

나무나이테를 이용한 설악산 지역의 4월~8월 총강수량 복원

박원규* · 서정욱** · Liu Yu*** · 김요정* · 한수원*

*충북대학교 산림과학부, **함브르크대 목재생물연구소,

***중국 과학원 지구환경연구소

Reconstruction of April-August Precipitation in Mt. Sorak Region from Tree Rings

Won-Kyu Park*, Jeong-Wook Seo**, Liu Yu***,
Yo-Jung Kim* and Su Won Han*

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

**Institute of Holzbiologie, Hamburg University, Hamburg 21031, Germany

***The State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of
Earth Environment, Chinese Academy of Science, Xian 710054, China

요 약

설악산 백담산장 (해발고 400m) 지역에서 자라는 소나무를 이용하여 141년 (A.D. 1858~1998)간의 나무 나이테(연륜) 연대기를 작성하여 4월~8월 총강수량을 복원하였다. 복원한 결과 1880~1887년, 1893~1901년, 1922~1938년은 건조기로 나타났으며, 1906~1918년은 습윤기로 나타났다. 장기간 변동으로 보았을 때, 19세기말과 20세기초는 20세기 후반기보다 건조하였다. 전기간에 걸친 가뭄주기는 4.14년과 3.16년으로 분석되어 장주기보다 단주기 변화가 우세하였다.

ABSTRACT

April~August precipitation (141 years : A.D. 1858~1998) of Mt. Sorak region (East-central Korea) was reconstructed using a tree-ring chronology of *Pinus densiflora* sampled from Beakdam Shelter area. During the reconstructed periods, dry periods were 1880~1887, 1893~1901 and 1922~1938, and wet one 1906~1918. In the long-term variation, the late 19th and early 20th century were drier than the late 20th century. Major wet/dry periodicities in April~August precipitation series reconstructed were 3.16 and 4.14 years, indicating that short-term variation were more prominent than long-term one.

서 론

우리나라를 포함한 몬순지역에 위치한 국가들에서는 기후변화를 연구하기 위해서는 과거 장기간의 강수량 정보가 절대적으로 필요하나, 기온이

This study was supported by KOSEF(985-0400-002-2), Chinese NSF(49874170) and KZCX1-Y-05 from Chinese Academy of Sciences.

나 강수량 같은 기후요소에 대한 관측 자료는 지역별로 차이가 있지만 신뢰성 있는 기록은 최근 50~60년 동안에 국한되어 있고 관측 지역도 대도시 지역에 편중되어 있다 (박원규, 1998).

우리나라 강수량 자료는 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록, 증보문헌비고, 승정원일기 등의 역사 기록을 통해 다른 나라에서는 볼 수 없는 장기간 (1771년 이래 200년 이상)의 관측치를 갖고 있어 관측 이전 시대의 기후를 알 수 있는 주요한 자료로 사용될 수 있다 (김연옥, 1985; Lim & Jung, 1992). 현존하는 측우기 기록은 서울 지역에 국한되어 있다 (和田雄治, 1917).

관측 이전의 기후는 나무나이테 (연륜)를 이용하여 정량적으로 복원할 수 있다 (Fritts, 1976). 우리나라에서 연륜을 이용하여 강수를 복원한 것은 박원규와 Yadav(1998)가 속리산 소나무를 이용하여 우리나라 중서부 지역의 5월 강수량을 A.D. 1733년까지 복원한 것과 박원규와 서정욱 (2000)이 설악산 소나무를 이용하여 영동 지역의 5월~6월 강수량을 A.D. 1746년까지 복원한 것이 있다. 하계 몬순의 중심기간인 7월과 8월이 포함된 강수량 복원은 이루어져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 하계기간이 포함된 강수량을 연륜으로부터 복원하여, 19세기 후반부부터 20세기말까지의 우리나라 강수량 변동을 조사하고자 수행하였다.

