

江原道地方 소나무 同齡林分의 最大林木本數 및 枯死모델^{1*}
李祐均² · 徐廷昊² · 裴尚元³

Maximum Stem Number and Mortality Model for Even-Aged
Pinus Densiflora Stand in Kangwon-Province, Korea^{1*}
Woo-Kyun Lee², Jeong-Ho Seo² and Sang-Won Bae³

要 摘

본 연구에서는 ha당 단면적이 최대가 되는 임목본수가 그 임분이 유지시킬 수 있는 최대임목본수라는 Sterba의 이론을 강원도지방 소나무의 임시표본점 조사자료에 적용시켜 강원도지방 소나무 동령임분의 최대임목본수 및 고사모델을 유도하였다.

ha당 임목본수와 우세목수고를 변수로 하여 평균흉고직경을 추정하는 평균흉고직경식의 통계적 신뢰성은 매우 높았으며, ha당 임목본수 및 우세목수고에 따른 흉고직경생장의 변이를 잘 설명해 주었다. 또한, 이 평균흉고직경식으로부터 유도되는 ha당 흉고단면적식은 ha당 임목본수의 변화에 따른 ha당 흉고단면적의 변화를 우세목수고별로 잘 나타내 주었다.

ha당 흉고단면적이 최대가 되는 임목본수로부터 우세목수고 및 흉고직경별로 유도되는 최대임목본수곡선은 임목본수 관측치의 상부를 지나면서 임분의 최대임목본수를 잘 나타내 주었다. 또한, 평균흉고직경에 대한 최대임목본수식으로부터 추정되는 최대임분밀도지수는 임분의 최대잠재밀도를 나타내는 지수로 활용할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 최대임목본수식 및 최대임분밀도지수식은 최대밀도에 도달한 임분자료를 근거로 하는 것이 아니라 다양한 밀도를 나타내는 임분으로부터 조사된 자료를 근거로 한다는 특징이 있으며, 이를 이용하면 고사량추정, 최대잠재생산량추정 등 임분밀도관리에 필요한 정보를 마련할 수 있다.

ABSTRACT

Sterba's theory that stem number maintaining maximum basal area per ha is maximum stem number of a stand, had been applied to data from 103 temporary plots in even-aged *Pinus densiflora* stands in Kangwon province, Korea and a maximum stem number and mortality model was prepared.

DBH growth model which estimates dbh with the independent variables of stem number per ha and dominant height shows the good statistical performance, and explains well differences in dbh growth that would be caused by stem number per ha and dominant height. Basal area model

derived from dbh growth model also explains well differences in basal area according to stem number per ha and dominant height.

¹ 接受 2000年 8月 14日 Received on August 14, 2000.

² 고려대학교 산림자원환경학과 Dept. of Forest Resources and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea.

³ 임업연구원 중부시험장 Chungbu Forest Experiment Station, Forestry Research Institute, Pocheon 487-820, Korea.

* 본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구과제(과제번호: 971-0607-050-2) 지원된 연구결과의 일부임.

The maximum stem number curve, which is derived from stem number per ha at maximum basal area for dominant height and dbh, represents well the upper range of stem number per ha observed. And maximum stand density index derived from the maximum stem number model for dbh could be used for the index of maximum potential density of a stand.

The maximum stem number model and maximum stand density index in this study were not based on stand data with maximum density but based on the temporary data from stands with various density. This maximum stem number model can be applied to the estimation of mortality and maximum potential volume.

Key words : Sterba's theory, maximum basal area, maximum stem number, maximum stand density index, Pinus densiflora

서 론

산림관리는 주어진 입지조건하에서 그에 적합한 밀도관리를 하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 자연상태 또는 관리에 따른 임목본수의 변화를 파악하는 것은 산림관리에 있어 매우 중요한 내용으로 인식되고 있다. 일반적으로 동령임분의 임목본수는 임령, 우세목수고, 평균흉고직경이 증가될수록 감소하는 패턴을 보인다. 그러나 어느 생장인자를 기준으로 하는가에 따라 임목본수의 감소경향에는 차이가 발생한다.

같은 임령에서는 일반적으로 지위가 양호할수록 임목본수가 적은 것으로 알려져 있다. 그러나 우세목수고에 대해서는 지위지수가 양호할수록 임목본수는 오히려 많은 것으로 알려져 있다. 이는 지위지수가 양호할수록 수고생장은 빠르고 이에 따라 일정한 수고에 일찍(낮은 임령에서) 도달하기 때문인 것으로 설명되고 있다. 즉, 우세목수고가 같다 하더라도 지위가 좋을수록 임령은 어리며 그 만큼 본수가 많은 것이다. 그러나 같은 우세목수고일때의 지위에 따른 임목본수의 차이는 임령에 있어서의 지위에 따른 임목본수의 차이보다 작은 것이 일반적이다. 지위에 따른 이러한 임목본수의 차이는 평균흉고직경을 기준으로 임목본수의 감소경향을 나타내면 없어진다는 연구결과가 Reineke (1933)에 의해 밝혀진 바가 있다.

임목본수의 이러한 변화경향을 파악하는 것은 주로 2가지 측면에서 이루어진다. 하나는 주어진 관리방법으로 시업이 계속되는 동안 임목본수의 변화를 관측하는 것이다. 이 경우는 시험구별로 다양한 관리방법을 주기적으로 실시하고 이에 따른 임목본수를 주기적으로 관측함으로써 관리방법별 임목본수변화의 차이를 밝힐 수 있게 된다.

