

강원도 지방 소나무의 地域 幹曲線 및 材積式 모델^{1*}
金俊淳², 李祐均³, 邊雨熾³

**Regional Stem Curve and Volume Function Model
of *Pinus densiflora* in Kangwon-Province^{1*}**

Joon Soon Kim², Woo Kyun Lee³, Woo Hyuk Byun³

要 約

材積式은 보통 흉고직경과 수고의 함수로 표현되는데, 回歸分析을 통해 정확도가 높은 식이 주로 채택되고 있다. 우리나라에서도 지금까지 흉고직경(D)과 수고(H)를 독립변수로 하는 指數式($V = aD^b H^c$)으로 각 수종에 대한 一般材積式을 유도하고 있다.

본 연구에서는 강원도 지방내의 홍천, 정선, 명주, 원주, 영월지역에 대한 幹曲線式을 지역별로 유도하고, 이 간곡선식의 回轉體 積分을 통해 지역별 재적을 직접 추정할 수 있는 간곡선 및 재적식 모델을 마련하였다.

조제된 모델에 의해 지역별로 추정된 재적은 기존의 강원도 지방 소나무재적표에 의해 추정된 재적에 비해 정확도가 높았다. 또한 지역간곡선식에 의해 유도된 간곡선의 형태는 지역에 따라 서로 달랐으며, 특히 영월지역과 원주지역의 수간은 다른 지역에 비해 수간상부에서 가늘게 발달하는 것으로 나타났다. 이와같은 간곡선의 다양한 형태는 재적추정에 있어서도 지역간 차이를 유발하였다.

ABSTRACT

Volume functions, which are usually expressed by the function of dbh and height, are estimated commonly through the regression analysis with the highest statistical accuracy considered. In Korea, general volume functions for each tree species were prepared by means of the regression analysis with the exponential function ($V = aD^b H^c$) having the dbh(D) and height(H) as independent variables.

In this study, regional stem curve functions for the *Pinus densiflora* in Kangwon-province were derived and a regional volume function model, in which the stem volume can be directly estimated through the rotational integral of the regional stem curve functions, was prepared.

The regional volume estimated by the prepared model was more accurate than the volume by the general volume table for the *Pinus densiflora* in Kangwon-province. Additionally, the form of stem curves derived by the regional stem curve functions showed difference from each other. The stem in Youngwol and Wonju taper down more fast in upper part than that in other regions. These various stem forms also led to the regional difference in volume estimates.

Key words : volume estimate, volume function, regression analysis, stem curve function, volume function model, rotational integral

¹ 接受 1994年 9月 6日 Received on September 6, 1994.

² Institut für Forstökonomie, Universität Göttingen, Germany

³ 高麗大學校 山林資源學科

* 본 논문은 1990년도 한국학술진흥재단의 자유과제 학술연구조성비에 의해 수행되었음

I. 緒 論

立木の 재적은 간단히 形數를 이용하거나 材積表 또는 材積式을 통해 추정할 수 있다^{1,17)}. 흉고 단면적과 수고에 의한 원주체 재적에 일종의 감소요인인 形數(form factor)를 곱함으로써 단목 및 임분의 재적을 손쉽게 구할 수 있는 소위 “형수법”은 과거에 널리 사용된 가장 간단한 材積推定法이라 할 수 있다. 형수를 단순한 상수로 취급하여 손쉽게 재적을 추정하는 것은 이용의 간편성은 있지만 정확성이 떨어져 현재는 거의 이용되지 않고 있다. 따라서 요즘은 형수를 주로 흉고직경과 수고의 함수로 추정하는데^{8,22,23,24)}, 이는 흉고직경과 수고를 설명변수로 하는 재적식의 변형형태로 볼 수 있다.

立木材積측정의 또 다른 방법은 흉고직경 또는 흉고직경과 수고를 함수로 하는 材積式(volume function)을 이용하는 방법이다. 그간 재적식 추정정에 대한 많은 연구가 국내외에 있어 왔는데, 이들 중 대부분은 흉고직경과 수고를 재적의 설명변수로 취하는 2變數 재적식이다. 구분구적법을 통해 측정한 材積을 從屬變數로, 胸高直徑과 樹高를 獨立變數로 하는 많은 식들을 回歸分析한 후 이들중 통계적으로 가장 오차가 적고 정확성이 높은 식을 선택하는 것이 그간의 일반적인 방법이었다^{2,5,6,11,13,15,16,19,25)}. 우리나라에서도 역시 회귀분석을 통해 재적식을 추정하였는데, 대부분의 수종에 대한 재적식을 흉고직경(D)과 수고(H)를 독립변수로 하는 지수식($V = aD^bH^c$)을 이용하여 유도하고 이를 기초로 재적표를 조제하여 왔다^{2,5)}.

최근에는 幹曲線式을 이용한 재적추정법이 많이 연구 응용되고 있다^{4,7,9,10,12,20,26,27,33)}. 이는 수고를 x축, 직경 또는 반경을 y축으로 하는 수간의 최외곽선을 나타내는 간곡선을 수고의 함수식으로 유도한 다음 이의 回轉體 積分을 통해 재적식을 유도하는 방법이다^{3,4,12,18,21)}. 단목의 간곡선으로부터 이의 集合體로 볼 수 있는 林分 또는 地域의 간곡선식 및 재적식을 유도할 수 있는데, 이는 단순한 재적추정 뿐만 아니라 지역간 생장형태의 구별, 용도별·재장별 재적추정 등이 가능하여 회귀분석을 통한 일반 재적식에 비해 그 적용범위가 넓다고 인정되고 있다^{4,9,12,27,29,33)}.