재료 및 방법

연구대상 및 연륜측정

설악산 국립공원 (Fig. 1) 북서쪽에 위치하고 있는 백담산장 지역(38°9'30" N, 128°22'30" E)에서 수관이 밀폐되지 않은 우세목을 선별하여 시료 채취를 실시하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 연구지와 수종, 그리고 시험목 본 수를 나타낸 것이다.

공시목으로 선정된 수목을 대상으로 지상 약 0.5 m~1.2m 높이에서 가능한 髓(나무 중심)에 접근하도록 2개의 연륜시료(직경 0.4 cm의 성장편)를

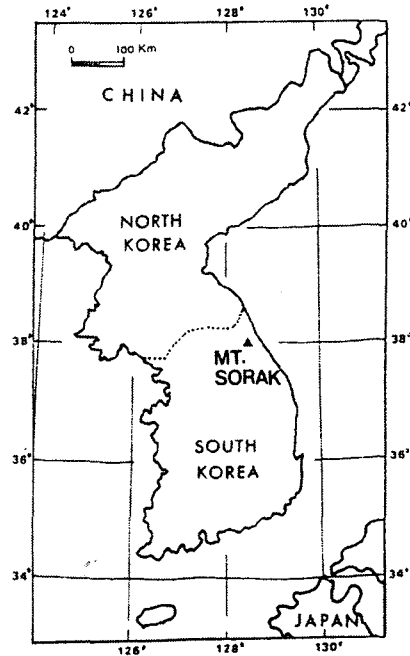


Fig. 1. Map of Korea showing tree-ring sampling area (filled triangle).

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

Site	Elevation (m)	Number of trees (cores)	Site ID
Baekdamjang	400	13 (26)	BDJ

임의의 방향에서 마주 보는 쪽으로 성장추를 이용하여 채취하였다. 채취된 성장편은 채취 직후 음료수용 종이빨대에 삽입하여 1~2일간 기건한 후, U자형 홈이 파인 나무막대에 접착제를 이용하여 정착시켰다. 사포로 표면을 연마하여 연륜경계가 선명하도록 하였다.

연륜폭 측정은 Velmex 연륜측정장치로 0.01 mm까지 측정하였다. 각 성장편의 연륜폭 곡선을 상호 비교하는 그래프법을 이용하여 크로스데이팅을 실시하였다 (Pumijumong, 1998).

연륜 통계분석

각 연륜폭 시리즈는 spline (50% 반응주기: 60년)으로 표준화하였다. 표준화는 생물학적 생육추세를 추정하여 예측된 연륜폭과 실제 연륜폭의 비례인 지수(index)로 계산하여 각 연륜계열별로 지수연대기를 얻는 것을 말한다. 각 연륜시리즈의 지수연대기를 연도별로 평균을 내어 최종 연륜연대기를 얻었다. 평균민감도, 자기상관계수 등을 얻어 작성된 연대기의 통계학적 성질을 평가하였다. 평균민감도는 연대기 계열에서 연속된 두 연륜폭간의 변이 크기, 즉 고주파 변동을 측정하기 위한 통계인자이다. 자기상관은 한 시계열, 즉 연륜연대기 내의 지속성을 측정하는 통계인자로 한 해의 임목생장이 생육 당년의 환경뿐만 아니라 생육 전년도들에 만들어진 영양물질, 호르몬, 잎 등의 영향에 좌우되는 정도를 나타낸다 (Fritts, 1976).

인접한 장소에서 생육하는 임목 성장간에도 유전적 및 미소환경 차이에 기인하여 개체간 연륜시리즈가 어느 정도 차이가 있으며, 동일 임목 내에서도 채취방향에 따라서 차이가 있을 수 있다. 연륜시리즈간 동질성을 평가하기 위하여 동일 임목내 성장편간 상관계수 그리고 임목간 연륜폭시리즈의 상호상관계수, 신호 대 잡음비(SNR), 모수 설명신호(expressed population signal: EPS)를 Briffa와 Jones(1990)의 식을 이용하여 구하였다.

