

## 정기평균생장을 이용한 잣나무 임분의 흉고직경 생장예측모델 및 고사예측모델의 개발

김선영<sup>1,2</sup> · 설아라<sup>1</sup> · 정주상<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 산림과학부, <sup>2</sup>서울대학교 농업생명과학연구원

## Development of Diameter Growth and Mortality Prediction Models of *Pinus Koraiensis* Based on Periodic Annual Increment

Seonyoung Kim<sup>1,2</sup>, Ara Seol<sup>1</sup> and Joosang Chung<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921 Korea

<sup>2</sup>Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921 Korea

**요약:** 본 연구는 기존의 잣나무임분 거리독립 개체목 생장모델을 개선하기 위해 수행되었다. 직경생장함수 및 고사율함수의 매개변수들을 고정표본점의 정기평균생장량을 토대로 추정하고, 이 함수들의 특성을 기존의 총평균생장량을 토대로 추정한 모델과 비교하였다. 여기서 생장함수는 수관율함수, 잠재직경생장함수 및 임분을 구성하는 임목간 경쟁효과를 고려하기 위한 수정율함수를 의미한다. 고사율예측함수의 경우에는 고정표본점 자료의 한계로 인해 정기평균생장량 측정값을 구할 수 없어 대신 총평균생장량과의 관계식을 추정하여 대체하여 적용하였다. 연구결과 정기평균생장량을 토대로 하는 직경생장함수가 총평균생장량을 토대로 추정한 함수에 비해 개체목의 생장특성을 보다 현실적으로 반영하는 것을 보여주었다. 고사율함수의 경우, 총평균생장량을 적용하여 개발한 경우 고사율이 과대한 것으로 나타나는 문제가 있었으나 새로운 모델에서는 이 문제가 개선된 것으로 나타났다.

**Abstract:** The objective of this study was to improve the performance of the existing individual-tree/distant-independent stand growth model in predicting the growth of *Pinus koraiensis* forest stands. The parameters of diameter growth and mortality prediction models were estimated using periodic annual increment (PAI) of permanent plots and the performance of the models were compared with that of the existing ones using mean annual increment (MAI). The diameter growth model includes crown ratio, potential diameter growth and modifier to compute for competitions of trees of a stand. In deriving the mortality prediction model, the parameters were estimated based on PAI which was also estimated as the function of MAI due to the lacking of permanent plot data. The results of this study showed that the newly-estimated functions based on PAI provide more realistic patterns in diameter growth of individual trees. The new approach using PAI in mortality model seems to overcome the over-estimate problem by the MAI-based model in estimating mortality of stand trees.

**Key words :** individual-tree stand growth model, diameter growth, mortality, *Pinus koraiensis*

### 서론

임분생장 및 수확예측모델은 임분의 생장여건 변화에 따른 생산력을 예측하고 평가하기 위한 것으로 임분단위 산림자원경영의 의사결정에 매우 유용한 도구가 된다. 따라서 이미 오래 전부터 임학에서는 임분의 생장을 예측하

고 이를 토대로 수확량을 예측하기 위한 노력을 해왔다. 그러나 이를 위해 요구되는 방대한 자료 수집의 문제는 물론, 시·공간상에서 발생하는 복잡한 임분동태의 구조적 변화를 해석하기 위한 방법론상의 문제로 인해 많은 제약이 있었다.

하지만 구미나 유럽 등에서는 20세기 말부터 전산과학의 발달과 함께 임분의 성장을 예측하기 위해 보다 정교한 모델들을 개발하여 다양한 산림경영 문제에 적용하고 있다. 즉, 이들은 기존의 전 임분모델(whole-stand model)이나 경급분포모델(diameter-class distribution model) 등에

이 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호: S120506L0101104)’의 지원에 의하여 수행되었음.

\*Corresponding author

E-mail: jschung@snu.ac.kr

서 한계로 지적되던 임분의 개체목간 경쟁을 고려하여, 임목의 고사 및 생장을 예측할 수 있는 다양한 형태의 개체목중심 임분생장모델(Individual-tree stand growth and yield model)을 개발하여 임업현장에서 활용하고 있다.

이러한 모델개발의 예로 Belcher *et al.*(1982), Gary(1981), Stage(1973) 등이 단순림 혹은 혼효림을 대상으로 개발한 인벤토리 기반의 개체목생장모델과 Botkin *et al.*(1972), Pacala *et al.*(1993), Bugmann *et al.*(1997) 및 Weishampel and Urban(1996) 등이 개발한 임분의 지리생리학적 조건을 고려한 모델들을 들 수 있다. 이 모델들은 임분 내 각 개체목의 경쟁을 계량화하여 생장 및 고사에측모델에 반영함으로써 흉고직경의 분포 변화를 예측하기 때문에 임분 생장 및 산림사업 효과에 대해 보다 구체적인 정보제공이 가능하다는 장점이 있다.