즉, 관리방법에 따른 임목본수의 변화에 초점이 맞추어진 분석방법이다. 또 다른 하나는 수종 및 입지에 따른 최대임목본수(maximum stem number) 또는 최대잠재밀도(maximum potential density)에 초점이 맞추어진 방법이다. 즉, 아무런 관리를 실시하지 않은 상태에서의 임목본수변화를 장기적으로 관측함으로서 수종 또는 입지별로 유지할 수 있는 최대임목본수를 추정하는 것이다. 이러한 최대임목본수는 결국 고사율(mortality rate)의 추정에 기준이 되며 최대잠재생산력(maximum potential productivity)을 나타낸다는 점에서 매우 중요하다.

최대임목본수의 변화를 파악하기 위해서는 두 가지 전제가 수반되어야 한다. 우선, 무시업구가 있어야 하고, 다음으로 그 무시업구에 대해 임목본수를 비롯한 각종 생장인자가 꾸준히 관측·조사되어야 한다. 그러나 일반적으로 무시업구에 대한 그와 같은 장기관측자료는 확보 및 유지에 많은 어려움이 수반된다. Sterba(1975, 1981, 1987)는 시업이 이루어지지 않은 임분에 대한 장기관측자료 없이도 임시표본점의 1회 조사에 의한 생장인자들로부터 최대임목본수 및 임분의 잠재생산력을 파악할 수 있는 방법을 발표한 바 있다. 본 연구에서는 이러한 Sterba(1975, 1981, 1987)의 이론을 Reineke(1933)의 임분밀도지수(Stand Density Index : SDI)이론과 함께 설명하고, Sterba 이론을 강원도지방 소나무 동령임분의 임시표본점 조사자료에 적용시켜 강원도지방 소나무 동령임분의 최대임목본수모델을 유도하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 재료

강원도지방의 소나무 동령임분 중에서 생육상태가 비교적 양호한 임분을 대상으로 103곳의 임시표본점을 설정하여 임분조사를 실시하였다. 한 표본점내에 30~40본의 임목이 포함되도록 표본점의 크기를 0.01 ha부터 0.1 ha 사이에서 정하였으며, 각 표본점에서는 임목에 대해 흉고직경 및 수고를 측정하였다. 우세목 수고는 각 표본점별로 추정되는 수고-흉고직경 함수식(이우균, 1996)으로부터 추정하였다. 즉, 직경을 순서대로 정렬하여 큰 직경급으로부터 20%에 해당하는 직경을 계산하고, 이를 수고-흉고직경 함수식에 대입하여 구한 수고를 우세목 수고로 하였다(Kramer와 Akca, 1995). 또한, 평균흉고직경은 단면적평균법(quadratic mean method)에 의해 추정하였으며, 수고-흉고직경 함수식에서 이 단면적평균직경(quadratic mean dbh)에 해당하는 수고를 평균수고로 하였다. ha당 본수, 흉고단면적, 재적등의 ha단위의 생장인자는 표본점내의 생장인자(본수, 평균 흉고단면적, 평균재적)를 ha 단위로 환산하여 추정하였다. 103 표본점의 자료의 주요 내용은 표1에 제시되어 있다.

2. 연구내용 및 방법

1) Reineke의 임분밀도지수(Stand Density Index : SDI)

Reineke(1933)는 간벌을 실시하지 않은 상태로 최대밀도에 도달한 임분(fully stocked stand)에서는 ha당 임목본수(N)와 평균흉고직경(dbh)간에는 다음과 같은 관계가 성립하며, 수종이나 임지에 관계없이 감소계수 β 는 약 -1.605를 지닌다고 하였다.

$$N = \alpha dbh^\beta \quad (1)$$

여기에서 흉고직경이 10 inch (25 cm)일 때의 임목본수를 임분밀도지수(Stand Density Index : SDI)라 하고 이를 임분밀도를 나타내는 척도로 활용할 것을 권하였다.

$$SDI = \alpha 25^\beta \quad (2)$$

식(1)과 (2)를 대수차변형식(algebraic difference form)으로 변환하면, 주어진 평균흉고직경(dbh)과 ha당 임목본수(N)에 대한 임분밀도지수(SDI)는 식(3)에 의해 추정되며, 주어진 임분밀도지수(SDI)에 대한 흉고직경(dbh)별 ha당 임목본수(N)는 식(4)에 의해 추정할 수 있게 된다.

$$SDI = N \left(\frac{25}{dbh} \right)^\beta \quad (3)$$

$$N = SDI \left(\frac{dbh}{25} \right)^\beta \quad (4)$$

이러한 Reineke의 방법을 최대본수 또는 밀도와 그에 따른 고사율 추정에 활용하기 위해서는 간벌을 실시하지 않은 상태에서 최대밀도에 도달한 임분에서 조사한 평균흉고직경과 ha당 임목본수 자료를 이용해야 한다. 그러나 일반적으로 간벌을 실시하지 않은 상태에서 최대밀도를 나타낸다고 인정되는 임분과 그로부터 조사된 자료의 확보에는 많은 어려움이 수반된다. 따라서 과거의 관리역사가 불분명하고 최대밀도에 도달한 임분이라는 명확한 근거가 없는 임분에서 조사된 자료를 활용할 경우, 평균흉고직경과 ha당 임목본수 자료 중에서 어느 자료가 최대밀도를 나타내는지 구분하는 것과 어느 자료를 Reineke의 임목본수 추정을 위한 회귀분석에 이용할 것인가를 결정하는 것이 어렵기 마련이다(Gadow와 Hui 1993).

Table 1. General description of stand data measured in 103 sample plot.

Variables	Mean	Minimum	Maximum	Std. Dev.	C.V.
Age (year)	37	18	87	14.7	39.8
Dbh (cm)	18.4	9.1	54.5	8.5	46.2
Mean height (m)	14.7	7.1	29.9	4.4	30.1
Dominant height (m)	15.9	8.4	31.0	4.6	29.2
No. of stem per ha (N/ha)	2083	260	6000	1156.3	55.5
Basal area per ha (m ² /ha)	40.0	22.2	91.1	11.6	29.1
Volume per ha (m ³ /ha)	283.9	104.4	932.5	132.5	46.7

Std. Dev. : Standard deviation, C.V. : Coefficient of variation

이러한 어려움 때문에 모든 자료를 Reineke의 임목본수추정식(식1)에 적합시킬 경우, 식(3)에 의해 추정된 임분밀도지수(SDI)가 그 임분의 최대밀도를 나타낸다는 근거를 제시할 수 없게 된다.

