The Korean Journal of Quaternary Research
Vol. 6, No. 1, 21~32 (1992)

亞寒帶 針葉樹類 年輪年代記를 利用한 中部山間地域의 古氣候復元

崔 鐘 南・柳 根 培・朴元圭*
서울大學校 地理學科
*忠北大學校 林產加工學科

Paleoclimate Reconstruction for Chungbu Mountainous Region Using Tree-ring Chronology

Jong Nam Choi, Keun Bae Yu and Won-Kyu Park*
Department of Geography, Seoul National Univ., Seoul Korea
* *Department of Forest Products, Chungbuk National Univ., Cheongju, Korea*

ABSTRACT

The paleoclimate of the Chungbu Mountainous Region, Mts. Seorak and Sobaek, was estimated by means of dendroclimatic methodology. The annual growth value of tree-rings is deeply interrelated with the mean temperature of April-May and July-August. The mean temperature of April-May of the reconstruction period(1635-1911), observation period(1912-1989), and the whole period(1635- 1989) is 13.58°C, 13.69°C, and 13.60°C, respectively. That of July-August is 24.50°C, 24.62°C, and 24.58°C respectively. The reconstructed mean temperature data for April-May and for July-August reveal 13.2 and 12.9 year cycles.

서 론

I. 연구목적

고기후 연구의 목적은 현생 기후요소들의 특성을 바탕으로 기상관측이전의 기후변동과 기후요소들을 추정하고 이들에 관한 통계적・수리적 모형을 검토하는 것이다. 고기후연구는 기후현상의 시・공간적인 패턴에 대한 보다 폭넓은 이해를 제공한다. 이러한 배경에서 역사적 자료와 자연적인 증거들을 통해 고기후를 추정하고자 하는 연구들이 지속적으로 이루어져 왔다.

우리나라에서는 비교적 오래 전부터 기후

*본 논문에서는 韓國科學財團에서 지원한 연구(과제번호 913-1507-007-1)의 年輪資料를 사용하였다.

에 관한 관찰이 이루어져 왔으며, 역사적 문헌이나 일기·서화 등의 고기록에서 고기후에 관한 내용들을 찾아 볼 수 있다. 그러나, 고기후기록의 내용은 주로 특이한 기상이변에 관한 것이거나 기록자의 주관적인 판단을 많이 포함하고 있다. 고기후에 대한 기록은 그 내용이 체계적이지 못하고 기록빈도 또한 매우 낮다. 따라서 이들 자료를 정량화하여 고기후를 복원하는 데에는 많은 어려움이 있다.

자연적인 증거를 이용하여 고기후를 추정할 수 있는 방법으로는 연륜기후학과 화분분석, 아미노산분석, 조류분석, 동위원소분석 등이 있다. 이 가운데 연륜기후학 이외의 방법들은 장기간의 기후복원에 주로 사용되며, 매년의 기후요소들을 정량화하기에는 커다란 한계가 있다. 반면에 연륜의 성장특성은 성장기의 기후 및 환경변화와 밀접한 관련을 가지므로, 비교적 정확하게 연대순에 따른 변화를 자세히 파악할 수 있다.

현재 국내에서는 이러한 연구방법을 통한 연구 사례가 많지 않기 때문에, 관측이전의 기후와 그 변동 및 기후요소들의 시계열적인 특성이 제대로 파악되지 못하고 있다. 본 연구에서는 연륜기후학적 방법을 이용하여 중부산간지역의 고기후를 추정하고, 추정된 고기후에서 유의하게 나타나는 기후주기를 밝혀보고자 한다.

2. 이론적 배경

Fritts, H.C.(1976)는 연륜기후학의 기본원리를 아래와 같이 정의하고 있다. 첫째, 현재의 환경 및 식물생장의 변동을 일으키는 물리·생물학적 과정들은 과거와 동일하다는 동일과정론의 원리이다. 둘째, 생물학적 과정은 가장 공급이 적은 한계요소에 의해 주로 영향을 받는다는 한계요소의 원리이다. 세째, 각 수종은 유전형질에 따라 성장하거나 재생산될 수 있는 범위가 다르다는 생태적 범위의 원리이다.

이러한 원리하에서 에너지 및 수분의 변동과 관련된 기후변동은 식물체의 광합성, 증산, 수분 및 양분흡수, 물질이동 등의 생리적 과정과 특성들을 제어함으로써 연륜의 너비와 밀도의 변화를 변화시킨다. 따라서, 연륜은 효소, 성장조절물질 등의 식물내적 요인과 함께 성장기 동안의 수분, 기온 등의 기후요인과 토양, 수목밀도 등의 식물외적 요인들을 반영한다.

수목의 성장은 그 성장지역의 기후와 성장기의 기후에 의해 절대적인 영향을 받는다. 수목의 연륜은 기후신호(climatic signal)를 통과시키거나 변환시키는 매개체로서 기후를 반영하는 필터로 간주될 수 있다. 그러므로 특정 연구지역 연륜의 성장특성과 기후변동간의 관계를 모형화하면, 기상관측 이전의 기후요소의 변동을 복원할 수 있고, 기후자료가 존재하지 않는 지역의 기후에 대한 추정이 가능하다.

3. 연구지역개관

연구지역은 소백산 비로봉부근 서사면(위도 36°52′30″~37°05′00″, 경도 128°22′30″

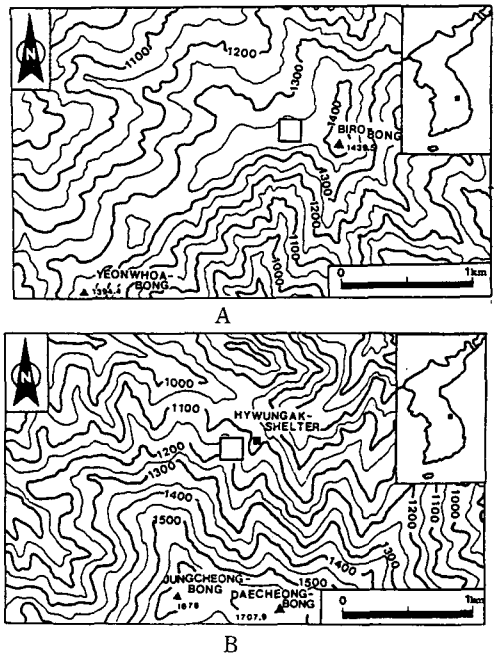

Fig 1. Study site (A: Mt. Sobaek, B:Mt. Seorak)

~128°35′00″, 고도 : 1365~1380m)과 설악산 희운각대피소부근 동사면(위도 : 38°08′05″~38°08′11″, 경도 : 128°28′08″~128°28′16″, 고도 : 1205~1220m)이다(그림 1). 이 지역은 아한대 산림지대로서, 수목성장의 기후적 분포한계인데, 동종 또는 이종간의 경쟁, 산불, 병충해, 식물밀도 등과 같은 비기후적 요소, 위치요소 및 인위적 요소의 배제가 손쉬운 천연림으로 구성되어 있다. 토양은 산성갈색삼림토이며, 주요 식생은 주목, 잣나무, 가문비나무, 분비나무, 신갈나무 등의 상록침엽수 및 낙엽활엽수이다.

