

## GIS 기법을 이용한 지형적 특성에 따른 월악산 소나무 연륜생장의 이질성 규명

서정욱 · 김재수 · 박원규

충북대학교 산림과학부

**적 요:** 소나무 직경생장과 기후인자(월 평균기온과 총강수량)와의 관계를 지형적 특성에 따라 분석하기 위하여 월악산국립공원에서 선정한 20개의 임분에서 각각 10여 본의 임목에 대한 연륜을 측정하였다. 각 연륜계열들은 크로스데이팅 한 후, 임령과 임분동태에 따른 임목생장 추세를 제거하기 위하여 표준화함으로써 임분별 연륜연대기를 작성하였다. 연륜의 성장경향을 이용한 집락분석의 결과 20개 임분을 4개의 집락으로 분류할 수 있었다. 집락 I의 사면 방향은 북쪽이었으나, 다른 집락들은 대부분 남쪽과 남서쪽이었다. 고도는 집락 I(1개 임분), 집락 II(10개 임분), 집락 III(2개 임분)이 305~580 m이었으나, 집락 IV(7개 임분)는 다른 집락들보다 높은 450~870 m이었다. 이 중 집락 II는 다른 집락보다 토심이 얇은 급경사의 암석지에 위치하였다. 지형에 따른 기후인자들과 연륜생장과와의 관계를 분석하기 위해 반응함수를 집락별로 실시하였다. 집락 I은 북사면의 다소 중습한 지역에 위치하여 다른 집락보다 기후인자의 영향을 많이 받지 않았다. 집락 II는 강수가 임목생장을 제한하는 주요인으로 나타났는데, 이는 집락 II가 낮은 고도에 위치하면서 토심이 얇은 급경사의 암석지에 위치하여 수분에 대한 임목생장의 민감도가 증가한 것이라 생각된다. 집락 III과 집락 IV는 집락 II에 비하여 임목생장 개시 이전의 겨울과 이른봄의 기온이 보다 중요한 인자로 나타났다. 이런 결과는 고도 상승에 따른 기온 감소(집락 IV)나 계곡부의 미소서형적 특성에 따른 온도 저하(집락 III)로 발생하는 결과라 생각된다. 이상의 결과는 GIS를 이용하여 수치화 하여 연륜과 지형이 갖는 시-공간적 정보들을 동시에 분석한 결과이다.

**검색어:** 기후변화, 다중회귀, 반응함수, 소나무, 시-공간적 이질성, 연륜연대, 임목생장, GIS, 집락분석

### 서 론

연륜연대학적 연구에 있어서 연륜과 기후와의 관계를 정확히 이해하는 것은 매우 중요하다. 연륜과 기후와의 관계를 표현하는 통계학적 방법인 반응함수(response function)(Fritts 1976)는 여러 개의 독립변수를 동시에 고려하는 다변량회귀식으로 월 강수량과 월 평균기온에 반응하는 임목생장 반응을 개괄적으로 파악할 수 있게 한다. 반응함수를 이용한 연구는 세계 각지에서 다양한 목적으로 적용되었다. Graumlich(1993b)는 반응함수를 이용하여 5대호 북부지방에 위치한 11가지 수종을 분석하여 임목생장과 기후와의 관계가 연구지역이 갖는 토양의 물리적 특성(중습지, 건중습지)보다 수종이 갖는 생물학적 특성에 더 민감함을 밝혔으며, 캘리포니아주와 네바다주의 아고산 지역에서 자라는 침엽수를 이용한 연구(Graumlich 1993a)에서는 반응함수를 이용하여 계산된 다중회귀식을 전이함수로 만들어 여름철 기온과 겨울철 강우를 1000년 전까지 복원하였다. Stahle 등(1988)은 북부 케톨리나의 기후를 A.D. 372까지 복원하는데 반응함수를 사용하기도 하였다. 최근에는 반응함수를 통해 만들어진 다중회귀식을 검증없이 이용할 경우 과평가된다는 단점이 있음을 확인하고 이를 보완하기 위해 부스트랩(bootstrap) 방법이 제시되었다 (Guiot 1991).

국내에서 반응함수를 이용한 연구가 체계적으로 실시된 것은 최 등(1992)이 설악산과 소백산 고산수종(주목과 잣나무)을 대상으로 4~5월, 7~8월 기온을 A.D. 1650년대까지 복원한 때이며, 이후 박(1993)은 설악산 주목, 잣나무 그리고 소백산 주목의 생장에 미친 대기중 이산화탄소의 영향을 분석하는데 반응함수를 이용하였다.

소나무(*Pinus densiflora*)는 수평적으로 볼 때 우리나라는 물론, 일본과 만주의 우수리강 유역까지 분포하고 있으며, 수직적으로는 따뜻한 곳을 좋아하는 생태적 특성때문에 남부의 경우 해발고 1150 m 이하, 중부는 1000 m 이하, 북부는 900 m 이하에 분포하는 침엽수이다 (이 1986, 김 1993, 임 1995). 이러한 분포적 특징을 갖는 소나무 연륜을 이용하여 기후와의 연관성을 연구한 것으로 지리산 소나무(Park and Yadav 1998b)와 속리산 소나무(Park and Yadav 1998a, Park et al. 1999)를 대상으로 실시한 연구가 있는데, 이들 연구에서는 고산(해발 850 m 이상)에 위치한 4~5개 임분의 소나무만을 대상으로 하였다.

