

## 植栽 密度가 林分生長모델 母數 推定에 미치는 效果에 關한 研究<sup>1\*</sup>

李鳳日<sup>2</sup> · 權純惠<sup>3</sup> · 鄭主相<sup>3</sup>

## Investigating the Effect of Planting Density on Parameter Estimation of Stand Growth Models<sup>1\*</sup>

Fengri Li<sup>2</sup>, Soonduk Kwon<sup>3</sup> and Joosang Chung<sup>3</sup>

### 要 約

본 연구에서는 식재본수가 임분 수고생장 및 단면적생장모델의 모수 추정에 미치는 효과를 연구하였다. 삼나무임분의 성장모델에 포함되는 모수들을 추정하기 위하여 기본식으로 Korf 식을 사용하였으며, 식재밀도의 변화가 모수 추정치에 미치는 영향을 분석하기 위해 합리적 분석과정으로 판단되는 추가제곱합(extra sums of square) 원칙을 적용하였다. 적용성 검토결과 임분수고의 생장이 식재밀도에 유의한 영향을 받지 않는다는 기존의 입장과 임분 단면적의 성장곡선은 임분밀도에는 관계없이 동일한 점근선에 접근한다는 사실을 재확인할 수 있었다. 그러나 단면적 성장곡선의 형태는 이와는 달리 식재밀도에 의해 유의한 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 삼나무 인공림에서 식재밀도에 따른 효과를 설명할 수 있는 임분단면적 성장모델을 제시하였다.

### ABSTRACT

In this study, the effects of stand planting density on parameters of stand height and basal area growth models were investigated. We used the Korf equation as the base model in estimating the parameters of the growth models for cryptomeria plantation forest stands. Then, in order to investigate the effects of the change in plantation density on the parameter estimates, the "extra sums of square" principle, which provided a reasonable statistical procedure for a performance test, was used. The results of the test coincide with the understandings that stand height growth is not affected significantly by the planting density and the growth curves of stand basal area approaches a common asymptote regardless of the stand density for a given site. However, the shapes of the basal area growth curves were affected significantly by the planting density. Based on the results of the test, we developed a basal area growth model to account for the effects of initial planting density in cryptomeria plantation forest stands.

*Key words* : Korf equation, stand height and basal area growth models, stand planting density, extra sum of squares, Cryptomeria japonica

<sup>1</sup> 接受 1999年 4月 20日 Received on April 20, 1999.

<sup>2</sup> 中國 東北林業大學校 森林資源環境學部 Faculty of Forest Resources and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150040, P. R. China.

<sup>3</sup> 서울대학교 산림자원학과 Department of Forest Resources, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Suwon, Kyonggido 441-744, Korea.

\* 본 연구는 1998년도 과학기술정책관리연구소의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것임.

緒 論

산림을 조성하는데 있어서 식재밀도 혹은 단위 면적당 식재본수는 임업경영과 관련하여 매우 중요한 의미가 있다. 즉, 임업경영적 관점에서 식재밀도는 장차 예상되는 무육 및 수입간벌의 횟수, 시기 및 강도 등과 깊은 관련이 있으므로 가능한 한 초기 임분의 식재밀도를 조절함으로써 많은 비용이 소요되는 간벌과 같은 산림사업의 횟수를 줄일 수 있는 방안이 국내 실무 임업인들 사이에서 간간히 거론되고 있는 것이 사실이다. 그러나 국내에서는 이러한 임분시업관리에 대하여 체계적인 연구가 매우 미진하고 또한 영구표본점 설치에 의한 자료수집이 제대로 수행되지 못했거나 수집된 자료가 공개되지 않고 있는 실정이다. 우선 임분의 초기 식재밀도가 수고생장이나 단면적 및 축적의 생장에 미치는 영향을 객관적으로 이해하기 위한 노력이 필요할 것으로 판단되며 이를 위해 체계적인 자료수집은 물론 임분생장에 관한 연구가 필히 요구된다.

한편 문헌고찰에 의하면 대부분의 정교한 임분생장모델들이 Chapman-Richards, Korf, Weibull, Gompertz 등과 같은 비선형의 이론적 함수들을 이용하여 연구개발되고 있음을 알 수 있다(Zeide, 1993; 손영모 등, 1997). 또한 임분생장 모델을 연구할 때는 비선형 성장함수의 모수 변화가 임분 성장조건에 따라 어떻게 영향을 끼치는지를 분석하는 것이 매우 중요하다.

