

大氣中 이산화탄소 증가와 한국산 亞高山 침엽수류의 生長動向¹

— 年輪年代學的 分析 —

朴元圭²

Increasing Atmospheric Carbon Dioxide and Growth Trends of Korean Subalpine Conifers¹

— Dendrochronological Analysis —

Won-Kyu Park²

要 約

大氣中 이산화탄소 증가에 따른 성장증진 가능성을 조사하기 위하여 한국산 亞高山 침엽수류의 生長動向을 年輪年代學的 方法으로 조사하였다. 설악산, 지리산, 소백산의 해발 1200~1750m에서 생육하는 3수종(주목, 잣나무, 구상나무) 64본의 노령임목으로부터 근래 209~412년간의 年輪年代記를 4개 작성하였다. 각 연대기의 곡선에서 뚜렷한 성장증가 추세를 발견할 수 없었으며 1950년 전후의 生長을 비교한 t검정에서는 설악산 잣나무의 경우만 제외하곤 유의차가 인정되지 않았다. 설악산, 잣나무의 경우도 1950년 후 生長이 8% 증가되었으나 이를 대기중 이산화탄소 증가의 영향이라 단정할 수 없었다.

ABSTRACT

Tree-ring data of subalpine conifers growing in Korea were analyzed to evaluate the possibility of enhanced tree growths due to increased atmospheric carbon dioxide. A total of 64 trees of three species (*Taxus cuspidata*, *Pinus koraiensis*, *Abies koreana*) were sampled from three mountain ranges (Seolak, Sobaek, Chiri) at 1200~1750m (above sea level) and four chronologies were developed in spans of 209~412 years. No apparent growth increases were found in the graphs of chronologies. As comparing the growths of 1900-1949 and 1950-1989 period, only one chronology possessed higher mean growth in the post-1950 period. Growth increase found in the *Pinus koraiensis* chronology from Mt. Seolak was 8% but it could not be solely attributed to increased carbon dioxide concentration.

Key words : CO₂ fertilization, dendrochronology, subalpine conifers, global change, tree rings, Korea

서 론

지구 대기권내에서의 이산화탄소(CO₂)의 분포는 지역별로 그리고 계절 별로 차이가 있으나,

대기중 CO₂가 차지하는 비율 즉, 그 농도는 대기권 80km 이내에서는 일정하다(Keeling 등, 1982; Cleveland 등, 1983; Komhyr 등, 1985). 한편 대기중 CO₂ 농도는 화석연료 사용의 증대로 근래 140년 동안 28%나 증가되어 1985년 현

¹ 接受 1992年 12月 8日 Received on December 8, 1992.

² 충북대학교 임산가공학과 Department of Forest Products, Chungbuk National University

* 이 연구는 '91년도 한국과학재단 신진연구비지원(과제번호 : 913-1507-007-1)에 의한 결과임.

재 약 345ppm으로 이러한 증가 추세가 지속된다면 21세기중에는 600ppm에 이를 것으로 추정된다(Boden 등, 1990).

한편 CO₂는 광합성에 필요한 물질이기 때문에 그 농도 증가로 식물생장이 증진되는 것이 여러 온실 실험에서 밝혀졌는데(Krizek 등, 1969; Funsch 등, 1970; Tinus, 1972; Carson and Bazzaz, 1980; Tolley, 1982; Tolley and Strain, 1984; Telewski and Strain, 1986), 이러한 생장증진 효과를 'CO₂ 施肥(CO₂-fertilization) 효과'라 부른다. 자연식생 수목에 대한 연구로는 Green and Wright(1977)가 미 캘리포니아 주의 폰데로사소나무를 대상으로 실험한 바 CO₂ 농도를 정상치(355ppm)보다 150ppm 증가시킬 때까지 생장 증진 효과가 있었는데 평균 순광합성 증가율은 84%에 달한다고 하였다. Rodgers 등(1983)은 테에다소나무, 풍나무 등의 실험에서 CO₂ 농도 910ppm에서 바이오메스가 무처리구의 157~186%에 이르렀다고 하였다.

CO₂ 시비효과는 단순히 광합성에 필요한 물질인 CO₂의 양적증가에 의한 효과만이 아니라 다른 생리인자들과 상호 관계되는 것으로 알려져 있다. CO₂ 증가는 광포화점을 상승시켜 탄소동화작용이 증대되며(Bannister, 1976), 잎의 기공을 폐쇄시켜 증산작용을 감소시키므로 식물의 수분이용효율을 향상 시키는 것으로 알려져 있다(Rodgers 등, 1983). 생장량 증가뿐 아니라 생장 물질의 각 식물기관으로 배당형태, 환경 스트레스에 대한 저항성 등도 CO₂ 증가에 의해 영향 받는다(Strain, 1985). 한편, 장기간(수년~수십년)의 CO₂ 시비 효과에 대한 생리적 분석은 알려져 있지 않은데 잎의 면적 및 가지의 증가 등이 수년간 지속되어 그 효과는 더욱 커질 것으로 예측된다(Tolley, 1982; Tolley and Strain, 1984).

