

수문 요인에 대한 중부 지역 소나무의 성장 반응¹⁾

김 재 수²⁾

²⁾충북대학교 산림과학부

Growth Response of *Pinus densiflora* to Hydrologic Conditions in the Central Korea¹⁾

Kim, Je-Su²⁾

²⁾School of Forest Resources, Chungbuk National University

ABSTRACT

Main concern is to figure out the growth response of *Pinus densiflora* to hydrologic conditions in the central Korea. Continuous measurements were carried out with six trees with dendrometers in the Chungbuk National University experimental forest (Wolak-san) during 1995~1996. Surrounding hydrological conditions reflected by the solar radiation, air temperature, precipitation, soil water were included in measurements. Their effects on the biological response of trees was investigated and expressed as response functions. With these response functions, tree growth model was developed.

Soil water availability was more related to the tree growth than air temperature. Limited number of biological measurements with dendrometer could permit determination of dynamics of radial tree growth to the hydrological conditions. Tree growth model could be used to check and revise the statistical transfer function of dendrohydrology.

Key words : *tree growth response, hydrologic condition, dendrohydrology, dendrometer*

I. 서 론

임목의 성장의 기록인 연륜을 이용하여 과거의 장기간에 대한 수문 현상들을 복원하고 있다. 수문현상으로는 강수량, 기온, 토양수분, 증발산량 등이 포함된다. 이러한 연륜의 이용은 수문학적 인자들과 임목 성장 반응에 대한 관련성에 기초를 두고 있다.

임목의 성장은 수문적 요인에 국한되지 않고 생태적 요인에 의하여도 영향을 받는다. 생태적 요인으로서 토양비옥도, 임목간의 경쟁, 임목 발달 단계, 곤충의 피해, 산불, 환경 오염 등이 포함되며, 이들 요인에 대하여도 임목의 성장이 극심하게 변화할 수 있으므로 이들 생태적 요인의 영향을 제거한 후에야 수문 현상의 복원이 가능하게 된다. 임목의 성장 반응에 대한

1) 본 연구는 한국과학재단 핵심과제(951-0608-009-2)의 지원으로 이루어졌음

생태 요인의 배제가 복잡하지만 연구 결과가 집적됨에 따라 수문학적 요인만을 추출하는 것이 가능하게 되었다(Loaiciga et al, 1993). 수문학적 변화 요인들이 임목의 성장에 영향을 주고, 그 흔적으로 남은 연륜을 계측하므로써 과거의 기록이 복원 가능하게 되었다.

그러나 이러한 분석 기법들은 장기간에 걸친 연륜 자료의 이용하여 외국에서 발전한 방법이다. 한국의 수문 현상이 외국과 다른 상황에서 점정없이 이들 분석 방법을 그대로 적용하는 것은 검토할 필요가 있다.

따라서, 중부지방에서 소나무를 이용한 생태 복원의 기초 연구로서 수문학적 인자가 중부 소나무의 성장에 어떻게 나타나는가를 조사하고 그에 따른 임목 성장모델을 작성하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 시험지 개황

조사는 충북대학교 연습림의 산록부문에 설정하였다. 전체 사면 경사가 28°이며 상부 주계곡의 경사도는 35°인 급한 경사지대이다. 암반이 노출된 지역이 많으나, 사면 하부에는 붕적된 토양이 쌓인 완경사를 이루고 있다. 사면 하부에는 수고 7~8m의 소나무가 밀생하고 있지만 전반적인 임상은 참나무와 혼효되어 있다. 하층식생은 진달래 등의 관목으로 울밀하다.

2. 강우량 조사

월악산 연습림 사무소의 옥상에 전도형 강우계를 설치하고 0.5mm 단위로 계측하였다. 조사된 강우 자료는 시간 단위의 강우량으로 정리하여 이용하였다.

3. 토양수분량조사

임내와 임내에 각각 2개소(토심 20cm, 50cm)의 토양 수분 변화 사항을 텐시오미터를 이용하여 측정하였다. 일단위로 측정된 토양 수분 장력을 이용하여 임내 임외의 토양 수분을 계산하였다. 시간 단위의 강우량을 이용하여 토양의 수분 변화를 모의 발생하였다(김재수, 1991;

김재수, 1993).

4. 기온조사

월악산 연습림내의 백엽상 내에 자동 기록 온도계를 설치하여 시간단위의 기온을 조사하였다. 시간단위의 자료를 이용하여 일별 기온을 정리하였다.

