

소나무 연륜연대기를 이용한 嶺東지방의 5~6월 강수량 (253년간: A.D. 1746~1998) 복원

박 원 규 · 서 정 옥

충북대학교 산림과학부

Reconstruction of May~June Precipitation (253 Years: A.D. 1746~1998) in East-Coastal Region (Yungdong) of Korea from Tree Rings of *Pinus densiflora* S. et Z.

Won-Kyu Park and Jeong-Wook Seo

School of Forest Resources, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

요 약

설악산에서 작성된 8개 지역 연륜연대기 중 강수량 복원에 적합한 대승폭포 인근 2개 지역(해발고 700~900m)의 연륜연대기를 이용하여 253년간 (A.D. 1746~A.D. 1998)의 5월~6월 총강수량을 복원하였다. 1765~1800년(최장 가뭄), 1835~1845년, 1890~1910년, 1920~1940년, 1980~1995년이 건조기로 나타났으며, 1810~1830년, 1860~1890년, 1950~1970년이 습윤한 시기로 나타났다. 장기간으로 보았을 때, 18세기 후반기는 건조한 기간이었으며, 19세기의 5월~6월 총강수량이 250mm로 20세기의 231mm보다 많아 19세기가 20세기보다 상대적으로 습윤하였음을 알 수 있었다. 강수량 변화폭이 19세기가 20세기보다 큰 것으로 관찰되었다. 전 기간에 걸친 주요한 전습 주기는 단기간은 3년, 장기간은 60~80년으로 조사되었다. 서울지방의 측우기 자료와는 1800년대 초를 제외하곤 대체로 일치하였다.

ABSTRACT

May-June precipitation (253 years: A.D. 1746~1998) of Yungdong region (coastal area of East-central Korea) was reconstructed using two tree-ring chronologies of *Pinus densiflora* sampled from Daeseung Fall area in Sorak Mountains. Dry periods were 1765~1800 (longest dry period), 1835~1845, 1890~1910, 1920~1940 and 1980~1995, and wet ones 1810~1830, 1860~1890 and 1950~1970. In long-term variation, late 18th century was dry. The 19th century May-June (250mm) was wetter than the 20th century (231mm) and the former indicated higher variability than the latter. Major wet/dry periodicities in May-June precipitation series reconstructed were 3 years in short term and 60~80 years in long term. The present reconstructed data agreed to the ancient rain gauge 'Chukwooki' data (1777~1907) of Seoul (central-west Korea) in low frequency variations except early 1800s.

이 연구는 한국과학재단 국제공동연구 (과제번호:985-0400-002-2)의 지원으로 수행되었음.

서론

지구역사와 함께 시작된 지구환경 변화는 산업화와 같은 인간의 간섭으로 이상변화를 보이기 시작하였다. 이러한 변화는 인간생활에 중요한 경작 생태계(농업, 임업, 어업)뿐만 아니라 자연생태계에도 많은 영향을 주어 지구환경 변화에 대한 인간의 관심이 날로 증가하게 되었다. 지구환경 변화에 대응하기 위하여 국제지구-생태권 프로그램(IGBP)에서는 6개의 핵심 프로젝트 중 하나로 PAGES (Past Global Change)를 지정하여 밝혀지지 않은 과거의 지구환경 변화 연구를 통해 현재 진행되고 있는 지구온난화와 지구환경 변화의 정도와 원인을 규명함으로써 미래에 닥칠 지구 위기에 대처하고자 노력하고 있다.

지구환경 변화에 대처하기 위해서는 과거 장기간의 기후정보가 필요하게 된다. 하지만 온도나 강수량 등 기후요소에 대한 관측 자료는 지역별로 차이가 있지만 신뢰성 있는 기록은 최근 50~100년 동안에 국한되어 있고 관측 지역도 대도시 지역에 편중되어 있어 기후변화를 정량적으로 규명하기에는 불충분하다.

우리나라 강수량 자료는 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록, 증보문헌비고, 승정원일기 등의 역사적 기록을 통해 다른 나라에서는 볼 수 없는 장기간(1771년 이래 200년 이상)의 관측치를 갖고 있어 관측이전시대의 기후를 알 수 있는 주요한 자료로 사용될 수 있다(김연옥 1985, 1990). 그런데 그 기록이 서울 지역에 국한되어 있고(和田雄治 1917; 김연옥 1985, 1987), 연속적으로 기록되어 있지 않아 정량화하기에는 불충분하다. 또한, 서울 지역의 고대 관측 기록과 근대 기록을 비교해 보면 1900년경 전후의 연 강수량이 크게 차이를 보이고 있어, 이 차이가 측정용기나 측정방법 또는 단위 환산에 따른 오차에 의한 것인지 아니면 고대 관측기간인 1900년 전의 강수량이 실제로 많았는지는 검증되어야 할 것이다(Lim & Jung, 1992).

관측기록 이전의 기후를 복원하기 위하여 연륜이 이용된 것은 연륜연대학의 창시자인 A.E. Douglas가 미국 애리조나 수종의 연륜폭 변동이 동계 강수량과 밀접한 관계가 있음을 밝혀낸 이후부터다(Douglas, 1914). 체계적으로 연륜연대기를 이용하여 고기후를 복원한 것은 Fritts(1965)가 미국 서부 지방의 건조한 지역을 대상으로 근래 약 400여 년간의 기후를 복원하여 강수량의 시간적, 지역적 변동을 나타내 준 것이며, 본격적인 복원은 1970년대 중반에 이루어졌다(Blasing, 1975; Fritts, 1990). LaMarche(1974)는 캘리포니아, 네바다주 등의 고산에서 자라는 브리슬콘 소나무들의 연대기를 이용하여 5000년 전까지의 냉온, 습윤 기후를 복원하였으며, Cook and Jacoby(1979), Stahle 등(1988)은 북미 동부의 강수량을 복원하였다. Stockton(1975)은 서북미 하천 유량변동을 복원하는데 연륜연대기를 이용하였다.