자연 생태계에서 장기간의 CO₂ 시비효과가 광역적으로 예견되던 중, LaMarche 등(1984)이 미국 서부 아한대의 침엽수인 브리슬콘소나무(*Pinus longaeva*와 *P. aristata*)와 림버소나무(*P. flexilis*)의 연륜폭이 20세기에 와서 뚜렷이 점진적으로 증가하였는데 이러한 현상은 기후변동 등 다른 환경 인자로는 설명할 수 없어 CO₂ 시비효과에 의한 것이라고 주장하였다. 이들은 장기간의 수목생장 추세를 분석하기 위하여 생육연도가 정확히 측정된 연륜폭의 수십~수천년간

의 변이를 이용하여 일련의 연대기를 작성, 분석하는 연륜연대학 기법을 이용하였다. 그 후 이러한 수목 생장 증가에 대한 연구가 연륜연대학기법을 이용하여 다양한 생태계에서 시도되었다.

Graybill(1987)은 LaMarche 등(1984)의 연구의 연장으로 미국 서부 고산지대 수림 한계선의 침엽수류 생장을 광역적으로 조사하여 LaMarche 등(1984)의 연구결과를 뒷받침하였으며 Hari와 Arovaara(1988)는 핀랜드 수림 한계선의 한대림에서 그 생장증가율이 15.5~43.3%에 이른다고 보고하였다. 그런데 몇 다른 연구 결과에서는 이러한 생장 증가 추세가 지역별로 차이가 있음을 나타내 주었다. 캐나다 서부와 미 북서부의 다양한 식생을 조사한 연구(Parker, 1986)에서 생장 증가는 17개 시험지 중 7개에 국한 되었으며 스위스의 론밸리(Rhon Valley)와 주라(Jura)지방, 사이프러스, 미 콜로라도 주 등 북반구의 4개 기후지역의 34개소의 천연 침엽수림 생장을 조사한 Kienast와 Luxmoore(1988)의 연구에서는 8개소의 생장이 1950년대 후 증가 추세이었다고 하였다. 미국 서북부 시에라네바다 산맥에서 생육하고 있는 침엽수류의 연륜연대기를 조사한 Glaumlich(1991)는 CO₂ 시비효과를 발견할 수 없었다고 하였다.

대체로 CO₂ 시비효과로 추정되는 생장증진이 고지대 식생에서 뚜렷하였는데 LaMarche 등(1984)은 대기압, 즉 공기 밀도가 고지대로 올라갈수록 낮아지기 때문에 CO₂ 농도도 따라서 감소되어 인위적인 CO₂ 증가에 의한 효과가 고지대에서 상대적으로 커진다고 하였으며 Gale(1986)은 CO₂ 증가 효과는 그 농도 증가에 의한 직접적 영향과 고지대에서의 고복사에너지와 관련된 간접적 영향이 복합된 것이라 하였다. 한편, 이와 같은 고지대의 수목식생은 벌채, 공해 등 인위적 피해를 적게 입어 CO₂ 시비효과에 의한 생장 증가 추세를 구별해 내기가 저지대의 수목식생에서 보다 쉬운 면도 있다. CO₂ 시비효과는 삼림의 생산력을 증진시킬 가능성이 있으며 또한 자연식생이 수중간의 CO₂ 시비효과의 차이에 의해 변화될 수 있기 때문에 이에 대한 연구는 세계 각지에서 계속되고 있다.

최근에는 국제적으로 CO₂방출을 억제하기 위한 방안이 적극적으로 모색되어 국내에서도 CO₂누적 영향에 대한 관심이 증대되고 있다. 1988년

현재 한국인 1인당 연간 CO₂ 방출량이 약 1.3톤에 이르는 것으로 추정되어 국가 당 CO₂ 방출량 크기로는 세계 20위인 것으로 알려져 있어 (Boden 등, 1990), CO₂ 시비효과에 의한 한국 삼림의 생태, 생산력 변화 가능성을 진단하고 수목에 의한 CO₂ 제거효과도 조사하는 것이 시급하다. 한편, 한국에서는 CO₂ 시비효과와 연관된 장기간의 수목성장 동향에 관한 연구는 아직 수행된 바 없는 데, 본 연구에서는 우선 CO₂ 시비효과에 민감할 것으로 기대되는 한국 亞高山 침엽수류를 대상으로 연륜연대학 기법을 이용하여 100년 이상 長期間의 연륜을 분석함으로써 다른 나라에서 발견되었던 근래의 수목성장 증가경향이 한국의 산림에서도 관찰되는지를 조사하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상

연륜연대기를 적용하기 위해서는 연륜의 경계가 뚜렷해야 하며 생육의 변화가 환경변화 특히, 기후변화에 의해 지배받으며 위연륜과 失年輪 (missing ring)이 과도하게 많지 않아 크로스데이팅 (Crossdating, 交叉年代測定)이 가능해야 한다. 특히 유령목의 경우 (50년 정도)는 수령에 따른 변동과 성장추세를 구분하기 어렵고 장기간의 연대기를 작성하기에 부적합하다.