기후 복원

반응함수를 이용하여 기후인자와 연륜성장과의 관계를 개략적으로 조사한 후, 복원할 기후인자를 선정하였다. 반응함수로는 부스트랩(bootstrap)방법이 적용된 프로그램인 PRECON을 사용하였다 (Fritts, 1976; Guiot, 1991). 본 연구에서는 반응함수뿐만 아니라 단순상관계수도 구하여 복원할 기후인자를 선정하는데 이용하였다. 기상자료는 속초측후소에서 관측된 30년간 (1969~1998) 자료가 사용되었다.

전이함수는 반응함수와는 반대의 개념으로 예측변수를 t 년의 연륜폭지수로 하여 기후요소를 추정하는 회귀방정식을 만드는 것이다. 이때 자기상관을 고려하여 t 년도의 기후인자 예측으로 $t-2$,

$t-1$, t , $t+1$, $t+2$ 년의 연륜폭지수를 모두 예측변수로 하여 단계별 회귀를 시도하였다.

결과 및 고찰

연륜연대기의 통계적 성질

크로스데이팅 후 선별된 시료들의 통계적 성질을 분석하였다. 그 결과 평균민감도는 0.179이었다. 임목내 상관계수와 임목간 상관계수는 각각 0.533과 0.326으로 조사되었다. SNR은 4.348로 비교적 낮게 나타났는데, 이는 시료수가 적은 관계로 나타난 결과로 생각된다. EPS는 0.813으로 조사되었다. 제1주성분에 의해 설명된 변동률에서는 42.28%로 조사되어 이 연대기는 연륜기후학적 연구에 이용될 수 있음이 제시되었다.

반응함수

복원할 기후인자와 연구지역 선정을 위하여 먼저 각 연구지역별 단순상관 분석을 실시하였다 (Fig. 2). 그 결과 BDJ 연륜연대기는 4월부터 8월까지의 강수량에 대하여 정의 상관관계를 보여주었으며, 8월 강수량에 대해서는 유의성 있는 결과

Table 2. Chronology(residual) statistics of *Pinus densiflora* chronology

Chronology	BDJ
Number of trees(cores)	12(22)
Period(years)	1858~1998(141)
Mean sensitivity	.179
Standard deviation	
Mean correlation	.176
Period(years)	1954~1998(45)
Among all radii	.338
Between trees	.326
Within trees	.533
SNR*	4.348
EPS*	.813
Variance explained by first eigenvector	42.28%

* SNR: signal-to-noise ratio

* EPS: expressed population signal

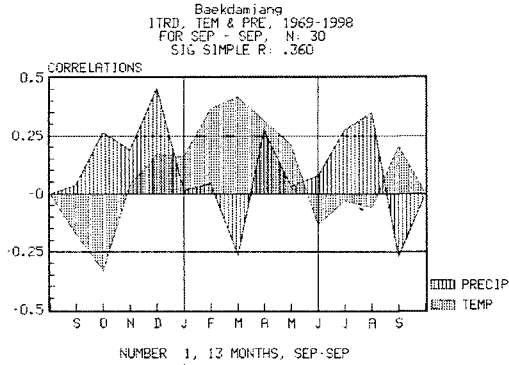


Fig. 2. Coefficients of correlation between tree-ring chronology and monthly climate variables (mean temperature and total precipitation).

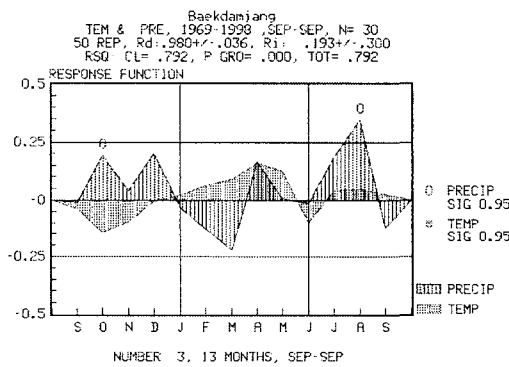


Fig. 3. Response functions of *Pinus densiflora* from BDJ at Sorak mountain.