국내에서 연륜을 이용한 기후 연구는 이명순(1988)의 서울 고기후 복원(온난지수)이 있는데, 이는 체계적인 시료채취 없이 한 두 개의 수목에 대한 연구이기 때문에 신뢰성이 없다. 따라서 체계적인 연구가 시작된 것은 박원규(1993)와 최종남 등(1992, 1994)이 설악산과 소백산 고산 수종(주목과 잣나무)을 대상으로 춘하계 기온을 A.D. 1650년대까지 복원한 때이다. 연륜을 이용하여 강수를 복원한 것으로 박원규와 Yadav(1998)가 속리산 소나무를 이용하여 중서부 지역의 5월 강수량을 A.D. 1733년까지 복원한 것이 있다.

본 연구는 한반도에서 아직까지 조사되지 않은 설악산(영동지방)의 소나무로부터 장기간의 강수량을 복원하여, 20세기의 강수패턴이 산업혁명 전인 17세기~19세기의 것과 차이가 있는지, 그리고 과거 측우기 자료와 현대관측 자료에서 나타난 1900년 전후 20여년 동안의 뚜렷한 건조기가 연륜 기록에서도 나타나는지를 분석하였다.

연구지역 및 방법

연구지역 및 수종 선정

위치적으로 북위 38°00'06" ~ 38°12'12", 동경 128°15'56" ~ 128°35'53"에 달하는 총면적 373 km²인 설악산국립공원에서 지형적으로 문순연구에 적합할 것으로 기대되는 7개 지역을 선별하여 시료 채취를 실시하였다. 연륜기후학을 위해서는 연구지 선정이 매우 중요한데, 이는 밀생목인 경우 수목간의 경쟁으로 기후의 영향이 감소되며, 국지적 환경 차이에도 민감하기 때문이다(Schweingruber, 1988).

연륜연대기를 적용하기 위해서는 연륜의 경계가 뚜렷하고, 생육의 변화가 기후에 의해 지배를 받으며, 위연륜(僞年輪, false ring: 성장 조건이 급변하여 나이트가 1년에 2개 이상 생기는 것)과 실연륜(失年輪, missing ring: 성장 조건이 열악하여 연륜이 생성되지 않는 해의 것)이 과도하게 많지 않아 연대측정(crossdating)이 가능해야 한다. 특히, 유령목의 경우(50년 정도)는 수령에 따른 변동과 성장추세를 구분하기 어려울 뿐만 아니라 고기후를 추정하는 데 필요한 장기간의 연대기 작성에 부적합하다.

소나무(*Pinus densiflora*)는 수평적으로 볼 때 우리나라는 물론, 일본과 만주의 우수리강 유역까지 분포하고 있으며, 수직적으로는 따뜻한 곳을 좋아하는 생태적 특성 때문에 남부의 경우 해발고 1,150m 이하, 중부는 1,000m 이하, 북부는 900m 이하에 분포하고(이영로, 1986; 김진수, 1993; 임경빈, 1995), 소나무 임분 대부분은 토심이 얇고, 암석이 많은 능선부에 위치하여 건조지역에 대한 경쟁력이 강한 수종으로 알려져 있다.

이상의 표본지 선정 전략을 고려하여 본 연구에서는 토심이 얇은 능선 부위의 바위가 노출된 곳에서 수관이 밀폐되지 않은 소나무 우세목 중 수령이 최소한 100여년 이상인 것을 선택하여 시료 채취를 실시하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 연구지와 시험목 수를 나타낸 것이다.

연륜채취 및 측정

공시목으로 선정된 수목을 대상으로 지상 약 0.5m~1.2m 높이에서 가능한髓(나무 중심)에 접근하도록 2개의 연륜시료(직경 0.4cm의 성장편)를 임의의 방향에서 마주 보는 쪽으로 성장추를 이용하여 채취하였다. 이때, 공시목이 경사지에 위치할 경우에는 압축이상재를 피하기 위하여 경사 방향의 수직인 위치에서 시료채취를 실시하였다. 채취된 성장편은 채취직후 음료수용 종이빨대에 삽입하여 1~2일간 기건한 후 U자형 홈이 파인 나무막대에 접착제를 이용하여 접착시켰다. 이때, 목재세포(섬유)가 상하로 주행하게 성장편을 접착시킴으로써, 표면 연마 후에 연륜경계가 선명하도록 하였다.

연륜폭 측정은 컴퓨터에 연결된 Lintab 연륜측정장치로 0.01mm까지 실체현미경으로 나이트 경계를 확인하면서 실시하였다.

크로스데이팅

크로스데이팅이란 나이트의 폭의 좁고 넓은 경향을 이용하여 위연륜이나 실연륜을 찾아내고, 알고 있는 기준 연대(예를 들면 연륜채취연도)를 이

Table 1. Site, elevation, and number of sampled trees

Site	Elevation (m)	Number of trees (cores)	Site ID
Baekdamjang	400	13 (26)	BDJ
Baekdamsa	400~500	24 (49)	BDS
Osek	800~850	24 (47)	OS
Kwonkeemseong	850	6 (12)	KKS
Chilseongbong	850	16 (35)	CSB
Upper Daeseung	800~900	22 (48)	DSU
Lower Daeseung	700	26 (51)	DSM

용하여 정확한 생육연대를 각 연륜에 부여하는 것을 말한다. 크로스데이팅이 가능한 것은 수목의 생장이 환경 특히, 기후의 영향을 받아 사람의 지문처럼 시대별로 독특한 나이테 성장 경향을 인접한 수목들과 공유하기 때문이다. 만일, 정확한 생육연대가 측정되지 않은 연륜계열들을 이용하여 하나의 대표연대기를 만들 경우 각 계열의 연도별 수치가 서로 가깝되어 환경변화에 대한 유용한 정보가 상쇄되며 부정확하고 모호한 결과를 초래하게 되므로, 크로스데이팅이 꼭 필요하다.

크로스데이팅 방법에는 골격도법과 그래프법이 있는데 (Schweingruber, 1988; Park, 1998), 본 연구에서는 임목이 성장하는 경향을 그래프로 나타내어 그 경향을 비교하는 그래프법이 사용되었다. 아울러 그 결과를 통계적으로 확인하기 위하여, DPL(Dendrochronology Programs Library) 중에서 Cofecha 프로그램(Holmes, 1983)을 이용하여 재확인하였다.