본 연구에서는 강원도 지방내의 흥천, 정선, 명주, 원주, 영월지역에 대한 지역간 곡선모델(regional stem curve model)을 도출하고, 이의 회전체 적분을 통해 지역별 재적추정이 가능한 재적식 모델(volume function model)을 조제하였다. 이외에도 회귀분석을 이용하여 상기 지역에 대한 지역재적식도 조제하여, 이를 재적식 모델과 비교 검토하였다. 그리고 본 연구는 간곡선식에 근거한 재적추정방식의 이론적 토대와 그 응용분야를 살펴봄으로써 재적추정에 관한 연구 및 현장작업에 질적 향상과 효율을 꾀하는데 그 목적을 두고 있다.

II. 材料 및 方法

1. 分析材料

강원도 지방 소나무의 간곡선 및 재적에 관한 본 연구는 강원도내의 흥천, 정선, 명주, 원주, 영월지역에서 조사한 1427본의 단목자료를 기초로 하여 이루어졌다(표 1).

간곡선식 및 재적식 유도를 위해서는 수간의 직경을 區間別로, 즉 0.2m, 1.2m, 그리고 2m 간격으로 측정해야 하는데, 이는 立木에서는 기술상 매우 어렵고 시간이 많이 소요됨으로 보통 벌도목에서 실시하고 있다. 또한 간곡선식 및 재적식 유도를 위한 연구는 많은 공시재료를 필요로 하는데, 이와 같이 많은 量의 입목별재를 연구만을 위해 실행하는 것은 기술 행정상으로 많은 어려움이 뒤따른다. 따라서 본 연구에서는 벌채현장을 중심으로 자료를 수집하였는데, 이리하여 자료의 지역 및 경급분포가 균등하지 못하였다(표 1).

2. 調査方法

벌도된 공시재료를 대상으로 0.2m(근주부: 벌도위치), 1.2m(흉고직경)와 이후 각 2m 간격으로 수간의 직경을 윤척을 이용하여 cm단위로 소수점 첫째자리까지 측정하였다. 2m가 안되는 초단부길이는 m단위로 소수점 첫째자리까지 측정하였다. 흉고아래부위에서 흔히 볼 수 있는 단면의 불규칙한 형태로 인한 오차를 최소화하기 위해서 근주부와 흉고직경부위는 직각 방향으로 두 번 측정하였다.

Table 1. Range and Mean of DBH and Height by survey region

Region	No. of stems	DBH			Height		
		Min.	Max.	Mean	Min.	Mix.	Mean
Hongchun-gun Nae-myun (Hongchun1)	164	9.0	30.9	17.7	5.7	16.9	12.1
Hongchun-gun Susuk-myun (Hongchun2)	239	6.1	34.5	16.9	4.7	22.0	11.2
Jungsun-gun Sindong-eup	199	8.2	42.2	24.4	7.0	28.5	18.2
Myungju-gun Sungsan-myun	209	10.4	35.7	22.1	7.9	23.8	15.2
Wonju-gun Hojeo-myun	292	6.3	30.5	16.2	4.4	21.1	16.7
Youngwol-gun Suju-myun	324	10.2	55.6	30.4	7.5	32.5	20.3
Total	1427	6.1	55.6	21.7	4.4	32.5	15.0

3. 分析方法

3.1. Spline function을 이용한 單木幹曲線 모델(single stem curve model)¹⁾

구간추정법(interval approximation)의 일종인 spline function을 이용하여 구간별로 측정된 단목의 간곡선식을 유도하였다. spline함수는 전체 구간을 小區間(subinterval)으로 나누고, 소구간별로 서로 다른 계수를 추정하는 內插函數(interpolatory function)로서 3次 多項式(cubic polynome)으로 구성되어 있다^{18,28,30,31,32,34}.

$$S_i(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + R_i, \quad (1)$$

i = 구간 $[x_i, x_{i+1}]$ $i=1, \dots, n-1$

x_i = 구간 $[x_i, x_{i+1}]$ 의 시작높이

x = 구간 $[x_i, x_{i+1}]$ 에 속하는 높이 : $x_i < x < x_{i+1}$

$S_i(x)$ = x 에서의 추정반경

a_i, b_i, c_i, R_i = 구간 $[x_i, x_{i+1}]$ 에서의 계수,
($R_i = x_i$ 에서의 추정반경)

이와같은 spline함수는 추정오차의 제곱합이 주어진 허용오차의 제곱합보다 작도록 하면서(식 2) 구간추정식 $S_i(x)$ 를 산정한다.