를 보여주었다. 기온에 대해서는 유의성 있는 기간(월)이 없었다. 반응함수 분석(Fig. 3)에서도 단순 상관분석에서와 같이 8월 강수에 대하여 유의성 있는 정의 관계를 보여주었으며, 6월을 제외한 4월부터 8월까지 강수에 대하여 정의 상관을 보여주었다. 따라서 하계 몬순기간을 포함한 4월~8월 강수를 복원 대상인자로 선정하였다.

기후복원

작성된 연대기(BDJ)를 독립변수로 하고 4월부터 8월 총강수량(Y)을 종속변수로 하는 회귀식 ($Y = 715.57 \times BDJ(t_0) + 57.65$)을 전이함수로 만들

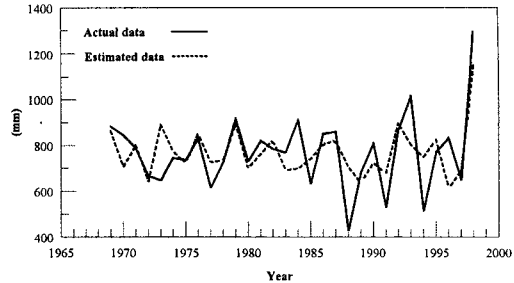


Fig. 4. Actual and estimated(reconstructed) April to August precipitation.

었다. 식에서와 같이 시차 없는 연대기만이 최종 회귀식의 독립변수로 사용되었다. 작성된 전이함수의 R^2 는 0.415로 7~8월 강수량 총변동량의 41.5%를 작성된 전이함수로 설명할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 4는 1969년부터 1998년까지 속초측후소에서 관측된 자료와 백담산장에서 채취된 소나무 연륜을 이용하여 복원된 4월부터 8월까지의 총강수량을 비교한 것이다. 기간이 짧아 보다 정확한 비교, 분석을 할 수는 없었으나, 대체적으로 실제 강수량과 비슷한 결과를 보여주었다. Leave-one-out test (Monteller and Tukey, 1977) 결과, 전이함수의 신뢰성이 검증되었다.

Fig. 5는 전이함수를 이용하여 연륜연대기가 작성된 모든 기간에 대하여 4월부터 8월까지의 강수를 복원한 것이다. 복원된 자료에 의하면 1880~

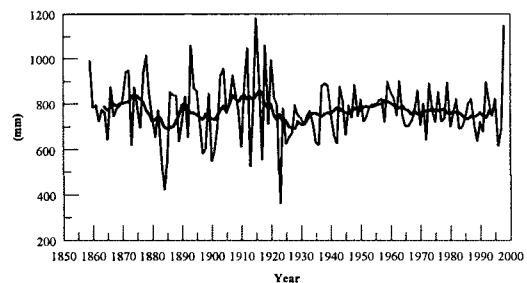


Fig. 5. Variation of the reconstructed April to August precipitation(smoothed curved : 10-year moving average).

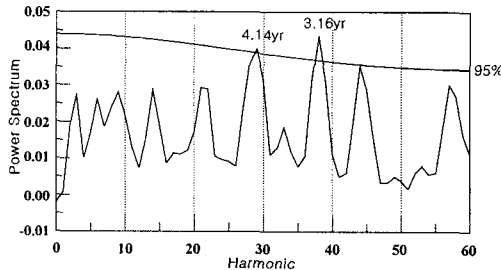


Fig. 6. Power spectrum analysis.

1887년, 1893~1901년, 1922~1938년은 건조기로 구분되어졌고, 1906~1918년은 습윤기로 구분되어졌다. 특히 1893~1901년간 나타난 건조기는 설악산 소나무로부터 복원된 중부 내륙의 5월 강수량 복원 결과(박과 Yadav, 1998)와 일치하여 이 기간의 가뭄은 한반도 내에서 폭넓게 (적어도 중부지역에서) 발생하였음을 알 수 있었다. 가뭄의 주기는 4.14년과 3.16년으로 조사되어 장주기보다 단주기 변화가 우세하였다 (Fig. 6).