기존의 연구에서는 비선형 생장예측모델을 개발할 때 주로 모수 예측방법을 사용하고 있다. 개별 임분의 생장에 영향을 미치는 주요 인자들로 수종, 지위나 식재밀도 등을 들 수 있고, 그 외에 인위적인 시업내역으로 간벌이나 시비 등이 임분 생장에 영향을 줄 수 있는 주요 인자로 포함된다. 예를 들어, Pienaar(1979)와 Pienaar와 Rheney(1990)는 Chapman-Richards 식을 사용하

여 모수와 지위 및 식재밀도의 관계를 파악하여 slash pine 인공림에서 수확예측 모델을 개발에 적용하였다.

그러나 이와 같은 모수 예측방법들의 경우는 대개 회귀분석기법에 의존해 온 것이 사실이다. 반면 본 연구는 임분생장 모델에서 추정된 모수와 현실 임분의 생장조건 간의 관계를 규명하기 위한 통계적 분석 방법을 적용하여 수행되었다. 이를 위해 Draper와 Smith(1981)에 의해 제안된 추가제곱합(Extra Sum of Square) 분석기법을 동일한 지위에서 식재밀도가 다른 삼나무 인공림의 수고생장과 흉고단면적 성장모델의 모수 추정치 비교에 이용하였다. 또한 이를 통해 식재 밀도가 다른 임분에 적용할 수 있는 삼나무 인공림의 흉고단면적 성장모델을 개발하였다.

資料 및 方法

1. 연구자료

본 연구에서는 1997년 대만의 Feng에 의해 보고된 미간벌 삼나무(*Cryptomeria japonica*) 인공림의 임분조사 자료를 활용하여 통계적 분석방법을 제시하였다. 이 영구표본점들은 동일한 지위에 식재 밀도를 1.5×1.5m, 1.7×1.7m, 1.9×1.9m, 2.3×2.3m, 3.1×3.1m의 다섯 가지로 구분하여 1931년에 조성되었고, 그 동안 벌채나 병충해에 의한 피해가 없는 것으로 조사되었다. Feng이 보고한 자료에 의하면 이 삼나무 인공림의 영구표본점들에 대하여 1931년부터 1956년까지 총 23회에 걸쳐서 측정이 이루어 졌으며, 측정결과가 Table 1에 나타나 있다.

2. 연구방법

본 연구에서는 우선 초기 밀도가 다른 다섯 가지 삼나무 인공림 자료를 Korf 성장함수에 적용하여 임분 수고생장과 흉고단면적 성장 함수를

Table 1. Range of the data for 23 measurements by plantation spacing (after Feng, 1977).

Spacing (m)	Plot area (ha)	Age (yr)	DBH (cm)	Height (m)	Stand density (stems/ha)	Basal area (m <sup>2</sup> /ha)	Volume (m <sup>3</sup> /ha)
1.5×1.5	0.065	2~26	0~19.71	0.61~19.60	2169~4754	0~66.80	0~530.90
1.7×1.7	0.098	2~26	0~19.99	0.71~19.96	1969~3074	0~62.79	0~491.96
1.9×1.9	0.071	2~26	0~21.29	0.64~19.01	1746~2901	0~62.48	0~483.51
2.3×2.3	0.091	2~26	0~22.98	0.64~19.60	1637~2044	0~68.41	0~495.54
3.1×3.1	0.085	2~26	0~27.50	0.70~19.05	965~1035	0~57.32	0~425.41

추정하였다.

$$y = Ae^{-kt^b} \dots\dots\dots(1)$$

여기서  $y$ 는 임분의 크기(수고 또는 흉고단면적),  $t$ 는 임령, 그리고  $A, k, b$ 는 추정된 모수를 의미하며, SAS(1985)의 Marquardt 방법을 적용하여 추정하였다.

이상의 방법으로 추정된 비선형 성장모델의 모수를 비교평가하기 위해 Draper와 Smith(1981)에 의해 제안된 추가제곱합(Extra Sum of Square) 원칙을 적용하였다. 즉, 이 원칙은 식재밀도가 다른 임분의 성장곡선을 fitting하는 과정에서 도출된 잔차제곱합의 유의성 변화를 비교 평가하는데 필요한 기준을 제시하여 주기 때문이다.