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i - r_i}{W_i} \right)^2 < F \quad (2)$$

r_i : 측정점 x_i 에서의 測定值(半徑)

R_i : 측정점 x_i 에서의 推定值(半徑)

W_i : 加重值

F : 허용오차(e)의 제곱합

$$\left(\sum_{i=1}^n e^2 = e^2 \cdot n \right) \leq \left(\frac{L_i - r_i}{W_i} \right)^2$$

(L_i : 간곡선을 선형으로 가정하였을 때의 추정값)

여기에서 許容誤差(e)를 平滑度(smoothing factor)라고 하며 이를 조절함으로써 곡선의 매끄러운 정도를 달리할 수 있으며, 경우에 따라서는 측정오차의 수정도 가능하다^{12,18,28}. 식 (2)의 W_i 는 加重值(weight)를 나타내는데, W_i 가 클수록 추정값 R_i 가 측정값 r_i 로 부터 멀어질 수 있는 범위가 크다. 평활도는 曲線 전체를 매끄럽게 하는 반면 가중치는 樹幹의 部位別로 추정값이 측정치로부터 벗어나는 범위를 다르게 줄 수 있다. 본 연구에서는 평활도를 0.01로 초기값으로 설정한 후, 추정 spline함수의 간곡선이 최고 3개의 변곡점을 가질 때까지 0.005씩 증가시켜 간곡선의 매끄러움을 조절하였다. 또한 가중치는 근주부, 흉고부위 및 수고부위를 제외하고는 1.0으로 하였다. 즉, 0.2m와 1.2m 부위에서는 가중치를 0.5로 하여 간곡선이 측정치로 부터 지나치게 벗어나는 것을 방지하였으며, 수고에서는 0.01의 가중치를 주어 간곡선이 x축과 만나는 점이 수고와 일치되도록 하였다.

주1) 이에 대한 자세한 설명은 李(1994)의 "spline함수와 선형방정식을 이용한 수간 및 임분간곡선 모델"을 참고 바라며 여기서는 간단한 설명으로 대신한다.

3.2. Spline函數를 통한 材積推定

Spline함수를 이용하여 간곡선을 추정하면 구간별 材積推定이 가능하다. 즉, 구간 $[x_i, x_{i+1}]$ 에서의 재적 V_i 는 spline함수식 $S_i(x)$ 의 회전체 적분을 통해 다음의 식으로 구해지며

$$V_i = \pi \cdot \int_{x_i}^{x_{i+1}} S_i^2(x) dx, \quad i = 0, \dots, n-1 \tag{3}$$

전체 재적 V 는 區間材積의 합으로 구할 수 있다.^{3,14,20,21,34)}

$$V = \sum_{i=0}^n V_i \tag{4}$$

3.3. 地域幹曲線모델(Regional taper curve model)

지역간곡선은 그 林分內에 生育하고 있는 單木 幹曲線의 集合體로 볼 수 있으며, 이 단목간곡선 집합으로부터 지역의 幹曲線을 線型모델로서 유도할 수 있다.^{8,29)} 이를 위해서는 수고를 相對化(수고=1)한 相對幹曲線(relative taper curve)을 유도하여 각 상대 높이마다 형태를 비교할 수 있어야 한다.^{29,31,33)}

$$x = \frac{X}{h} \quad X \in [0, h], \quad h: \text{수고} \tag{5}$$

단목의 상대간곡선 집합으로부터 일정 상대높이 x 에서의 직경 $y_j(x)$ 를 흉고직경 d_{12j} 의 線型關係로 나타낼 수 있는데, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$y_j(x) = f(x; d_{12j}) = \alpha d_{12j} + \beta, \quad x \in [0, 1] \tag{6}$$

j = 나무번호, $j = 1, \dots, n$

$y_j(x)$ = j 번째 나무의 높이 x 에서의 직경

d_{12j} = j 번째 나무의 흉고직경

α, β = 회귀계수(기울기, 절대값)

그런데 기울기 α 와 절대값 β 는 그 위치 x 에 따라 각기 다른 값을 갖게 되므로 이를 x 의 함수로 볼 수 있다. 따라서 식 (6)의 α 와 β 를 x 의 함수로 나타내면 單木幹曲線의 집합체인 地域幹曲線이 유도된다.

$$y_j(x) = f(x; d_{12j}) = \alpha(x) \cdot d_{12j} + \beta(x), \quad x \in [0, 1] \tag{7}$$

각 상대높이별로 구해진 기울기 $\alpha(x)$ 와 $\beta(x)$ 를 x 에 대해 일반화된 식으로 표현하기 위해 다

음과 같이 원점을 지나는 6차 회귀식을 채택하였 다.

$$\alpha(x, \vec{a}) = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6, \quad x \in [0, 1] \tag{8}$$

$$\beta(x, \vec{b}) = b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5 - b_6b^6, \quad x \in [0, 1] \tag{9}$$

이와 같이 상대높이 x 의 함수로 표현된 α 와 β 로 간곡선식을 표현하면 다음과 같이 된다.

$$y_j(x) = f(x; d_{12j}) = \alpha(x, \vec{a}) \cdot d_{12j} + \beta(x, \vec{b}) \quad x \in [0, 1] \tag{10}$$

$$\alpha(x, \vec{a}) = \vec{X} \vec{a}, \quad \beta(x, \vec{b}) = \vec{X} \vec{b}$$

$$\vec{X} = [x, x^2, x^3, x^4, x^5, x^6]$$

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_6 \end{bmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_6 \end{bmatrix}$$