최근 들어 국내에서도 개체목 생장모델과 관련한 연구 결과가 제시되고 있다. 이우균(1996)은 개체목간 경쟁지수 산정 및 흉고직경 예측에 관한 연구를 수행하였고, 신만용 등(2003)은 임분의 고사확률함수를 예측하는 연구결과를 보고한 바 있다. 특히, 권순덕 등(2003)은 Belcher *et al.*(1982)에 의해 완성된 미국 농무성의 STEMS(Stand and Tree Evaluation and Modeling System)를 원형으로 하여 국내적용을 위한 수정된 형태의 거리독립 생장함수를 개발하였다.

이러한 국내의 연구들은 개체목 생장모델 개발에 필요한 접근 방법론의 개발이라는 측면에서 그 의미가 크다고 할 수 있다. 반면 국내의 연구 여건상 모델개발에 요구되는 모수추정에 요구되는 자료가 미비하여 정교한 모델개발에 한계가 있다. 즉, 모수 추정을 위해 오랜 기간 동안 다양한 임분조건의 고정표준지 등에서 수집되는 임분정보가 필요하지만 국내 여건상 축적된 자료가 매우 미흡한 실정이다.

따라서 권순덕 등(2003)은 이러한 문제를 해결하기 위해 임시표준지에서 수집한 자료로부터 총평균생장량(MAI; Mean Annual Increment)을 산출하고, 이 자료를 토대로 수관율, 흉고직경 및 고사율 함수 등의 모수를 추정하였다. 그 결과 MAI 값을 활용하여 추정된 현실 흉고직경생장곡선이 전체적으로 S형 곡선의 형태는 유지하지만 임

분의 밀도조절 등에 따른 영향이 매우 둔감한 추세를 보이는 경우가 있다. 이는 MAI가 기간별 생장특성을 나타내기 보다는 현재까지의 총생장을 평균적으로 설명함으로써 생장년수 동안의 각종 변화에 대한 정보를 축약하기 때문이다.

특히 임분 혹은 개체목의 활력도와 밀접하게 관련되는 고사율의 경우에는 Hasenauer(2006), Buchman(1979) 등에서와 같이 최근의 정기평균생장량(PAI; Periodic Annual Increment)에 의해 활력도를 간접적으로 평가하는 방식을 적용하는 것이 일반적이다. 하지만 국내 여건상 산림사업에 의한 간섭이 없이 3회 이상 반복 측정된 고정표본점 자료를 찾기 어려운 실정으로 이를 대체할 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 잣나무 고정표본점 자료로부터 산출한 PAI 값을 이용하여 개체목 흉고직경 생장에측함수의 모수를 추정하고자 하였다. 특히 고사율함수 추정에 요구되는 PAI 산출을 위한 2회의 반복 측정 및 개체목의 생존여부 판정을 위한 조사(status measurement) 자료가 미비하므로 이를 대체하기 위해 MAI로부터 PAI를 추정하기 위한 함수를 도출하여 적용함으로써 모형을 추정하였다. 이를 통해 도출된 각 구성함수의 특성을 규명하고, 기존 연구결과와의 비교분석을 통해 생장함수의 적합성을 검토하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 임분 자료

본 연구에서는 서울대학교 태화산 연습림(경기도 광주시)의 잣나무 임분에서 측정된 8개의 고정표준점 자료(총 1,963본)를 이용하였다(Table 1). 이 고정표준점 자료들은 1977년부터 5년 간격으로 측정되었으며 본 연구에서는 간벌 등 산림사업에 의한 간섭이 발생하기 이전의 자료만을 대상으로 2시기에 걸쳐 반복하여 측정된 자료만을 추출하여 사용하였다. 대상 임분은 1952년부터 1961년 사이에 조립되었으며, 간벌은 87년, 92년, 97년에 걸쳐 1차 또는 2차에 걸쳐 시행되었다. 간벌 등의 간섭이 배제된 임분만을 선택한 것은 간벌에 의해 일시적으로 직경생장이 증가

Table 1. Summary of stand statistics for the study area.

Variables	Initial measurement			Second measurement			Periodic annual increment (cm/yr)	Site index*	Plot size (ha)
	Stand age (year)	Stand mean DBH (cm)	Stand density (trees/ha)	Stand age (year)	Stand mean DBH (cm)	Stand density (trees/ha)			
Mean	25.4	17.0	1,021.0	30.4	19.1	979.6	0.44	15.5	0.37
St. dev.	6.7	4.6	214.6	6.7	4.3	198.3	0.37	1.8	0.09
Min.	16.0	10.4	778.6	21.0	13.3	731.0	0.00	14.0	0.23
Max.	36.0	23.4	1,352.2	41.0	25.2	1,287.0	2.94	18.0	0.46

\*Base age of site index is 30 years.