연륜의 통계분석

정확히 크로스데이팅된 각 연륜 시료에 내재되어 있는 수령에 따른 임목 고유의 생물학적 생육 추세와 오랜 기간에 걸친 경쟁과 교란에 따른 결과로 발생하는 추세(Fritts, 1976; 박원규, 1993)를 제거하기 위하여 표준화한다. 일반적인 임목의 직경생장은 유령기에는 생육이 빨라 연륜폭이 넓고 연도별 변이의 폭이 크며, 유령기가 지나면 상대적으로 균일해지는 경향을 보이는데, 이는 줄기의 직경생장을 위해 필요로 되는 광합성물이 상대적으로 일정한 수관으로 인해 충분히 생산해 내지 못하기 때문이다. 만일 연륜폭 측정치를 그냥 서로 합하여 평균을 낼 경우 각 연륜계열의 유령기 동안의 연륜폭들에 의해 평균치들이 크게 좌우되기 때문에 시대별로 균일한 연대기를 얻을 수 없다. 표준화는 생물학적 생육추세를 추정하여 예측된 연륜폭과 실제 연륜폭으로 나누어 지수(index)로 계산하여 각 연륜계열별로 지수연대기를 얻는 것을 말한다. 본 연구에서는 spline (50% 반응주기: 200년)으로 표준화하였다.

지수연대기의 통계적 성질을 평가하기 위하여 평균민감도, 자기상관, 상호상관분석을 실시하였다. 평균민감도(mean sensitivity)는 연대계열에서 연속된 두 연륜폭간의 변이 크기, 즉 고주파변동을 측정하기 위한 통계인자이다 (Fritts, 1976). 고주파변동이란 연륜이 갖는 연간 (yearly) 변이를 말한다. 자기상관은 한 시계열, 즉 한 연륜연대기 내의 지속성(persistence)을 측정하는 통계인자로 한 해의 임목생장이 생육 당년의 환경뿐만 아니라 생육 전년도들에 만들어진 영양물질, 호르몬, 잎 등의 영양에도 좌우된다는 것을 말한다 (Fritts, 1976). 인접한 장소에서 생육하는 임목 성장간에도 유전적 및 미소환경 차이에 기인하여 개체간 연륜시리즈가 어느 정도 차이가 있으며, 동일 임목내에서도 채취방향에 따라서 다소 차이가 있다. 동일 임목내 성장편간 상관계수 그리고 임목간 연륜폭시리즈의 상호상관계수, 신호대잡음비(SNR), 모수설명신호(expressed population signal: EPS)를 Briffa와 Jones(1990)의 식을 이용하여 구하였다.

$$EPS(t) = \frac{\bar{r}_{bt}}{r_{bt} + (1 - r_{bt})/N}$$

N = 임목 수

\bar{r}_{bt} = 임목간 상관계수의 평균

기후복원 방법

반응함수(response function: RF)는 기후인자와 연륜생장과와의 관계를 조사하기 위해 H.C. Fritts 교수에 의해 개발되었다. 이는 기후인자와 연륜간 관계를 일반적인 다중회귀식으로 나타낼 경우 기후인자간 다중공선성이 나타나는 단점이 있기 때문이다(Fritts, 1976; 김기영과 전명식, 1994). 독립변수간 상관이 존재할 경우 하나의 독립변수로 인해 다른 독립변수의 중요도가 변하게 되어 종속변수인 연륜과 독립변수인 기후인자간 관계를 정확히 파악할 수 없게 된다. 반응함수는 이러한 단점을 보완하기 위하여 독립변수를 직교변환하기 위하여 상호 독립적인 형태인 고유벡터 또는

주성분으로 변환하여 독립변수간 존재하는 상관
을 제거하게 된다(Fritts, 1976; Cook & Kairiukstis, 1990).

반응함수의 신뢰성을 부가하기 위하여 부스트
랩(bootstrap)방법이 적용된 반응함수프로그램인
PRECON을 사용하였다(Guiot, 1991). 부스트랩
은 반응함수에서 나오는 다중회귀계수에 대한 표
준오차를 측정하여 정확한 유의성 검사를 하는 것
으로, 회귀에 모든 관측치들을 이용하지 않고 일부
관측치들을 제외시킨 나머지 관측치로 무작위로
추출한 다음 회귀계수값을 계산하는 과정을 무수
히 반복하여(보통 50회) 회귀계수값들이 일정한
값에 수렴하였을 때 가장 안정적인 추정치를 갖게
된다는 원리를 이용한 것이다. 이렇게 선택된 값이
올바른지를 검증하기 위해 무작위 선택시 남아있
는 자료들이 사용된다. 이 방법을 사용할 경우 독
립변수와 종속변수의 관계를 확인하는데 가장 이
상적 방법인 보정과 검증을 하는 것과 같은 효과
를 얻을 수 있어, 만들어진 회귀식을 이용하여 예
측모델을 만들서 과대예측되는 것을 방지할 수 있
다.

본 연구에서는 반응함수뿐만 아니라 단순상관
계수도 구하여 복원할 기후인자를 선정하는데 이
용하였다. 사용된 기상자료는 우리나라 중부지역
6개 측후소의 평균 자료(Park & Yadav, 1998)가
사용되었다. 개별 측후소 데이터보다 지역평균값
이 신뢰성이 높아 연륜기후학에서 보통 쓰인다.

전이함수 (transfer function: TF)는 반응함수
와는 반대의 개념으로 예측변수를 t 년의 연륜폭지
표로 하여 기후요소를 추정하는 회귀방정식을 만
드는 것이다 (Cook & Kairiukstis, 1990). 이때 한
지역의 기후요소(문순) 추정을 위하여 그 지역의
모든 수종의 연대기를 모두 예측변수로 하는 다변
량 회귀식을 이용하고자 하였다. 또한 자기상관을
고려하여 t 년도의 기후인자 예측을 위하여 $t-2$,
 $t-1$, t , $t+1$, $t+2$ 년의 연륜폭 지수를 모두 시도하
였다.