따라서 과거의 간벌여부에 대한 내용을 모르는 상태에서 비교적 밀하다고 판단되는 임분에서 조사된 자료를 이용하는 본 연구에서는 다음부터 설명하고자 하는 Sterba의 최대본수모델을 이용하여 최대임분밀도지수를 추정하였으며, Reineke의 임목본수모델(식1)은 이를 위한 보조식으로 활용하였다.

2) Sterba의 최대임목본수(Maximum stem number)

(1) 우세목수고에 따른 최대임목본수

Kira 등(1953)이 1년생 작물에서 식재밀도(p)와 생산량(w)간에는 $1/w = ap + b$ (a, b =계수)의 역상관 관계가 있다는 C-D효과(Competition Density Effect) 발표한 이후, 임분에서도 이러한 C-D효과를 이용하여 식재밀도로는 임목본수(N), 생산량으로는 평균재적(v)을 적용한 $v = 1/(aN + b)$ (a, b =계수)식을 이용하여 임분밀도와 재적생산량 간의 관계를 구명해 왔다(김도경외, 1987; 심동섭외, 1985, 1986, 1987).

Goulding(1972)은 평균재적(v) 대신에 흥고직경(dbh)을 적용할 때 밀도효과를 더 잘 설명할 수 있다고 하였으며(Sterba, 1975, 1981, 1987), 이 때 계수 a 와 b 는 우세목수고(h_o)의 함수로 나타낼 수 있다고 하였다.

$$dbh = \frac{1}{aN + b} \quad (6)$$

즉, 식(6)에서, a 와 b 를 각각 $a = a_0 h_o^{a_1}$, $b = b_0 h_o^{b_1}$ 와 같이 대체하면 식(7)과 같은 ha당 임목본수(N)에 대한 평균흉고직경(dbh)추정에 있어 우세목 수고(h_o)를 추가한 흥고직경발달식이 유도된다.

$$dbh = \frac{1}{a_0 h_o^{a_1} N + b_0 h_o^{b_1}} \quad (7)$$

Sterba(1975, 1981, 1987)는 이와 같은 흥고직경 발달식을 이용하여 우세목수고 및 평균흉고직경

에 따른 최대임목본수추정식을 유도하였다. 이를 위한 첫 단계로 식(7)로부터 추정되는 평균흉고직경(dbh)과 ha당 임목본수(N)로부터 ha당 흥고단면적(Basal Area : BA)을 다음과 같이 추정한다.

$$\begin{aligned} BA &= \pi \left(\frac{dbh}{200} \right)^2 N \\ &= \frac{\pi}{40000} \left\{ \frac{N}{(a_0 h_o^{a_1} N + b_0 h_o^{b_1})^2} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

일반적으로 한 임분에서 임목본수가 증가하면 ha당 단면적도 함께 증가하다가 어느 본수에 이르면 최고점에 접근하게 되고 이후로는 변화가 거의 없게 된다. ha당 단면적은 본수와 평균단면적으로부터 계산되는데, 거의 변화가 없는 ha당 단면적을 유지시키기 위해서는 두 요인 중이 하나가 감소되어야 한다. 임령이 증가하면 생장에 의해 우세목수고는 물론 평균흉고직경이 증가되고 이에 따라 평균단면적이 증가하게 되는데, 생장에 의한 이와 같은 평균단면적의 증가를 상쇄시키기 위해서는 임목본수의 감소가 일어나야 한다. 만약, 임목본수가 감소되지 않는다면 평균단면적이 감소되어야 하는데, 생장을 하는 임목에서는 일어날 수 없는 일이다(Sterba, 1981). 따라서 ha당 단면적이 최고에 달하는 밀도가 그 임분의 최대밀도가 되며, 이때의 본수가 그 임분이 유지할 수 있는 최대본수가 된다.

이때 단면적이 최고에 달하는 최대임목본수는 ha당 단면적식을 ha당 임목본수에 대해 1차 미분하고, 이 일차 미분식을 0으로 하는 ha당 임목본수를 구하면 된다. ha당 흥고단면적식(식8)을 ha당 임목본수(N)에 대해 1차 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\delta BA}{\delta N} = \frac{\pi}{40000} \left\{ \frac{b_0 h_o^{b_1} - a_0 h_o^{a_1} N}{(a_0 h_o^{a_1} N + b_0 h_o^{b_1})^3} \right\} \quad (9)$$

이 미분식(식9)을 0으로 하는 ha당 임목본수(N)를 구하면 다음과 같이 우세목 수고를 설명변수로 하는 최대임목본수(maximum stem number)식 또는 최대밀도(maximum density)식을 유도할 수 있다.

$$N_{\max} = \frac{b_0 h_o^{b_1}}{a_0 h_o^{a_1}} = \left(\frac{b_0}{a_0} \right) h_o^{(b_1 - a_1)} \quad (10)$$

a_1 이 b_1 보다 큰 이상 우세목 수고가 증가할수록 최대임목본수는 감소하게 된다. 즉, 인위적 간벌이 없어도 임목본수가 자연적으로 감소되면서 ha당 단면적은 최대치로 유지되는 것이다(Sterba, 1987).