한편 본 연구에서는 Korf식을 사용하여 임분 성장모델들을 추정하였고, 초기 임분식재밀도가 다른 임분의 성장모델을 비교하기 위하여 다음과 같이 Ratkowsky(1983)가 제시한 통계적 분석과정을 적용하였다.

(A) 개별 임분의 자료에서 잔차제곱합 함수(2)를 최소화하면서 각각의 계수,  $A_i, k_i, b_i(i=1, 2, 3, 4, 5)$ 를 추정한다.

$$RSS_A = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{n_i} (y_j - A_{iA} e^{-k_{iA} t_j^{b_{iA}}})^2 \dots\dots\dots(2)$$

이 식에서  $i$ 는 임분,  $j$ 는 측정횟수를 나타내고,  $n_i$ 는  $i$ 번째 임분의 표본크기를 나타낸다.

(B) 임분에서 공통 모수  $A$ 를 추정하고, 개별 임분에서 잔차제곱합을 계산하기 위한 함수(3)를 최소화하기 위한 계수  $k$ 와  $b$ 를 추정한다.

$$RSS_B = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{n_i} (y_j - A_B e^{-k_B t_j^{b_B}})^2 \dots\dots\dots(3)$$

(C) (B)와 같은 방법으로 공통 변수  $k$ 를 추정하고, 개별 임분에서  $A$ 와  $b$ 를 추정한다.

(D) (B)와 같은 방법으로 공통 변수  $b$ 를 추정하고, 개별 임분에서  $A$ 와  $k$ 를 추정한다.

(E) 임분에서 공통 모수  $A$ 와  $k$ 를 추정하고, 개별 임분에서 잔차제곱합 함수(4)를 최소화하기 위한 계수  $b$ 를 추정한다.

$$RSS_E = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{n_i} (y_j - A_E e^{-k_E t_j^{b_E}})^2 \dots\dots\dots(4)$$

(F) (E)와 같은 방법으로 공통 변수  $A$ 와  $b$ 를 추정하고, 개별 임분에서  $k$ 를 추정한다.

(G) (E)와 같은 방법으로 공통 변수  $k$ 와  $b$ 를 추정하고, 개별 임분에서  $A$ 를 추정한다.

(H) 모든 자료의 잔차제곱합 함수(5)를 최소화 하면서 공통 모수  $A, k, b$ 를 추정한다.

$$RSS_H = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{n_i} (y_j - A_H e^{-k_H t_j^{b_H}})^2 \dots\dots\dots(5)$$

마지막으로 다른 자료들 간에 비선형 성장 모델의 비교는 이상의 과정에서 구한 잔차제곱합의 분산분석을 사용함으로써 비교할 수 있다. 즉, 다른 임분자료에서 모수  $A$ 의 불변성 가설을 테스트하기 위하여 다음 식(6)을 이용하여 통계량  $F$ 를 산출한다.

$$F = \frac{(RSS_B - RSS_A) / (df_B - df_A)}{RSS_A / df_A} \dots\dots\dots(6)$$

여기서 만약 통계량  $F$ 가  $F_\alpha(df_B - df_A, df_A)$  보다 크면, 신뢰도  $\alpha(1\%, 5\%)$ 에서 가설을 기각한다. 이러한 결과는 개별 임분에서 성장 함수를 최소화하는데 있어 공통 모수  $A$ 를 고정시킬 수 없고, 개별적으로 모수  $A$ 를 구해야 한다는 것을 의미한다.

한편  $F$  검정에서 가설을 기각하였다면 모수가 개별 임분간에 어떠한 양향을 미치는지를 파악할 필요가 있으며, 이를 위해 다음과 같이 다중  $T$  검정(Multiple  $T$ -test)을 실시한다.

$$T = \frac{\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j}{\sqrt{\frac{df_i \times Var(\hat{\theta}_i) - df_j \times Var(\hat{\theta}_j)}{(df_i + df_j) / 2}}} \dots\dots\dots(7)$$

여기에서  $Var(\hat{\theta}_i) = [SE(\hat{\theta}_i)]^2$ ,  $SE(\hat{\theta}_i)$ 는  $i$ 번째 임분자료에서의 추정된 모수 ( $\hat{\theta}_i$ )의 점근선의 표준오차이다. 또한  $df_i$ 와  $df_j$ 는  $i$ 번째와  $j$ 번째 임분자료에서의 자유도를 나타낸다. 여기에서 통계량  $T$ 가  $T_\alpha(df_i + df_j)$  보다 크면, 신뢰도  $\alpha(1\%, 5\%)$ 에서  $i$ 임분의  $\hat{\theta}_i$ 와  $j$ 임분의  $\hat{\theta}_j$ 가 유의성이 있음을 의미한다.