**Table 2. Statistics of additional field survey data for crown ratio.**

No. of plots (trees)	Variables	DBH (cm)	Total height (m)	Crown base height (m)	Crown ratio	Basal area (m <sup>2</sup> /ha)
37 (1,487)	Mean	14.8	9.8	4.4	0.56	22.7
	St. dev.	4.8	2.3	1.7	0.11	6.0
	Min.	2.6	3.0	0.7	0.15	11.0
	Max.	31.7	16.8	8.7	0.89	33.2

하는 효과를 배제하기 위해서였다.

한편 Table 1의 고정표본점 자료에는 지하고에 대한 정보가 누락되어 있다. 이 연구에서 잠재직경성장함수를 추정하기 위해서는 수관율에 대한 정보가 반드시 요구되므로 부득이 연구대상지에서 37개의 표본점(총 1,487본)을 추가적으로 조사하고 수관율함수의 추정에 사용하였다. Table 2에는 이 표본점들에서 측정된 흉고직경, 수고, 지하고의 통계치와 이를 토대로 산출한 수관율 및 흉고단면적이 나타나 있다.

## 2. 성장함수모형의 선정

본 연구에서는 Table 3에서와 같이 인벤토리 기반의 거리독립 개체목성장모델인 STEMS모델(Belcher *et al.*, 1982)을 구성하는 함수식들을 원형으로 이용하였다. 이 모델에서는 Holdaway(1986)가 개발한 모형에 의해 임분의 단위면적당 흉고단면적(Basal area,  $BA$ )과 흉고직경(Diameter at breast Height,  $DBH$ )의 함수관계에 의해 수관율(Crown ratio,  $CR$ )을 추정하고, 잠재직경성장(Potential diameter growth,  $PG$ )은 Hahn and Leary(1979)의 모형에 따라 흉고직경, 수관율 및 지위지수(Site index,  $SI$ )의 함수관계에 의해 그리고 잠재직경생장을 보정하기 위한 Holdaway(1984)의 수정율(Modifier,  $MOD$ )은 임분의 평균 흉고직경(Average diameter,  $AD$ ), 단위면적당 흉고단면적, 최대흉고단면적(maximum basal area,  $BA_{max}$ ) 및 흉고직경의 함수관계로 표현되어 있다.

한편 개체목의 고사 여부를 나타내는 고사율(Mortality,  $M$ )은 Buchman(1979)이 제안한 방식에 따라 개체목의 크기나 입지환경에 따른 활력도 혹은 성장율에 의해 결정된다는 가정 하에 고사율을 성장율 및 흉고직경의 함수관계로 표현한 모형을 사용하였다. 즉, Buchman(1979)은 고사율함수를 추정하기 위해 4개의 모형을 선택하고, 각 수준의 특성에 따라 이중 하나를 선별하여 사용하였다. 본 연구에서는 잣나무의 흉고직경성장율이 흉고직경의 크기에 의해 영향을 받는다는 가정 하에 Table 3에 제시된 모형을 선정하였다.

## 3. 성장량 산출

본 연구에서 임분의 수관율은 Holdaway *et al.*(1979)의 정의에 의해 흉고단면적 및 평균 흉고직경의 함수관계로 결정하였다. 잠재직경생장은 Hahn and Leary(1979)가 제

**Table 3. The forms of individual-tree growth functions.**

Function	Parameter estimates
Crown Ratio	$CR = b_1 \left[ \frac{1}{1 + b_2 BA} \right] + b_3 [1 - \exp(-b_4 DBH)]$
Potential Diameter Growth	$PG = b_1 DBH^{b_2} + b_3 SI \cdot CR \cdot DBH^{b_4} + b_5$ $MOD = 1 - \exp\left(-[f(X_1) \cdot g(X_2)] \left[ \frac{BA_{max} - BA}{BA} \right]^{0.5}\right)$
Modifier	where $f(X_1) = b_1 \left[ 1 - \exp\left(b_2 \frac{DBH}{AD}\right) \right]^{b_3} + b_4$ $g(X_2) = b_5 (AD + 1)^{b_6}$
Mortality	$M = \frac{1}{1 + \exp(b_1 + b_2 (PG \cdot MOD)^{b_3} + b_4 DBH)} + b_5$

