜패턴은 서로 간에 통계적으로 유의한 수준의 일치가 확인되었다. 반면, 경상도와 전라도 국립공원에 자생하는 소나무들의 연륜패턴은 다른 지역 국립공원 소나무들과는 일부만 일치하였다. 이는 중부와 남부지역에 따른 기후의 차이로 판단되며, 이를 확인하고자 연륜생장과 기후와의 상관관계를 분석하였다. 상관분석은 통계분석이 가능한 11곳을 대상으로만 실시하였다. 그 결과, 중부와 남부지역에서 자생하는 소나무 대부분은 봄(2월과 4월)의 온도와 5월 강수량에 의해 연륜생장에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 강원·충청지역을 제외한 일부 지역에서는 생장 전해와 당해의 겨울철(11월-1월)의 기온과 강수량도 영향을 주는 것으로 확인되었고, 계곡 주변 또는 저지대 평지에서 자생하고 있는 일부 소나무들에서는 강수량의 증가가 직경 생장을 제한하는 것으로 확인되었다. 따라서 연륜생장 패턴은 지역적 영향이 컸으나, 연륜생장과 기후요소의 관계에서는 생육 조건의 영향이 큰 것으로 확인되었다.

이번 연구를 통해 제작된 연대기들은 지역별 소나무의 연륜연대기를 확장하는 데 중요한 자료로 이용될 수 있을 것이며, 특히 북한산, 설악산, 월악산에서 자생하는 소나무 연륜연대기는 과거 한국의 기후 변동성에 대한 세부적인 복원 연구에 활용될 수 있을 것이다.