본 연구에 사용된 중부지역 기후 자료의 관측개
시 연도가 1909~1995(1950~1953년은 결측)임

을 고려하여, 1909~1949년 기간을 TF 기간으로
이용하고, 1953~1995년 기간은 TF로 추정된 기
후들과 실제 관측치와 비교하여 TF가 타당한지를
검사하는 검증 (verification: VF) 기간으로 설정
하였다. VF 통계량으로는 관측치와 예측치간 상
관관계분석, 오차감소도(reduction of error), 편차
곱평균(products means) 검증 등을 이용하였다
(Fritts, 1976; Cook & Kairiukstis, 1990).

결과 및 고찰

크로스데이팅

채취된 시료를 이용하여 크로스데이팅을 실시
한 결과 Fig. 1과 같은 연대기를 각 연구지역에서
작성할 수 있었다. 가장 긴 연대기는 칠성봉(CSB)
지역으로 332(1667~1998)년 기간의 연대기를 작
성할 수 있었으며, 반면 백담장(BDJ) 지역에서는
141(1858~1998)년 기간의 짧은 연대기를 작성할
수 있었다. 작성된 지역별 연대기들은 크로스데이
팅이 가능한 시료들만을 이용하여 만든 것이다.
Fig. 1에서와 같이 서로 다른 지역에서 각 시료들
이 채취되었음에도 불구하고 각 연대기들이 매우
잘 일치하는 것으로 보아 거시적 기후의 영향이
입목생장에 큰 영향을 주었음을 알 수 있다. 하지
만 모든 연대기가 포함되어 있는 1900년에서 1998
년까지의 모든 연대기들을 비교한 결과 BDJ와
BDS는 다른 지역에 비하여 연간 생장변동이 크지
않으며, 상관관계분석에서도 다른 지역보다 낮게
분석되었다(Table 2). 두 지역을 제외한 나머지 지
역간 상관관계분석에서는 모두 유의성이 있었으
며, 평균상관계수도 0.612로 높게 나타났다. 특히,
대승폭포 상부지역(DSU)과 중간지역(DSM)에서
작성된 연대기들 간에는 상관계수가 0.94로 매우
높게 나타났다.

연륜연대기의 통계적 성질

크로스데이팅 후 표준화를 통해 획득된 7개 연
륜연대기들의 통계적 특성을 조사하였다. 모든 연
대기들이 포함되어 있는 1900년도를 기준으로 상

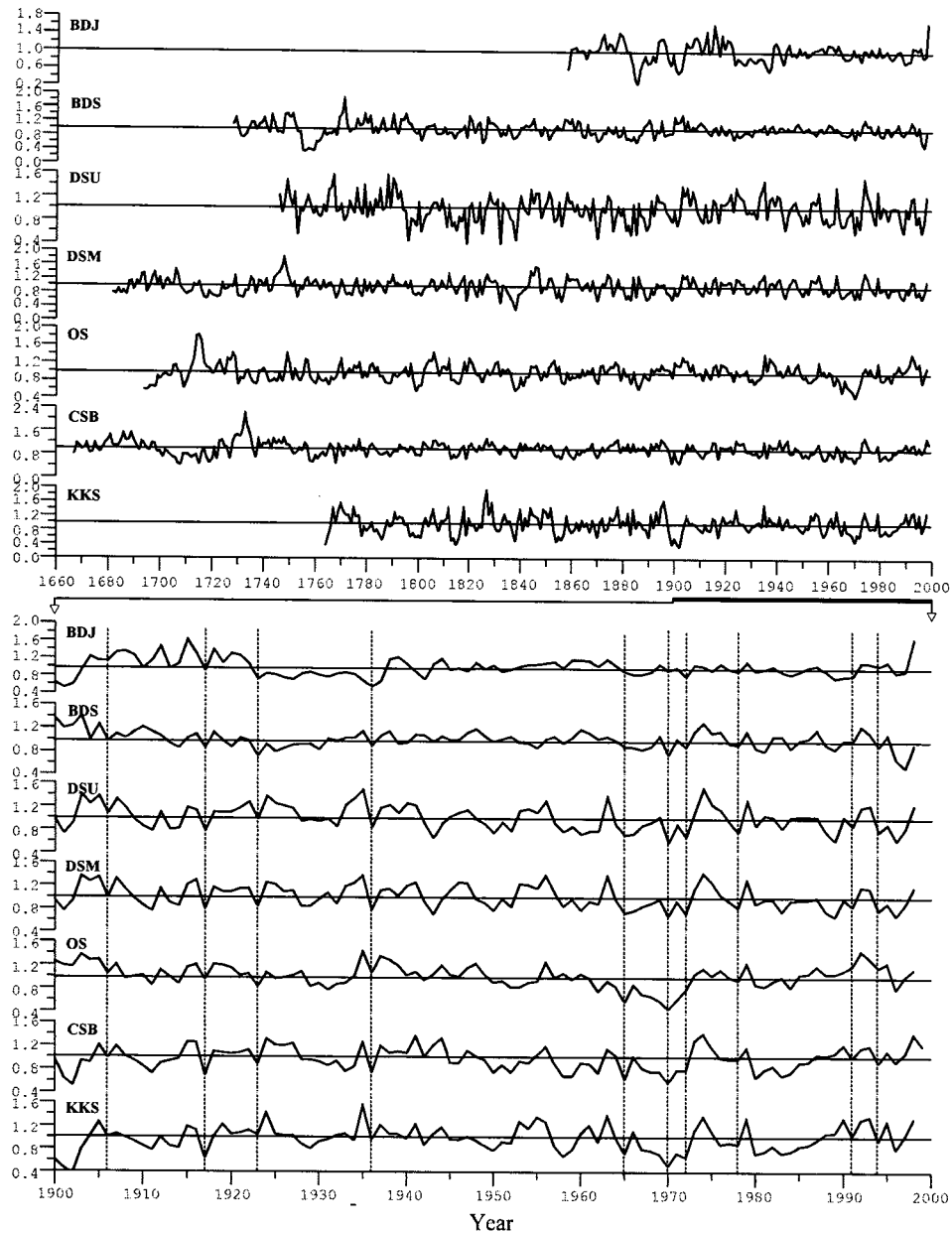


Fig. 1. Chronologies of seven study sites at Sorak mountain.
See Table 1 for chronology(site) IDs.