(2) 우세목에 따른 최대단면적
식(10)의 최대본수(N_{\max})를 식(8)의 단면적(BA)식에 대입하면 우세목수고에 따른 최대단면적(BA_{\max})식이 유도된다.

$$BA_{\max} = \frac{1}{160,000} \cdot \frac{\pi}{a_0 b_0 h_o^{a_1 + b_1}} \quad (11)$$

이는 인위적인 간섭이 없는 상태에서 자연고사에 의해 유지되는 최대단면적(maximum basal area)을 의미하며, Assmann(1955, 1961)의 자연적 단면적(natural basal area)과도 같은 의미를 지닌다(Sterba, 1975).

(3) 우세목수고에 따른 최대 및 최소흉고직경
식(7)에서 ha당 임목본수 $N=0$ 으로 접근하면 평균흉고직경은 다음과 같이 계산되는데, 이는 경쟁이 없는 상태에서 자란 자유목 또는 고립목의 흉고직경생장을 의미한다. 반대로 ha당 임목본수 $N=1$ 무한대로 접근하면 평균흉고직경은 0에 접근하게 된다.

$$dbh_{\max} = \frac{1}{b_0 h_o^{b_1}} \quad (12)$$

또한, 식(10)의 최대임목본수(N_{\max})를 식(7)에 대입시키면 최대임목밀도 또는 최대임목본수를 유지시킬 수 있는 최소흉고직경(dbh_{\min})식을 유도할 수 있다.

$$dbh_{\min} = \frac{1}{2b_0 \cdot h_o^{b_1}} = \frac{dbh_{\max}}{2} \quad (13)$$

(4) 흉고직경에 따른 최대본수
Reineke의 본수곡선식과 비교하기 위해 식(13)을 우세목 수고(h_o)에 대해 끈 다음(식14), 이를 식(10)에 대입하면 식(15)와 같은 평균흉고직경에 따른 임목본수곡선식이 유도된다.

$$h_o = (2b_0 \cdot dbh_{\min})^{-1/b_1} \quad (14)$$

$$N_{\max} = \frac{b_0}{a_0} (2b_0)^{\frac{a_1}{b_1}-1} \cdot dbh_{\min}^{\frac{a_1}{b_1}-1} \quad (15)$$

이를 식(1)과 비교하면, Reineke식의 α 와 β 는 각각 다음과 같이 대응됨을 알 수 있다.

$$\alpha = \frac{b_0}{a_0} (2b_0)^{\frac{a_1}{b_1}-1} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{a_1}{b_1} - 1 \quad (17)$$

이와 같이 추정되는 α 와 β 는 최대임목밀도를 나타내는 임분에서의 평균흉고직경에 따른 본수감소를 나타낸다.

(5) Reineke의 최대임분밀도지수 추정

또한, 평균흉고직경 10 inch (25cm)일 때의 최대임목본수는 Reineke의 최대임분밀도지수(SDI_{\max})를 의미하므로 식(15)의 평균흉고직경(dbh)에 25cm를 대입하여 풀면 다음과 같이 최대임분밀도지수(SDI_{\max})를 추정할 수 있다.

$$SDI_{\max} = \frac{b_0}{a_0} (50b_0)^{\frac{a_1}{b_1}-1} \quad (18)$$

(6) 계수추정

식(1)은 양변에 log를 취하여 선형으로 전환한 다음 SAS의 REG 프로시저를 이용하여 계수를 추정하였다. Sterba의 평균흉고직경추정식의(식7) 경우는 SAS의 NLIN 프로시저를 이용하여 계수를 추정하였다. 또한, 식17을 b_1 에 대해 풀면,

$$b_1 = \frac{a_1}{\beta+1} \quad (19)$$

이 되므로 이를 식(7)에 대입하면 다음과 같이 계수가 3개인 평균흉고직경추정식을 유도할 수 있다. 여기에서 β 는 식(1)에서 추정된 β 를 적용하였으며, SAS의 NLIN프로시저를 이용하여 계수를 추정하였다.

$$dbh = \frac{1}{a_0 h_o^{\alpha} N + b_0 h_o^{\beta}} \quad (20)$$

결과 및 고찰

1. Reineke의 임목본수모델

1) 흥고직경에 대한 임목본수모델

식(1)에 log를 취하여 선형으로 전환한 후, 이를 SAS의 REG 프로시저를 이용하여 data에 적합시킨 결과 $\alpha = 163,349.648$, $\beta = -1.611470$ 으로 추정되었다(표2). 추정된 계수는 유의수준 0.0001에서 모두 유의한 것으로 판단되었으며, 추정식의 결정계수는 0.89로 비교적 높은 편이었다.

여기에서 감소계수로 불리는 β 는 임분의 임목본수유지력을 나타내는데, 클수록(절대치로는 작을수록) 본수의 감소정도가 낮으며, 같은 흥고직경에서 많은 임목본수를 유지시킬 수 있다(Gadow와 Franz, 1989). 즉, 임목의 생존력이 높고 상대적으로 고사율은 낮은 것이다. Gadow와 Franz(1989)에 의하면, 이러한 경우 강도의 간벌을 하더라도 흥고직경의 생장촉진을 크게 기대할 수는 없다고 한다. 또한, 계수 α 는 자연상태에서 유지시킬 수 있는 최대단면적의 수준을 의미하는 것으로 Assmann(1959)과 Schmidt(1973)에 의하면 임분의 수확 수준결정을 위한 척도로 활용될 수 있다고 한다(Gadow와 Franz, 1989).

Reineke에 의하면 같은 감소계수 β 는 수종, 임령, 지위 등에 관계없이 -1.605를 나타낸다고 했으나, 그간의 많은 연구에 의하면 수종이나 임지별로 약간의 차이가 있는 것으로 밝혀졌다(Gadow와 Franz, 1989). 본 연구에서 추정된 강원도 소나무의 β 계수는 -1.61147로서 Reineke의 β

계수 -1.605보다 약간 높은 것으로 나타났다.