3.4. 地域 材積式

林分幹曲線이 數式으로 표현되면 材積은 회전체 積分式을 이용하여 구할 수 있다.^{12,33)}

$$V = \frac{\pi}{40000} h \int_0^1 y^2(x) dx \tag{11}$$

식 (10)을 식 (11)에 대입하여 풀면 다음과 같은 재적식을 얻게 된다.

$$V = F_1 \cdot d_{12}^2 \cdot h + F_2 \cdot d_{12} \cdot h + F_3 \cdot h \tag{12}$$

h = 수고 (m), d_{12} = 흉고직경 (cm)

$$F_1 = \frac{\pi}{40000} \int_{h_1}^{h_2} \alpha^2(x, a) dx$$

$$F_2 = \frac{\pi}{40000} \cdot 2 \cdot \int_{h_1}^{h_2} \alpha(x, a) \cdot \beta(x, b) dx$$

$$F_3 = \frac{\pi}{40000} \int_{h_1}^{h_2} \beta^2(x, b) dx$$

$$h_1 = (h - h_0) / h, \quad h_2 = (h - h_u) / h,$$

$$h_0 = \text{윗높이}, \quad h_0 \leq h$$

$$h_u = \text{아랫높이}, \quad h_u \geq 0$$

III. 結果 및 考察

1. 單木 幹曲線

Spline 함수를 이용하여 단목의 간곡선을 도출한 후 상대화 하여 지역별로 상대간곡선집합체를

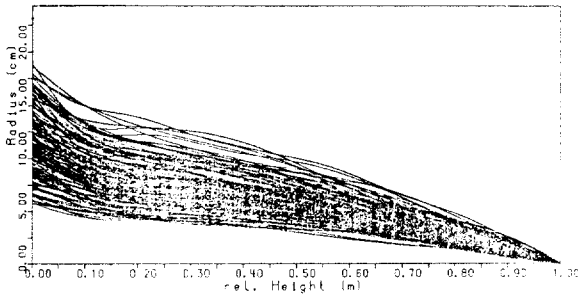


Fig. 1. Population of relative single stem curve in a region (HongChun1)

도출하였다. 그림 1은 한 지역의 상대화한 단목 간곡선들을 나타낸 것인데, 이로부터 각 상대높이에서의 직경과 흉고직경의 선형관계식을 유도할 수 있다.

2. 地域 幹曲線

그림 1과 같은 단목의 相對幹曲線 집합체를 21 등분하고 각 상대높이에서의 직경과 흉고직경과의 선형관계를 단순회귀로 유도하였다. 이와같이 유도된 각 상대높이에서의 기울기 α 와 절대치 β 를 상대높이 x 에 대해 원점을 지나는 6차 함수식으로 나타내었다. 그림 2는 상대높이 x 에 대해 일반화시킨 각 지역의 기울기와 절대치이다 (식 8, 9 참고). 그림에서 x 축은 상대수고, y 축은 기울기와 절대치를 나타내는데, 상대수고 0.0은 나무의 끝부위를, 1.0은 지면과 접하는 근주부위를 의미한다. 그림 2(a)를 보면 상대높이가 커질수록, 즉 나무의 밑부분으로 내려갈수록 기울기가 커짐을 알 수 있다. 이는 임의 높이에서의 직경은 수고로부터 밑으로 내려갈수록 흉고직경에 근접해가는 일반적 현상을 설명해 주는 것이다. 수간의 밑부위에서는 각 지역이 비슷한 기울기를 나타내는 반면, 윗부분에서는 영월과 원주지역이 다른 지역과는 구분되어 기울기가 눈에 띄게 낮음을 알 수 있다.

그림 2(b)는 지역별로 나타낸 식 (9)의 절대치인데 기울기에 비해 지역별 차이가 크음을 알 수 있다. 기울기는 상대높이가 증가함에 따라 커지는 반면 절대치는 뚜렷한 경향없이 대략 0.5에서 4.0의 값을 나타내었다.

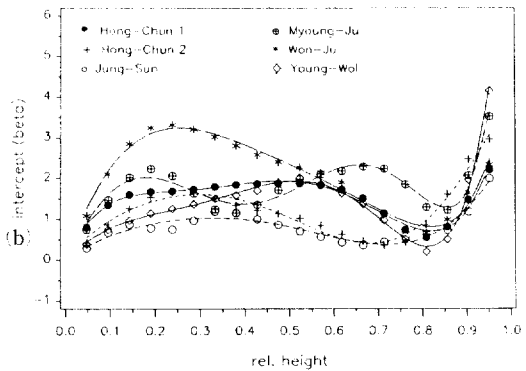
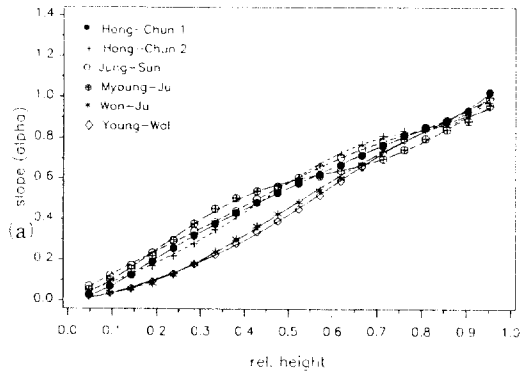


Fig. 2. Regional slope(a) and intercept(b) of function (8) and (9) estimated by 6 grade multiregression over relative height x

표 2는 이와같은 기울기(α) 및 절대치(β)의 상대높이(x)에 대한 6차 회귀식의 결과, 즉 추정계수, 식의 적합도를 나타내는 결정계수(R-sq.), 평균자승오차의 근(\sqrt{MSE}) 및 변이계수(C.V.)를 나타내는데, 결정계수가 높고 오차가 적어 식의 적합성이 매우 높음을 알 수 있다.