5. 임목 성장량 조사

1995년도에 산록 사면하부에 자생하는 소나무 20년생 4본을 선정하여 관측을 시작하였다. 특수 제작된 임목의 원주를 측정하는 덴드로미터를 이용하여 주 2회 0.01mm 단위까지 측정하였다. 1995년 연말에 1본(임목번호 : w2)을 벌채하여 임목조직을 관찰하기 위한 시료로써 사용하였다. 1996년도에 2본을 추가 선정하여 임목의 흉고 직경 성장 상황을 연속적으로 계측하다가, 1996년 7월에 임목 1본(임목번호 : w6)을 공식시료로 벌채하였다. 기상자료와 임목 성장량 조사를 그림 1에 일괄하여 나타내었다. 임목의 성장 반응을 분석할 때는 평균치를 이용하였다.

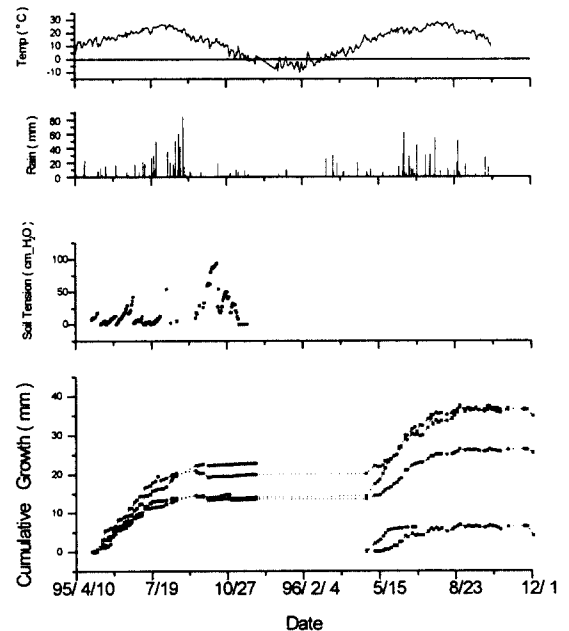


그림 1. 임목생장과 온도, 강수량, 토양수분 장력

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 임목의 성장반응

1.1. 태양에너지와 임목의 성장

임목의 성장은 성장환경과 수종 및 개개목의 특성에 따라 달라지겠지만 광합성의 원천인 태양에너지에 직접적으로 관련된다. 그림 2는 태양에너지와 임목의 성장관계를 보여주고 있다. 태양에너지는 1995년 6월 22일 45.5MJ/m²로 가장 높은 값을 나타내었으며, 임목이 성장하려면 30.0MJ/m² 이상이 되어야 함을 보여주고 있다. 어느 일정 에너지 이상이 되었을 때 생육을 시작하고 있음을 보여 주고 있으며, 온도가 상승함에 따라, 임목 개체의 성장도 증가하는 경향이 있지만 어느 적정 온도 이상에서는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 광합성 총량은 증가하지만, 임목의 소비량도 같이 증가하기 때문에 순광합성량의 감소에 기인한다고 생각된다.

임목의 성장량은 일 평균 기온 12℃ 이상이면 최대 성장을 할 수 있다고 생각된다. 그 27℃가 되는 8월 14일 이후는 오히려 생장이 둔화

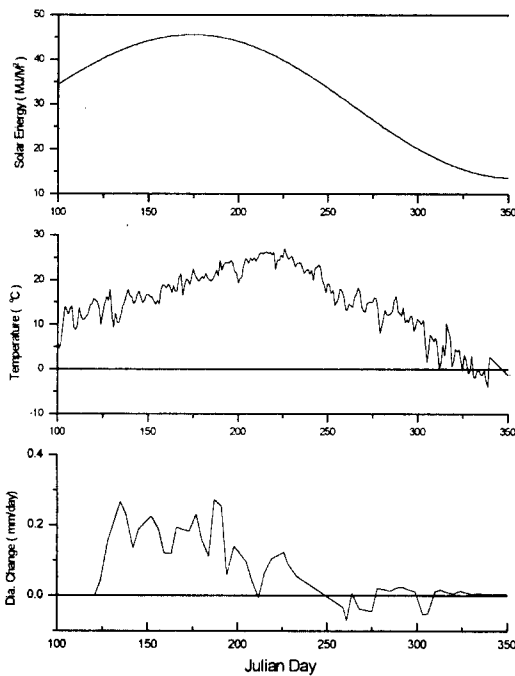


그림 2. 임목생장과 태양에너지 및 온도

되고 있는 것으로 생각된다. 9월 이후의 성장량 감소는 태양에너지의 감소에 기인하는 것으로 생각된다. Vaganov 등(1994)은 성장 개시온도가 4℃, 최적온도가 26~35℃로 높게 잡고 있으나 일교차가 심한 우리나라에서는 보다 낮은 온도로 설정하는 것이 합리적이라고 생각된다.