2) 우세목수고에 대한 임목본수모델

우세목수고를 설명변수로 한 경우, 감소계수 β 가 흥고직경의 감소계수보다 다소 높은 -2.027로 추정되었다. 추정된 계수의 유의수준도 흥고직경을 설명변수로 하는 경우와 마찬가지로 0.0001에서 모두 유의한 것으로 판단되었다. 추정식의 결정계수는 0.72로 비교적 낮은 편이었으며, 추정치의 표준오차도 흥고직경을 설명변수로 하는 것보다 높게 나타났다. 이와 같은 통계적 적합성의 차이는 흥고직경을 설명변수로 하면 지위나 임령의 영향을 최대한 배제시킬 수 있다는 Reineke(1933)의 연구결과에서 찾을 수 있다. 즉, 흥고직경 - 임목본수관련을 이용하면 우세목수고 - 임목본수의 관계보다 임지환경의 영향을 더 많이 배제시킬 수 있다는 것을 암시하는 것이다.

2. Sterba의 평균흥고직경추정모델

표 3은 흥고직경추정모델(식7과 식20)의 추정계수 및 통계검정치를 나타낸다. 추정계수의 t - 검정 결과 식(7)에서는 추정계수의 유의수준이 비교적 높았다. 특히, 추정계수 a_0 의 경우 유의수준이 0.33으로 매우 높게 나타나 이보다 낮은 유의수준에서는 추정계수가 0이라는 귀무가설을 기각하지 못하여 a_0 의 변수인 우세목수고가 임목본수 - 흥고직경관계에 의미있는 영향을 주지 못하는 것으로 판명되었다. 그러나 식(20)과 같이 식(1)에서 추정된 β (-1,61147)를 식(19)에 대입하여 b_1 대신에 $a_1/-0.61147$ 을 변수로 하여 계수를 추정한 결과, 추정계수의 유의수준이 모두 0.0001로 매우 낮아 임목본수 - 흥고직경관계에 있어 우세목수고에 따른 차이가 있는 것으로 나타났다.

Table 2. Parameter estimates and related regression statistics for the stem number models.

Model (logarithmic form)	Parameter estimate		$\log - SEE$	$\log - R^2$
	α	β		
$N = \alpha dbh^{\beta}$ ($\ln N = \ln \alpha + \beta \ln dbh$)	163,498.648 (0.0001)	-1.611470 (0.0001)	0.05224	0.89
$N = \alpha h_o^{\beta}$ ($\ln N = \ln \alpha + \beta \ln h_o$)	430,654.748 (0.0001)	-2.026899 (0.0001)	0.13544	0.72

$\log - SEE$: standard error of estimate in linear regression of logarithmic form

$\log - R^2$: coefficient of determination in linear regression of logarithmic form

N : stem number per ha, dbh : diameter at breast height, h_o : dominant height

α , β : Coefficients, \ln : exponential log.

표 3과 같이 추정된 계수를 이용하여 각 모델에서 유도되는 최대임목본수모델의 계수를 표4와 같이 추정하였다. 식(7)과 식(20)의 경우, 같은 추정식이라 하더라도 추정된 계수의 차이 때문에 최대임목본수모델의 계수 역시 상이하게 추정되었다. 전반적으로 식(20)의 계수가 식(7)의 계수에 비해 다소 크게 추정되었으며, 이 결과 최대임목본수곡선 역시 차이를 나타내었다(그림 1, 그림 4). 또한, 식(20)에 의한 계수로부터 추정된 α (식16)와 β (식17)를 Reineke의 임목본수유도식(식1)의 α , β 와 비교할 경우, β 는 같은 반면 Sterba식에 의한 α 가 Reineke식에 의한 α 보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 Sterba식에 의한 임목본수곡선은 최대임목본수를 의미하는 반면, Reineke식에 의한 임목본수곡선은 관측치의 평균적인 임목본수를 의미하기 때문이다. 이에 따라 두 곡선의 감소경향은 같은 상태에서 Sterba식에 의한 본수곡선은 관측치의 상부를, Reineke식의 본수곡선은 관측치의 중앙을 지나는 것이다(그림 4).

3. 우세목수고에 따른 최대임목본수본수

그림 1은 우세목수고에 대한 최대임목본수곡선을 나타낸다. 비교를 위하여 임목본수 관측치와 이의 경향을 나타내는 회귀추정선을 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 식(10)에 의해 추정된 최대임목본수곡선은 모두 관측된 임목본수

의 상부를 지나고 있었다. 관측된 본임목수의 상부는 우세목수고별로 도달할 수 있는 최대임목본수를 나타낸다고 볼 수 있으므로 추정된 최대임목본수곡선은 임분의 최대임목본수를 잘 나타낸다고 할 수 있다. 식(20)에 근거한 최대임목본수가 식(7)에 근거한 최대임목본수에 비해 높은 값으로 시작하지만, 그 감소정도가 빨라, 우세목수고 20m, 흙고직경 18cm 전후에서는 식(7)에 근거한 최대임목본수와 비슷해지고 이후로는 약간 낮게 추정되었다. 그림 상으로는 어느 최대임목곡선이 더 적합한지를 파악할 수 없었으나 통계적으로는

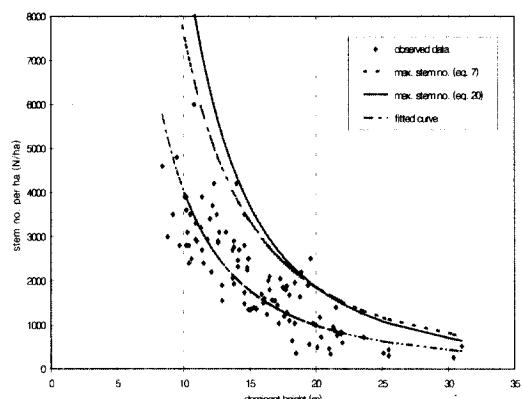


Fig. 1. Stem number per ha and maximum stem number curves over dominant height.