이와같이 식 (8), (9)의 계수가 표 2와 같이 구해지면, 임의의 흉고직경과 수고에 대한 간곡선을 식 (10)에 의해 유도할 수 있다.

그림 3은 직경 40cm, 수고 25m일 때의 간곡선을 지역별로 나타낸 것이다. 그림을 보면 같은 흉고직경과 수고라 할지라도 수간상부의 간곡선 형태가 다양하게 나타남을 알 수 있다. 특히 원주, 영월지역의 樹幹이 다른 지방에 비해 현격히 가늘게 발달되는데, 수간의 이와같은 지역간 차이를 검증하기 위하여 공분산분석을 실시하였다.

주2) 21등분된 상대간곡선에서 나무의 頂端을 0, 지면과 접하는 근주부위를 1로 한다.

Table 2. Regression coefficients of 6 grade equation between slope (alpha), intercept(beta) and relative height (x)

Region	HongChun1	HongChun2	JungSun	MyoungJu	WonJu	YoungWol	KangWon
a	a1	0.015958	0.926040	1.412428	0.608331	0.251435	0.051765
	a2	10.820164	-0.161944	-1.219461	4.760307	0.652246	4.50585
	a3	-39.315258	-0.918965	0.373907	6.187287	4.438776	-16.359727
	a4	69.025452	14.823080	7.342081	-12.758247	-8.075167	35.759275
	a5	-59.375492	-28.305619	-14.046031	27.841474	3.789675	35.866571
	a6	19.990806	14.787222	7.231085	-13.292821	0.005842	12.897974
a	R sq	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	√MSE	0.00622	0.00957	0.00437	0.01127	0.01044	0.00845
	Mean	0.53423	0.53794	0.55428	0.53642	0.46775	0.45294
	C.V.	1.16507	1.77817	0.78834	2.10162	2.23121	1.86503
							10.55806
b	b1	24.825598	13.821375	8.207695	21.564563	30.597987	11.221993
	b2	-146.754597	52.642330	28.481666	-23.392582	83.787955	-38.122094
	b3	424.818438	155.994232	73.759747	394.529320	9.449032	27.107950
	b4	586.367969	-348.259896	-142.168183	1452.340738	263.609359	206.423376
	b5	336.544667	376.778861	132.347882	1814.173989	-402.782468	-470.552113
	b6	48.892985	141.760194	-40.886718	766.216183	187.476921	272.830943
a	R-sq	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	√MSE	0.09862	0.13916	0.12314	0.18111	0.15791	0.09319
	Mean	1.50670	1.21569	0.80851	1.82801	2.09690	1.38985
	C.V.	6.54515	11.44727	15.23027	9.90760	7.53080	6.70484
							41.47848

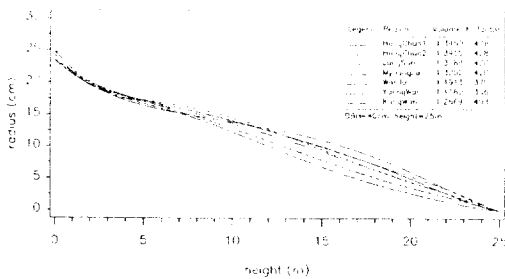


Fig. 3. Regional stand taper curve at DBH 40cm and height 25m

반경에 차이가 나기 시작하는 높이 7.5m 이후의 반경을 분석자료로 하였으며, 0.25m 간격의 수간높이를 공변량(covariate)으로 설정해 수간높이에 따른 편의를 보정하였다. 분석결과 지역간 차이가 있는 것으로 판정되어(F=48.92, P=0.0001) 지역내의 차이를 알아보기 위해 Duncan의 다중검증을 실시하였다(표 3).

명주와 정선 그리고 정선과 흥천의 간곡선이 같은 형태로 분류되었으며 원주, 영월, 강원도의 간곡선은 서로 다른 형태로 발달되는 것으로 나

타났다. 또한 명주, 정선의 영동지방 수간이 흥천, 원주, 영월의 영동지방 수간에 비해 통직하였다. 이와같은 수간의 다양한 형태는 재적 및 형수에도 영향을 미치게 된다. 즉, 원주, 영월의 재적은 각각 1.2m³, 1.1m³, 형수는 각각 0.38, 0.36으로, 재적 1.3m³, 형수 0.42 이상인 다른 지역에 비해 매우 낮게 추정되고 있다.

3. 地域 材積式

지역 간곡선식의 회전체 적분을 통해 전체 수간에 대한 각 지역의 재적식을 유도하였으며(표 4의 4번식), 비교를 위해 기존의 방법대로 회귀분석을 통한 재적식도 다음 3개의 식으로 도출하였다. 여기에서 재적은 Spline 함수식에 의한 단목간곡선식의 회전체적분을 통해 구한 값이다(식 3, 4).