따라서 본 연구에서는 서로 다른 환경조건(고도와 사면 방향)에 위치한 다양한 임분을 대상으로 연대기를 광역(월악산국립공원)에 걸쳐 작성하여 상호 비교함으로써 연륜생장이 유사한 임분집락들로 분류하였다. 분류된 집락간 소나무 연륜생장과 기후와의 관계를 조사함으로써, 월악산 국립공원에 위치한 소나무의 이질적인 연륜생장 원인을 조사하

여 기후변화에 따른 임목생장 변화를 예측할 자료를 구축하고자 하였다. 최종적으로 획득된 자료와 결과를 GIS (Geographic Information System)로 구축함으로써 연륜생장의 시·공간적 이질성을 효과적으로 규명하고자 하였다.

### 연구지 개황

연구대상지인 월악산국립공원에서 실시한 식생조사(강 1996)에 따르면 서어나무가 우점하는 계곡림, 계곡에 인접한 곳은 졸참나무, 남사면은 굴참나무, 북사면과 고지대는 신갈나무가 우점하는 참나무림 및 건조한 능선부에 우점하는 소나무림으로 구성되어 있다. 신갈나무 군락, 신갈나무-소나무 군락, 소나무 군락, 소나무-신갈나무 군락, 굴참나무-소나무 군락, 신갈나무-굴참나무 군락, 졸참나무 군락의 9개 군락으로 구분됨으로써(강 1996), 소나무가 월악산국립공원 내의 침엽수종 우점 수종임을 알 수 있다.

월악산의 기후는 우리나라 소기후구 구분으로 보면 1월과 7월의 일교차가 크고 1월의 상대습도가 낮은 제천을 중심으로 한 소백산맥 산간지역에 속한다 (박 1987). 동일 기후대에 속해있는 측후소들의 최근 44년간(1954~1997) 기후자료에 따르면 이 지역의 연평균기온은 11.3°C이며, 연총강수량이 1314.7 mm로 조사되었다 (서 1999).

### 연구방법

#### 연륜채취 및 측정

지형특성에 따른 임목과 기후와의 반응을 조사하기 위해 사면방향을 고려하면서 월악산 지역을 1 km<sup>2</sup>단위로 구획한 후 20개의 임분(W1~W20)을 선정하였으며(Fig. 1), 각 임분에서 10여 본의 우세목을 선택하여 흉고에서 2개씩의 생장편을 채취하였다. 채취된 연륜시료는 골저도법(Stokes and Smiley 1968)과 그래프방법(Pumijumnong 1998)을 병행한 크로스데이팅 기법을 이용하여 각 연륜에 정확한 생육연도를 부여하였다. 연륜폭은 스케너가 부착된 WinDENDRO™ Teen 시스템을 이용하여 0.01 mm까지 측정하였다.

#### 표준화

표준화는 임목의 수령에 따른 임목 고유의 생물학적 생육추세와 오랜 기간에 걸친 경쟁과 교란에 따른 추세(Fritts 1976, Yasue 1998)를 제거하는 것으로, 생장추세선을 구하여 예측된 연륜 값과 실제 연륜 측정값의 비례인 지수로 계산하여 각 연륜계열별로 지수연대기(index chronology)를 만드는 것이다 (Fritts 1976). 본 연구에서는 이중표준화법이 사용되었는데, 이는 1차로 지수곡선으로 생육곡선을 측정된 다음 2차로 spline(50% 반응주기 60년)을 이용하여 재표준화하는 것이다 (서 1999). 지수연대기는 자기회귀 모형에 의해 생물학적 지속성을 제거한 후 잔차(residual)연대기를 최종적으로 사용하였다.

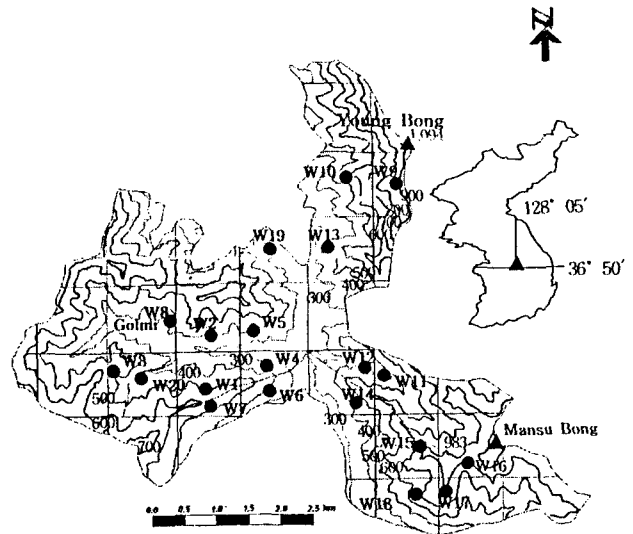


Fig. 1. Map of the study area, Mt. Worak and the locations of 20 sample stands. (●: Location of sample stands)

#### 연륜연대기의 통계학적 평가

작성된 연륜연대기의 통계적 평가를 위하여 평균민감도, 상호상관분석, 주성분분석을 실시하였다.

평균민감도는 연륜계열에서 연속된 두 연륜폭간의 변이 크기, 즉 고주파변동을 측정하기 위한 통계인자로 연륜연대학의 창시자인 A.E. Douglass에 의해 고안된 것이다 (Fritts 1976).