結果 및 考察

1. 임분별 수고성장 및 흉고단면적 성장 함수의 추정

초기 식재 밀도가 다른 다섯 가지 삼나무 임분 (Table 1)에 대하여 수고 및 흉고단면적 성장함수를 도출하였다. 이를 위해 다양한 비선형의 성장함수 모형중 Korf, Weibull, Richards 및 Gompertz의 4가지 식을 선정하여 성장모형을 도출한 결과 다른 세 가지 성장함수모형에 비해 Korf 식(1)이 임분의 수고생장과 흉고단면적 성장을 설명하는데 가장 적합한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 1989년 Zeide가 몇 가지 수종의 임분을 대상으로 흉고직경생장에 관해 수행한 연구결과와 동일한 것이다. 이러한 연구결과를 토대로 본 연구에서는 Korf 식을 적용하여 분석하였다.

Table 2는 Korf 식을 적용하여 임분의 수고생장과 흉고단면적 성장함수 도출시 추정된 모수 값들과 통계분석 결과를 보여주고 있다. 이 결과에 의하면 수고를 예측하기 위한 성장함수의 경우 개별 임분에 따른 결정계수( $R^2$ )가 99.6% 이상으로 나타났고, 상대오차는 3.5% 이하로 나타났다. 또한 흉고단면적의 경우에는 결정계수( $R^2$ )가 99.5% 이상으로 나타났고, 상대오차는 4.7% 이하로 나타난 것을 알 수 있다.

2. 임분의 수고성장 곡선 비교

Table 1에 나타난 초기 식재밀도가 다른 임분

의 수고성장곡선을 비교한 결과가 Table 3에 제시되어 있다. 이 표에는 전술한 Ratkowsky(1983)의 분석과정을 적용하였을 때 나타나는 임분수고생장의 잔차제곱합(RSS)과 평균자승오차(MSE), 그리고 Korf 함수의 모수 불변성을 검정하기 위한  $F$  검정까지의 결과가 나타나 있다.

Table 3을 보면 각 임분별 모수  $A$ 의 불변성 가설검정 결과 RSS의 변화된 값, 즉,  $RSS_B - RSS_A$ 는 0.6990으로 나타났다. 또한  $F = (0.699035/4) / (11.417995/100) = 1.5306 < F_{0.05}(4, 100) = 2.46$ 으로  $\alpha = 5\%$ 의 유의수준에서 임분별 공통 모수  $A$ 는 같다는 가설을 받아 들일 수 있었다.

다음으로 개별 임분에 따른 모수  $k$ 의 불변성과  $b$ 의 불변성,  $A$ 와  $k$ 의 불변성,  $A$ 와  $b$ 의 불변성,  $b$ 와  $k$ 의 불변성 가설을 검토했던 결과  $\alpha = 5\%$ 의 유의수준에서 가설을 받아 들일 수 있는 것으로 나타났다. 그 외에 임분별 공통 모수  $A, k, b$ 의 가설을 검토했던 결과는  $F = 2.111015$ 로  $\alpha = 5\%$ 의 유의수준에서는 가설을 기각해야 하는 것으로 나타났다,  $\alpha = 1\%$ 에서는 가설을 받아 들일 수 있는 것으로 나타났다.

한편 임목의 생장은 임분의 환경조건에 따라 변이가 심한 점을 고려할 때 유의성검정은 1%의 유의수준에서도 충분한 것으로 판단할 수 있다. 이러한 관점에서 삼나무 인공림 수고성장곡선의 모수  $A, k, b$ 의 추정값이 초기 식재밀도에 따라 유의성이 없다면 그 모수들은 공통으로 추정하여도 무관할 것이다. 또한 삼나무 인공림의 수고생

Table 2. Parameter estimates and fit statistics for Korf equation to describe stand height and basal area growth of cryptmeria plantations with different spacing.