$DBH$ =initial tree d.b.h.;  $SI$ =plot site index;  $CR$ =tree crown ratio;  $BA_{max}$ =maximum basal area per hectare for a species;  $BA$ =current basal area per hectare;  $AD$ =average stand diameter

안한 바와 같이 임분의 우세목 및 준우세목 직경생장의 95% 수준에 달하는 성장량으로 정의하였다. 즉,  $i$ 가 지위지수, 수관율 및 흉고직경의 교차급간이라고 할 때,  $\Delta D_i$ 는 급간  $i$ 의 평균 직경성장량, 그리고  $S_{\Delta D_i}$ 는  $\Delta D_i$ 의 표준편차이고 잠재적인 흉고직경의 생장은  $PG_i = \Delta D_i + 1.65 S_{\Delta D_i}$ 로 산출하였다. 예를 들어, 지위지수 16, 수관율 0.5, 흉고직경 20 cm인 급간에 해당하는 개체목들을 대상으로 PAI의 평균과 표준편차를 산출함으로써 해당급간의 잠재직경생장을 추정하였다. 또한 수정율은 Holdaway(1984)의 정의에 의해 PAI를 추정된 잠재직경성장량으로 나누어 산출하였다.

## 4. 고사율 산출

Buchman(1979) 등은 개체목의 활력도를 흉고직경의 연평균성장량 혹은 PAI에 의해 판단하였으며, 본 연구에서도 Buchman이 제안한 방식을 적용하고자 하였다. 그의 방법에 따르면 앞선 2시기 동안( $t_1$  및  $t_2$ ) 표본점 매목조사를 통해 PAI를 산출하고, 제3시기인  $t_3$ 에 PAI에 따른 개체목의 생존여부를 판단해야 한다. 즉, 각 개체목의 PAI를 구한 후 PAI의 크기에 따라 구간을 나누고, 각 PAI 구간별 개체목의 생존본수에 의해 고사율을 산출하는 방식이다.

Buchman(1979)에 따르면 각 PAI 구간에 대한 고사율( $R$ )은 아래 식 2에 의해 생존율( $SR$ )을 구하면  $R=1-SR$ 에

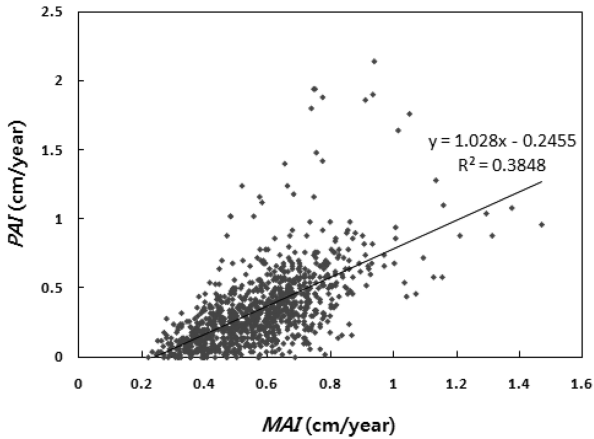


Figure 1. Relationship between PAI and MAI.

의해 결정할 수 있다. 아래 식에서  $t_1$ 은 개체목의 생존여부를 판단하는 시점( $t_3$ )까지의 경과년수,  $N_i$ 는  $t_2$ 에서의 생존본수,  $S_i$ 는  $t_3$ 에서의 생존 본수를 의미한다.

$$\sum S_i = \sum (N_i \cdot SR^i) \quad (1)$$

즉 위와 같이 고사율함수를 추정하기 위해서는 3시기의 산림조사가 필요하지만 본 연구에서 사용한 고정표본점 자료는 간벌사업에 의한 간섭을 받기 전 2시기의 자료만이 유효하였다. 따라서 2시기의 자료만을 이용하여 3시기 자료에서 이용가능한 개체목의 활력도(PAI)와 생존여부를 모두 판단할 수 있도록 하기 위해 PAI를 MAI와의 함수관계에 의해 Figure 1과 같이 별도로 추정하여 사용하는 방안을 고안하였다. 이는 2시기 자료에 대한 임령 자료가 있었기 때문에 가능하였으며, 추정식은  $PAI=1.028 \cdot MAI-0.2455$  ( $r^2=0.38$ )로 도출되었다.

5. 모수의 적합성 검증

본 연구에서 추정된 모수들은 적합도 지수를 이용하여 통계적 적합성을 검증하였으며, 적합도 지수는 다음과 같이 산출하였다.

$$FI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

또한, 기존 연구와의 모형별 예측 패턴을 비교함으로써 예측모델의 현실성을 검토하고자 하였는데 이는 통계적 적합성 검증만으로는 PAI를 이용한 개체목 성장모델의 현

실적 타당성을 설명하기 어렵기 때문이다.