상호상관분석은 유전적 및 국소입지의 차이에 따라 발생하는 인접한 임목 개체간 연륜계열의 차이와, 채취방향에 따른 동일 임목내 연륜계열의 차이를 조사하기 위하여 실시하였다. 임목내 생장편간 상관계수( $r_w$ )와 임목간 상호상관계수( $r_b$ )는 단순상관계수로 구하였으며, 작성된 연대기들의 기간별 유효성을 나타내 주는 시그널강도(signal/noise ratio: SNR)는 임목간 상호상관계수( $r_b$ )를 이용하여 계산하였다 (Briffa and Jones 1990).

다음으로, 한 임분에 속한 모든 임목의 연륜시리즈로부터 주성분을 계산하고 제1주성분에 의해 설명되어지는 변동률(PC-1%)을 계산하였다. PC-1%가 높다는 것은 일정지역에 생육하는 임목의 연륜생장에 높은 유사성이 있음을 의미하며, 보통 기후인자의 영향을 크게 받을 경우 유사성이 높아진다. 이상의 통계적 평가는 ARSTAN 프로그램(Cook 1985)을 이용하였다.

#### 집락분석

20개 연구 지역에 대한 임분연륜연대기들의 유사성을 검사하기 위하여 집락분석을 실시하였다. 집락분석은 대상들이 지니고 있는 유사성을 바탕으로 동질적인 집락으로 묶거나 다수의 대상들을 몇 개의 동질적인 집락으로 구분하여 동일 집락에 속해 있는 공통된 특성들을 조사하는 것이

다. 본 연구에서는 제곱유클리디언거리를 계산함으로써 집락을 구분하였다 (김 1997).

**반응함수**

반응함수는 기후인자와 연륜생장과의 관계를 조사하기 위해 H.C. Fritts 교수에 의해 개발되었다. 이는 기후인자(독립변수; 월 평균기온과 월 강수량)와 연륜지수(종속변수) 간 관계를 일반적인 다중회귀식으로 나타낼 경우 기후인자간 다중공선성(multicollinearity)이 나타나는 단점이 있기 때문이다 (Fritts 1976, 김과 전 1994). 만일 독립변수간 상관관계가 존재할 경우 하나의 독립변수로 인해 다른 독립변수의 중요도가 변하게 됨은 물론 종속변수인 연륜과 독립변수인 기후인자간 관계를 정확히 파악할 수 없게 된다. 반응함수란 이러한 단점을 보완하기 위하여 독립변수들을 직교 변환하여 상호 독립적 형태인 주성분(principal component)으로 변환함으로써 독립변수간 존재하는 상관을 제거하는 것이다 (Fritts 1976).

본 연구에서는 부스트랩방법을 응용한 반응함수프로그램(PRECON)이 사용되었다 (Guiot 1991). 부스트랩은 반응함수에서 나오는 다중회귀계수에 대한 표준오차를 측정하여 정확한 유의성 검사를 하는 것으로(Guiot 1990), 관측치 중에서 일부만을 이용하여 n번의 반복으로 만들어진 회귀식들이 갖는 오차가 가장 안정적인 값에 도달하도록 하는 방법이다. 본 연구에서는 부스트랩으로 50회 검정된 반응함수를 구하였다.

반응함수를 이용하여 임목생장과 기후와의 관계를 조사하기 위해서는 연구지에 대한 정확한 기후자료가 필요한데, 월악산의 경우 측후소가 없기 때문에 월악산 주변과 동일 기후대에 속하는 6개 측후소(제천, 충주, 문경, 보은, 영주, 서울)의 자료를 이용하여 시험지가 속해 있는 중부 소백산맥 산간 지역구를 대표할 기후자료를 만들었다 (서 1999). 지역평균값이 보통 연륜연대학에서 사용되는데 이는 개별 측후소의 데이터보다 신뢰성이 높고, 측후소가 없는 지역으로까지 연구범위를 확장할 수 있는 방법이 되고 있다 (Fritts 1976). 측후소자료에 대한 신뢰성을 조사하기 위해서는 상관분석과 동질성검사가 사용되었다 (Fritts 1976). 반응함수에 사용된 독립변수는 전년도 8월부터 당년 9월까지의 월 평균기온과 월 강수량이었으며, 분석에 포함된 기간은 44년간(1954-1997) 이었다.

**GIS분석**

20개 연구지에서 분석된 결과를 공간적으로 확장하고, 임목생장 경향과 지형특성과의 연관성을 관찰하기 위해 GIS를 이용한 향분석과 공간분석을 실시하였다. 향(aspect; 사면방향)분석으로 경·위도 좌표와 등고 값을 갖는 지형도에 방위 값을 지정해 줌으로써 동일한 방위를 갖는 지역을 지형도 위에 나타냈으며, 공간분석은 향분석 결과와 연륜생장 분석결과를 지형도 위에 함께 표시함으로써 연륜생장과 향과의 관계를 시각적으로 분석하였다. 아울러 연륜생장 분석시 획득된 모든 결과를 GIS를 이용하여 데이터베이스로

구축하였다. 사용된 시스템은 Intergraph사의 MGE(Modular GIS Environment)와 GeoMedia이다.