따라서 본 연구에서는 크로스데이팅이 가능하고 수령이 대략 100년 이상이고 우세목인 시험목을 비교적 균일한 임분에서 10그루 이상 선정할 수 있는 수종을 3개 삼림 지역별(설악산, 지리산, 소백산)로 1~2개 수종씩 선정하였다 (Table 1). 지역에 따라 다르지만 해발 1200m 이상에서

자라고 있는 주목 (*Taxus cuspidata* S. et Z.), 잣나무 (*Pinus koraiensis* S. et Z.), 구상나무 (*Abies koreana* W.) 등 3수종을 대상으로 하였다. 지역별로 보면, 소백산에서는 비로봉 서사면의 주목 (BRT) 13본을, 지리산에서는 반야봉 북동 사면에서 구상나무 (BYA) 19본을, 설악산에서는 회운각대피소 동쪽 능선에서 주목 (HWT) 16본, 잣나무 (HWP) 16본을 공시목으로 하였다 (Table 1). 공시목의 수령은 Table 1에 나타내었는데 노령의 주목은 대부분 심부후때문에 髓 부분까지 코어를 채취하지 못하여서 실제 수령은 정확히 산출할 수는 없었다.

2. 크로스데이팅과 연륜측정

각각의 공시목의 지상 0.5m 정도 높이에서 가능한 髓에 접근하도록 2개의 연륜시료 (직경 0.5 cm의 성장편)를 임의의 방향에서 마주보는 쪽에서 성장추를 이용하여 채취하였다. 성장편은 채취 직후 음료수용 종이빨대에 삽입하여 약 일주일간 기건한 후 U형 홈이 파여진 나무막대에 접착제를 이용하여 정착시켰다. 2~3일간 접착제를 경화시킨 후 사포로 연마된 표면을 입체현미경으로 관찰, 각 연륜의 광형을 비교하여 인접한 연륜들 보다 좁은 경우에만 막대를 그려 임목간에 비교하는 골격법이라 불리는 방법으로 크로스데이팅하였다 (Stokes and Smiley, 1969). 연륜 폭은 입체현미경 (Union UKZ-5; 약 45배)에 부착된 접안 마이크로메타로 약 0.05mm 까지 측정하였다.

3. 標準化 (standardization)

각 코어의 연륜폭계열 (연륜폭선)은 수령에 따른 수목 고유의 생물학적 생육추세 (Biological

Table 1. Site and sample information.

Series ID	Mountain	Site Name	Species Name	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Analyzed Trees	Cores	Span range* ¹ (Median)
BRT	Sobaek	Birobong	<i>Taxus cuspidata</i>	36° 52' 30" ~37° 5'	128° 22' 30" ~128° 35'	1360~1380	13	17	79~225 (119)
BYA	Chiri	Banyabong	<i>Abies koreana</i>	35° 19' 03" ~35° 19' 20"	128° 22' 30" ~127° 34' 46"	1730~1750	19	39	46~209 (127)
HWT	Seolak	Hiunkak-Valley	<i>Taxus cuspidata</i>	38° 08' 05" ~38° 08' 11"	128° 28' 08" ~128° 28' 16"	1200~1220	16	32	128~412 (288)
HWP	"	"	<i>Pinus koraiensis</i>	"	"	"	16	31	149~356 (253)
Total							64	119	

*¹ Range of the spans(year) of individual cores.

trend)를 제거하기 위하여 표준화하였다. 수목이 유령기에는 생육이 빨라 연륜폭이 넓고 연도별 변이의 폭이 크며 유령기가 지나면 상대적으로 균일해진다. 또, 수간의 모양이 원형이기 때문에髓에서 멀어질수록, 즉 노령기로 갈수록, 같은 용적의 목질이 형성되더라도 연륜폭은 작아지게 된다. 따라서 만일 연륜 측정치를 그냥 서로 합하여 연도별로 평균을 낼 경우 각 연륜계열의 유령기 기간 동안의 연륜폭들에 의해 평균치들이 크게 좌우되기 때문에 시대별로 균일한 연대기를 얻을 수 없다.

표준화는 생물학적 성장 추세를 추정하는 생육 곡선을 구하여 예측되는 연륜측정치와 실제 연륜 측정치의 비례로써 指標(index)를 계산하여 각 연륜 계열별로 指標年代記(index chronology)를 얻는 것을 말한다(아래 식 참조). 본 연구에서는 장기간의 성장동향을 보존하기 위하여 指數 또는 直線方程式으로 표준화하였다. Fig 1에 지수곡선에 의한 표준화 결과를 컴퓨터출력으로 나타내었다.

$$I_t = \frac{W_t}{Y_t}$$

Y_t : 예측되는 연도별 연륜측정치

W_t : 관측된 연도별 연륜측정치

I_t : 연도별 지표치

4. 연대기의 통계적 성질

표준화된 각 연륜시리즈의 산술평균을 구하여 최종연대기를 산출하였다. 기초통계치로 평균값, 표준편차, 왜도(Skewness), 첨도(Kurtosis) 등을 조사하였다. 연대기의 변동성(fluctuation)을 조사하기 위하여 평균민감도, 自己 상관관계계수 등을 조사하여 다른 국가에서 구한 연륜연대기의 통계치와 비교하고자 하였다.