1.2. 토양수분과 임목의 성장.

토양 수분은 강수에 의하여 증가하며, 증발산과 유출에 의하여 감소한다. 월악산에서 성장을 시작하는 초기의 토양 수분은 포장 용수량에 가까운 값을 가지고 있다. 그림 2에서 강수에 따른 토양수분장력과 토양수분량, 임목의 흉고 원주 변화량을 나타내었다. 기온이 올라가면서 임목의 생장이 가속화되고 4월 말경부터 8월말까지 주요한 생장이 이루어지고 있다. 강수에 의한 수분 공급이 없으면 토양내 수분이 줄어들고 임목의 생장이 둔화되고 있음을 보여주고 있다. 임목 생장이 활발한 시기에는 일주일에 50mm 이상의 강수에 의하여야만 산림토양은 포장용

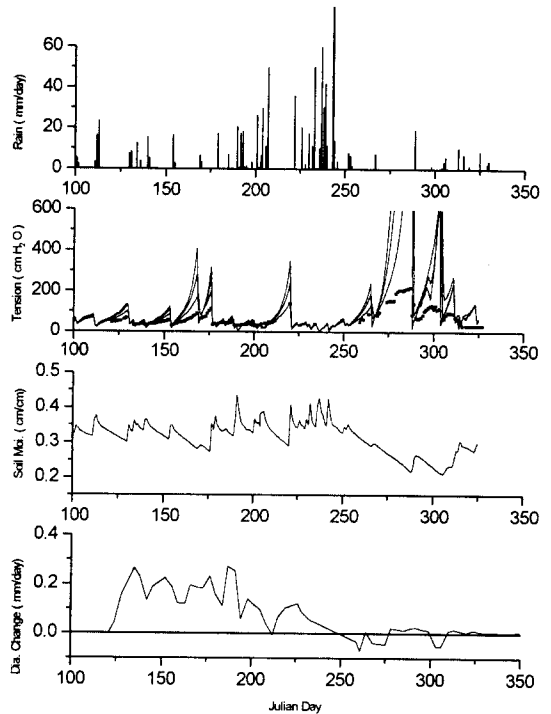


그림 3. 임목생장과 토양수분

수량을 유지하게 되므로(Spurr, 1980), 그 이하의 강우에는 쉽게 토양수분 스트레스를 받는 것을 생각할 수 있다. 그림 3에서 토양 수분의 증감에 따라 임목 성장 반응이 시간 간격을 두고 나타나고 있음을 보여주고 있다.

1995년 4월 21일~4월 23일의 43.5mm의 강우에 대하여 임목의 원주 변화량은 5월 15일에는 0.27mm/day로 가장 크게 반응하였다. 이어지는 16일간의 비가 오지 않을 때는 임목의 변화량이 점차 감소하여 5월 22일에는 0.13mm/day로 하강극치를 이루었다. 이와 같은 상황을 표 1에 나타내었다. 변화량이 크게 증가할 때는 토양수분이 충분한 조건아래서 충분한 광합성을 하며, 임목 형성층 세포내의 팽압이 상승함에 따른 결과라고 생각된다. 그러나, 7월 9일부터 많은 강우가 내려 토양 수분 조건이 양호함에도 불구하고, 7월 17일 0.13mm/day로 변화량의 상승량이 낮은 이유는 너무 잦은 비에 의하여 충분한 태양에너지를 흡수하지 못하여 광합성량이 낮은 때문으로 생각된다. 이와 같은 이유로 7월 31일에는 하강극치를 이루었으며, 8월 초순의 무강우시에는 임목의 생장이 완만하게 상승하였다. 9월 초순부터의 무강우에 의하여 생장은 없고 9월 16일에 하강극치를 이루었다. 월악산의 소나무 생장은 8월말까지 지속되며 9월 이후에는 토양수분 건조가 지속이 되면 세포내 팽압감소에 의한 수간의 수축이 일어난다고 말할 수 있다. 그러나 9월말까지는 미미하지만 생장을 계속하여 추재를 형성한다고 생각된다.