**결과 및 고찰**

**크로스데이팅 및 수령분석**

크로스데이팅을 실시한 결과 1964, 1988, 1994년도에 월악산 소나무의 생장이 전체적으로 저조하게 관찰되었다. 크로스데이팅이 잘 이루어지지 않은 시료는 재확인 작업을 수회에 걸쳐 실시하였으며, 이때도 크로스데이팅이 이루어지지 않은 시료는 연구에서 제외하였다. 그 결과 Table 1과 같이 1개소(W12)를 제외하고는 모두 8본 이상의 임목이 포함되었다. 또한 W20 임분을 제외하고는 연륜이 모두 임분간 크로스데이팅 되었으며, 이미 작성된 속리산 연대기 (Park et al. 1999)와도 크로스데이팅이 가능하였다. 임분간 수령분석에서는 5개 임분을 제외한 대부분이 100년 미만의 수령으로 조사되었으며, W6 지역의 수령이 약 150년으로 가장 오래된 것으로 나타났다.

**연대기의 통계학적 성질**

기후 자료가 있는 1954년부터 1998년까지의 연륜지수를 이용하여 통계조사를 실시하였다 (Table 2). 연속된 두 연륜폭간 변이를 나타내는 평균민감도는 0.159~0.278로 나타났는데, 이는 대체로 높은 민감도에 해당되는 것으로 월악산 소나무의 연륜 변동이 고주파 변동, 즉 연도별 변이를 포함하고 있어 1차적으로 연륜연대학적인 분석이 가능한 연대기임을 나타내준다.

**Table 1.** Number of crossdated cores and estimated tree ages

Stand ID	Number of crossdated cores (trees)	Innermost years	Estimated ages
W1	16 ( 9)	1901	98~100
W2	20 (10)	1922	76~97
W3	16 ( 8)	1938	61~68
W4	17 ( 9)	1925	74~75
W5	18 (10)	1925	74~76
W6	16 ( 9)	1852	147~150
W7	19 (10)	1862	137~145
W8	14 ( 8)	1929	70~74
W9	16 (10)	1935	64~69
W10	19 (10)	1933	66~69
W11	18 ( 9)	1952	47~50
W12	11 ( 6)	1922	77~84
W13	18 ( 9)	1933	66~78
W14	18 ( 9)	1878	121~127
W15	19 (10)	1950	49~60
W16	14 ( 8)	1873	126~132
W17	19 (10)	1856	143~149
W18	20 (10)	1942	57~60
W19	20 (10)	1938	61~73
W20	16 (10)	1955	44~48

**Table 2.** Summary statistics of residual chronologies

Stand ID	Mean Sensitivity	Correlation coefficient		Signal to noise ratio	Variance explained by first principal component (PC-1%)
		Within-tree( $r_w$ )	Between-tree( $r_b$ )		
W1	0.236	.566	.407	6.188	46.5
W2	0.259	.592	.419	7.218	46.1
W3	0.160	.516	.193	1.196	31.9
W4	0.247	.486	.411	2.096	48.2
W5	0.278	.684	.481	7.423	53.7
W6	0.249	.652	.508	8.252	56.7
W7	0.219	.614	.416	7.835	46.6
W8	0.236	.669	.497	6.923	55.5
W9	0.178	.540	.296	1.259	50.9
W10	0.243	.688	.509	11.422	55.1
W11	0.159	.535	.308	0.888	54.0
W12	0.202	.693	.383	3.105	48.4
W13	0.269	.658	.633	3.450	67.3
W14	0.230	.475	.486	2.835	52.7
W15	0.174	.451	.332	3.978	41.0
W16	0.209	.590	.327	3.397	41.5
W17	0.159	.580	.381	5.540	43.4
W18	0.171	.526	.408	6.898	46.0
W19	0.247	.501	.412	2.079	51.2
W20	0.194	.428	.414	1.411	47.8

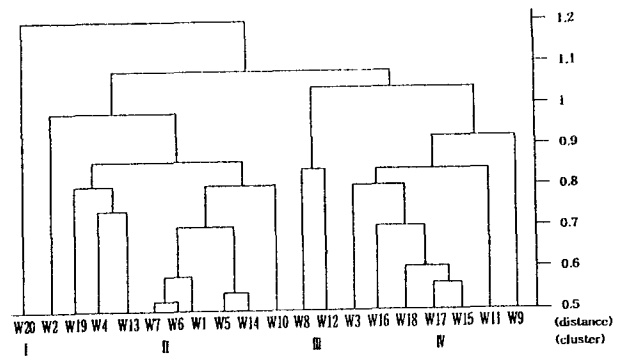
월악산 소나무에서 관찰된 동일입목내 상관계수( $r_w$ )는 0.428(W20)~0.693(W12)으로 평균  $r_w$ 가 0.572이었으며, 입목간 상관계수( $r_b$ )는 0.210(W3)~0.636(W13)으로 평균  $r_b$ 가 0.411로 나타났다. 이는 Park과 Yadav(1998a, b)가 동일수종을 대상으로 지리산과 속리산에서 실시한 연구결과에 비해 입목간 상관계수는 월악산이 높고, 동일입목내 상관계수는 월악산 연륜이 낮은 것으로 관찰되었다. 따라서 월악산 지역에서 자생하고 있는 소나무는 지리산과 속리산에 위치한 소나무보다 입목간 성장변이는 적고, 채취 방향에 따른 입목성장 변이는 높음을 알 수 있었다.