Table 3. Parameter estimates and related regression statistics for the dbh-growth models.

Model no.	Parameter estimate					SEE	R^2
	a_0	a_1	b_0	b_1			
7	0.0000019960 (0.3342)	0.653424005 (0.0607)	1.688386640 (0.0495)	-1.389883090 (0.0001)		1.9687	0.95
	0.0000009240 (0.0001)	0.911054030 (0.0001)	2.281415639 (0.0001)	-1.489940684 (calculated)			

SEE : standard error of estimate, R^2 : coefficient of determination

Table 4. Coefficients for maximum stem number model.

Index	Max. stem number			Max. SDI
	Variable	dominant height(h_o)	diameter at breast height (dbh)	
Coefficient	$\frac{b_0}{a_0}$	$b_1 - a_1$	$\alpha = \frac{b_0}{a_0} (2b_0)^{\frac{a_1}{b_1} - 1}$	$\beta = \frac{a_1}{b_1} - 1$
Equation 7	845,885.0902	-2.043307095	141,366.1813	-1.470128754
Equation 20	2,469,064.5440	-2.400994714	213,892.7029	-1.611470000
Function	$N_{max} = \left(\frac{b_0}{a_0} \right) h_o^{(b_1 - a_1)}$ (eq. 10)		$N_{max} = \alpha \cdot dbh^\beta$ (eq. 15)	$\frac{b_0}{a_0} (50b_0)^{\frac{a_1}{b_1} - 1}$ (eq. 18)

식(20)이 다소 양호함으로(표 2), 이의 계수에 근거한 최대임목본수추정식을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 2는 임목본수에 따른 흥고단면적관측치 및 추정선(식8), 최대흥고단면적(식11)을 5m 간격(10, 15, 20, 25, 30m)으로 구분한 우세목수고급별로 나타낸 것이다. 전체적으로는 우세목수고급이 증가될수록 임목본수는 감소되는 반면 단면적은 증가하고 있다. 이는 임령이 증가하면서 우세목수고도 증가하고 그에 따라 본수는 감소하지만 ha당 단면적은 증가하는 일반적인 경향을 반영하고 있는 것이다.

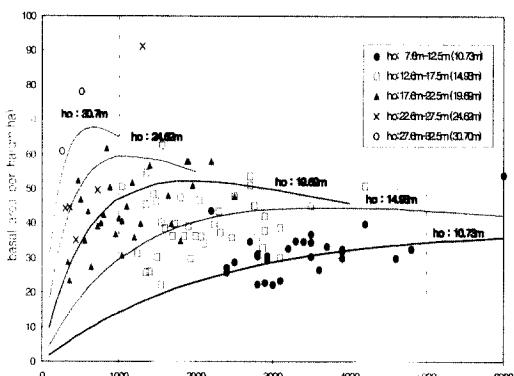


Fig. 2. Basal area curves over stem number per ha for various strata of dominant height, according to equation (8).

같은 우세목급이라 하더라도 임목본수나 단면적에서 변이를 보이고 있다. 측정오류나 표본오류가 그 원인 일수도 있는데, 이러한 오류가 없다는 가정 하에서는 자연적 임목감소, 즉 고사(mortality)는 밀도에 대해 연속적이 아니라 불연속적으로 일어난다는 데서 그 원인을 찾을 수 있다(Sterba와 Monserud, 1993). 즉, 이론적으로 고사는 밀도에 대한 연속적 과정(continuous process)으로 규정하지만 실제로는 그렇지 않다는 것이다. 예를 들어 기상조건이 안 좋은 해에 기상조건이 좋은 해보다 고사가 더 많이 발생할 수 있다는 것이다.

같은 우세목수고급에서는 임목본수가 증가됨에 따라 단면적도 함께 증가되는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향을 보다 면밀히 알아보기 위해 각 우세목수고급의 평균치를 식(8)에 대입하여 임목본

수에 따른 흥고단면적 추세선을 유도하였다. 흥고단면적 추세선은 각 우세목수고급별 흥고단면적 범위의 중앙부위를 지나면서 증가하다가 최고점에 달한 후에는 다시 감소하는 추세를 보여주고 있다. 각수고급별 최대흥고단면적을 식(11)에 의해 추정하여 각 추세선에 표시하였는데, 추세선은 이 최대흥고단면적까지 임목본수에 따른 단면적의 증가추세를 잘 나타내주고 있다. 이후로는 임목본수도 흥고단면적도 더 이상 증가되지 않는다. 이 점에서는 고사가 발생하게 되고 결국 최대임목본수(식10)와 그에 따른 최대단면적(식11)이 유지되는 것이다.

그림 3에는 우세목수고에 따른 최대 및 최소 흥고직경추세선을 관측자료와 함께 나타내었다. 식(13)에 의해 추정되는 최소흥고직경은 최대임목본수와 그에 따른 최대흥고단면적이 유지될 때의 흥고직경을 의미하며, 관측치의 하단부를 지나고 있음을 알 수 있다. 식(12)에 의해 추정되는 최대흥고직경은 경쟁을 받지 않는 고립목상태에서의 흥고직경을 의미하며 흥고직경분포의 상단보다도 약간 위를 지나고 있다. 이는 조사대상임분이 고립목상태가 아니라 임목간의 최소한의 경쟁이 있는 상태라는 것을 나타내 주는 것이다.