호비교를 실시하려고 했으나, BDJ와 BDS는 연륜이 많은 시료 수가 부족하여 각각 1954년과 1929년부터 분석을 실시하였다. 그 결과 평균민감도는

0.151~0.248로 낮은 편이었으나, DSM, DSU, KKS는 0.230~0.248로 다른 지역에 비하여 높은 평균민감도를 나타내었다. 임목간 상관계수는 0.254~

Table 2. Correlation matrix for the tree-ring chronology of each study site at Sorak mountain (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$). See Table 1 for chronology IDs

	BDS	BDJ	CSB	KKS	OS	DSM	DSU
BDS	1.00						
BDJ	0.15	1.00					
CSB	0.15	0.31**	1.00				
KKS	0.11	0.32**	0.81**	1.00			
OS	0.53**	0.18	0.56**	0.47**	1.00		
DSM	0.39**	0.34**	0.58**	0.61**	0.48**	1.00	
DSU	0.36**	0.25*	0.59**	0.59**	0.49**	0.94**	1.00

0.449로 분석되었으나, 평균민감도에서와 같이 DSM, DSU, KKS는 0.429~0.449로 비교적 높은 결과를 나타내었다. SNR은 4.348~14.092로 DSM이 가장 높게 분석되었다. EPS는 0.709~0.934로 역시 DSM이 가장 높은 것으로 분석되었으며, 전체적으로 DSU와 DSM이 기후인자를 많이 반영하는 것으로 조사되었다(Table 3).

복원할 기후인자와 연구지역 선정

복원할 기후인자와 연구지역 선정을 위하여 먼저 각 연구지역별 단순상관 분석을 실시하였다. 그 결과 DSM과 DSU가 강수량 복원에 가장 적합한 지역으로 선별되었다. 두 지역 모두 5월이 다른 월에 비하여 상관계수가 0.424와 0.393으로 높게 나타났다. 우리나라에서 몬순이 시작되는 6월에 대해서는 DSM은 0.280으로 유의성 있는 결과를 나

Table 3. Chronology(residual) statistics of *Pinus densiflora* in Sorak mountain

	BDJ	BDS	OS	KKS	CSB	DSU	DSM
Number of trees (cores)	12 (22)	22 (40)	24 (45)	6 (12)	14 (32)	20 (42)	24 (47)
Period (years)	1858~1998 (141)	1728~1998 (271)	1694~1998 (305)	1764~1998 (235)	1667~1998 (332)	1746~1998 (253)	1682~1998 (317)
Mean sensitivity	.179	.151	.173	.248	.189	.241	.230
Mean correlation							
Period (years)	1954~1998 (45)	1929~1996 (68)	1900~1998 (99)	1900~1998 (99)	1900~1998 (99)	1900~1998 (99)	1900~1998 (99)
Among all radii	.338	.262	.359	.471	.357	.437	.445
Between trees	.326	.254	.354	.449	.344	.429	.439
Within trees	.533	.522	.529	.562	.578	.697	.628
SNR*	4.348	6.812	11.513	2.440	5.767	12.787	14.092
EPS*	.813	.872	.920	.709	.852	.927	.934

* SNR: signal-to-noise ratio

* EPS: expressed population signal

Table 4. Correlation coefficients between monthly climate variables and the chronologies of *Pinus densiflora* (1909~1995). P: precipitation, T: Temperature and subscript p after month represents prior growth year (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

Variables (monthly)		Correlation coefficients						
		BDS	BDJ	OS	CSB	KKS	DSM	DSU
SEP	P	-0.041	-0.120	-0.067	-0.116	-0.132	-0.086	-0.125
AUG	P	0.010	-0.029	-0.006	-0.127	-0.093	-0.055	-0.039
JUL	P	-0.156	-0.019	-0.055	0.089	0.077	0.196	0.183
JUN	P	0.056	0.098	0.079	0.071	0.191	0.280**	0.150
MAY	P	0.197	0.157	0.065	0.252*	0.285**	0.424**	0.393**
APR	P	0.090	0.003	-0.052	0.045	0.001	0.161	0.115
MAR	P	-0.045	-0.137	-0.063	-0.070	-0.068	-0.130	-0.184
FEB	P	0.007	0.103	0.003	0.057	0.110	0.074	0.096
JAN	P	-0.029	0.033	-0.058	-0.012	-0.178	-0.139	-0.162
DEC _p	P	0.060	-0.105	0.202	-0.002	0.032	0.056	0.082
NOV _p	P	-0.058	-0.073	-0.110	-0.078	-0.006	-0.135	-0.082
OCT _p	P	0.030	0.131	-0.052	-0.007	0.011	0.129	0.142
SEP _p	P	0.036	-0.003	-0.093	-0.112	-0.131	0.022	-0.094
SEP	T	-0.053	-0.099	-0.141	-0.074	0.007	-0.206	-0.190
AUG	T	-0.048	-0.012	-0.072	0.126	0.146	-0.124	-0.114
JUL	T	-0.173	0.037	-0.012	0.009	-0.011	-0.210	-0.198
JUN	T	-0.246*	-0.124	-0.118	-0.205	-0.187	-0.432**	-0.345**
MAY	T	-0.153	-0.114	-0.335**	-0.263*	-0.186	-0.377**	-0.304**
APR	T	-0.068	-0.009	0.014	-0.026	-0.077	-0.221*	-0.186
MAR	T	0.135	0.020	0.212*	0.084	0.178	-0.123	-0.071
FEB	T	0.154	0.177	0.184	0.088	0.179	-0.054	-0.066
JAN	T	0.229*	0.010	0.117	0.197	0.141	-0.043	-0.120
DEC _p	T	0.164	0.002	0.081	0.061	0.151	0.013	0.003
NOV _p	T	-0.017	-0.079	0.005	-0.106	0.015	-0.098	-0.105
OCT _p	T	-0.008	0.051	-0.097	-0.115	-0.042	-0.214*	-0.224*
SEP _p	T	0.064	0.061	-0.088	-0.040	0.041	-0.036	-0.027

타내었으나, DSU는 유의성 있는 결과를 보이지는 않았다. 하지만 5월에 이어 계속 정의 상관관계를 나타내고 있어, 5월과 6월의 강수를 복원할 수 있는 가능성을 제시하였다. 5월과 6월의 총강수량을 합하여 DSM과 DSU와의 단순상관을 분석한 결과 DSM은 0.409, DSU는 0.286으로 모두 유의성 있는 결과를 나타내었다. CSB와 KKS 역시 5월에 대하여 유의성 있는 결과를 보여주었으나, 시료 수가 적고 6월의 상관계수가 낮아 5월과 6월의 총강수량을 합하여 상관분석을 재차 분석한 결과 유의

성 있는 결과를 얻지 못하였다(Table 4).