결론

설악산 백담산장 주변에 자라는 소나무의 연륜 폭을 이용하여 4월부터 8월까지의 강수량을 141년간 성공적으로 복원할 수 있었다. 복원된 강수량 시계열에서 건조기와 습윤기가 반복되었음을 알 수 있었다. 즉 1880~1887년, 1893~1901년, 1922~1938년은 건조기로 나타났으며, 1906~1918년은 습윤기로 나타났다. 1900년대 전후에 발생된 건조기는 우리나라 일부에서만 발생된 국지적인 현상이 아닌 최소한 중부지역 전역에 걸친 현상임을 알 수 있었다. 장기간 변동으로 보았을 때, 19세기말과 20세기초는 20세기 후반부보다 건조하였다.

본 연구에서 복원된 강수량에서 발견된 저주파 변동이 중국 북부지역에서의 강수량 변동과 유사한 것으로 조사되었으며 이러한 유사성은 별도의 논문으로 보고될 것이다 (Liu 등, 2001).

본 연구를 통하여 장기간의 춘·하계 강수량을

복원하려 했으나, 나이가 오래된 임목의 수가 충분하지 못하여 A.D. 1858까지 밖에 복원하지 못하였다. 하지만 이 지역에 대한 고사목 조사나 고건축에 사용된 고목재 조사가 수행되어 연대기를 확장할 수 있다면, 보다 장기간의 몬순기후 복원이 가능할 것으로 생각된다.

본 연구는 국내에서 연륜연대기를 이용하여 하계기간이 포함된 몬순기후를 복원한 최초의 연구이며, 향후 우리나라 몬순기후를 연구하는데 있어 연륜기후학이 중요한 도구가 될 수 있음을 제시하였다.

참고문헌

- 和田雄治. 1917. 조선고대관측기록보고. 조선총독부관측소, 인천. 200p.
- 김연옥. 1985. 한국의 기후와 문화. 이대출판부. 549p.
- 박원규. 1998. 연륜연대 기법을 이용한 장기간의 한발과 홍수에 관한 분석과 예측. 한국과학재단 1995년도 핵심과제 최종보고서.
- 박원규, Yadav, R. R. 1998. 소나무 연륜을 이용한 한국 중서부의 5월 강수량(A.D. 1731~1995) 복원. 한국기상학회지 34(3):460-465.
- 박원규, 서정옥. 2000. 소나무 연륜연대기를 이용한 영동지방의 5~6월 강수량 (253년간: A.D. 1746~1999) 복원. 한국제4기학회지 14(2):87-99.
- 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.
- Fritts, H. C. 1976. Tree Rings and Climate. Academic Press Inc. (London) Ltd. pp. 567.
- Guiot, J. 1991. The bootstrapped response function: research report. *Tree-Ring Bulletin* 51: 39-41.
- Lim, G. H. and Jung, H. S. 1992. Interannual

- variation of the annual precipitations at Seoul, 1771-1990. *J. Korean Meteor. Soc.* 28(2):125-132.
- Liu, Y., Park, W.-K., Seo, J. W., Ma, L. and Jung, H. S. 2001. Monsoonal precipitation variation in the East Asia since A.D. 1840: tree-ring evidences from China and Korea. *Science in China* (submitted).
- Mosteller, F. and Tukey, J. W. 1977. *Data analysis and regression*. Addison-Wisley Pub. Co., Reading, Massachusetts, USA.
- Pumijumnong, N. 1998. Graphic method of crossdating with emphasis on subtropical trees. *Proceedings of the Second East Asia Workshop on Tree-Ring Analysis*. Ed. W.-K. Park, Agricultural Science & Technology Institute of Chungbuk National University. pp. 75-87.

(Accepted: April 12, 2001)