4. 연구방법 및 자료

우선, 交叉年代測定(Crossdating)을 통하여 각 연륜을 성장시기별로 확인하고 측정오류와 僞年輪을 검정하였다. 標準化를 통하여 연륜너비연대기로부터 수령에 따른생육추세와 수목의 부피성장에 따른 연륜너비의 기하학적 감소 등의 체계적인 분산을 제거함으로써, 연륜너비연대기를 안정적인 연륜지수연대기로 변환하였다. 적절한 연륜연대기를 채택하여, 각 연륜연대기들의 신뢰성을 검정하고, 그 특성을 파악하기 위하여 평균민감도와 자기상관분석, 분산분석, 상관계수분석, 신호 대 잡음비분석, 모집단에 대한 신호강도분석 등을 실시하였다. 상관계수분석과 단계회귀분석을 이용하여 연륜지수연대기와 밀접한 관련을 가지는 기후자료를 선별하고, 보정방정식을 산출하였다. 상관계수분석과 부호검정, 복원평균검정, 오차환산분석을 이용하여 산출된 보정방정식의 적합성을 검정하였다. 검정된 보정방정식을 이용하여 고기후를 복원하고, 고빈도 분산을 제거하여 기후의 장기적인 변동을 관찰하였다. 또한 주기성분석을 통하여 고기후의 주기를 분석하였다.

효율적으로 고기후를 복원하기 위해서는 추정기간에 걸쳐 교차연대측정이 가능한 연륜 형태가 나타나고, 기후변동에 민감하게 반응하며, 고기후복원에서 필요로 하는 충분한 수령을 가진 수종을 선택해야 한다. 본 연구에서는 이러한 조건을 일반적으로 만족시키는 고산성 수목인 주목(*Taxus cuspidata*)과 잣나무(*Pinus koraiensis*)를 선정하였다.

소백산에서는 13本의 주목으로부터 17개의 성장편을 추출하였고, 설악산에서는 16本의 주목에서 32개의 성장편을, 그리고 17本의 잣나무에서 33개의 성장편을 추출하였다. 직경 4.5mm의 생장추(Increment Borer)를 사용하여 지표면 약 0.5m높이에서 髓에 접근하도록 성장편을 추출한 후 자연건조가 가능한 종이빨대에 보관하였다. 적절히 건조한 표본들은 선명한 표면과 정확한 측정을 위하여 연륜과 직각으로 정렬한 후, 砂布(#320, #600, #1000)를 사용하여 순차적으로 연마하였다. 측정은 입체현미경과 접안 마이크로미터를 사용하여 약 0.0147mm 단위로 측정하였다.

각 기상관측소의 기후자료가 가지는 위치 및 관측시점의 차이에 따른 문제점을 극복하기 위하여 지역평균기온을 산출한 후, 이를 기후자료로 사용하였다. 지역평균기온은 연구지역주변 기상관측소(추풍령, 대관령, 강릉, 속초, 대전, 춘천, 원주, 서울)의 월평균기온을 해수면 경정기온으로 변환한 후, 이 값들을 평균하여 산출하였다. 월평균기온은 기상청의 [기상월보]와 [한국누년기후극값]을 참조하였다.

본 론

1. 교차연대측정

교차연대측정은 다양한 환경요소 변화에 대한 표본들의 연륜변화를 비교하는 연륜기후학의 중요한 기법 가운데 하나이다. 이는 부적절한 연륜을 추출하고, 표본간 연륜패턴의 同時性과 同質性을 검정하여 각 연륜을 정확한 시간적 순서로 배열하는 방법이다(그림 2). (그림 2)의 화살표는 연륜간에 僞年輪이 발생한 것을 가리킨다.

연륜을 圖式的으로 표현하는 骨格圖

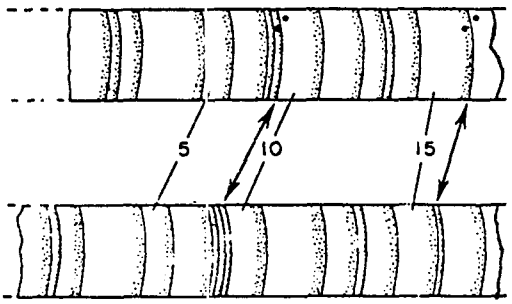

Fig. 2. Crossdating (Source: Fritts H.C., 1976, Tree Rings and Climate, p.22)

(skeleton plot)는 폭이 좁은 연륜을 형성한 해를 지시년(☆)으로 표시하는 교차연대측정의 한 방법이다(그림 3). 골격도의 작성에는 입체현미경과 모눈종이를 사용하였다. 본 연구에서는 골격도를 이용하여 교차연대측정을 한 후, COFECHA 프로그램을 이용하여 보다 정확한 교차연대측정을 실시하였다.