반응함수 분석에서도 단순상관분석에서와 같이 DSM은 5월과 6월에 대하여 유의성 있는 정의 관계를 보여주었으며, DSU는 5월에 대해서만 유의성 있는 결과를 보여주었다(Fig. 2). 하지만, 6월에 대해서도 5월에 이어 정의 관계를 나타내고 있었다. 이와는 반대로 기온에 대해서는 5월부터 6월에 걸쳐 부의 관계를 나타내고 있었다. 따라서 이 기간 동안 기온 상승으로 수분의 증발산이 증가하면 임목에 대한 수분스트레스가 증가함을 알

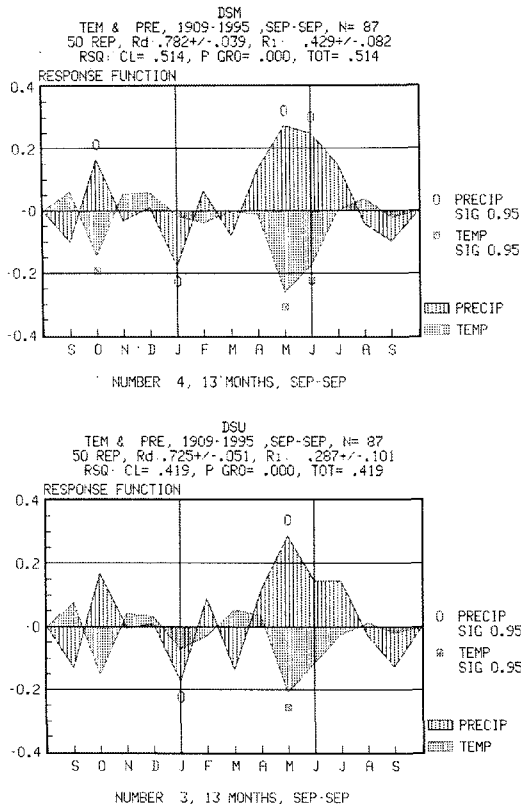


Fig. 2. Response functions of *Pinus densiflora* from DSM and DSU at Sorak mountain.

수 있다.

기후복원

설악산 연대기 중에서 5월과 몬순이 시작되는 6

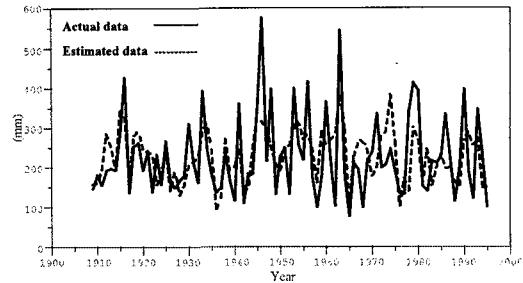


Fig. 3. Actual and estimated(reconstructed) May to June precipitation.

월에 대하여 유의성 있는 정의 상관관계를 나타내는 DSM과 DSU가 전이함수에 사용이 되었다. 전이함수의 종속변수(Y)는 1909년~1949년까지의 5월과 6월 총강수량이며, 독립변수는 t년과 t+2년

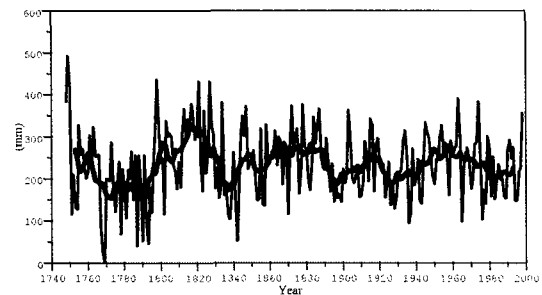


Fig. 4. Variation of the reconstructed May to June precipitation (smoothed curved: 10-year moving average).

Table 5. Calibration and verification statistics computed for tree-ring and May precipitation for two sub-periods. The sub-period 1909~1949 calibration model was used for reconstruction

Calibration		Verification			
Period	R ²	Period	r	RE	PMt
1909~1949	0.42	1953~1995	0.45*	0.176*	2.624*

R² is the square of the correlation coefficient calculated between actual and estimated data; r is the actual/estimated correlation over the verification period; RE is the reduction of error; PMt is the t value derived using the product mean test (Fritts, 1976). (*: p<0.05)

의 연륜연대기가 사용되었다.

$$Y = -470.93 \times DSU_{t+2} + 189.08 \times DSM_t \\ + 268.76 \times DSM_{t+2} + 243.22$$

전이함수(1909~1949)는 총변동량의 42%를 설명할 수 있었다(Table 5). 이 보정함수를 1953년~1995년까지의 기간을 이용하여 검정(VT)을 실시한 결과, 상관계수는 0.45, 오차감소도는 0.176, 편차곱평균은 2.624로 모두 통계적으로 관측치와 복원치들간 합치도가 인정되었다.

Fig. 3은 1909년부터 1995년까지 현대 관측장비를 이용하여 관측된 자료와 DSM과 DSU 지역의 연륜을 이용하여 복원된 5월과 6월 총강수량을 비교한 결과이다. 1970년 부근을 제외하고는 대부분의 기간에서 잘 일치되는 것이 관찰되었으며, 특히 87년간 나타난 5월, 6월 총강수량의 장기간 변동과도 일치하였다. 검정된 보정함수를 이용하여 연륜자료가 작성된 A.D. 1746년까지의 253년간의

강수를 복원하였다.