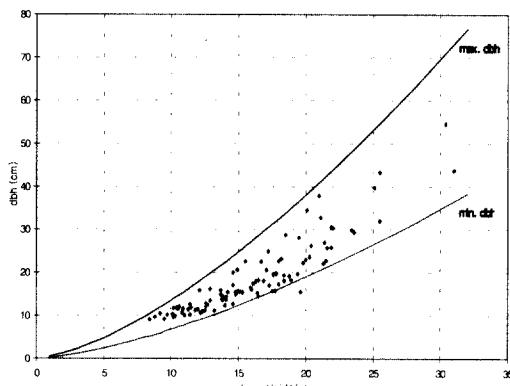


Fig. 3. Maximum and minimum dbh curve over dominant height.

4. 평균흥고직경에 따른 최대임목본수

그림 4는 식(7)에 의해 임목본수 및 우세목수고별로 추정되는 평균흥고직경과 식(15)에 의해 추정되는 최대임목본수곡선을 나타낸다. 가는 실선은 식(7)에 의해 ha당 임목본수에 대해 추정되는 평균흥고직경을 우세목수고(10m, 15m, 20m,

25m, 30m)별로 나타낸 것이다. 관측치의 가운데를 지나는 굽은 점선은 식(1)에 의해 흥고직경별로 추정되는 임목본수발달곡선을 나타낸다. 관측치의 최외곽을 지나는 굽은 점선과 실선은 흥고직경생장식(7)과 (20)으로부터 각각 유도된 최대임목본수모델(식15)에 의한 최대임목본수곡선을 나타낸다. 그럼에서 보는 바와 같이 최대본수곡선은 관측치의 상부를 지나고 있으며 우세목별로 추정된 흥고직경추정선의 최외곽선을 따라 흐르고 있다. 이는 한 임분이 유지할 수 있는 최대밀도를 의미하며, 임령이나 지위지수에 영향을 받지 않는 것으로 알려졌다(Sterba와 Monserud 1993).

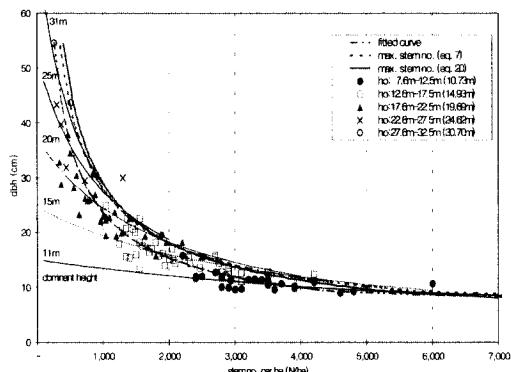


Fig. 4. Density effect curves for various strata of dominant height, maximum stem number curve, and fitted curve with observed dbh data over stem number per ha.

그림 5는 흥고직경-임목본수의 관계에서 일반적으로 사용하는 log형태의 그림이다. Reineke의 임분밀도지수와 비교하기 위해 식(3)에 의해 Reineke의 임분밀도지수별로 추정되는 본수발달선을 함께 나타내었다. 식(15)에 의해 흥고직경별로 추정되는 최대임목본수(N_{\max})는 Reineke의 임분밀도지수별 임목본수식(식3)에 식(18)에 의해 추정되는 최대임분밀도지수(SDI_{\max})를 대입한 임목본수와 같다. 강원도지방 소나무의 경우, SDI_{\max} 는 1,195로 추정되었는데(표3), 이는 흥고직경 25cm일 때 유지될 수 있는 최대임목본수를 의미하는 것으로서 한 임분에서 도달할 수 있는 최대임분밀도를 지수화한 것이다. Sterba가 제시한 이러한 SDI_{\max} 추정방법은 최대밀도에 도달한 임분자료를 근거로 하는 것이 아니라 다양한 밀도를 나타내는 임

분으로부터 조사된 자료를 근거로 한다는 데 특징이 있다(Sterba, 1987). 이와 같이 추정되는 SDI_{\max} 는 지위지수와 함께 임지생산능력을 파악하는 기준으로 활용될 수 있으며(Hasenauer 등, 1994; Sterba, 1987; Sterba와 Monserud, 1993), Assmann(1966, 1970)의 수확수준(yield level)과도 유사한 의미를 지닌다(Hasenauer 등, 1994; Sterba, 1975). 우세목수고에서 도달할 수 있는 총생장량을 수확수준이라 하며(Assmann, 1966, 1970), Assmann은 자연 또는 최대임분밀도에서도 도달할 수 있는 총생장량을 수확수준으로 할 것을 권고하고 있다(Assmann과 Franz 1963; Sterba, 1975). 또한 SDI_{\max} 를 이용하여 수종별, 지위별 최대잠재밀도(maximum potential density)를 비교할 수 있다(Sterba 1987; Sterba와 Monserud, 1993).

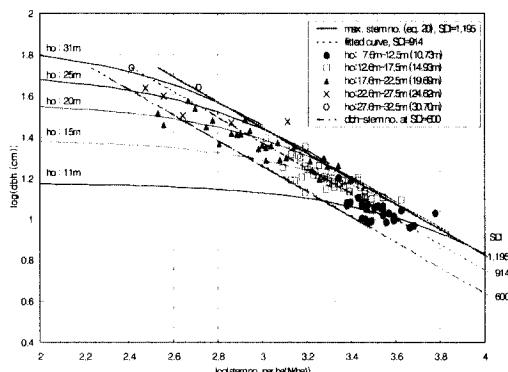


Fig. 5. Density effect lines for various strata of dominant height, maximum stem number line, and fitted line with observed dbh data over stem number per ha, in logarithmic scale.