平均敏感度(mean sensitivity)란 연대계열에서 연속된 두 연륜간의 변이의 크기, 즉 고주파 변동(high-frequency fluctuation)을 측정하기 위해 연륜연대학의 창시자인 A.E. Douglass에 의해 고안된 통계인자로 아래의 식으로 표시된다(Fritts, 1976).

$$M S_x = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \left| \frac{2(X_{t+1} - X_t)}{X_{t+1} + X_t} \right|$$

X_t : (t)년의 연륜폭

X_{t+1} : (t+1)년의 연륜폭

自己相關(autocorrelation)은 한 시계열 즉, 한 연륜연대기內的 지속성(persistence)을 측정하는 통계인자로 이는 연륜내의 저주파(low-frequency)의 크기를 나타내는 것으로 본 연구에서

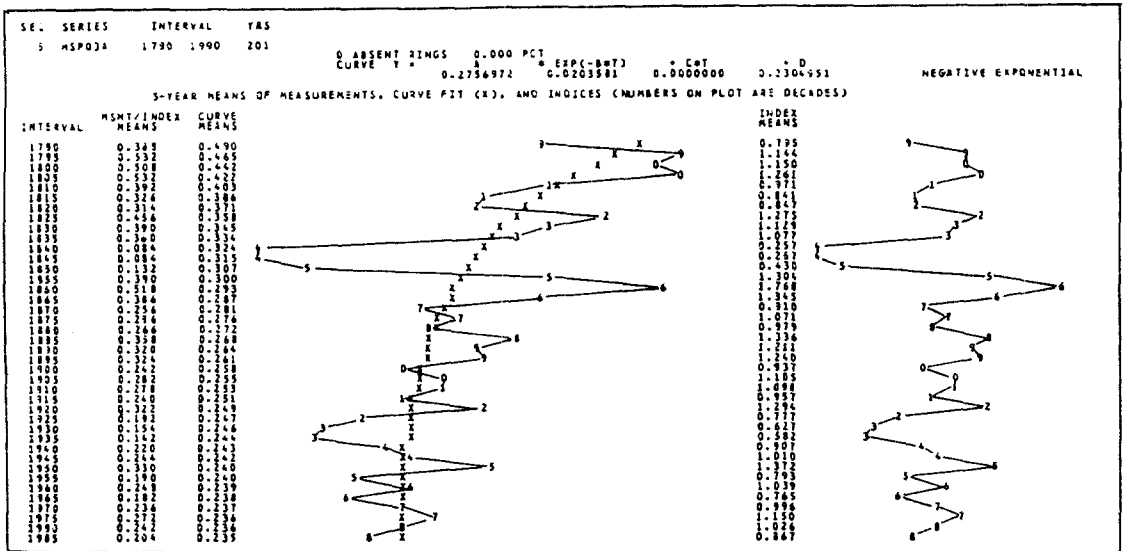


Fig. 1. The result of standardization by negative exponential curve fitting for a series of Korean pines from Seolak Mountain. The left overlaid curves represent five-year averages of ring-width series ('number's) and standardization curve('X's). The right curve represents the standardized series, that is, index series.

는 1차 자기상관계수 (lag=1)만을 구하였다.

5. 상호상관분석

인접한 장소에서 생육하는 임목 성장간에도 유전적 및 局所立地的 차이에 기인하여 개체간 연륜시리즈가 어느 정도 차이가 있으며 동일 임목 내에서도 채취방향에 따라서도 차이가 있다. 이러한 개체간, 개체내 변이의 크기는 연륜연구에서는 보통 분산분석 또는 상호상관분석(cross-correlation)에 의해 분석할 수 있다(Fritts, 1976; Wigley, 1984). 본 연구에서는 동일 임목 내 성장편간 상관계수 (r_{wi} ; within-tree correlation) 그리고 임목간 연륜지표시리즈의 상호상관 분석계수 (r_{bi} ; between tree-correlation)를 단순 상관계수를 이용하여 구하였다. 상관분석기간은 각 연대기별로 결측구간(주로 연대기의 초기연도가 좌우함)을 고려하여 최대의 공통기간을 설정하였다.

작성된 지표연대기의 기간별 유효성을 나타내 주는 시그널강도(signal/noise ratio; SNR)는 임목간 상호상관계수 (r_{bi})를 이용하여 아래의 식으로 구하였다.

$$SNR = N r_{bi} / (1 - r_{bi})$$

각 연륜폭 시리즈의 표준화, 평균 연대기 산출 및 그 통계적 특성들은 충북대 전산실 VAX-11과 교원대 VAX-8250을 이용하여 연륜해석을 위해 개발된 Tree-Ring Library Program (Holmes, 1990)으로 분석하였다.