5월과 6월 총강수량을 복원한 결과 1765~1800년, 1835~1845년, 1890~1910년, 1920~1940년, 그리고 1980~1993년이 건조기로 나타났다(Fig. 4). 1765년부터 1800년까지의 기간이 지난 250여년간 중 가장 건조한 기간이 오래 지속된 기간이었다. 이 기간은 측우기 기록으로는 밝힐 수 없었던 기간이었다. 1830년대 말 건조기는 연륜자료와 측우기 자료 모두에서 뚜렷하였다. 1890~1910년간의 건조기는 근래의 현대 강수량 자료와 서울지방 측우기 관측 강수량을 분석한 결과(Lim & Jung, 1992)와 속리산 소나무 연륜을 이용하여 5월의 강수량을 복원한 결과(Park & Yadav, 1998)와 대체로 일치하였다 (Fig. 5). 이 기간은 북반부 전체로 보아도 건조기에 속한다(Bradley and Jones, 1992). 1920년 이후와 1980년 이후에 나타난 건조 현상은 속리산의 연구 결과와도 일치하였다.

1810~1830년, 1860~1890년, 그리고 1950~

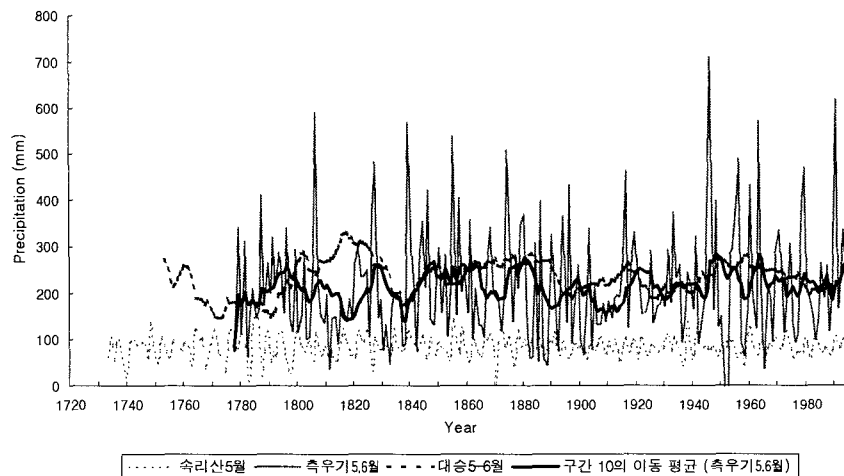


Fig. 5. Comparison of dendroclimatologically reconstructed precipitation with instrumentally measured precipitation. May precipitation reconstructed from Songni Mt. red pines (Park and Yadav 1998)-thin broken line, May-June precipitation reconstructed from Sorak Mt. Daeseung red pines (present study: 10-year moving average)-thick broken line, ancient 'Chukwooki' rain gauge data before 1908 and modern gauge data since 1908 (Lim and Jung 1992)-thin gray line for yearly values and thick line for 10-year moving average).

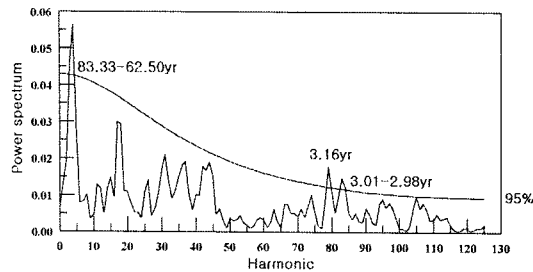


Fig. 6. Power spectrum analysis.

1970년은 습윤한 기간으로 나타났다. 박과 Yadav(1998)가 속리산 소나무를 이용하여 우리나라 중서부 지역의 5월 강수를 복원한 결과와 비교해 본 결과, 1854~1860년과 1964~1970년이 모두 습윤한 기간으로 관찰되었다 (Fig. 5). 측우기 자료와는 일치하지 않는 기간도 있었다. 연륜으로 복원된 자료는 1810~1820년, 1860~1880년 기간이 다습한 기간으로 분석되었으나 측우기 자료에서는 건조한 기간으로 해석되었다 (Fig. 5). 이러한 불일치가 서울과 영동지방의 지역적 차이에 의한 것인지, 아니면 다른 요인에 의한 것인지는 향후 추가로 연구되어야 할 것이다.

장기간으로 보았을 때, 18세기 후반기는 건조한 기간이었으며, 19세기의 5월~6월 총강수량이 250 mm로 20세기의 231 mm보다 많아 19세기가 20세기보다 상대적으로 습윤하였음을 알 수 있었다. 강수량 변화폭도 19세기가 20세기보다 큰 것으로 관찰되었다 (Fig. 4).

주기성 분석을 실시한 결과 5~6월 강수량의 주요한 주기가 83.33~62.50년, 3.16년, 3.01~2.98년으로 분석되어 단기간으로는 3년 주기, 장기간 주기에서는 60~80년 주기가 관찰되었다 (Fig. 6).

결론

영동지방의 강수량을 복원하고자 설악산에서 7개 연구지역을 선정하여 시료채취를 한 결과, 강수량 복원에 적합한 대승폭포 지역(DSM과 DSU)을 선정하여 각각 253년(1746~1998년)과 317년

(1682~1998년)의 연대기를 작성하였다. 작성된 연대기를 이용하여 5~6월 강수량을 1746년까지 253년간 복원하였다. 이 기간동안에 단주기로는 3년, 장주기로는 60~80년의 건습주기로 5~6월 강수량이 변동하였다. 지난 250년간 중 건조한 기간이 가장 오래 지속된 기간은 17세기말이었다. 연륜에서 관찰된 1890~1910년의 건조 현상은 현대 강수자료와 측우기 관측자료를 분석하여 나온 결과(Lim & Jung, 1992), 그리고 Park & Yadav(1998)가 속리산 소나무를 이용하여 5월의 강수를 복원한 결과와 일치하였으나 영동지방이 건조 강도는 약하였다. 1854~1860년, 1964~1970년, 1980~1993년에 나타난 건조 현상은 속리산 연륜을 이용하여 복원한 기록과 일치하여, 이 기간 동안 나타난 건조 현상은 우리나라 중서부뿐만 아니라 영동지방에까지 걸쳐 나타난 광역의 현상으로 생각된다. 습윤한 기간에 대해서는 두 지역 모두 1854~1860년과 1964~1970년이 습윤한 것으로 관찰되어, 역시 우리나라 전반에 걸쳐 5~6월에 많은 강우가 내렸음을 알 수 있었다.