결과 및 고찰

1. 생장 및 고사율 함수의 추정

Table 4는 각 생장함수에 대한 모수추정 결과를 보여준다. 이 표에 의하면 추정함수의 결정계수( $R^2$ )가 수관율함수, 수정율함수, 고사율함수, 잠재직경생장함수의 순으로 나타났으며, 모든 함수식은 유의수준 5%에서 유의한 것 ( $P<0.0001$ )으로 나타났다. 이 중 잠재직경생장함수의 결정계수가 0.11로 매우 낮게 추정되었는데 이것은 임분 우세목 및 준우세목의 흉고직경 생장 측정 자료의 수가 충분히 많지 않은 것에 기인할 수도 있지만, Table 3에 나타난 바와 같이 흉고직경, 수관율 및 지위지수의 복잡한 함수관계로 정의되는 잠재직경생장함수의 특성에 의해 나타나는 것이라고도 볼 수 있다. 즉, 자체적으로 변이가 심한 각 생장관련 인자들의 복합적 교호작용에 의해 영향을 받게 되므로 그만큼 변이가 커질 수 있는 것이다.

이처럼 낮은 설명력에 대해서는 미국 오대호 연접지역에서 26개 수종에 대해 잠재직경생장함수를 추정한 Hahn and Leary(1979)의 연구에서 유사한 결과를 볼 수 있다. 그들이 추정한 함수의 설명력이 수종에 따라 0.17의 매우 낮은 값에서부터 0.74까지 비교적 높은 값의 범위에 분포함으로써 수종에 따라 변이의 폭이 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 국내의 예로 권순덕 등(2003)이 추정한 낙엽송 및 잣나무의 잠재직경생장함수의 설명력이 각각 0.17 및 0.26의 낮은 값을 보이고 있다.

또한 Table 4에서 보면 잠재직경생장함수의 모수 중 지위지수와 수관율의 모수가 매우 작은 값을 보이고 있는데, 이것은 작은 수의 고정표본점 및 동령림의 특성에 의해 개체목간 수관율의 변이가 낮은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

2. 수관율함수의 특성

Figure 2는 잣나무 임분의 수관율이 흉고직경 및 흉고단면적에 의해 어떻게 영향을 받는지를 보여주는데, 이 그림에서 실선은 본 연구에서 추정한 수관율함수이며, 점선은 권순덕 등(2003)이 추정한 함수이다. 본 연구에서 추정

Table 4. Parameter estimates of growth functions for *Pinus koraiensis*.

Function	Parameter estimates						R <sup>2</sup>
	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	
Crown Ratio	0.3733	0.0346	0.3532	0.1295	-	-	0.76
Potential Growth	0.8318	-0.00088	1.8062	0.00232	0.9899	-	0.11
Modifier	1.1761	-1.0000	1.7838	0.4498	0.1499	0.5265	0.84
Mortality	1.7768	277.6	2.7561	0.0351	0.00527	-	0.59

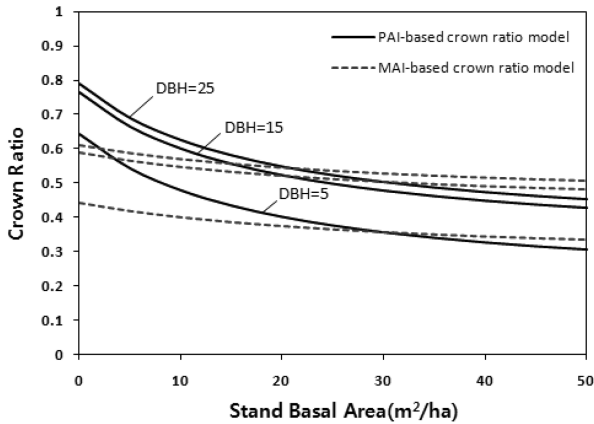


Figure 2. Crown ratio in relation with stand basal area.

한 함수는 대체로 성장초기에는 수관율의 감소속도가 상대적으로 빠른 반면 시간이 지날수록 그 속도가 저하된다. 반면 권순덕 등에 의한 추정 곡선은 거의 직선에 가까운 형태를 보이고 있다. 또한 이 그림에서 수관율은 임분의 흉고직경이 커질수록 높아지는 경향을 보이고 있으나 흉고직경이 커질수록 수관율에 미치는 영향이 빠른 속도로 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이러한 변화는 임분의 성장과 함께 울폐지수가 높아지면서 자연 낙지 등에 의해 수관율의 변화가 크게 줄어드는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