2. 성장함수의 추출

식물성장은 환경조건에 의해 영향을 받기 때문에, 환경의 특성은 연륜에 반영된다. 연륜의 성장에 영향을 주는 요소는 다음과 같다. 내적요소는 효소, 사용 가능한 영양물질, 성장조절물질 등이다. 외적요소는 기온, 수분 등의 기후적인 요소와 토양무기물, 同種 및 異種間의 경쟁, 산불, 병충해 등의 비기후적인 요소가 있다. 또, 수령과 지름의 증가에 따라서 기하학적인 연륜너비 성장이 감소하는 경향이 있다. 식물의 연륜성장(R_t)에 영향을 미치는 각 요소는 [식 1]의 선형적인 결합으로 표현할 수 있고, 실제 연륜성장에서 기후적인 영향을 제거한 예상성장경향(Gt)은 [식 2]로 나타낼 수 있다.

$$R_t = A_t + C_t + \delta D2_t + E_t \quad [1]$$

$$C_t = f(A_t,\ \delta D1_t,\ \delta D2_t) \quad [2]$$

각 연륜너비연대기의 예상성장함수는 ARSTAN 프로그램의 이중표준화(Double detrending)방법을 사용하여 산출하였다. 1차로 지수함수(그림 4-A) 및 선형회귀식(그림 4-B)을 사용하여 예상성장함수를 구한 후, 2차로 Cubic Spline 방법(그림 4-C)을 사용하여 예상성장함수를 산출하였다. 低頻度의 연륜너비 성장경향은 장기적 기후변화

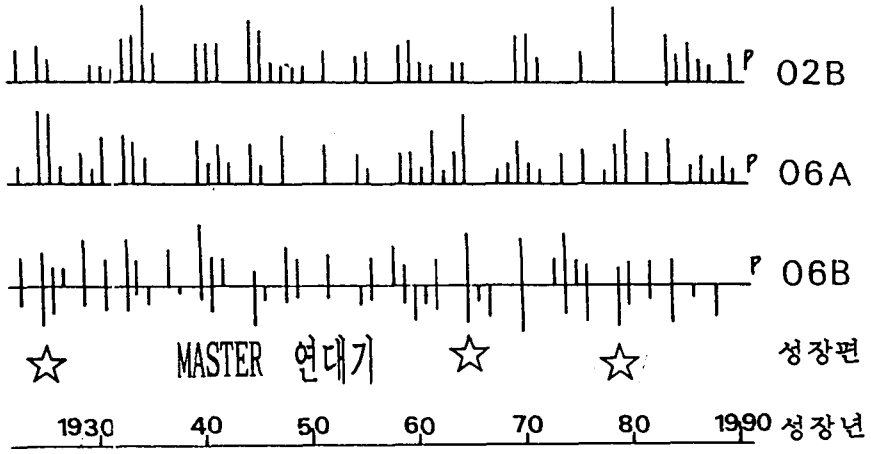

Fig. 3. Matching Skelteon Plots with Master Chronology (Mt. Seorak)

At : 수령과 지름의 증가와 관련된 기하학적인 나이테너비의 경향, Ct : 기후적으로 관련되어진 환경변수, D1t : 경쟁제거 등의 연구지역내의 시·공간적 동일성이 없는 성장경향, D2t : 연구지역내의 시·공간적 동일성을 가지는 산불이나 오염 등에 의한 성장경향, Et : 다른 신호와 관련되지 않은 설명되어지지 않는 연변화.

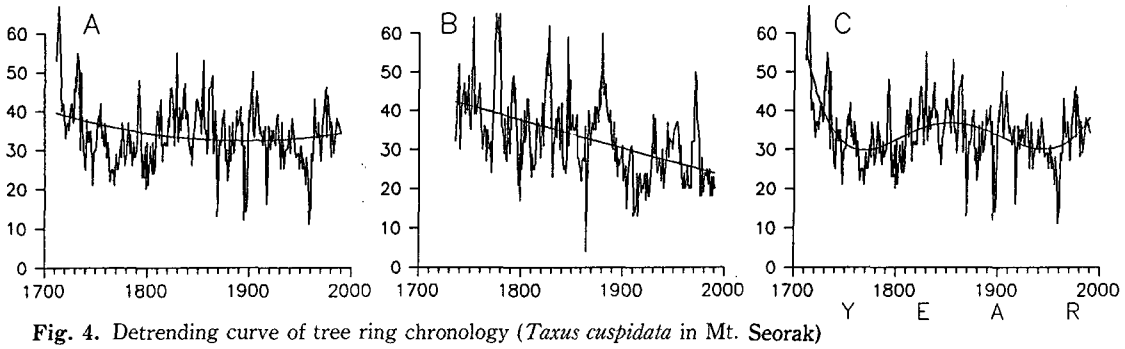

Fig. 4. Detrending curve of tree ring chronology (*Taxus cuspidata* in Mt. Seorak)

에 관한 잠재적인 정보를 제공할 수 있으므로, 지나친 평활화로 이들 정보가 소실되지 않게 2차의 예상성장함수는 120년 이상의 경직성(stiffness)을 가지도록 했다. 식물성장 초기의 일부 연륜은 위치요소와 비기후적인 환경변화로 인해 오히려 증가하거나, 성장함수에 의해 적절히 맞추어질 수 없는 경우가 있다. 이러한 연륜은 기후에 관한 정확한 정보를 제공하지 못하는 경우가 많기 때문에 연구에서 제외하였다.

3. 표준화

연륜너비연대기에는 비대성장에 따른 기하학적인 연륜너비의 감소와 각 수목의 생리적인 성장경향 등의 비기후적 성장경향이 포함되어 있다. 수목으로부터 기후신호를 추출하기 위해서는 연륜의 年成長値에서 비기후적 성장경향들을 제거할 필요가 있다. 표준화는 연륜너비연대기로부터 비기후적 성장경향을 제거하여 연륜너비연대기를 안정적인 연륜지수연대기(It)로 변환시킨다(식 3).

$$I_t = R_t / G_t \qquad [3]$$

연륜지수연대기는 수목간의 공통적인 기후신호(C_t)와 개개 연륜연대기의 유일한 신호($\delta D1_t, E_t$)의 결합체로서 기후변화에 따른 수목의 상대적인 성장비를 나타낸다. 연륜지수연대기에서는 비기후적인 경향과 저차의 자기상관들이 제거되는 반면, 장기적인 기후변동 경향에서 얻을 수 있는 정보량이 한정된다. 연륜지수연대기의 평균은 '1.0'이고, 분산과 평균민감도는 연륜너비연대기와 동일하다. 각 지역 개개 수목의 연륜지수연대기를 평균하여 지역의 평균연대기(지역연대기)를 산출하였다(그림 5).