Variable	Spacing	Parameter estimates			Fit statistics			
		$A$	$K$	$b$	$N$	RSS	Sy.x	$R^2$
Height	1.5×1.5 m	56.797185	6.969202	0.573857	23	2.6444	0.3636	0.99653
	1.7×1.7 m	57.887241	7.369919	0.591591	23	1.4605	0.2702	0.99820
	1.9×1.9 m	42.442453	7.564105	0.686825	23	3.4216	0.4136	0.99539
	2.3×2.3 m	42.389883	8.010977	0.717389	23	1.6016	0.2830	0.99801
	3.1×3.1 m	41.967755	7.618562	0.702789	23	2.2899	0.3384	0.99705
	Overall	47.118341	7.464784	0.653923	115	14.3104	0.1278	0.99633
Basal area	1.5×1.5 m	70.833022	105.795446	2.189863	23	60.2574	1.7358	0.99528
	1.7×1.7 m	66.258756	214.659195	2.486820	23	61.0855	1.7476	0.99497
	1.9×1.9 m	69.476752	89.675970	2.008018	23	41.2891	1.4368	0.99629
	2.3×2.3 m	82.041784	92.399072	1.939978	23	15.2974	0.8746	0.99893
	3.1×3.1 m	75.525619	62.229237	1.661340	23	13.6310	0.8256	0.99854
	Overall	72.315226	87.687221	1.981820	115	2418.7300	4.6471	0.96051

**Table 3.** Comparisons of parameter estimates for height growth curves using the Korf equation ( $Var(y)$  was assumed to be a constant for each data set).

Steps of Fitting	No. of parameters to be estimated	df	RSS	MSE
(H) Common $A$ , $k$ , and $b$	3	112	14.310422	0.127772
(G) Common $k$ and $b$	7	108	13.085544	0.121162
(F) Common $A$ and $b$	7	108	13.184409	0.122078
(E) Common $A$ and $k$	7	108	13.077612	0.121089
(D) Common $b$	11	104	11.964942	0.115048
(C) Common $k$	11	104	11.720784	0.112700
(B) Common $A$	11	104	12.117030	0.116510
(A) Individual $A$ , $k$ , and $b$	15	100	11.417995	0.114180

Hypothesis test	df	RSS changed	MSE	F-value
(B)-(A): Test the invariant of $A$	4	0.699035	0.174759	1.530556 <sup>ns</sup>
(C)-(A): Test the invariant of $k$	4	0.302790	0.075697	0.662966 <sup>ns</sup>
(D)-(A): Test the invariant of $b$	4	0.546947	0.136737	1.197555 <sup>ns</sup>
(E)-(A): Test the invariant of $A$ and $k$	8	1.659617	0.207452	1.816888 <sup>ns</sup>
(F)-(A): Test the invariant of $A$ and $b$	8	1.766415	0.220802	1.933806 <sup>ns</sup>
(G)-(A): Test the invariant of $k$ and $b$	8	1.667549	0.208444	1.825572 <sup>ns</sup>
(H)-(A): Test the invariant of $A$ , $k$ , and $b$	12	2.892428	0.241036	2.111015*

(Note : <sup>ns</sup> is not significantly different at 5% level; \* and \*\* are significantly different at 5% and 1% levels, respectively.)

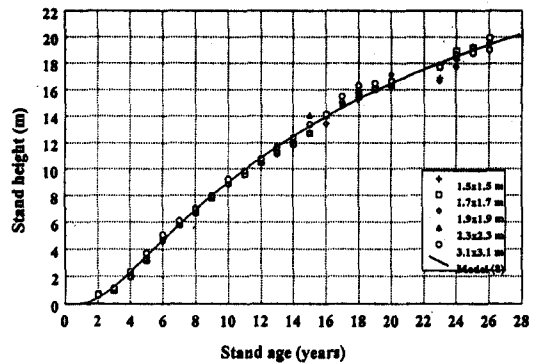
장은 초기 임분밀도에 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단되며, 이러한 결과는 1983년 Clutter 등이 수행한 연구에서 “임분의 평균수고 생장은 임분의 식재 밀도를 다르게 하여도 중요하게 영향을 받지 않는다”는 보고결과와 일치한다.