19세기가 20세기보다 상대적으로 습윤하였고 강수량 변화폭도 19세기가 20세기보다 큰 것으로 관찰되었다. 현재 20세기의 강수기록만 가지고 작성되고 있는 홍수설계량은 최소한 18~19세기 수준으로 상향 조정되어야 할 것이다.

17세기 중엽의 강수를 연륜자료를 이용하여 얻음으로써 측우기 기록과 함께 우리나라의 과거 강수의 역사(가뭄과 홍수)를 보다 광역에 적용하여 해석할 수 있게 되었다. 앞으로 노령목과 고목재로부터 연륜연대기를 작성한다면, 보다 장기간에 걸친 강수량 복원도 가능할 것이라 생각된다.

사사

연륜시료 채취 및 측정을 도와준 충북대 산림과 학부 이진호, 김요정 연구원에게 감사드립니다. 연륜분석을 자문하여준 Liu Yu 박사(중국과학원 지구환경연구소)와 측우기자료를 제공해준 정현숙 박사(기상연구소)께 감사드립니다.

참고문헌

- 和田雄治. 1917. 조선고대관측기록보고. 조선총독부관측소, 인천. 200p.
- 김기영, 전명식. 1994. 다변량 통계자료분석. 자유아카데미. pp.79-201.
- 김연옥. 1985. 한국의 기후와 문화. 이대출판부. 549p.
- 김연옥. 1987. 개정 기후학개론. 정익당, 서울. 541p.
- 김연옥. 1990. 고일기에 의한 고기후 연구. 이대 한국문화연구원논총, 58, 351-370.
- 김진수. 1993. 지구상의 소나무 속 수종의 발달과 분포. 숲과 문화 연구회(편), 소나무와 우리문화, 두솔기획, 서울. pp.9-12.
- 박원규. 1993. 대기중 이산화탄소 증가와 한국산 아고산 침엽수류의 생장동향 -연륜연대학적 분석-. 한국임학회지, 82(1), 17-25.
- 이명순. 1988. 수목의 비대생장을 통한 서울 고기후의 복원. 중앙대 석사논문.
- 이영로. 1986. 한국의 송백류. 이화여자대학교 출판부, 서울. 241p.
- 임경빈. 1995. 소나무. 대원사, 서울. 143p.
- 최종남, 류근배, 박원규. 1992. 아한대 침엽수류 연륜연대기를 이용한 중부산간지역의 고기후복원. 한국제4기학회지, 6(1), 21-32.
- Blasing, T. J. 1975. Methods for analyzing climatic variations in the North Pacific sectors and Western North America for the last few centuries. Ph.D. Thesis. U. of Wisconsin, Madison, USA.
- Bradley, R. S. and Jones, P. D. (eds). 1992. Climate Since A. D. 1500. Routledge, London. 679p.
- Briffa, K. R. and Jones, P. D. 1990. Basic chronology statistics and assessment. In Method of Dendrochronology, eds. E. R. Cook and L.A. Kairiukstis, Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, pp.137-152.
- Choi, J. N., Park, W. K. and Yu, K. B. 1994. Central Korea temperature changes reconstructed from tree rings of subalpine conifers. *Dendrochronologia*, 12, 33-43.
- Cook, E. R. and Jacoby, G. C. 1979. Evidence for quasiperiodic July drought in the Hudson Valley, New York. *Nature*, 282, 90-392.
- Cook, E. R. and Kairiukstis, L. A. 1990. Method of Dendrochronology. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, Netherlands.
- Douglas, A. E. 1914. A method of estimating rainfall by the growth of trees. In Climate Factor, ed. E. Huntington, Carnegie Institute of Washington Pub. 192, 101-122.
- Fritts, H. C. 1965. Tree-ring evidence for climatic changes in western North America. *Monthly Weather Review*, 93, 421-443.
- Fritts, H. C. 1976. Tree Rings and Climate. Academic Press Inc. (London) Ltd. pp.567.
- Fritts, H. C. 1990. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data: a diagnostic analysis. U. of Arizona Press.
- Guiot, J. 1991. The bootstrapped response function; research report. *Tree-Ring Bulletin*, 51, 39-41.
- Holmes, R. L. 1983. A computer-assisted quality control program. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- LaMarche, V. C., Jr. 1974. Paleoclimatic inferences from long tree-ring records. *Science*, 183, 1043-1048.
- Lim, G. H. and Jung, H. S. 1992. Interannual variation of the annual precipitation at Seoul, 1771-1990. *J. Korean Meteor. Soc.*, 28(2), 125-132.
- Park, W. K. 1998. Skeleton-plot method for tree-ring crossdating. Proceedings of the Second East Asia Workshop on Tree-Ring Analysis. Agricultural Science & Technology Institute

- of Chungbuk National University. pp.68-74.
- Park, W. K. and Yadav, R. R. 1998. Reconstruction of May precipitation (A.D. 1731~1995) in west-central Korea from tree rings of Korean red pine. *J. of Korean Meteor. Soc.*, 34(3), 460-465.
- Schweingruber, F. H. 1988. *Tree Rings: Basic and Applications of Dendrochronology*. D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland. 276pp.
- Stahle, D. W., Cleaveland, M. K. and Hehr, J. G. 1988. North Carolina climate changes reconstructed from tree-rings: A.D. 372 to 1985. *Science*, 1517-1519.
- Stockton, C. W. 1975. Long-term stream flow records reconstructed from tree-rings. *Papers of Laboratory of Tree-Ring Research*(No. 5), Univ. of Arizona, Tucson, Arizona, USA.

(Accepted: October 10, 2000)