제1주성분에 의해 설명되어 질 수 있는 변동률(PC-1%)은 31.9에서 67.3으로 평균 PC-1%가 49.2로 계산되어, 본 연구 지역들이 연륜연대학적 연구에 이용될 수 있음을 제시하였다. 제1주성분에 의해 설명되어지는 변동률이 높다는 것은 일정지역에 생육하는 입목의 연륜성장간 유사성이 크다는 것을 의미하는데 보통 기후인자의 영향을 크게 받을 경우 높은 유사성을 갖는다.

### 집락분석

20개 입본의 연륜연대기들을 집락분석하여 Fig. 2와 같이 분류하였다. 각 연결고리들은 동질성이 높은 순서대로 묶여진 것이며, 최종적으로 4개의 집락으로 분류할 수 있었다.

분류된 집락들과 지형적 특성과의 연관성을 관찰하기



**Fig. 2.** Cluster analysis by calculating the statistical distance among stand chronologies.

위하여 Table 3과 같이 집락간 고도와 사면방향을 비교한 결과, 집락 I은 고도면에서 중간 높이이면서 사면방향이 정북으로 다른 집락과는 차이를 보이고 있었다. 집락 II는 고도면에서 저지대부터 중간 위치까지 분포하고 있으며 사면 방향의 대부분이 남쪽에 위치하고 있어 집락 I에 비해 높은 수분 스트레스를 받을 것이라 생각된다. 또한 집락 II에 위치한 대부분의 소나무들은 암반 노출이 많은 곳이다. 집락 III은 고도면에서 중저에 속하며 사면방향이 남향과 서향으로, 지리적으로 볼 때 집락 II와는 큰 차이가 없으나 계곡 부 주위에 위치하고 있어 집락 II에 비해서는 수분에 대한 스트레스가 상대적으로 적을 것으로 유추된다. 집락 IV는 고도면에서 450 m에서 870 m으로 고지대에 위치하며, 사면 방향의 대부분이 남향과 서향이다.

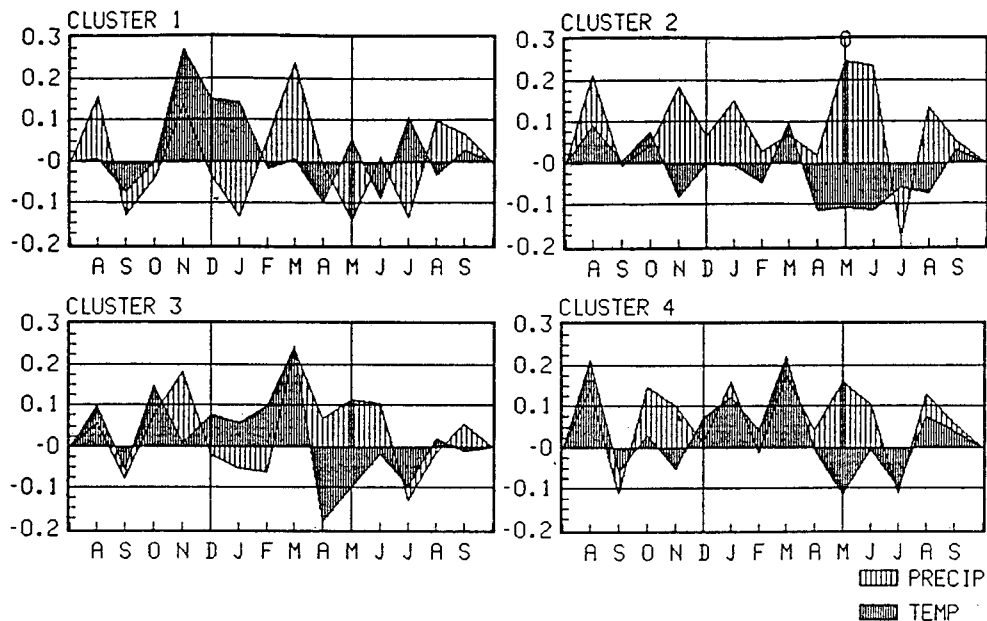
### 반응함수

동일 집락으로 분류된 입본들의 연륜연대기들을 평균함으로써 각 집락의 연대기를 작성하고 각각의 집락연대기에 대한 반응함수를 구하였다 (Fig. 3). 각 집락에 사용된 기후인자 주성분의 수는 모두 19개이며, 이들 주성분에 의해 설명되어지는 변동률은 52.8%~56.9%로 계산되었다. 이는 각 집락연대기의 총변동량의 55%가량을 기후인자들이 설명할 수 있음을 나타낸다. 각 집락에 대한 반응함수를 구하여 연륜과 기후와의 관계를 지형에 따라 개략적으로 비교하였다.