이와 같은 결과를 토대로 초기 식재밀도가 다른 삼나무 인공림의 수고생장은 아래와 같이 하나의 곡선식으로 나타낼 수 있다. 이 식의 통계 분석 결과는 Table 2에 나타나 있으며, 수고생장 곡선은 Fig. 1에 나타나 있다.

$$H = 47.118341 e^{-7.464784t^{0.663923}} \dots \dots \dots (8)$$

**3. 임분의 흉고단면적 곡선 비교**

초기 식재 밀도가 다른 다섯 개의 삼나무 임분의 흉고단면적 생장곡선의 모수 추정 비교 결과가 Table 4에 나타나 있다. 이 표에 의하면 7가지 모수 불변성의 가설을(단계 BH) 검토한 결과  $\alpha = 5\%$ 의 유의수준에서는 7가지의 가설 모두를 기각하였으나 공통 모수(common parameter)  $k$ 에 대해서는  $\alpha = 1\%$ 에서 가설을 수락할 수 있었다. 이 결과로 볼 때, 초기 식재밀도가 다른 임분의



**Fig. 1.** Stand height as a function of stand age for cryptmeria stands with different spacing. The solid line indicates growth curve predicted by equation (8).

흉고단면적 생장곡선에서 모수  $k$ 는 불변이고, 모수  $A$ 와  $b$ 는 초기 밀도의 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다.

한편 모수  $A$ 와  $b$ 에 영향을 미치는 초기 밀도를 파악하기 위해서 Table 2에 나타난 모수 추정 값과 모수 점근선의 표준오차 값을 이용하여 개별 임분간의 모수를 다중  $T$  검정한 결과가 Table

**Table 4.** Results of parameter estimates for basal area growth curves using the Korf equation ( $Var(y)$  was assumed to be a constant for each data set).

Steps of Fitting	No. of parameters to be estimated	df	RSS	MSE
(H) Common $A$ , $k$ , and $b$	3	112	2418.730560	21.595809
(G) Common $k$ and $b$	7	108	685.201671	6.344460
(F) Common $A$ and $b$	7	108	502.216936	4.650157
(E) Common $A$ and $k$	7	108	426.054313	3.944947
(D) Common $b$	11	104	237.696048	2.285539
(C) Common $k$	11	104	217.176105	2.088232
(B) Common $A$	11	104	275.291756	2.647036
(A) Individual $A$ , $k$ and $b$	15	100	191.560454	1.915605

Hypothesis test	df	RSS changed	MSE	F-value
(B)-(A): Test the invariant of $A$	4	83.731302	20.932826	10.927530**
(C)-(A): Test the invariant of $k$	4	25.615651	6.403913	3.343024*
(D)-(A): Test the invariant of $b$	4	46.135594	11.533899	6.021023**
(E)-(A): Test the invariant of $A$ and $k$	8	234.493859	29.311732	15.301557**
(F)-(A): Test the invariant of $A$ and $b$	8	310.656482	38.832060	20.271439**
(G)-(A): Test the invariant of $k$ and $b$	8	493.641217	61.705152	32.211843**
(H)-(A): Test the invariant of $A$ , $k$ and $b$	12	2227.170110	185.597509	96.887173**

(Note : <sup>ns</sup> is not significantly different at 5% level; \* and \*\* are significantly different at 5% and 1% levels, respectively.)

**Table 5.** The results of  $t$ -test for the parameter invariant of the basal area growth curves among stands of different spacing.

Parameter	Spacing	1.5×1.5 m	1.7×1.7 m	1.9×1.9 m	2.3×2.3 m
$A$	1.7×1.7 m	1.865 <sup>ns</sup>			
	1.9×1.9 m	0.488 <sup>ns</sup>	-1.225 <sup>ns</sup>		
	2.3×2.3 m	-4.629**	-7.033**	-4.835**	
	3.1×3.1 m	-1.524 <sup>ns</sup>	-1.950 <sup>ns</sup>	-1.878 <sup>ns</sup>	2.235*
$k$	1.7×1.7 m	-1.318 <sup>ns</sup>			
	1.9×1.9 m	0.411 <sup>ns</sup>	1.564 <sup>ns</sup>		
	2.3×2.3 m	0.392 <sup>ns</sup>	1.576 <sup>ns</sup>	2.815**	
	3.1×3.1 m	1.320 <sup>ns</sup>	1.978 <sup>ns</sup>	1.073 <sup>ns</sup>	1.795 <sup>ns</sup>
$b$	1.7×1.7 m	-1.315 <sup>ns</sup>			
	1.9×1.9 m	0.930 <sup>ns</sup>	2.239*		
	2.3×2.3 m	1.530 <sup>ns</sup>	2.959**	0.466 <sup>ns</sup>	
	3.1×3.1 m	3.160**	4.384**	2.303*	2.645*

(Note : <sup>ns</sup> is not significantly different at 5% level; \* and \*\* are significantly different at 5% and 1% levels, respectively.)