### 3. 잠재직경성장함수의 특성

Table 3에서와 같이 잠재직경생장은 임목의 흉고직경, 지위지수 및 수관율의 함수관계에 의해 결정되며, 그러한 관계에 따른 곡선함수가 Figure 3에 나타나 있다. 이 그림에서 실선으로 표현된 곡선은 본 연구에서 PAI를 이용하여 추정된 함수이며, 점선은 권순덕 등(2003)에 의해 MAI를 이용하여 추정된 함수이다. 두 연구에서 추정된 함수는 매우 유사한 포물선 형태를 보이고 있으나 본 연구에서 추정된 잠재직경성장함수는 권순덕 등(2003)의 함수에 비해 상대적으로 초기 생장이 느린 반면 성장율의 저하속도가 많이 빠른 것으로 나타나고 있다. 이러한 성장패턴의 차이는 본 연구에서 연평균직경성장량으로 PAI를, 권순덕 등(2003)의 경우에는 MAI를 적용한 것에 기인한 것으로 보인다. 일반적으로 개체목의 성장함수 추정에 PAI를 사용하는데 이것은 임목생장이 총성장기간의 평균적 성장패턴보다는 각 시기별 성장패턴에 민감하게 반응하기 때문이다.

한편 Figure 3에서 잠재직경생장은 임목의 흉고직경이 작을 때는 성장속도가 점차 증가하다가 일정 시점의 DBH에서 극대점에 도달하고 이 후 성장속도가 빠르게 감소하는 경향을 보인다. 또한 지위지수가 높을수록 그리고 수관율이 클수록 잠재성장율이 높은 값을 보이는 경향이 있

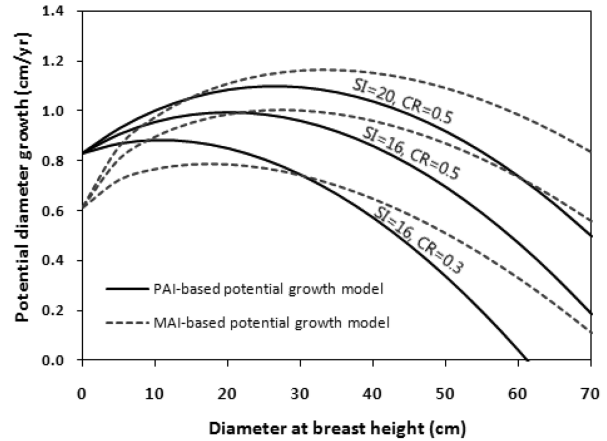


Figure 3. Potential diameter growth as the function of DBH.

다. 이 그림에서 지위지수는 30년을 기준임령으로 결정된 값이다.

### 4. 수정율함수의 특성

수정율은 개체목간 경쟁이 없는 입지조건 하에서 결정된 잠재직경생장에 개체목간 경쟁정도를 고려하여 현실 임분에 속한 임목들의 직경생장을 산출하기 위한 인자이다. Figure 4에서 실선은 본 연구에서 추정된 수정율곡선 함수이며, 점선은 권순덕 등(2003)이 추정된 곡선함수를 보여준다. 이 그림에서 상대흉고직경이 0.5일 때 권순덕 등(2003)의 잣나무 수정율곡선은 본 연구에 추정된 곡선과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 하지만 상대흉고직경이 커질수록 두 연구에 의한 곡선이 보이는 차이가 매우 커지는 경향을 보인다. 즉, 상대흉고직경이 0.5에서 1.0 및 1.5로 증가할 때 권순덕 등(2003)의 수정율함수곡선이 본 연구의 추정함수에 비해 훨씬 큰 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 특히 권순덕 등(2003)의 곡선에서 상대흉고직경이 1.5일 때 흉고단면적의 증가에도 불구하고 일정 기간 동안 수정율이 1.0에 가깝게 유지되는 것으로 나타나

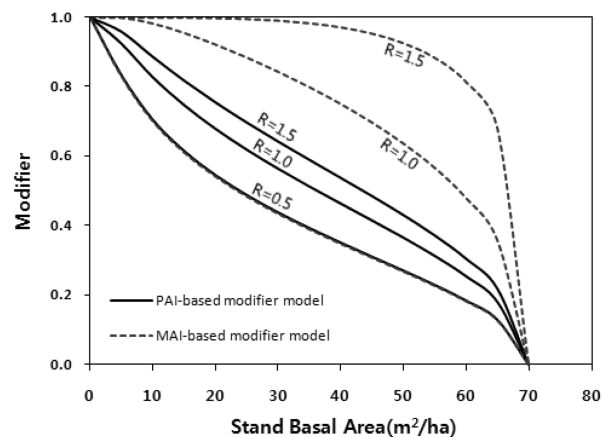


Figure 4. Modifier in relation with stand basal area.