4. 연륜연대기의 신뢰성검정

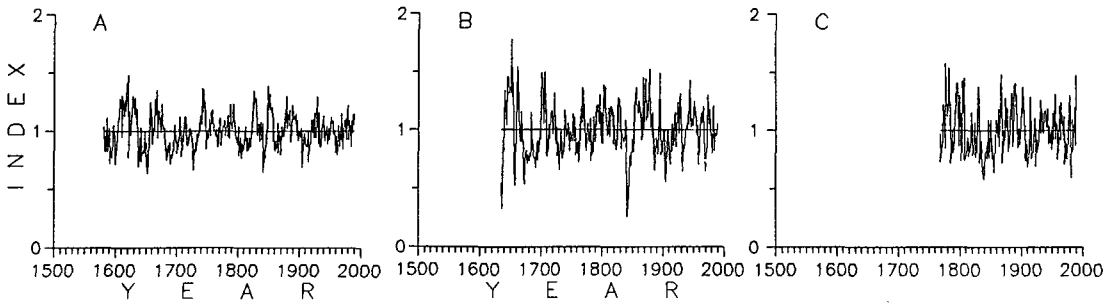

Fig. 5. Tree ring indice curve (A STR, B SPR, C BTR)

* BTR, STR and SPR Tree ring indice chronology of *Taxus cuspidata* in Mt. Sobaek, *Taxus cuspidata* and *Pinus koraiensis* in Mt. Seorak.

지역연대기의 신호는 각 지역의 전체 연륜연대기에 대한 정량화된 신호로서 통계적인 개념이다. 따라서, 지역연대기에 대한 신뢰성분석은 고기후복원에 앞서 지역연대기의 선택과 그 특성을 파악함에 있어 유용하다.

평균민감도분석(Mean Sensitivity, MS)에 따르면, 각 지역연대기는 낮은 평균민감도를 가진다(표 1). 이 결과에 따르면 각 지역연대기의 개개 연륜은 상대적인 연변동이 크지 않을 뿐더러 기후에 대해 유사한 반응을 보인다.

자기상관분석에 따르면, 각 지역연대기는 높은 1차의 자기상관을 보인다(표 1). 이는 수목의 성장이 전년의 환경상태에 따라 민감하게 반응한다는 것을 나타낸다.

각 지역연대기와 COFECHA 프로그램을 이용하여 산출한 Master 연대기간의 상관계수는 [표 1]과 같다. 각 연륜연대기와 Master 연대기간에는 높은 상관을 보이고 있다.

각 지역연대기의 나무내 성장편간(Vwt, Within tree), 나무간(Vbt, Between tree), 모든 성장편간(Vat, All tree) 분산분석의 결과는 [표 1]과 같다. 각 지역연대기에 포함된 연륜지수연대기의 수와 기간을 고려한다면 각각 높은 공분산을 가지는 것으로 추정할 수 있다.

각 지역연대기의 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio SNR)는 [표 1]과 같다. 연강수량의 변화가 크지 않는 北美서부 건조지대 수목의 경우에는 '10'전후의 신호대 잡음비를 가진다. 연구지역의 기후변동 경향이 큰 것을 고려할 경우, 연구지역의 연륜연대기는 비교적 높은 기후신호의 강도를 가진다고 할 수 있다.

각 지역연대기의 모집단에 대한 신호강도(Expressed Population Signal, EPS)는 [표 1]과 같다. 각 지역연대기의 모든 성장편에서 모집단에 대한 신호강도가 85%이상일 경우, 지역연대기가 통계적으로 보다 큰 신뢰성을 가진다. 설악산 잣나무와 설악산 주목, 소백산 주목의 경우, 이는 각각 1671년과 1651년, 1791년 이후의 기간에 해당한다. 초기의 연륜들도 Master 연대기와 상관관계가 높으므로, 유효한 기후신호를 가졌을 것이라는 일반적인 추정이 가능하다.

위의 각 분석들에 따르면 각 연륜연대기들은 지역의 공통적인 기후신호(C_t)를 비교적 잘 반영한다고 볼 수 있다.

Table 1. Statistics of tree ring indice chronology

Chronology	BTR	STR	SPR
Period	1770-1990	1579-1990	1635-1990
MS	0.190	0.173	0.237
1th Autocorr.	0.631	0.595	0.655
Correlation	0.516	0.510	0.565
V wt	0.592	0.722	0.664
V bt	0.143	0.291	0.252
V at	0.184	0.310	0.266
SNR	2.169	6.657	5.727
EPS	0.685	0.869	0.852

5. 고기후의 복원

1) 보정

보정은 기상관측기간 동안의 연륜너비지수와 기후변수간의 관계를 밝히고, 고기후를 복원하기 위한 보정방정식을 도출하는 것이다. 본 연구에서는 연구기간을 기상관측 이전의 고기후복원기간(1635-1911)과 기상관측기간(1912-1989)으로 분리하였다. 기상관측기간은 연륜너비지수와 기후변수간의 보정방정식을 구하는 보정기간(1912-1949)과 보정방정식의 적합성을 평가하는 검정기간(1952- 1989)으로 나누었다.

① 상관관계분석

지역연대기의 연륜지수와 밀접한 관련이 있는 기후변수를 도출하기 위하여 상관관계분석을 사용하였다. 특정년도의 성장은 해당년도(t)와 그 전년과 그 이전(t-1, t-2, …, t-n)의 기후와 환경에 의해 영향을 받는다(그림 6). 1912-1989년간 전년(t-1) 7

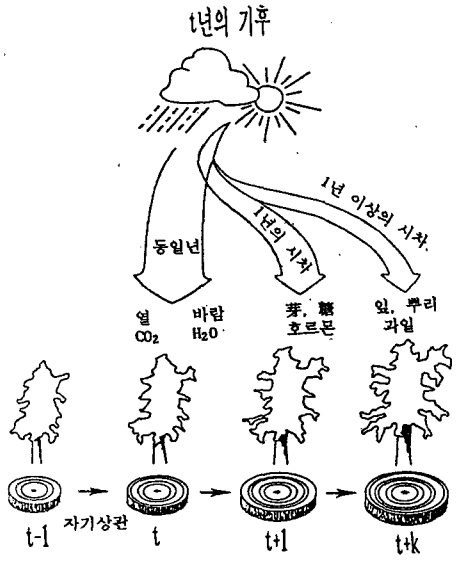

Fig. 6. Pictorial representation which models the way climate of a given year(t) affects ring widths in a tree.