5에 나타나 있다. 이 표를 살펴보면 각 임분의 모수  $k$ 의 추정 값은 대부분 유의성이 나타나지 않았으며, 이러한 결과는  $F$  점정을 한 결과와 동일하였다. 모수  $A$ 와  $b$ 의 추정 값은 총 10쌍 중에서 각각 4쌍과 6쌍이  $\alpha=5\%$ 의 유의수준에서

유의한 것으로 나타났다. 그 중 모수  $A$ 가 유의성이 있는 것은 2.3×2.3m 임분과 다른 4개의 임분간에만 나타났다. 이것은 이 임분의 모수  $A$ 의 값이 다른 임분의  $A$  값 보다 높게 추정되었기 때문이다.

4. 초기 식재 밀도와 관련된 흉고단면적 성장 모델

이상과 같은 유의성 검정 결과에 의하면 초기 식재밀도( $M_0$ )가 임분 흉고단면적의 성장에 미치는 효과가 지극히 미진하거나 없는 것으로 판단할 수 있으므로 흉고단면적 성장 모델에서 모수  $k$ 와  $A$ 를 상수로 처리할 수 있다. 특히 초기 식재밀도가 다른 다섯 개의 삼나무 임분에서 점근선의 크기(asymptotic size)를 나타내는 모수  $A$ 는 "최종수확량 일정법칙"에 의해 해석이 가능하다. 즉, 동일한 입지조건 하에 초기 밀도가 다른 임분의 흉고단면적 성장은 임령이 증가하면 언젠가는 동일한 점근선에 도달하기 때문이다(Pienaar and Turnbull, 1973). 이러한 관점에서 Re-parameterized Method를 적용하여 식재밀도에 따른 삼나무 인공림의 흉고단면적생장을 추정할 수 있는 모델을 다음과 같이 만들었다.

$$BAS = Ae^{-kt^{-b_0/b_1}} \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $M_0$ 는 식재 밀도를 나타내며,  $A$ ,  $k$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ 는 추정해야 할 모수를 나타낸다.

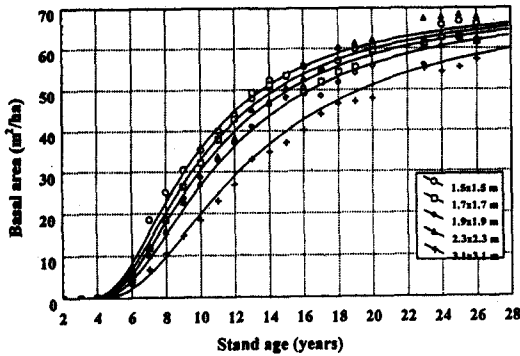


Fig. 2. Basal area growth curves, by planting density, over time for cryptomeria plantation.

이 흉고단면적 성장모델(9)의 모수 추정과 통계량 분석 결과가 Table 6에 나타나 있고, 식재 밀도에 따른 흉고단면적 성장 예측치와 실제 관측치를 비교할 수 있는 그래프가 Fig. 2에 나타나 있다. Table 6에 의하면 흉고단면적 성장함수는 결정계수( $R^2$ )가 98.8%로 나타났고, 평균흉고단면적에 따른 평균오차는 7.5%로 나타났다. 식재 밀도가 다른 모든 성장곡선이 임령이 증가할수록 흉고단면적이  $71m^2/ha$ 가 되는 점근선에 근접하고 있음을 알 수 있다.

한편 Korf식(1)에서 모수  $b$ 는 곡선의 모양을 결정하는 주요 변수로 이해되며, 위의 성장모델(9)에서  $b$ 가 식재본수의 함수관계로 표현되고 있다. 따라서 Fig. 2의 흉고단면적 성장곡선들은 식재밀도에 따라 곡선의 모양이 달라지고 있음을 알 수 있다. 즉, 초기 식재밀도가 작으면 곡선의 모양이 급하게 점근선에 도달하는 현상을 보이며, 반대로 초기 식재 밀도가 크면 곡선의 모양이 완만하게 점근선에 도달하게 된다.

結 論

본 연구에서는 Korf 식을 이용하여 성장함수의 모수와 임분의 성장조건으로서 식재밀도와의 관계를 통계적 방법으로 연구하였다. 이를 위해 초기 식재 밀도가 다른 임분들의 수고성장 곡선과 흉고단면적 성장곡선을 비교하였다.