6. 성장동향 분석

최근 수십년동안의 수목의 생장이 증진되었는지 여부는 1차적으로 최종 연대기들을 그래프로 만든 뒤 최근에 연륜폭선이 상승하는 경향이 있

는지 조사하였다. 또한 수치적 비교를 위하여 각 지표 연대기의 1900 ~ 1949 (低 CO₂ 기간), 1950 ~ 1990 (高 CO₂ 기간)의 평균이 유의하게 차이가 있는지를 두표본 t-검정을 이용하여 조사하였다. 1950년 전후를 기준으로 기간을 구분한 것은 대기중 CO₂농도가 개략적으로 1950년을 경계로 급증하였다는 자료(Boden 등, 1990)에 근거를 둔 것으로, 국외의 연구(Kienast and Luxmoore, 1988; Glaumlich, 1991)에서도 이 기준으로 CO₂서비효과를 분석한 바 있다.

결과 및 고찰

1. 연륜폭연대기의 통계적 성질

각 연륜폭 측정치의 통계적 성질들은 Table 2에 나타내었다. 시리즈 평균은 0.66~0.88mm, 표준편차는 0.24~0.47mm로 수종별로 또 생육지별로 큰 차이가 없었음을 알 수 있었다. 그러나 동일 임목에서의 수로부터 수피 쪽으로의 經年(year-to-year)변화 즉 수령에 따른 임목의 비대생장은 그 절대치에 있어서 크게 차이가 있어 연륜연대학에서 채택하는 표준화 과정을 거쳐서 야만 산지별 또는 수종별로 그 생육추세를 비교할 수 있음을 확인하였다(Fig. 1).

왜도와 첨도는 각각 0.717~1.576, 0.734~3.620로 각 연륜시리즈의 관측치들이 대부분 정규분포를 하지 않음을 알 수 있었다. 평균민감도는 0.184~0.293으로 인접한 두 연륜들간의 변화가 컸음을 알 수 있었는데 이는 공시 수종들이 어떤 형태로든 생육환경변화에 민감하게 반응하였음을 일차적으로 알 수 있었다. 자기상관계수는 0.727~0.773으로 일정하게 높게 나타나 아고산 수종들이 일반적으로 높은 자기상관 특성을 갖는다는

Table 2. Summary statistics of the raw series.

Series ID*1	Mean (mm)	Standard Deviation	Mean Sensitivity	Skewness	Kurtosis	1st Aauto-correlation
BRT	0.88 ±0.30*2	0.36 ±0.12	0.231 ±0.045	0.776 ±0.716	1.184 ±2.018	0.727 ±0.108
BYA	0.78 ±0.34	0.47 ±0.19	0.293 ±0.055	1.576 ±0.939	3.620 ±4.386	0.744 ±0.093
HWT	0.66 ±0.24	0.24 ±0.08	0.184 ±0.026	0.717 ±0.423	0.734 ±1.060	0.765 ±0.087
HWP	0.86 ±0.35	0.45 ±0.21	0.234 ±0.027	1.282 ±0.667	2.739 ±2.602	0.773 ±0.090

*1 See Table 1 for the series ID abbreviations.

*2 Standard deviation

보고(LaMarche 등, 1982)의 결과와 일치하였다. 이는 한 해에 생성된 양분이나 생장호르몬이 다음 해로도 전이되기 때문에 한 해의 환경영향이 다음 해의 생육에 까지 상당히 지속됨을 알 수 있었다(Fritts, 1976).

2. 지표연대기의 통계적 성질

작성된 지표연대기들은 Fig. 2에 도시하였고 각 지표연대기의 통계적 특성은 Table 3에 나타내었다. 작성된 연대기의 기간은 209년~412년으로 설악산 주목(HWT), 설악산 잣나무(HWP)의 경우는 A.D. 1700년 이전 까지 연대기를 연장할 수 있었다.

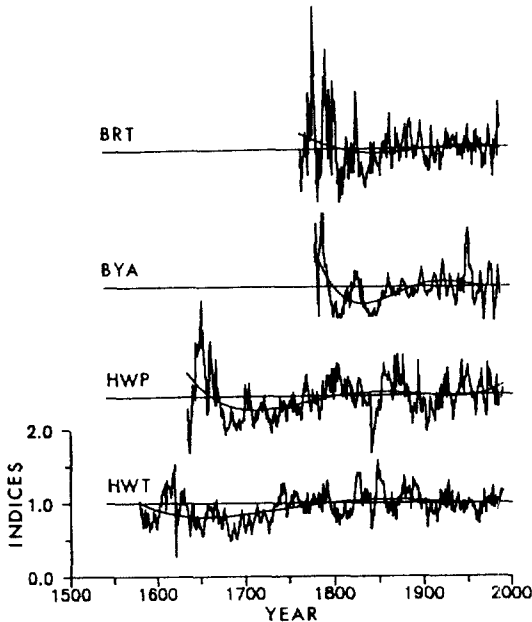


Fig. 2. Final standardized chronologies. Smoothed curves(splines) are given to show long-term trends. The abbreviations are described in Table 1.