월에서 수목의 비대성장이 끝나는 해당년(t) 9월의 월평균기온 및 이전(t-1, t-2, t-3)의 연륜지수와 해당년의 연륜지수(It)간의 상관계수분석을 통하여 연륜지수와 기후변수간의 관계를 도출하였다(그림 7).

전체적으로 각 지역연대기들은 수목성장 초기인 4월과 5월 기온과 왕성한 수목활동을 보이는 7월과 8월 기온과 각각 강한 양(+)의 상관관계를 보인다. 또한, 설악산 잣나무의 경우에서처럼 각 지역연대기는 1차의 자기상관을 보여준다. 이는 고산지대의 수목성장에 관한 Norton, D.A.(1984)의 연구와 유사하다.

특정 지역에서 특정 수목의 연륜은 특정 기간의 정보를 제한적으로 제공한다. 따라서, 지역연대기와 밀접한 관련을 가지는 4-5월과 7-8월 평균기온을 중심으로 고기후를 복원하였다. 이러한 기후자료를 집단화하는 방법은 변수의 수가 줄어들고, 식물성장에 적합한 계절로 기후를 분할할 수 있기 때문에 연륜기후학에서 주로 사용된다.

② 보정방정식

본 연구에서는 다중회귀분석을 사용하여 보정방정식을 구하였다. 특정 기후의 발생과 수목의 성장간에는 [그림 6]에서 보듯이 1년 혹은 그 이상의 時差(자기상관)를 가진다. 따라서 성장기의 기후신호와 성장기 이전의 성장에서 기인한 제약을 분리하기 위해서, 보정방정식은 1년이상의 시차를 가지는 연륜지수들(It, $I_{t+1}, \cdots, I_{t+k}$)을 독립변수로 포함시킬 필요가 있다(그림 7).

4-5월 평균기온(Y_t)의 보정방정식은 설악산 주목의 성장기 연륜지수(STR_t), 설악산 잣나무의 성장기 익년 연륜지수(SPR_{t+1}), 소백산 주목의 성장기 연륜지수(STR_t)를 독립변수로 사용하였다(식 4). 7-8월 평균기온(Y_t)의 보정방정식은 설악산 주목의성장기 연륜지수(STR_t)와 잣나무의 성장기 익년 연륜지수(SPR_{t+1})를 독립변수로 사용하였다(식 5).

$$Y_t = 8.896 + 1.998 \times STR_t + 0.818 \times SPR_{t+1} + 1.835 \times BTR_t \quad [식\ 4]$$

$$Y_t = 18.883 + 4.165 \times STR_t + 1.502 \times SPR_{t+1} \quad [식\ 5]$$

보정기간에 걸친 상관계수분석에 따르면 실제기온과 예측기온은 비교적 높은 상관관

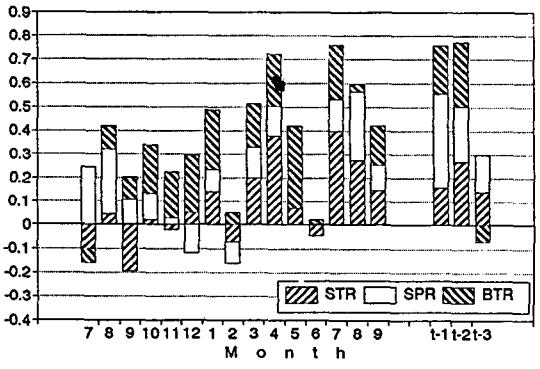

Fig. 7. Correlation of each month's mean temperature for year *t* and *t*-1 and tree ring indice for year prior to growth on tree ring indice for year *t*.

계를 가진다(표 2).

2) 검정

보정방정식은 검정기간의 기상관측자료를 이용하여 그 적합성의 검정이 이루어져야 한다. 보정방정식이 기후복원기간의 기후변동을 밝혀주는 설명력은 검정에서 밝혀진 것과 일치한다.

4-5월과 7-8월 평균기온의 실제치와 예측치간의 상관계수가 보정기간의 상관계수보다 더 낮은 것은 1950년대이후 산업화 등에 의한 환경오염으로 수목이 보정기간과는 다른 성장환경에서 자랐기 때문으로 추정할 수 있다(표 3). 연구지역과 유사한 기후적 한계지역에서 주로 사용되는 부호검정의 결과에 따르면, 4-5월과 7-8월 평균기온은 각각 72.9%와 70.3%의 일치를 보였다(표 3). 보정방정식은 유의수준 $P=0.05$에서 채택된다. 4-5월과 7-8월 평균기온의 복원평균검정분석결과는 각각 유의수준이 $P=0.3231$과 $P=0.8221$이다(표 3). 이로써 관측치와 예측치의 분포가 통계적으로 유의한 차이가 있다는 연구가설은 기각되고, 두 보정방정식은 유의수준 $P=0.05$에서 유의하게 나타났다. 오차환산분석결과에 따르면, 4-5월과 7-8월 평균기온은 각각 0.1961과 0.1770이다(표 3). 이 분석은 결과치가 양의 값을 가질 경우에 한하여 복원에 관한 정보를 제공하므로 4-5월과 7-8월 평균기온의 보정방정식은 고기후에 관한 정보를 제공한다.

3) 보정방정식을 이용한 고기후복원

① 4-5월 평균기온

기상관측기간동안 실제치와 보정방정식을 이용하여 복원한 4-5월 평균기온의 예측치는 [그림 9-A]와 같다. 이 보정방정식을 이용하여 1770-1989년간의 4-5월 평균기온을 복원하였다(그림 10-A). 복원기간과 관측기간, 전체기간의 평균기온은 각각 13.58℃과 13.69℃, 13.60℃이다.

복원기간의 평균에서 $\pm 2\sigma$ 이상의 기온을 나타낸 해를 각각 고온특이년, 저온특이년으로 가정했을 때, 고온특이년은 1782-1783년, 1793-1794년, 1803년, 1829년이고, 저온특이년은 1785년, 1786년, 1810년, 1814년, 1841-1844년이다. 10년 이동평균의 경우, 기온이 비교적 낮았던 기간은 1807-1816년, 1835-1844년, 1903-1912년 등이며, 비교적 높았던 기간은 1774-1783년, 1791-1800년, 1822-1831년 등이다(표 4).