고 있는데 이것은 임분밀도가 증가하여 임분 내 경쟁이 심화되는 환경에서도 각 개체목간 경쟁이 없는 독립수와 같은 입지환경에서의 성장을 의미하므로 현실림에 속한 개체목의 성장특성과 부합된다고 보기 어렵다.

한편 이 그림에서 흉고단면적이 커질수록 수정율이 감소하는 경향을 보인다. 또한 AD를 임분의 평균 흉고직경이라고 할 때 상대흉고직경( $R=DBH/AD$ )이 커질수록 수정율도 점차 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 임분밀도가 높아질수록 수정율은 감소하게 되며, 그 결과 개체목의 실제 직경성장량이 그만큼 감소한다는 것을 의미한다. 또한 임분 내의 개체목의 상대흉고직경이 커질수록 실제 직경성장량이 커지는 것을 의미한다.

5. 고사율함수의 특성

Figure 5는 본 연구에서 추정한 고사율함수(실선)와 권순덕 등(2003)이 추정한 고사율함수(점선)를 비교하기 위해 개체목의 직경성장량과 흉고직경에 따른 고사율의 변화를 그림으로 보여준다. 본 연구에서 추정된 고사율은 직경성장량이 연간 약 0.2 cm보다 작을 때에는 흉고직경과 직경성장량의 증가에 따라 급격히 감소하다가 직경생장이 연간 0.2 cm보다 클 때에는 0에 가까운 최소 고사율(0.527%)을 유지하는 것으로 나타나고 있다. 이와 같이 고사율이 급격하게 감소하는 경향은 개체목의 성장 및 임분밀도 감소에 의한 영향으로 판단되지만, 최소고사율이 유지되는 구간에 대해서는 향후 고정표본점의 반복 측정 자료에 의한 정밀 검토가 필요할 것으로 판단된다.

한편 본 연구의 결과를 기존의 권순덕 등(2003)의 함수와 비교할 때 고사율이 상대적으로 낮고, 흉고직경의 변화에 매우 민감한 것으로 나타났다. 즉, 권순덕 등(2003)의 경우 고사율이 흉고직경의 변화에 거의 영향을 받지 않고, 흉고직경생장율이 큰 경우에 최소 고사

율이 3.21%의 높은 값을 유지하고 있어 본 연구 추정치에 비해 약 6배 이상의 높은 고사율을 보이는 것으로 나타났다.

이러한 차이에 대해서는 국내외의 고사율에 관한 연구 결과들을 참고하여 비교할 필요가 있다. 즉, 신만용 등(2003)은 잣나무임분의 최소고사율을 연간 0.4% 정도로 보고하고 있고, 미국에서 Buchman(1979)이 Jack pine, red pine 등의 다양한 침엽수종에 대한 최소고사율들이 대체로 0.5% 이하의 값을 보이고 있어 본 연구에서 추정된 함수가 기존의 고사율함수에 근접하고 있음을 알 수 있다. 결국 권순덕 등(2003)에 의한 고사율함수의 패턴이 본 연구나 다른 연구와 차이를 보이는 것은 함수 추정 시 적용한 연평균 흉고직경생장에 있는 것으로 판단된다. 즉, 본 연구나 Buchman(1979) 등은 PAI를 그리고 권순덕 등(2003)은 PAI 대신 MAI를 적용하여 고사율함수를 추정한 것에 기인한 것으로 판단된다.

결론

최근들어 국내에서도 개체목 중심의 성장함수 모수추정에 대한 연구들이 수행되고 있으나 대부분 함수모형 추정에 요구되는 고정표준점에 대한 자료가 부족하여 정교한 임분성장모델의 개발이 어려운 실정이다. 본 연구에서도 부족한 자료에 따른 모수추정의 문제를 해결하기 위한 연구를 수행하고자 하였다. 기존연구에서 임분성장함수 모수추정에 따른 과대 혹은 과소 추정치의 문제점을 찾고 이를 개선하고자 하였다.

기존연구에서는 성장함수의 모수를 추정하면서 임분 내 개체목의 성장 활력도로 PAI 대신 MAI를 적용하였으며, 이로 인해 임분의 성장특성이 효과적으로 반영되기 어려웠던 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 PAI와 MAI의 함수관계에 따른 추정식을 적용하여 성장함수의 모수를 추정하고 그에 따른 효과를 비교하여 고찰하였다.

연구결과 고정표본점 자료의 한계를 극복하기 위한 방안으로 MAI 보다는 PAI-MAI의 관계식을 도출하여 적용하는 것이 임분내 개체목 성장에 따른 임분밀도의 영향을 보다 효과적으로 반영할 수 있는 것으로 나타났다.