표준편차, 평균민감도, 왜도, 첨도는 각각 0.197~0.336, 0.110~0.212, 0.087~1.610, 0.140~5.849로 표준화 이전보다 대체로 감소하는 경향이었는데, 이는 표준화과정을 통하여 연륜시리즈내의 생물학적 변이(수령에 따른 생육추세)를 줄여주었음을 나타내 준다. 그런데 자기상관계수는 표준화 이후에도 0.580~0.795로 감소되지 않았고 BYA와 HWP의 경우는 오히려 증가되었음을 알 수 있는데, 이는 본 연구에서 택한 표준화 곡선인 지수 곡선과 1차직선이 생장변동에 해당하는 저주파의 변동을 보존시켜주고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 작성된 지표연대기의上記 통계치들은 美 서부지방의 89개소 연륜연대기를 조사한 Fritts(1989)의 연구에서 얻은 평균민감도 0.35 ± 0.22 (95%신뢰구간), 표준편차 0.37 ± 0.18 , 그리고 자기상관계수 0.42 ± 0.21 과 비교한다면 이들의 95% 한계내에는 모두 포함 되었다. 미서부 지역이 연륜연대기들의 응용면에서 세계 각 지역 중 성공적인 지역 중 하나인 점을 감안 한다면 직접적인 수치의 비교는 어렵지만 본 연구에서 작성된 지표연대기의 기본 통계치들은 1차적으로 어느 정도 저주파, 고주파 변동을 소유하고 있는 것으로 나타났다.

3. 상호상관분석

각 지표연대기의 상관분석 결과를 Table 4에 나타냈다. 임목간 상관계수인 r_{bi} 는 지리산의 구상나무(BYA)의 것이 0.1 미만으로 매우 낮았으며, 그 밖의 것들도 0.143~0.233으로 비교적 낮았다. 이는 우선 임목간의 생장변이가 큼을 나타내 주는데 개개의 연륜코어 시리즈 곡선을 검토한 바, 본 연구 표본지역에서의 비대생장이 수분이나 온도의 스트레스를 비교적 적게 받고 있는

Table 3. Summary statistics of the standardized chronologies.

Series ID*1	St. Yr. *2	Span (Yr)	Mean Sens. *3	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis	1st Auto-correlation
BRT	1766	225	0.212	0.336	1.610	5.849	0.580
BYA	1782	209	0.110	0.258	1.184	2.608	0.795
HWT	1579	412	0.154	0.197	0.087	0.140	0.707
HWP	1635	356	0.144	0.278	0.726	1.733	0.786

*1 See Table 1 for the series ID abbreviations.

*2 Starting year of the chronology.

*3 Mean sensitivity

Table 4. Summary statistics of correlation analysis for detrended series.

Series ID* ¹	Common period [year]	Numbers of analyzed		Correlation coefficients			SNR* ²
		Trees	Cores	Among all cores	Between trees SNR* ²	Within trees	
BRT	1908-1981 [74]	13	17	0.184	0.143	0.922	2.2
BYA	1881-1990 [100]	15	24	0.114	0.088	0.718	1.5
HWT	1768-1990 [223]	14	21	0.198	0.174	0.726	2.9
HWP	1822-1990 [169]	15	29	0.257	0.233	0.738	4.5

*¹ See Table 1 for the series ID abbreviations.

*² Signal-to-noise ratio

것으로 추정되고 또한 상호경쟁에 의한 교란이 큰 것으로 생각된다. 임목간 상관계수가 낮은 것은 임목간의 생장 변이가 큼에도 원인이 있지만 본 연구에서 이용한 표준화방법에도 일부 기인한다. 즉 본 연구의 연구지역이 임관밀도가 비교적 높고 중습성(mesic)인 것을 고려하면 좀 더 유연한 표준곡선을 사용하여 지표시리즈간의 변이를 줄여 주어야 하나 연구대상인 생장경향을 보전하기 위하여 지수곡선이나 1차직선을 사용하였다는 점이다. 동일 임목내 연륜 시리즈간 상관계수인 r_{wi} 는 0.718~0.922로 r_{bi} 보다 3~8배 이상 큼을 알 수 있는데, 이는 수간의 방위에 따른 연륜변이가 적음을 알 수 있었다.

시그널 강도, 즉 r_{bi} 로 부터 계산된 SNR은 1.5~4.5로 미 서부지방의 연륜연대기의 경우는 보통 10이상인 것을 고려하면 본 연구에서 채택한 표준화곡선의 영향을 감안하더라도 낮은 수치이다. 이는 역시 임목간의 생육 변이가 큼을 알 수 있었다. 이러한 경향은 크로스데이팅 과정에서도 발견할 수 있었는데 결국 BRT와 HWT 경우 각각 4코어 시리즈는 육안에 의한 크로스데이팅을 상관관계로 재확인하는 프로그램인 Cofecha의 분석 결과, 마스타 연대기(master chronology)와의 상관성이 매우 낮아 최종 연대기 작성에서 포함시키지 않았다. 향후의 타 연구에서, 특히 기후복원 연구에서와 같이 높은 SNR이 필수적인 요건이라면 본 연구에서 채취한 공시목의 숫자보다 더 많은 공시목을 이용하여야 함을 알 수 있었다.