Table 2. Calibration statistics

	April-May	July-August
Period	1912-1950	1912-1950
Correlation Coeff.	0.63664	0.56448
Adjust R^2	0.35434	0.28079
F-level	7.95160	8.41783
Significant F	0.0004	0.0010

Table 3. Verification statistics

	April-May	July-August
Period	1952-1989	1952-1989
Correlation Coeff.	0.4848	0.4797
Adjust R^2	0.2137	0.20869
Sign Test	72.9%	70.3%
(Agreement/Total)	(27/37)	(26/37)
Product Means Test(P)	0.3231	0.8221
Reduction of Error	0.1961	0.1770

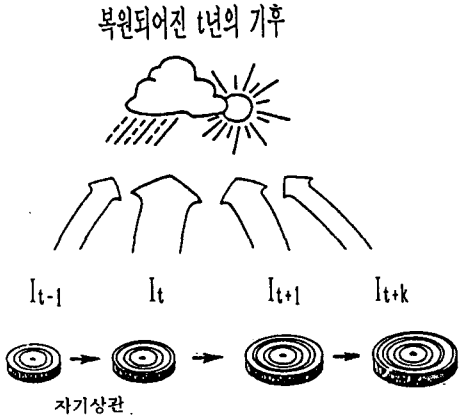

Fig. 8. A model for the statistical calibration of the system portrayed in Fig 6.

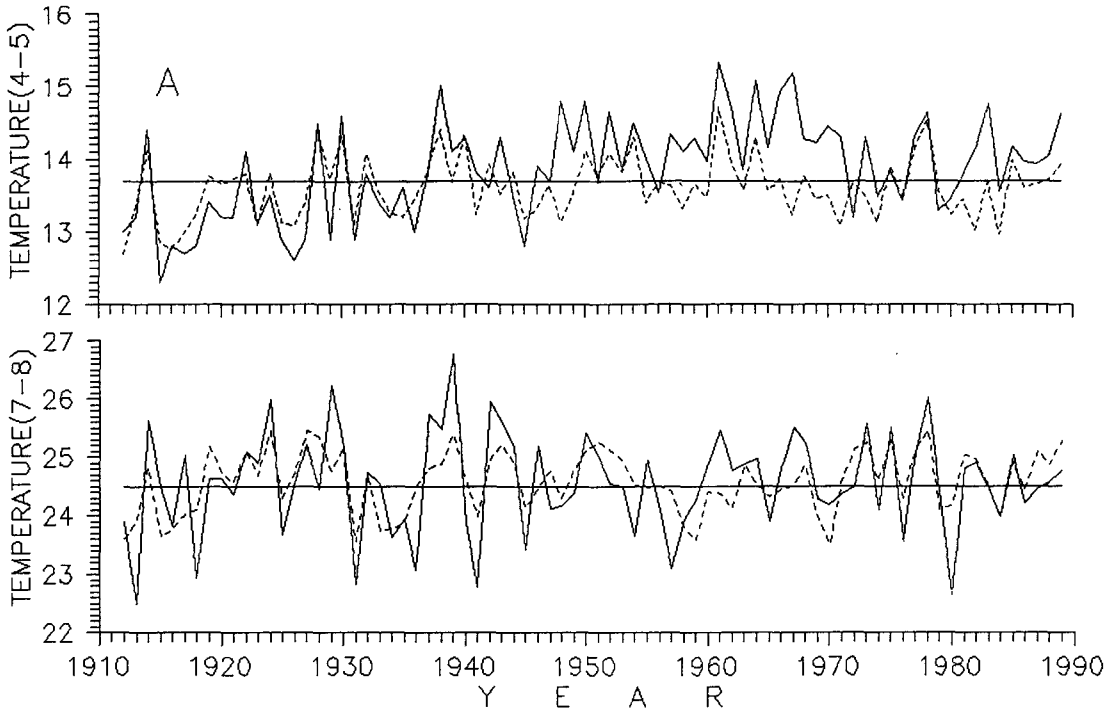

Fig. 9. Actual (dashed line) and reconstructed (solid line) values of temperature for the period 1912-1989(A April-May's mean temperature, B July-August's mean temperature)

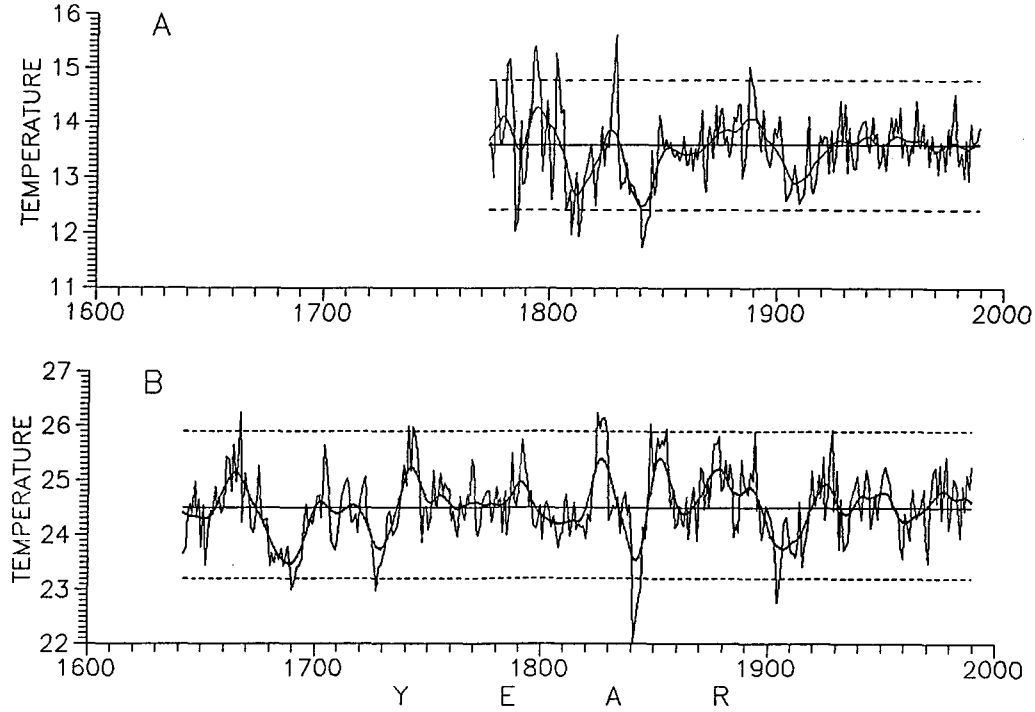

Fig. 10. Reconstructed April-May's and July-August's mean temperature, and smoothed mean temperature which deleted low-frequency variance below 12 year (A April-May's mean temperature, B July-August's mean temperature, middle solid line mean temperature for total year, dashed line mean temperature $\pm 2\sigma$)