표 1. 1995년도 임목 원주변화량의 주요 극치
(단위 : mm/day)

일자	상승극치	일자	하강극치
5. 15	0.27	5. 22	0.13
6. 1	0.22	6. 8	0.12
6. 26	0.23	7. 3	0.11
7. 6	0.26	7. 13	0.06
7. 17	0.13	7. 31	-0.01
8. 14	0.12	9. 16	-0.03

수간의 수축은 9월 하순경부터 보이고 있다. 형성층은 대부분의 성장기간 동안 수분스트레스를 받게된다. 형성층은 임목내의 수분 부족에 아주 민감하며, 수분 부족 시에는 생장이 저해된다. 분화된 가도관의 수, 형성층이 자라는 기간, 물관과 체관의 성장 비율, 춘재와 추재의 비율 등은 임목내 수분 부족에 반응하여 나타난다. 이렇듯 수분부족은 형성층의 성장에 직간접적으로 영향을 미친다. 수분부족으로 인한 광합성량의 감소로 인하여 간접적으로 형성층의 생장이 낮아질 수 있다. 임목내의 수분 부족은 형성층의 활력에 영향을 주는데, 세포가 성장하기 위해서는 높은 팽압이 필요하기 때문이다. 이른 봄 형성층의 성장 초기에는 수분스트레스가 그다지 심하지 않기 때문에 임목 내부의 수분 부족은 그다지 영향을 미치지 않는다. 그러나, 형성층이 일단 성장하기 시작하면, 토양내의 수분 부족은 임목의 형성층 형성에 크게 영향을 주는 것으로 생각된다. 형성층 부위에서만 일간, 계절간 수축 양상에 대하여 많은 논문이 발표되었다(Kozlowski, 1979). 계속된 가뭄 시에는 형성층이 수분스트레스를 계속적으로 받으므로 생장의 둔화와 수축양상을 보여준 것으로 생각된다. 중부지방 소나무의 생장은 기온보다는 토양수분의 영향이 더욱 큰 것으로 생각된다.

2. 임목성장 모델

이상의 결과에서 임목의 성장 반응은 태양에너지를 기조로 하여, 토양수분과 온도에 따라 영향을 받는 것으로 생각할 수 있다. 임목성장 반응모델은 목재세포형성과 환경인자의 관계에서 얻어진다. 소나무의 연륜을 형성하는 가도관은 계절적인 외부 요소의 영향을 받아서 가도관의 폭, 두께, 가도관의 세포 분화 수에 차이가 있게 된다. 즉 연륜의 생장은 최대가능성장률과 성장제한요인에 의하여 결정되며, 연륜의 최대가능성장률은 태양에너지 강도에 의하여 정하여지며, 성장제한요인은 대기 온도와 토양내 수분의 함수로 정의할 수 있다.

$$TGr = Gr_0(E) \cdot (Gr(T) \cdot Gr(W)) \quad (1)$$

단, TGr , 연륜생장량(mm/day), $Gr(E)$, 태양에너지강도에 의하여 결정되는 최대가능 연륜생장량, $Gr(T)$, 온도에 의하여 정하여지는 상대생장율, $Gr(W)$, 토양수분에 의하여 정하여지는 상대생장율을 나타낸다.

식 1에서 최대가능 연륜 생장량은 다음과 같이 정의된다.

$$Gr_0(E) = \alpha(E - \beta) \quad (2)$$

단, E 는 태양에너지(MJ/m²), α 는 광합성율, β 는 순광합성을 하는 최소 태양에너지

그림 2에서 태양에너지 E 와 직경 변화량을 정규 방안에 그리고, 그 기울기를 구하였다. 그 기울기는 광합성율을 의미한다. 즉, α 는 0.020, β 는 35.0로 구할 수 있었다.

이때 $Gr(T)$ 와 $Gr(W)$ 는 상승적으로 작용하는 제한요인이라고 생각하였다.

$Gr(T)$ 의 T값은 실측온도를 대입하여

$$\begin{aligned} Gr(T) &= 0, T_a < T \\ &= \frac{1}{T_b - T_a} (T - T_a), T_a \leq T \leq T_b \\ &= 1.0, T_b \leq T \leq T_c \\ &= 1.0 - \frac{1}{T_d - T_c} (T - T_c), T_c \leq T \leq T_d \end{aligned} \quad (3)$$

같은 방법으로 토양수분상대생장율 $Gr(W)$ 은

$$\begin{aligned} Gr(W) &= 0, W_a < W \\ &= \frac{1}{W_b - W_a} (W - W_a), W_a \leq W \leq W_b \\ &= 1.0, W_b \leq W \leq W_c \\ &= 1.0 - \frac{1}{W_d - W_c} (W - W_c), W_c \leq W \leq W_d \end{aligned} \quad (4)$$

이상의 조건에서 생장에 관여하는 파라미터를 구하면 다음과 같이 설정할 수 있었다. $W_a = 0.05$, $W_b = 0.5$, $W_c = 0.80$, $W_d = 0.95$, $T_a = 5.0$, T_b

= 12.0, $T_c = 25.0$, $T_c = 40.0$ 으로 설정하고 임목 생장량을 계산하였다. 그림 4에 모델에 의한 추정치와 실측치를 나타내었다. 계산에 사용된 태양에너지는 실측치가 아닌 관계로 모델과 임목 생장이 정확히 맞지 않지만 임목 생장에 저해하는 요인에 대하여 잘 반응을 나타내고 있다고 생각된다. 이상의 방법으로 구한 임목 생장량은 전통적인 연륜연대학의 통계적 전이함수를 점검하고 비선형 관계를 보정하는데 사용될 수 있다고 생각된다(Vaganov 등, 1994).