4. 생장동향분석

Fig. 2에 나타 낸 바와 같이, 모든 연대기에서 1900년경 이후 최근의 생장이 증가하는 뚜렷한 경향이 그래프상에서 관찰되지 않았다. 1950년 전후의 지수평균을 수치적으로 비교한 t검정의 결과는 Table 5에 나타내었다. BRT, BYA, HWT의 경우는 유의하지 않았으며 HWP의 경우는 5% 유의수준에서 1950~1990년 기간의 지수가 1900~1949년 기간보다 증가된 것이 인정되었다. 그런데 그 증가폭이 8%로 다른국가에서 발견된 생장증가율보다 훨씬 적으며 이산화탄소 농도 증가율에도 못미친다(LaMarche 등, 1984; Hari와 Arovaara, 1988). 따라서 본연구에서 조사한 한국의 아고산 침엽수류의 경우 최근 수십년 동안 이산화탄소의 시비효과로 추정될 수 있는 생장 증가는 관찰되지 않았다고 결론 지을 수 있는 데 이를 몇 가지 이유로 해석할 수 있었다.

우선 최근에 밝혀지고 있는 CO₂ 시비효과와 생리적 기작을 보면, 종래 생각하였던 CO₂ 농도의 증가에 의한 광합성량의 증가보다는 식물이 수분 스트레스를 받을 때 고농도의 CO₂가 잎의 기공을 구성하는 공변세포의 폐쇄를 촉진

Table 5. Results of two-tailed t-test.

Series	BRT	BYA	HWP	HWT
t-test	ns	ns	*	ns
			(-0.08)	

See Table 1 for the series ID abbreviations.

ns : not significant

* : Significant at 5% level

() : Differences in mean indices of post-1950 from those of pre-1950 period.

시키기 때문에 수분이용효율이 증진된다는 것이다(Rodgers 등, 1983; Tolly와 Strain, 1984). 세계적으로도 현재 성장증진 경향이 뚜렷이 관찰되는 지역이 수분스트레스의 정도가 극심한 건조한 고산지대에 집중되고 있는 것으로 조사되고 있다. 그런데 본 연구의 조사지역인 한국의 아고산 지대는 중습(mesic)한 특성을 갖고 있기 때문에 이러한 CO₂증가에 따른 수분이용효율의 증진효과가 크지 않았으며, 따라서 성장증진 경향이 뚜렷이 관찰되지 않았다고 생각할 수 있다. 또한, 다른 가능성은 본 연구 조사지역들의 수목들이 우세목임에도 불구하고 비교적 밀생을 하기때문에 임목간의 경쟁에 의한 성장변이가 시비효과를 상쇄시킬 수 있음을 생각할 수 있다. 상관 분석에서 나타난 매우 낮은 연대기의 시그널강도는 이러한 임목간의 변이를 단적으로 보여주고 있다. 지리산의 구상나무 그리고 소백산 주목에 관한 연구(강, 1984a, 1984b)에서 한국 아고산 침엽수림의 재생은 주로 gap형상에 따른 후속수의 침입에 의한 것으로 조사된 바 있어 임목간의 경쟁이 이들 삼림에서 큼을 알 수 있었다.

한편, 토양이나 기후조건, 산성우의 영향 등 많은 요인들이 CO₂시비효과와 상호 작용할 수 있기 때문에 이들에 대한 기초 연구는 앞으로의 과제이다. 특히 지구온난화에 의한 기온상승의 영향과 대기중 이산화탄소 농도 상승에 따른 성장증진 효과가 상호 작용할 수 있는데 이에 대한 연구가 시급하다.

사 사

연륜분석 프로그램을 기증하여 준 에리조나大 연륜연구소의 Richard Homes씨, 소백산 주목 코어를 분양해 주신 충북대 과학교육과 강상준 교수님, VAX 컴퓨터사용에 협조하여 주신 충북대 공대와 교원대 전산실 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 시료채취부터 연륜 측정까지 까지 열심히 도와준 서울대 지리학과 최종남, 충북대 임산가공학과 이호영, 김정실, 신경수, 전재범, 남윤용, 이상호씨에게 고마움을 전합니다.