Table 4. Largest temperature anomalies

Rank	April-May's mean temperature				July-August's mean temperature			
	Year		10-year means		Year		10-year means	
	Cool	Warm	Cool	Warm	Warm	Cool	Warm	Cool
1	1841	1829	1835-1844	1791-1800	1841	1667	1684-1693	1848-1857
2	1842	1794	1807-1816	1774-1783	1842	1825	1838-1847	1823-1832
3	1785	1793	1903-1912	1822-1831	1637	1828	1903-1912	1737-1746
4	1814	1803	1783-1792	1875-1884	1904	1848	1723-1732	1875-1884
5	1810	1782	1817-1826	1886-1895	1727	1741	1676-1685	1661-1670

전체기간에 걸쳐 뚜렷한 기온의 증감이 나타나지 않으나, 20세기에는 장기적인 기온의 상승경향이 나타나고 있다. 특히, 1950년대 이후의 기온상승경향은 CO_2 등의 온실가스 증가에 따른 전세계적인 기온상승 현상과 일정 정도 맞물려 있다. 그러나 이를 대기중 CO_2의 증가에 따른 CO_2의 시비효과(CO_2 fertilization)로 간주하기는 어렵다. 가장 혹독한 저온기는 1835-1848년간에 발생한 것으로 추정된다. 이 기간은 12년 이하의 빈도를 가지는 분산을 제거한 복원에서도 볼 수 있듯이, 전체기간중 가장 극심하고 오랫동안 지속되었던 것으로 추정된다. 1793-1803년간은 전체기간 중에서 가장 더웠던 기간이고, 1870년대 중반에서 1890년대 중반까지 장기적인 고온기가 지속되었던 것으로 추정된다.

검정은 때로 보정기간과 유사한 기후상태를 지닌 기간에 한정된다. 따라서 복원의 신뢰성을 확보하기 위해서는 고기후기록 및 전세계적인 기온의 변동과의 비교가 필요하다. 增補文獻備考에 따르면, 1660-1680년대와 1830-1850년대에는 많은 강수와 이에 따른 기온 하락을 기록하고 있다. 1780년대와 1830-1840년대의 저온기는 冷雨와 低溫으로 인해 일본역사상 가장 큰 기근으로 기록되는 天明飢饉(1782-1787) 및 天保飢饉(1833-1839)과 유사한 시기이다. 1870-1890년대의 고온기는 1876-1895년간 고온기를 유지했다는 일본의 기온복원과 약 5년의 시기적인 차이는 있지만 유사하다. 또, 20세기 초반의 저온기가 20세기중 가장 혹심한 저온기임을 보여준다. 이는 19세기 후반에서 20세기 초반에 걸쳐 진행된 전세계적인 기온 하강현상과 전반적으로 일치한다.

② 7-8월 평균기온

기상관측기간동안 실제치와 보정방정식을 이용하여 복원한 7-8월 평균기온의 예측치는 [그림 9-B]이다. 이 보정방정식을 이용하여 1580-1989년간의 7-8월 평균기온을 복원하였다(그림 10-B). 복원기간과 관측기간, 전체기간의 평균기온은 각각 24.50℃과 24.62℃, 24.58℃이다.

복원기간의 저온특이년은 1637년, 1727년, 1841-1843년, 1904년이고, 고온특이년은 1667년, 1741년, 1743년, 1825년, 1828년, 1848년이다. 또, 10년 이동평균의 경우, 기온이 비교적 낮았던 기간은 1684-1693년, 1838-1847년, 1903-1912년 등이고, 비교적 높았던 기간은 1737-1746년, 1823-1832년, 1848-1857년 등이다(표 4).

4-5월 평균기온과 마찬가지로 20세기 이후 약간의 기온의 증가가 있음을 알 수 있다. 이러한 기온의 증가추세는 1850년대 후반부터 1890년대 후반까지의 기간에도 나타난다. 1740년대부터 1820년대까지는 기온의 장기적인 하강현상이 나타나고 있으나 전체기간에 걸쳐 뚜렷한 기온의 상승·하강현상을 보이지는 않는다.

전체기간중 1676-1693년간의 7-8월이 가

장 한랭한 여름으로 추정된다. 이 기간에는 1838-1847년과 1903-1912년간의 저온기와 더불어 비교적 오랫동안 한랭한 여름이 지속되었다. 또, 4-5월 평균기온과 마찬가지로 20세기 초가 20세기중 가장 한랭했다는 것을 보여준다. 8년 이하의 분산을 제거한 복원도에서 위의 저온기들이 명확하게 나타난다. 1793-1803년 기간은 전체기간중 가장 온난했던 기간이고 1851-1895년은 고온기가 장기적으로 지속되었던 기간이다.

4-5월의 기온복원치와 마찬가지로 복원된 각 저온기와 고온기들이 한반도전역에 걸쳐서 발생한 것인지는 명확하지 않다. 그러나, 주변국가의 고기후연구와 우리나라의 고기록 자료는 위의 저온기 및 고온기에 관해 비교적 잘 표현하고 있다. 지역에 따라 다소 차이는 있지만, 전세계적으로 소빙기는 15-18세기에 걸쳐 나타났다. 한랭한 소빙기의 극을 이룬 17세기는 복원기간중 1690년 전후의 저온기와 유사하며, 우리나라를 비롯하여 중국, 일본 등지에서 공통적으로 발생했던 것으로 판단된다. 저온기가 비교적 강하게 나타나지 않은 1740년대 중반에서 1790년대 후반까지의 기간은 18세기 중엽에서 19세기 초반에 걸친 북극빙하의 해빙기와 유사함을 보여준다. 복원기간중 가장 냉량한 기온을 보였던 1830-1840년대의 저온기는 朝鮮古代觀測記錄調査報告에 의하면, 7-8월 강수가 비교적 많았던 기간이다. 20세기 초반의 기온의 하강은 4-5월 평균기온과 마찬가지로 전세계적인 기온의 하강과 맥을 같이 한다.