- 1) $\ln V = a + b \ln D + c \ln H$ (V=a D^b H^c)
- 2) $V = a D^2 H + b DH + c H$
- 3) $V = a + b D^2 H$ (V: 재적, D: 흉고직경, H: 수고)

표 4에는 위의 식들의 회귀분석 결과를 함께

Table 3. Mean radius and Duncan Grouping

Region	MyoungJu	JungSun	HongChun1	HongChun2	KangWon	WonJu	YoungWol
Mean radius	9.450	9.081	8.914	8.830	8.445	7.589	6.808
Duncan Grouping							

Table 4. Coefficients and R-square of regional volume functions

	function	a	b	c	R-sq
WonJu	1	8.9543780000	1.8046590000	.7076370000	0.970
	2	.0000199212	.0003424112	-.0012601750	0.985
	3	.0180078000	.0000298922		0.952
	4	.0000260790	.0001378109	.0004119945	
MyoungJu	1	9.3052460000	1.8074380000	.8925063000	0.976
	2	.0000146493	.0007898369	-.0061228850	0.994
	3	.0344395600	.0000324571		0.966
	4	.0000282458	.0001812558	.0003642727	
JungSun	1	-9.8803140000	1.8922810000	.9839763000	0.974
	2	.0000160077	.0008122004	-.0079133030	0.985
	3	.0278610600	.0000321471		0.949
	4	.0000309054	.0000807494	.0000713876	
HongChun2	1	-9.4022200000	1.8647430000	.8440744000	0.988
	2	.0000255116	.0003167018	-.0014273070	0.991
	3	.0137700900	.0000344291		0.969
	4	.0000301513	.0001337188	.0002109117	
HongChun1	1	9.4340590000	1.7832020000	.9581041000	0.983
	2	.0000255116	.0003167018	-.0014273070	0.991
	3	.0137700900	.0000344291		0.969
	4	.0000301513	.0001337188	.0002109117	
YoungWol	1	-9.4447330000	1.9639100000	.7173473000	0.992
	2	.0000213420	.0003491440	-.0028048870	0.994
	3	.0421955900	.0000267927		0.986
	4	.0000244285	.0001330759	.0003117578	
Kangwon	1	9.3249300000	1.8784520000	.7923885000	0.987
	2	.0000164626	.0006226551	-.0044728240	0.991
	3	.0469253700	.0000274051		0.980
	4	.0000281884	.0001337327	.0002243408	

* 1 : $\ln V = a + b \ln D + c \ln H$

2 : $V = a D^2 H + b DH + c H$ estimated through regression analysis

3 : $V = a + b D^2 H$

4 : $V = a D^2 H + b DH + c H$ derived from stem curve model

나타냈는데, 3식 모두 결정계수가 0.95 이상으로 적합성이 높아 재적식으로 이용 가능하였다. 그런데 재적식의 적합성보다는 올바른 재적식의 선정이 더욱 중요하다는 Martin의 주장¹⁹⁾을 상기해 볼 때, 단순히 결정계수의 크기 뿐만 아니라 식의 생물학적 논리성 및 활용범위 등을 고려하여 재적식을 마련할 필요성이 있었다.

4. 比較 및 檢證

각 지역별 재적식에 대한 검증은 제 3의 자료, 즉 간곡선식 및 재적식 유도에 이용되지 않은 자료의 부족으로 본 연구에 이용된 자료를 가지고 분석할 수 밖에 없었으며, 강원도 전체 지역의 재적식에 대해서는 본 연구에 이용되지 않은 69개의 樹幹析解자료로 검증을 실시하였다.

표 5는 實材積과 각종 재적식에 의한 推定材積 간의 평균자승오차의 근(\sqrt{MSE})과 변이계수를 나타낸다. 식 (1), (2), (3)은 본 연구를 통해 새롭게 조제된 지역별 재적식이며, 식 (4)와 (5)는 1965년도와 1973년도에 각각 조제된 강원도 지방 소나무에 대한 일반재적식이다^{2,5)}.

기존의 강원도 소나무 재적식이 새로 조제된 재적식보다 오차가 작은 정선지방을 제외하고는, 모든 지역에서 새로운 재적식이 기존의 재적식에 비해 낮은 오차를 보였다. 평균재적에 대한 평균 자승오차의 근(\sqrt{MSE})의 비율(CV : 변이계수)이 가장 낮은 지역은 명주로서 새로운 재적식에서는 평균 8.7%, 기존의 재적식에서는 평균 9.7%의 오차율을 나타내었다. 그외의 지역에서는 변이계수가 새로운 재적식의 경우 10%에서 15%, 기존