그 결과 초기 식재밀도가 다른 다섯 개의 삼나무 인공림 수고성장곡선의 모수  $A$ ,  $k$ ,  $b$ 는 변하지 않기 때문에 공통으로 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 동일한 입지조건에서 초기 임분 밀도는 임분수고생장에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

한편 임분의 흉고단면적 성장 모델에서는 식재 밀도가 서로 다른 임분에서 모수  $k$ 의 값은 변하지 않았으나, 모수  $A$ 와  $b$ 는 초기 밀도의 영향을

Table 6. Parameter estimates and fit statistics of basal area growth model for cryptotomeria plantation.

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	T Ratio	Approx. Prob.> T	Fit statistics			
					n	RSS	Sy.x	R <sup>2</sup>
A	71.003160	1.504954	47.1796	0	115	764.3129	2.6241	0.987522
k	114.725859	23.947679	4.7907	0.0001				
b <sub>0</sub>	1.096454	0.066520	16.4830	0				
b <sub>1</sub>	0.083256	0.005324	15.6365	0				

받는 것으로 나타났다. 따라서 임분의 식재밀도가 모수  $A$ 와  $b$ 에 미치는 영향을 파악하기 위해서 다중  $T$  검정(Multiple  $T$ -test)을 실시하였다. 그 결과 식재밀도가 서로 다른 다섯 개의 삼나무 임분에서 점근선의 크기를 나타내는 모수  $A$ 는 식재밀도와 무관한 것으로 나타났고, 성장곡선의 형태를 결정하는 모수  $b$ 는 식재밀도에 따라 유의한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 결과를 토대로 식재밀도가 서로 다른 임분에 적용할 수 있는 삼나무 인공림의 단면적성장모델을 개발하였다.

이러한 식재밀도가 다른 임분에 적용할 수 있는 성장모델 개발은 임업경영과 관련하여 매우 중요할 것으로 판단된다. 즉, 초기 임분의 식재밀도를 조절함으로써 많은 비용이 소요되는 간벌과 같은 산림사업의 횡수를 줄일 수 있기 때문에 비용을 절감할 수 있을 것이다. 그러나 국내에서는 이러한 임분사업관리에 대하여 체계적인 연구가 매우 미진하고, 또한 영구표본점 설치에 의한 자료수집이 제대로 수행되지 못했거나 수집된 자료가 공개되지 않고 있는 실정이다.

따라서 임분의 초기 식재밀도가 수고생장이나 단면적 및 축적의 생장에 미치는 영향을 객관적으로 이해하기 위한 노력이 필요할 것으로 판단되며, 이를 위해 체계적인 자료수집은 물론 임분생장에 관한 연구가 필히 요구된다.

### 引用 文 獻

1. 孫英模·李慶學·鄭榮教. 1997. 非線形 生長 函數를 利用한 林分生長 推定. 韓國林學會誌. 86(2): 135-145.
2. Clutter, J.L., J.C. Fortson, L.V. Pienaar, G.H. Brister, and R.L. Bailey. 1983. Timber management: A quantitative approach. John Wiley & Sons. New York. 333pp.
3. Draper, N.R. and H. Smith. 1981. Applied regression analysis. 2nd ed. Wiley. New York.
4. Feng, F.-L. 1997. Modeling stand growth varies in response to different spacing. Quarterly J. Exp. For. Nat. Taiwan Univ. 11(2): 111-123.
5. Pienaar, L. and J.W. Rheney. 1990. Yield prediction for mechanically site-prepared slash pine plantations in the southeastern coastal plain. South. J. Appl. For. 17(4): 163-173.
6. Pienaar, L.V., and K.J. Turnbull. 1973. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. For. Sci. 19: 2-22.
7. Pienaar, L.V. 1979. An approximation of basal area growth after thinning based on growth in unthinned plantations. For. Sci. 25: 223-232.
8. Ratkowsky, D.A. 1983. Nonlinear regression modeling. Marcel Dekker, New York. 276p.
9. SAS. 1985. SAS User's Guide: Statistics, Version 5 edition, SAS Institute, Inc., Cary NC. 956p.
10. Zeide, B. 1989. Accuracy of equations describing diameter growth. Can. J. For. Res. 19: 1283-1286.
11. Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. For. Sci. 39(3): 594-616.