4) 주기성분석

복원된 4-5월과 7-8월 평균기온의 주기를 분석한 결과, 4-5월과 7-8월 평균기온은 각각 13.2년과 12.9년에서 통계적으로 유의한 주기를 가지고 있었다. 따라서 두 평균기온은 유사한 주기성을 보였다. 기후주기분석의 결과는 짧은 기상관측기간의 기후주기분석이 가지는 한계점을 보완하여, 예상되는 기후재해 등 다양한 기후정보를 제공한다.

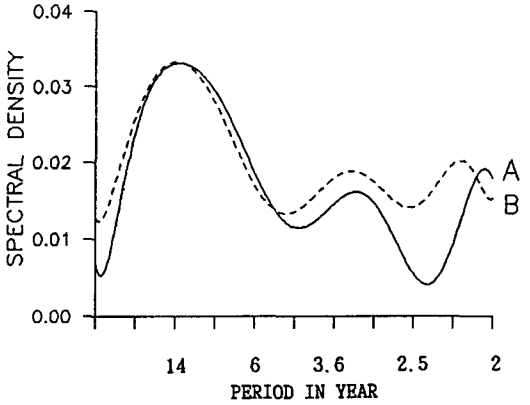

Fig. 11. Periodicity of April-May's and July-August's mean temperature (A April-May, B July-August)

결 론

본 연구는 연륜기후학적인 연구방법을 이용하여 중부산간지역의 고기후를 추정하고, 이를 근거로 기후주기를 산출하였다. 이 연구를 통해 밝혀진 내용은 다음과 같다.

1) 연구수목 연륜의 연성장치(年成長値)는 4-5월과 7-8월 평균기온과 밀접한 관련을 가진다.
2) 4-5월과 7-8월 평균기온의 보정방정식을 이용하여 각각 1770-1989년과 1636-1989년간을 복원하였다. 검정결과에 따르면, 각 보정방정식은 약 21%의 설명력을 가진다.
3) 복원기간, 관측기간 및 전체기간의 4-5월 평균기온은 각각 13.58℃, 13.69℃ 및 13.60℃이고, 7-8월 평균기온은 각각 24.50℃, 24.62℃ 및 24.58℃이다. 20세기이후 약간의 기온상승이 있었다.
4) 4-5월 평균기온의 복원결과 한랭했던 해는 1785년과 1814년, 1841년 등이고, 온난했던 해는 1794년과 1803년, 1829년 등이다. 한랭했던 10년간은 1807-1816년과 1835-1844년, 1903-1912년 등이고, 온난했던 10년간은 1774-1783년과 1791-1800년, 1822-1831년 등이다.

5) 7-8월 평균기온의 분석결과를 살펴보면 한랭했던 해는 1637년, 1841년, 1904년 등이고, 온난했던 해는 1667년, 1825년, 1828년 등이다. 한랭했던 10년간은 1684-1693년과 1838-1847년, 1903-1912년 등이고, 온난했던 10년간은 1737-1746년과 1823-1832년, 1848-1857년 등이다.
6) 복원된 4-5월과 7-8월 평균기온의 주기는 각각 13.2년과 12.9년이다.
7) 복원된 고기후는 증보문헌비고, 한국고대관측기록조사보고 등의 고기록 및 한반도 주변국의 고기후복원 등에서 밝혀진 내용과 시기적으로 유사하다.

참고문헌

氣象廳, 氣象月報, 1964年 1月-1989年 12月.

氣象廳, 1990, 한국누년기후극값, pp.3-25.

朴元圭, 1991, 大氣汚染 增加에 따른 탄산가스 累積이 韓國産 針葉樹類의 生長 및 木材才質에 미친 影響 : 年輪年代學的 分析, 韓國科學財團. 金蓮玉, 1985, 韓國의 氣候와 文化-韓國의 氣候와 文化. 歷史的 硏究, pp.503-517.

朝鮮總督府觀測所, 1917, 朝鮮古代觀測記錄調查報告, pp.65-78.

竺可楨, 1975, "中國の氣候 5000年來の變化," 地理, 第 20卷 3號. pp.102-129.

Arbaugh, M.J. and D.L. Peterson, 1989, "Variable Selection in Dendroclimatology An Example Using Simulated Tree-Rings Series," *Forest Science,* vol.35, pp.294-302.

Cook, E.R. and L. Kairiukstis, 1990, *Methods of Dendrochronology : Applications in the Environmental Sciences, Kluwer Academic Publishers, pp.*40-235. *Fritts, H.C.,* 1976, *op.cit.,* pp.261-433.

Fritts, H.C., T.J. Blasing, B.P. Hayden and J.E. Kutzbach, 1971, "Multi-variate Techniques for Specifying Tree-Growth and Climate Relationships and for Reconstructing Anomalies in Paleoclimate," *Journal of Applied Meteorology,* vol.10, pp.845-864.

Fritts, H.C., 1976, Tree Ring and Climate, Academic Press, London, U.K., pp.10-11.

Graumlich, L. and L.B. Brubaker, 1985, "Reconstruction of Annual Temperatures (1590-1979) for Longmire, Washington, Derived from Tree-Rings," *Quarternary Research,* vol.25, pp.223-234.

Holmes, R.L., 1990, *Dendrochronology Program Library,* Laboratory of Dendrochronology : CRICYT-Parque San Martin Mendoza, Argentina.

Ikuo Maejima and Yoshino Tagami, 1988, "Climate of Little Ice Age in *Japan," Journal of Geography and Geography,* vol. 24, pp.24-48.

LaMarche, V.C., 1974, "Paleoclimatic Inferences from Long Tree-Ring Records," Science, vol.183, pp.1043-1048.

Lamb, H.H. and A.I. Guetter, 1961, "Climatic variation and observed changes in the general circulation," *Geographical Annual,* vol.13, pp.363-400.

Norton, D.A., 1984, "Tree growth-climate relationships in subalpine *Nothofagus* forests, South Island, New Zealand," *New Zealand Journal of Botany,* vol.22, pp. 471-481.

Pittock, A.B., 1982, "Climatic Reconstructions from Tree-Rings," in *Climate From Tree Rings* (Hughes, M.K. et al. (ed), Cambridge University Press), pp.62-65.

Stokes, M.A. and T.L. Smiley, 1968, *An Introduction to Tree-Ring Dating,* University of Chicago Press, Chicago, IL, USA.

Received: November 15, 1992
Accepted: December 5, 1992