향후의 연구에서는 고정표본점 자료의 축적을 통해 보다 정확한 임분의 성장특성이나 고사율 등을 예측할 수 있는 모델의 개발이 요구된다. 특히 20세기 말부터 시작된 지속가능한 산림경영의 개념을 구현하기 위한, 특히 기후변화 등과 관련된 주요 이슈들과 관련하여 임분 동태구조의 변화에 대한 정교한 과학적 해석기법이 그 기초가 될 수 있으므로 지속적인 자료의 수집과 구축이 반드시 요구된다.

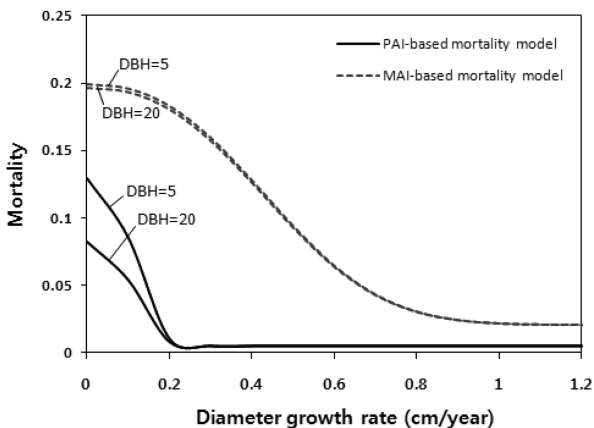


Figure 5. Mortality function in relation with diameter growth rate.

## 인용문헌

1. 권순덕, 김형호, 정주상, 이경학. 2003. 잣나무 임분의 개체목간 거리독립 성장 및 고사 예측함수의 개발. 한국임학회지 92(6): 590-597.
2. 신만용, 이민준, 안홍수. 2003. 거리독립 경쟁지수를 이용한 4개 침엽수종의 고사율 추정식의 개발. 한국임학회지 92(6): 581-589.
3. 이우균. 1996. 위치중속임분조사에 의한 개체목의 경쟁지수 및 흉고직경성장 추정. 한국임학회지 85(3): 539-551.
4. Belcher, D.M., Holdway, M.R. and Gary, J.B. 1982. A description of STEMS-the stand and tree evaluation and modeling system. USDA Forest Service General Technical Report NC-79: 1-18.
5. Botkin, D.B., Janak, J.F. and Wallis, J.R. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology* 60: 849-872.
6. Buchman, R.G. 1979. Mortality functions. In a generalized forest growth projection system applied to the Lake States region. USDA Forest Service General Technical Report NC-79: 1-18.
7. Bugmann, H., Grote, R., Lasch, P., Lindner, M. and Suckow, F. 1997. A new forest gap model to study the effects of environmental change on forest structure and functioning. In *Impacts of global change on tree physiology and forest ecosystems*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers: 255-261.
8. Davis L.S. and Johnson, K.N. 1987. *Forest Management*. New York: McGraw-Hill.
9. Fortin, M., Bedard, S., DeBlois, J. and Meunier, S. 2009. Assessing and testing prediction uncertainty for single tree-based models: a case study applied to northern hardwood stands in southern Quebec, Canada. *Ecological modelling* (in press).
9. Gary J.B. 1981. "Grow"-a computer subroutine that projects the growth of trees in Lake States forests. USDA Forest Service Research Paper NC-207: 1-11.
10. Hahn, J.T. and Leary, R.A. 1979. Potential diameter growth functions. In a generalized forest growth projection system applied to the Lake States region. USDA Forest Service General Technical Report NC-49: 22-26.
11. Holdaway, M.R. 1984. Modeling the effect of competition on tree diameter growth as applied in STEMS. USDA Forest Service General Technical Report NC-94: 1-8.
12. Holdaway, M.R. 1986. Modeling tree crown ratio. *The forestry chronicle* 62(5): 451-455.
13. Hasenauer, H. 2006. *Sustainable forest management: Growth models for Europe*. Springer.
14. Pacala, S.W., Canham, C.D. and Silander Jr., J.A. 1993. Forest models defined by field measurements: I. The design of a northeastern forest simulator. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1980-1988.
15. Stage, A. 1973. Prognosis model for stand development. USDA Forest Service Research Paper INT-137: 1-32.
16. Weishampel, J.F. and Urban, D.L. 1996. Coupling a spatially-explicit forest gap model with a 3-D solar routine to simulate latitudinal effects. *Ecological Modelling* 86: 101-111.

---

(2010년 3월 16일 접수; 2010년 11월 29일 채택)