인 용 문 헌

1. 강상준. 1984a. 지리산 아고산대 침엽수의 갱신. 한국생태학회지 7(4) : 185-193.
2. 강상준. 1984b. 소백산 주목군락의 구조와 동태. 자연보존 48 : 31-48.
3. Bannister, P. 1976. Introduction to Physiological Plant Ecology. Halsted Press, Jone Wiley and Sons, New York.
4. Boden, T.A., P.Kanciruk and M.P. Farrell. 1990. Trends '90-A compendium of data on global change. Cabon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, U.S.A.
5. Carson, R.W. and E.A. Bazzaz. 1982. Photosynthetic and growth response to fumigation with SO₂ at elevated CO₂ for C3 and C4 plants. Oecologia 59 : 50-54.
6. Cleveland, W.S., A.E. Freeny and T.E. Graedel. 1983. The seasonal component of atmospheric CO₂: Information from new approaches to the decomposition of seasonal time series. J. Geophy. Res. 88 : C15 : 10934-10946.
7. Fritts, H.C. 1976. Tree Ring and Climate. Academic Press, New York.
8. Fritts, H.C. 1989. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data : a diagnostic analysis. University of Arizona Press, Tucson, AZ, U.S.A.
9. Funsch, R.W., R.H. Mattsoa and G.R. Mowry. 1970. CO₂-supplemented atmosphere increases growth of *Pinus strobus* seedlings. For. Sci. 16 : 459-460.
10. Gale, J. 1986. Carbon dioxide enhancement of tree growth at high elevations. Science 231 : 859-860.
11. Glaumlich, L.J. 1991. Subalpine tree growth, climate, and increasing CO₂ : An assessment of recent growth trends. Ecology 72(1) : 1-11.
12. Graybill, D.A. 1987. A network of high elevation conifers in the western U.S. for detection of tree-ring growth response to increasing atmospheric carbon dioxide. Pages 463-474. in Proceedings of the International Symposium on

- Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis. G.C. Jacoby, J.W. Hornbeck, eds. August 17-21, 1986. Mary mount College, Tarrytown, New York.
13. Green, K. and R. Wright. 1977. Field response of photosynthesis to CO₂ enhancement in ponderosa pine. *Ecology*. 58 : 687-692.
 14. Hari, P. and H. Arovaara. 1988. Detecting CO₂ induced enhancement in the radial increment of trees. Evidence from northern timber line. *Scand. J. For. Res.* 3 : 67-74.
 15. Holmes, R.L., R.K. Adams and H.C. Fritts. 1986. Tree-ring chronologies of western America : California, eastern Oregon and northern great basin. NSF Grants Report, TRL, Tucson, Arizona.
 16. Keeling, C.D., R.B. Bacastow, and T.P. Whorf. 1982. Page 377 in *Carbon Dioxide Review*, ed. W.C. Clark. Oxford Univ. Press, New York.
 17. Kienast, F. and R.J. Luxmoore. 1988. Tree-ring analysis and conifer growth responses to increased atmospheric CO₂ levels. *Oecologia* 76 : 487-495.
 18. Komhyr, W.D., R.H. Gammon, T.B. Harris, L.S. Waterman, T.J. Conway, W.R. Taylor and K.W. Thoning. 1985. Global atmospheric CO₂ distribution and variations from 1968-1982 NOAA/GMCC CO₂ flash sample data. *J. Geophys. Res.* 90 : D3 : 5567-5596.
 19. Krizek, D.T., R.H. Zimmermann, H.H. Kueter and W.A. Bailey. 1969. Accelerated growth of birch and crabapple seedlings under CO₂ enriched atmospheres. Abstract. *Plant Physiol. Suppl.* 44 : 15.
 20. LaMarche, V.C. Jr., D.A. Graybill, H.C. Fritts and M.R. Rose. 1984. Increasing atmospheric carbon dioxide : Tree ring evidence for growth enhancement in natural vegetation. *Science* 225 : 1019-1021.
 21. Parker, M.L. 1986. Recent abnormal increase in tree-ring widths : A possible effect of elevated atmospheric carbon dioxide. Pages 511-521. in *Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis*. G.C. Jacoby, J.W. Hornbeck, eds. August 17-21, 1986. Mary Mount College, Tarrytown, New York.
 22. Rodgers, H.H., J.F. Thomas and G.E. Bingham. 1983. Response of agronomic and forest species to elevated atmospheric carbon dioxide. *Science* 220 : 428-429.
 23. Stokes, M.A. and T.L. Smiley. 1968. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Univ. of Chicago Press, Chicago. 73pp.
 24. Strain, B.R. 1985. Physiological and ecological controls on carbon sequestering in terrestrial ecosystem. *Biogeochem.* 1 : 219-232.
 25. Telewski, F.W. and B.R. Strain. 1986. Densitometric and ring width analysis of three year old *Pinus taeda* L. and *Liquidambar styraciflua* L. grown under three levels of CO₂ and two water regimes. Pages 494-500 in *Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis*. G.C. Jacoby, J.W. Hornbeck, eds. August 17-21, 1986. Mary mount College, Tarrytown, New York.
 26. Tinus, R.W. 1972. CO₂ enriched atmosphere speeds growth of ponderosa pine and blue spruce seedlings. *Tree Planters' Notes* 23 : 12-15.
 27. Tolley, L.C. 1982. The effect of atmospheric carbon dioxide enrichment, irradiance and water stress on seedling growth and physiology of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda*. Ph. D. Dissertation, Duke University, NC.
 28. Tolley, L.C. and B.R. Strain. 1984. Effects of CO₂ enrichment on growth of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda* seedlings under different irradiance levels. *Can. J. For. Res.* 14 : 343-350.
 29. Wigley, T.M.L., K.R. Briffa and P.D. Jones. 1984. On the average value of correlated time series with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Climate and Appl. Meteorology* 23 : 201-213.