Table 5. Root of mean square error (MSE) and coefficient of variances(CV) between the volume estimated by the volume functions and the volume estimated by spline function on stem analysis

region	WonJu		MyoungJu		JungSun		HongChun2		HongChun1		YoungWol		Kangwon	
mean vol	0.12566		0.29862		0.44597		0.15885		0.16430		0.72062		0.48718	
No.	292		209		199		239		164		324		69	
function	√MSE	CV	√MSE	CV	√MSE	CV	√MSE	CV	√MSE	CV	√MSE	CV	√MSE	CV
(1)	0.0186	14.8	0.0261	8.7	0.0682	15.3	0.0191	12.2	0.0188	11.4	0.0726	10.1	0.0538	11.0
(2)	0.0171	13.6	0.0254	8.5	0.0673	15.1	0.0183	11.5	0.0189	11.5	0.0710	9.9	0.0574	11.8
(3)	0.0180	14.3	0.0266	8.9	0.0683	15.3	0.0194	12.2	0.0192	11.7	0.0728	10.1	0.0790	16.1
(4)	0.0298	23.7	0.0272	9.1	0.0666	14.9	0.0204	12.8	0.0205	12.5	0.1704	23.7	0.0569	11.7
(5)	0.0220	17.5	0.0304	10.2	0.0667	15.0	0.0207	13.0	0.0206	12.5	0.1006	14.0	0.0540	11.1

- * (1) $V = aD^bH + bDH + cH$ from stem curve
- (2) $V = a D^b H^c$ new prepared
- (3) $V = a + b D^2H$ new prepared
- (4) $V = a D^b H^c$ Kim D.C. 1965
- (5) $V = a D^b H^c$ Lee J.K. 1973
- * CV : Coefficient of Variation($\sqrt{MSE} * 100 / \text{Mean}$)
- * Kangwon : validated with the volume by 69 stem analysis data

의 재적식의 경우는 23%까지 보였다.

방법간에는 회귀분석을 통해 도출된 2번식이 가장 정확하였으며, 간곡선식으로부터 유도된 1번식이 거의 비슷한 정확도를 나타내었다. 역시 회귀분석으로 유도된 3번식은 1,2번식 보다는 오차가 약간 높았지만 그 차이는 미미하였다. 3식간 오차의 차이가 가장 큰 지역은 원주지역으로서 1식과 2식간 변이계수가 1.2%의 차이가 났으나, 이외의 지역에서는 1% 미만의 차이를 보이고 있다. 따라서 새롭게 마련된 위의 3재적식은 모두 비슷한 정확도를 갖고 재적을 추정한다고 볼 수 있다.

표 5의 마지막 켄은 강원도 전체지역에 대한 검증용 수간석해자료로 실시한 것이다. 다른 식들과 비교하면 간곡선식으로부터 유도된 2번 재적식이 오차가 가장 적었다. 즉 2번식의 평균자승오차의 근(\sqrt{MSE})은 0.0538로서 가장 적었으며, 이는 수간석해로 계산된 실제적의 평균 $0.4872m^3$ 의 11.04%에 해당된다. 2번식의 오차는 $-0.1271m^3$ 에서 $+0.2088m^3$ 까지 분포하였으며, 이를 평균재적에 대한 비율로 나타내면 -17.90%에서 +23.96%까지 오차가 발생하였다.

이를 종합하면 새롭게 조제된 재적식이 기존의 재적식에 비해 정확도가 높았으며, 새 재적식 중 간곡선식의 회전체 적분을 통한 재적추정은 회귀분석을 통한 재적식과 마찬가지로 그 정확성이 높음을 알 수 있다. 주목할 점은 재적식이 주어 진 구간에 대한 재적을 추정하는 반면 간곡선식을 이용한 재적추정은 임의의 수간부위에 대한

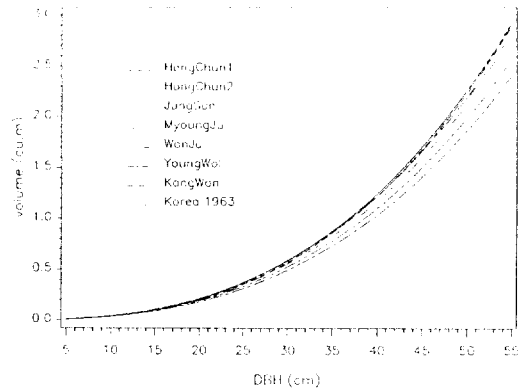


Fig. 4. Regional volume estimated by volume functions derived from stem taper curve models. dbh(d) : 5-55, height(h) : estimated by the Freese's function [$h = \exp(0.681818 + 0.640073 \ln(d) + 0.002523 d)$]

材長別 재적을 자유로이 구할 수 있다는 점이다. 즉 간곡선식을 통한 재적추정방법은 높은 정확도를 유지하면서도 수간부위별 재적추정을 가능하게 하여, 기존의 회귀추정식에 비해 그 활용범위가 넓은 특징을 지니고 있다.

그림 4는 간곡선식에 의해 유도된 지역별 재적식으로부터 추정한 재적을 흉고직경에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 흉고직경이 20cm를 넘으면서 지역간 재적의 차이가 커지기 시작하여, 흉고직경 40cm부터는 가장 큰 재적을 나타내는 홍천과 가장 작은 재적을 보이는 영월간에 $0.2m^3$ 이상의 재적차이를 보이고 있다. 또한 원주지방의 재적은 영월보다는 높지만 기타 다른

지역에 비해 현저히 낮게 추정되고 있다. 이외의 다른 지방에서는 $0.1m^3$ 내외의 재적차이를 보이면서 재적이 비슷하게 추정되고 있음을 알 수 있다.