집락 I은 생육 전년도 11월부터 생육 당년 1월까지의 기온과 당년 3월의 강우에 대해서만 비교적 높은 정의 상관을 보였다. 전체적인 반응 경향은 다른 집락과 많은 차이를 보이고 있으며, 생육 당년의 월별 반응함수도 매월 부호가 바뀌고 그 크기도 작았다. 유의성에 있어서는 모든 월에 대하여 95% 유의 수준을 만족시키지 못했으며, 기후인자에 의해 설명되는 변동량도 52.8%로 가장 낮았다. 집락 II는 강우에 있어서 대부분 정의 관계를 보이고 있으며, 기온에 대해서는 전년도 8월, 10월과 당년 3월에 대해서만 정의 관계를 보였다. 특히 5월의 강우에 대해서는 95% 수준에서 유의한 정의 관계를 보이고 있어 성장초기의 강우가 적을

**Table 3.** Comparison of topographical characteristics among clusters

	Cluster I	Cluster II	Cluster III	Cluster IV
Stands	W20	W1, W2, W4, W5, W6, W7, W10, W13, W14, W19	W8, W12	W3, W9, W11, W15, W16, W17, W18
Elevation (m)	430	305~580	370~380	450~870
Aspect	north		mostly, south to southwest	
Slope characteristics	gentle slope	very stiff and rocky slope	near in valley	moderately stiff, upper slope



**Fig. 3.** Response functions of four clusters. Y axis: Regression coefficient converted to normalized indices, X axis: The months of climate variables from previous August to current September.

경우 수분 스트레스를 받는 것으로 생각된다 (Lee and Kim 1987). 대부분이 남사면의 암석지에 위치하고 있는 지형적 특성을 고려해 볼 때, 이 기간 동안의 강우에 대한 높은 반응은 지형적 특성과 관련이 있음을 알 수 있다. 집락 III은 집락IV와 대부분 비슷한 경향을 보이고 있으나 전년도 12월부터 당년 2월까지의 강우에 대하여 부의 뚜렷한 반응을 보이지 않았다. 이는 집락III이 계곡부에 위치하고 있어 중습한 미소환경인 결과라 유추된다. 집락IV는 강우에 있어 대부분 정의 상관을 보이고 있으며, 기온에 대해서는 전년도 8월과 당년 1월과 3월에 대해 정의 반응을 보였다. 이는 소나무의 생육고도 한계에 위치하고 있는 소나무와 기후간 나타나는 전형적인 성장 반응이라 볼 수 있다 (Park et al. 1999). 높은 고도로 인해 발생하는 저온화 현상은 휴면기와 성장 초기의 기온이 소나무 성장에 정의 역할을 하며, 5월과 6월에 대해서는 수분에 더욱 민감하게 반응하는 결과를 보였다.

응하는 결과를 보였다.

800 m 이상 되는 고지에서 채취된 속리산 소나무 연륜연대기와 본 연구에서 얻어진 집락(I, II, III, IV)들의 연륜연대기기간 상관계수가 0.224, 0.620, 0.502, 0.735로 집락 I의 경우를 제외하고는 모두 유의성이 인정되었으며, 고도면에서 유사한 집락IV의 연륜연대기와의 가장 높은 상관을 보여주었다. 50 km 이상 떨어진 속리산과 월악산에 자라는 소나무의 연륜연대기가 유사하다는 것은 거시적인 기후가 연륜생장에 영향을 줄 수 있다. 다만 지형적 특성에 따른 미소기후와의 반응에는 차이가 있기 때문에 연륜연대기를 이용하여 기후와의 반응을 조사하거나 고기후를 추정할 때는 서로 유사한 지형적 특성-예를 들면 고도와 경사방향-을 갖는 임분의 연대기를 선별할 필요가 있음을 알 수 있다.

**GIS분석**

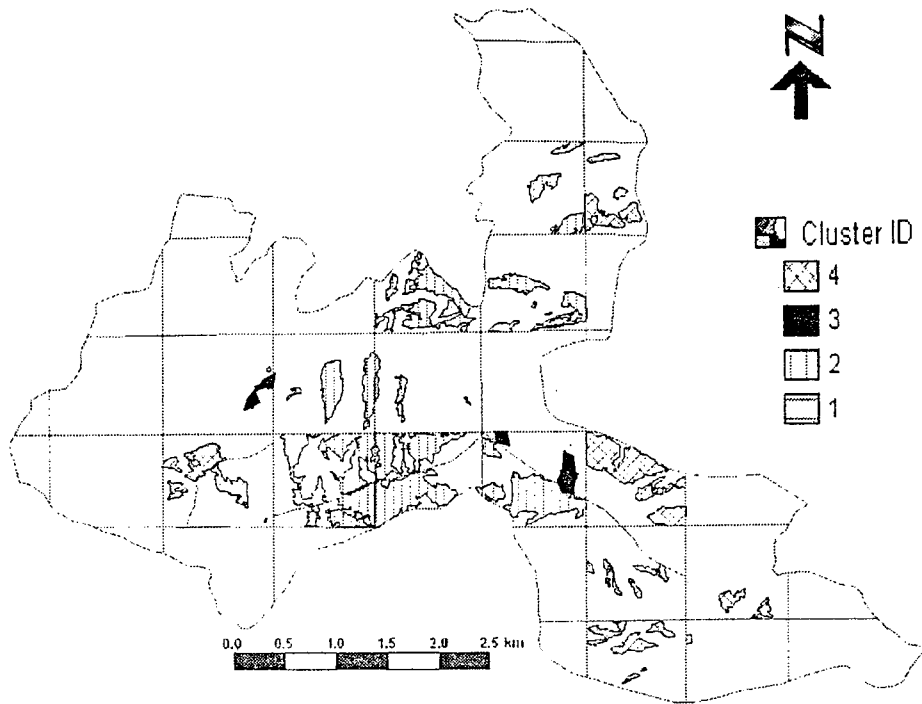


Fig. 4. Geographical distributions of 4 clusters.