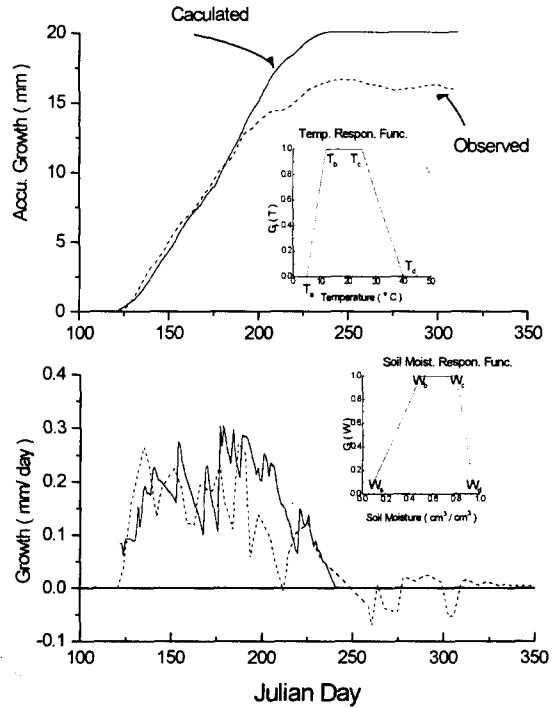


그림 4. 임목생장과 모델에 의한 추정치

IV. 결 론

이 연구의 주목적은 수분 인자에 대한 중부 지방 소나무의 생장 반응 특성을 구명하고자 하였다. 이 연구는 연륜의 생장에 대한 임목의 해부학적 구조에 기초를 두고, 기후 변화에 따른 임목의 비대 생장 특성을 파악하고자 시도하였다. 2개년(1995, 1996)에 충북대학교 부속 연습림내의 소나무 6본의 생장을 연속적으로 조

사하고, 임목의 성장에 관여하는 인자로서 일사량, 기온, 강수량, 토양수분을 조사하였다. 임목의 연륜 생장은 일사량, 기온과 토양수분에 반응하는 것을 알 수 있으며 이들 요인들의 합수로 표현할 수 있었다.

중부 산림 지역의 소나무 성장은 태양에너지에 의하여 좌우되며, 제한인자로서 기온에 의한 영향보다는 토양수분스트레스가 보다 많이 영향을 준다고 할 수 있다. 수분스트레스는 9월초까지는 심각하지 않지만 9월 중하순부터는 임목의 증산량에 비하여 임목의 수분 흡수가 늦어지고 생장이 둔화되는 것을 알 수 있었다.

이러한 생리적 기초 위에 임목의 성장모델을 작성하였다. 성장모델에는 세포내 팽압의 감소에 의한 수축 관계를 고려하지 않고 있으나 임목 생장의 기온 및 토양 수분 조건에 대한 경시적 반응은 잘 나타낼 수 있었다. 임목 성장모델을 이용하여 연륜연대학의 통계적 전이함수와 비선형관계를 보정하는데 이용할 수 있다고 생각된다.

V. 인용문헌

- 김재수. 1991. 임내사면에서의 근계흡수모델. 충북대 농과연 9(1) : 91~101.
- 김재수. 1993. 중부 급경사 산림소유역내의 지중수변화. 충북대 농과연 11(1) : 140~151.
- Kozlowski, T. 1979. Physiology of woody plants. Academic Press.
- Loaiciga, H. A., L. Haston, and J. Michaelson. 1993. Dendrohydrology and long-term hydrologic phenomena. Reviews of Geophysics. 31(2) : 151~171.
- Spurr, S. H. 1980. Forest ecology. 3rd ed. pp 251~274.
- Vaganov, E., Won-Kyu Park, and Gyo-Young Oh. 1994. Anatomical structure of tree ring of some conifer species grown in Korea as a characteristic of seasonal an year to year growth changes in relation to the climatic factors (experimental and modelling approaches) in '93년 CIS 과학자 유치 결과 보고서. 한국과학기술연구원.

接受 1999年 3月 10日