결 론

본 연구에서는 ha당 흥고단면적이 최대가 되는 임목본수가 그 임분이 유지시킬 수 있는 최대임목본수라는 Sterba의 이론을 강원도지방 소나무의 일시조사자료에 적용시켜 강원도지방 소나무 동령임분의 최대임목본수 및 고사모델을 유도하였다.

ha당 임목본수와 우세목수고를 변수로 하여 평균흥고직경을 추정하는 평균흥고직경식의 결정계

수가 0.95로 높고, t-분석에 의한 추정계수의 유의수준은 모두 0.0001로 매우 낮아 이 평균홍고직경식의 통계적 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

이 평균홍고직경식으로부터 유도되는 ha당 홍고단면적식은 ha당 임목본수의 변화에 따른 ha당 홍고단면적의 변화를 우세목수고별로 잘 나타내주었다. 한 우세목수고급에서는 ha당 임목본수가 증가할수록 ha당 홍고단면적이 증가하다가 최대점에 도달하고는 다시 감소하는 경향을 보여, ha당 홍고단면적이 최대가 되는 임목본수가 한 임분이 유지시킬 수 있는 최대임목본수임을 잘 나타내주었다. 또한, 전체적으로는 우세목수고급이 증가할수록 ha당 임목본수는 감소하는 반면, ha당 홍고단면적은 증가하는 추세를 보였다.

이러한 생장원칙에 입각하여 ha당 홍고단면적식을 ha당 임목본수에 대해 미분하고, 이를 0으로 하는 ha당 임목본수로부터 추정한 우세목수고 및 홍고직경에 따른 최대임목본수곡선은 임목본수 관측치의 상부를 지나면서 임분의 최대임목본수를 잘 나타내 주었다.

평균홍고직경에 대한 최대임목본수식에 평균홍고직경 25cm를 대입하면 홍고직경 25cm일 때 유지될 수 있는 최대임목본수를 의미하는 최대임분밀도지수를 추정할 수 있으며, 이를 임분의 최대잠재밀도를 나타내는 지수로 활용할 수 있다.

본 연구에서 제시한 최대임목본수식 및 최대임분밀도지수식은 최대밀도에 도달한 임분자료를 근거로 하는 것이 아니라 다양한 밀도를 나타내는 임분으로부터 조사된 자료를 근거로 한다는 특징이 있으며, 이를 이용하면 고사량추정, 최대잠재생산량추정 등 임분밀도관리에 필요한 정보를 마련할 수 있다.

인 용 문 헌

1. 김도경, 김종원, 박승걸, 오민영, 유진행. 1987. 소나무 천연치수임분의 생장해석과 적정밀도관리기준 설정에 관한 연구. 임시연보 34 : 32-40
2. 심동섭, 박찬우, 이홍균, 김사일. 1985. 잣나무 임분밀도관리도 제작에 관한 연구. 임시연보 32 : 38-48
3. 심동섭, 박찬우, 이홍균, 김사일. 1986. 낙엽송 임분밀도관리도 제작에 관한 연구. 임시연보 33 : 1-12
4. 심동섭, 박찬우, 이홍균, 김사일. 1987. 리기다

소나무 임분밀도관리도 제작에 관한 연구. 임시연보 34 : 12-21

5. 이우균. 1996. 강원도지역 소나무의 임분 및 일반 수고-홍고직경곡선 모델. 산림경제연구 4(2) : 66-78
6. Assmann, E. 1955. Die Bedeutung des "erweiterten Eichhorn'schen Gesetzes" für die Konstruktion von Ertragstafeln. Forstw. Centralblatt 74 : 321-330
7. Assmann, E. 1959. Höhenbonität und wirkliche Ertragsleistung, Forstw. Centralblatt 78(1/2) : 1-20
8. Assmann, E. 1961. Waldertragskunde. BLV Verlag. München-Bonn-Wien
9. Assmann, E. 1966. Die Schätzung jetziger und künftiger Ertragsleistungen. Forstw. Centralblatt 85 : 353-371
10. Assmann, E. 1970. The principles of forest yield studies. Pergamon Press, Oxford. 506p
11. Assmann, E. and F. Franz. 1963. Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Inst. f. Ertragskunde der Forstl. Forsch. Anst., München.
12. Gadow, K.v. and F. Franz. 1989. Studien zur Durchmesser-Stammzahl-Grenzbeziehung in Kiefern-und Eucalyptusbeständen Südafrikas. Forstarchiv (60) : 74-77
13. Gadow, K.v. and G. Hui. 1993. Modelling Survival and Potential Density in Cunninghamia lanceolata. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 110(2) : 41-48
14. Goulding, C.J. 1972. Simulationtechnique for a stochastic model of growth of Douglas-fir. Ph.D. thesis. Univ. of. B.C., Vancouver. 185p
15. Hasenauer, H., H. Burkhart and H. Sterba. 1994. Variation in Potential Volume Yield of Loblolly Pine Plantations. Forest Science 40(1) : 162-176
16. Kramer, H. and A. Akca. 1995. Leitfaden zur Waldmeßlehre. J.D. Sauerländer's Verlag. 266pp
17. Kira, T., H. Ogawa, and N. Sakazaki. 1953. Intraspecific competition among higher plants. I. Competition-yield-density interrelationship in regularly dispersed populations. J. Inst. Polytechn. Osaka City Uni. D4 : 1-16

18. Reineke, L.H. 1993. Perfecting a stand density index for even aged forests. *J. Agric. Res.* 46 : 627-638.
19. Schmidt, A. 1973. Ertragsniveau und Standort, dargestellt am Beispiel der Kiefer. *Forstw. Centralblatt* 92 : 268-274
20. Sterba, H. 1975. Assmanns Theorie der Grundflächenhaltung und die "Competition-Density-Rule" der Japaner Kira, Ando und Tadaki. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 92(1) : 46-62
21. Sterba, H. 1981. Natürlicher Bestockungsgrad und Reinekes SDI. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 98(2) : 101-116
22. Sterba, H. 1987. Estimating Potential Density from Thinning Experiments and Inventory Data. *Forest Science* 33(4) : 1022-1034
23. Sterba, H. and R.A. Monserud. 1993. The Maximum Density Concept Applied to Uneven-Aged Mixed-Species Stands. *Forest Science* 39(3) : 432-452