Fig. 4와 같이 동일한 연구지역으로 구획된 곳에서도 연륜채취 장소와 동일한 향 조건을 갖는 곳만을 선별하여 연륜분석을 통하여 획득된 집락분석 결과를 GIS 기법을 이용하여 공간적으로 나타내었다. 조사지역인 월악산국립공원을 전체로 보았을 때 집락 I은 서남쪽 일부, 집락 II는 중앙부분의 가장 넓은 면적을 차지하였으며, 집락 III은 서북쪽과 동부 일부에 국한되는 반면에, 집락 IV는 고지대인 동쪽부분의 대부분과 서쪽의 일부를 차지하였다. 특히, 고도가 700 m 이상 되는 고지대(W9, W15, W16, W17)에서는 소나무의 분포 면적이 700 m 이하의 고도에 속하는 다른 연구지역에 비하여 제한되어 있음이 관찰되었다. 양수인 소나무의 생리학적 특성을 고려해 볼 때, 향분석을 통해 구분된 지역들은 실제 소나무가 분포하고 있는 잠재적 분포를 제시해주며, 동일한 집락으로 구분된 분포지의 소나무들은 유사한 성장을 공유하며 기후와 성장관계도 일치할 것으로 예측된다.

GIS를 이용한 공간적 해석과 함께 각 조사지역에서 획득된 모든 자료와 연륜분석 결과들을 GIS데이터베이스로 구축하였다. GIS데이터베이스 작업에는 연구지역의 수종, 연륜지수연대기, 경·위도 좌표, 고도, 경사도, 사면방향, 군집분석 결과 등이 사용되었다. 조사지역의 모든 자료를 GIS데이터베이스로 구축함으로써 단시간 내에 조사지역의 모든 자료들을 검색하고, 동시에 위치정보를 알 수 있게 되었다. 예를 들어, 사면 방향이 남쪽인 임분만을 찾거나, 월악산에서 5월 가뭄이 심했던 1965년도 연륜생장이 연평균

성장량보다 적은 임분만을 찾을 경우, GIS시스템에 있는 조건문에 해당 사항을 기입하면 필요로 하는 정보는 물론, 지도상의 위치까지 표시해 주게 된다 (서 1999).

### 결론

월악산 소나무의 연륜생장을 다양한 지형적 특성을 갖는 20개의 임분에서 조사한 결과 4개의 집락으로 분류할 수 있었다. 집락 I은 생육당년도보다는 생육전년도 가을과 겨울의 기온에 대해 높은 영향을 받으나, 북사면에 위치하고 있어 수분에 대한 스트레스가 적다고 유추된다. 낮은 고도의 토심이 얇은 가파른 경사에 속하는 집락 II는 성장초기와 강우와는 정의 관계를 보이고 기온과는 부의 관계를 가지어 성장 초기의 수분조건에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 봄 가뭄기간 동안의 강수가 수분스트레스를 많이 받는 임분의 연륜생장을 크게 좌우하는 것으로 생각된다. 집락 III은 저지대의 계곡부에 위치하고 있고 토심이 비교적 깊어 집락 II의 경우보다 강우의 영향을 적게 받으며, 생육개시 직전의 강우와 기온에 대해서는 정의 관계를 보여 주어 집락 II와는 차이를 나타내었다. 집락 IV는 고지대에 위치하고 있으며, 생육전년도의 겨울 기온에 대하여 가장 민감한 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 또한 성장초기의 강수에 대해서는 집락 II와 같은 큰 영향을 받지 않는 것으로 관찰되었다. 이는 고도가 높아지면 기온이 체감되기 때문에 휴면기와 성장초기 기온이 집락 IV의 소나무

무 성장에 중요한 요인이 되는 것으로 생각된다.

이상의 결과를 GIS로 해석한 바 월악산 소나무의 연륜생장은 임목이 위치한 지형적 특성(고도와 사면방향)에 따라 기후에 대한 반응 결과를 달리함을 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 우리 나라에서 소나무를 연륜연대학적으로 활용하는데 기초자료로 이용할 수 있으며, 아울러 향후 지속될 기후변화에 따라 초래될 수목성장반응의 공간적 이질성을 예측하는데 활용될 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제(981-0605-019-2)의 지원으로 수행되었음.

## 인용문헌

- 강상준. 1996. 월악산 국립공원자연자원조사. 국립공원관리공단, 서울. pp. 35-101.
- 김기영, 전명식. 1994. 다변량 통계자료분석. 자유아카데미, 서울. 307 p.
- 김진수. 1993. 지구상의 소나무 속 수종의 발달과 분포. 숲과 문화 연구회(편) "소나무와 우리문화"에서, 두솔기획, 서울. pp. 9-20.
- 김충연. 1997. SAS라는 통계상자 -통계분석 및 시장조사기법을 중심으로-. 데이터플러스, 서울. 592 p.
- 박원규. 1993. 대기중 이산화탄소 증가와 한국산 아고산 침엽수류의 성장동향-연륜 연대학적 분석-. 한국임학회지 82(1): 17-25.
- 박현욱. 1987. 기후요소의 주성분분석에 의한 한국의 기후구분. 지리학 36: 13-25.
- 서정욱. 1999. 월악산 소나무(*Pinus densiflora*) 연륜 변동에 관한 시-공간적 분석. 충북대 석사논문, 청주. 59 p.
- 이영로. 1986. 한국의 송백류. 이화여자대학교 출판부, 서울. 241 p.
- 입경빈. 1995. 소나무. 대원사, 서울. 143 p.
- 최종남, 류근배, 박원규. 1992. 아한대침엽수류 연륜연대기를 이용한 중부산간지역의 고기후 복원. 한국제4기학회지 6: 21-32.
- Cook, E.R. 1985. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. Ph.D. Dissertation. University of Arizona, Tucson. Arizona. 175 p.
- Briffa and Jones. 1990. Basic chronology statistics and assessment. In E.R. Cook and L.A. Kairiukstis, Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht. The Netherlands. pp. 137-152.
- Fritts, H.C. 1976. Tree Rings and Climate. Academic Press Inc., London. 567 p.
- Graumlich, L.J. 1993a. A 1000-year record of temperature and precipitation in the Sierra Nevada. Quaternary Research 39: 249-255.
- Graumlich, L.J. 1993b. Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region. Can. J. For. Res. 23: 133-143.
- Guiot, J. 1990. Methods of Calibration. In E.R. Cook and L.A. Kairiukstis (eds.), Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, The Netherlands. pp. 165-178.
- Guiot, J. 1991. The bootstrapped response function. Tree-Ring Bulletin 51: 39-41.
- Lee, C.S. and J.H. Kim. 1987. Relationships between soil factors and growth of annual ring in *Pinus densiflora* on stony mountain. Korean J. Ecol. 10: 151-159.
- Park, W.K. and R.R. Yadav. 1998a. 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: 459-465.
- Park, W.K. and R.R. Yadav. 1998b. A dendroclimatic analysis of *Pinus densiflora* from Mt. Chiri in southern Korea. Ann. Sci. For. 55: 451-459.
- Park, W.K., R.R. Yadav and D. Ovtchinnikov. 1999. Influence of climatic factors on the radial growth of *Pinus densiflora* from Songni mountains in central Korea. In R. Wimmer and R.E. Vetter (eds.), Tree-Ring Analysis. CAB International, Wallingford. pp. 287-297.
- Pumijumng, N. 1998. Graphic method of crossdating with emphasis on subtropical trees. In W.K. Park and J.S. Kim (eds.), Proceedings of the Second East Asia Workshop on Tree-Ring Analysis. Agricultural Science & Technology Institute of Chungbuk National University, Cheongju. pp. 75-87.
- Stokes, M.A. and T.L. Smiley. 1968. An Introduction to Tree-Ring Dating. Univ. of Chicago Press, Chicago. 73 p.
- Stahle, D.W., M.K. Cleaveland and J.G. Hehr. 1988. North Carolina climate changes reconstructed from tree rings: A.D. 372 to 1985. Sci. 240: 1417-1519.
- Yasue, K. 1998. Methods of standardization and autoregressive modeling for dendroclimatological study. In W.K. Park and J.S. Kim (eds.), Proceedings of the Second East Asia Workshop on Tree-Ring Analysis. Agricultural Science & Technology Institute of Chungbuk National University. Cheongju, Korea. pp. 58-67.

(1999년 6월 7일 접수)

---

## Analysis of Heterogeneous Tree-Ring Growths of *Pinus densiflora* with Various Topographical Characteristics in Mt. Worak Using GIS

Seo, Jeong-Wook, Jesu Kim and Won-Kyu Park

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

**ABSTRACT:** To analyze the relationship between climatic factors (monthly temperatures and precipitations) and the radial growths of *Pinus densiflora* with different topographical settings in Worak National Park, Korea, 20 stands were chosen and 10 trees were selected from each stand. After crossdating, each ring-width series was double detrended (standardized) by fitting first a negative exponential or straight regression line and secondly a 60-year cubic spline. The growth patterns could be categorized by four groups using cluster analysis. Cluster I stand has north aspect, but others have south or southwest aspects. Cluster I (one), cluster II (ten), and cluster III (two) stands are located in lower elevation (305~580 m), however, cluster IV (seven) stands are located in higher elevation, mostly in 560~870 m. Cluster II and III stands are located at similar elevation with the same aspect, however, cluster II stands are located on more rocky and stiff slope with shallow soil depth. The response functions were used to examine the difference in the relationships between climatic factors and tree growths among the 4 cluster chronologies. The climatic factors are not limiting the growth in the cluster I stand as highly as in other cluster plots because of rather mesic conditions in the north slope. The precipitation in the spring appears to be the main limiting factor in the cluster II stands. The topographical characteristics of the sites of cluster II, shallow soil depths on the rocky slope in the south aspect at lower elevation, may enhance the sensitivity of growth to moisture stress. In cluster III and cluster IV, winter and spring temperature prior to the growth become more important than for cluster II. This pattern is common for *Pinus densiflora* trees growing in higher elevation ( $\approx 800$  m) in South Korea. It may be related with preconditioning effects of temperature as the temperature decreases with increasing elevation (cluster IV) or in the valley (cluster III). The results obtained by tree-ring analysis were digitalized by GIS and spatio-temporal information on tree-ring data and topographic setting were analyzed and displayed simultaneously. The results of this study can be used to predict the future change of *Pinus densiflora* ecosystem to climate change expected in central Korea.

**Key words:** Climate change, Cluster analysis, Dendrochronology, GIS, Korea, Multiple regression, *Pinus densiflora*, Response function, Spatio-temporal heterogeneity, Tree growths

---