그러나 분석자료의 지역내 조사지 및 직경분포에 편중성이 있어, 이에 의한 분석 결과가 지역을 완전하게 대표한다고 볼 수는 없으며, 따라서 지역간의 비교에는 한계가 있음을 밝혀둔다.

IV. 結 論

본 연구에서는 강원도 지방 소나무에 대한 간곡선식을 지역별로(홍천, 정선, 명주, 원주, 영월) 유도하였으며, 이의 회전체 적분을 통해 지역별로 재적추정이 가능한 재적모형을 조제하였다. 조사지역에 대한 간곡선식 및 추정재적을 상호 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

지역별로 유도된 간곡선식(식 7)의 기울기 α 및 절대치 β 는 지역별로 뚜렷한 차이를 보여 지역간 수간의 성장형태가 다를 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 간곡선식으로 부터 유도된 간곡선은 지역에 따라 그 형태가 달랐으며, 특히 영월지역과 원주지역의 수간은 다른 지역에 비해 상부로 갈수록 가늘게 발달하였다. 이와 같은 간곡선의 다양한 형태는 재적 및 형수추정에서도 지역간 차이를 유발하였다.

또한 본 연구를 통해 새롭게 조제된 지역별 재적식들은 기존의 강원도 지방 소나무 재적표에 비해 정확도가 높아, 지역별로 재적식을 마련하는 것이 타당함을 보여주었다.

간곡선식으로 부터 재적을 직접 추정하는 본 연구의 방법은 기존의 회귀분석에 의한 재적식 유도방법과 재적추정에 있어 비슷한 정확도를 보였다. 그러나 새롭게 조제된 간곡선 및 재적모형을 이용하면 기존의 일반 재적식과는 달리 수간의 재적을 수간 부위별로 추정할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 모델을 발전시킬 경우 이용별 등급별 재적추정, 간곡선의 형태비교에 의한 지역간 성장형태 분석, 환경변화 또는 관리방법에 따른 수간생장의 변화 파악 등이 가능하다.

결론적으로 보면 간곡선식을 통한 재적추정방법은 높은 정확도를 유지하면서 수간부위별 재적추정을 가능하게 할뿐만 아니라 수간형태를 파악할 수 있어 기존의 회귀분석에 의한 재적식유도

방법에 비해 그 활용범위가 넓은 특징을 지니고 있다.

引用 文 獻

1. 김갑덕, 1974. 산림측정학, 향문사.
2. 김동춘, 1965. 강원도산 소나무 입목간재적표, 농시연보 7권 제 2권. 1-18.
3. 변우혁·이우균·윤광배, 1990. 수간석해 전산프로그램 개발 및 성장량 계산방법의 비교에 관한 연구. 한국임학회지 79(1) : 1-15.
4. 이우균, 1994. Spline 함수와 선형방정식을 이용한 수간 및 임분 간곡선 모델, 한국임학회지 83(1) : 63-74.
5. 이진규, 1973. 이태리포푸라 외 5수종에 대한 입목간재적표 조제. 임시연보 19 : 29-42.
6. Amateis, R.L., Burkhart, H.E. 1987 : Cubic-foot volume equations for loblolly pine trees in cutover, site-prepared plantations. SJAF : 185-189.
7. Amidon, E.L. 1984 : A general taper functional form to predict bole volume for five mixed-conifer species in California. For. Sci. 30(1) : 166-171.
8. Bergel, D. 1973 : Formzahluntersuchungen an Buche, Fichte, Europäischer Lärche und japanischer Lärche zur Aufstellung neuer Massentafeln. AFJZ 144 : 117-124.
9. Böckmann, T., Kramer, H. 1990 : Herleitung vorläufiger Massentafeln für Winterlinde(*Tilia cordata* Mill.) in Nordwestdeutschland. AFJZ 161 : 41-47.
10. Byrne, J.C., Reed, D.D. 1986 : Complex compatible taper and volume estimation systems for red and loblolly pine. For. Sci. 32(2) : 423-443.
11. Demaerschalk, J.P. 1972 : Converting volume equations to compatible taper equations. For. Sci. 18(3) : 241-245.
12. Gaffrey, D. 1989. Forstamts-bestandesindividuelles Sortimentierungsprogrammalls Mittel zur Planung, Aushaltung und Simulation. Diplomarbeit der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Univ. zu

- Göttingen.
13. Honer, T.G. 1965 : A new total cubic foot volume function. *For. Chron.* 41 : 476-493.
 14. Hradetzky, J. 1981. Spline-Funktionen und ihre Anwendung in der forstlichen Forschung. *Forstw. Cbl.* 100 : 45-95.
 15. Hotvedt, J.E., Cao, Q.V. 1985 : Tree volume and stem-profile functions for Baldcypress. *SJAF* 9 : 227-232.
 16. Jimenéz, J. 1988 : Aufstellung von Schaftholz-Massentafeln und Tarifen für *Pinus pseudostrobus* LINDL. und *Pinus teocote* SCHL. et CHAM. in einem Teil der Sierra Madre Oriental in Nordosten Mexicos. Dissertation Göttingen.
 17. Kramer, H., Akça, A. 1987. Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. J.D. Sauerländer's Verlag : 53-55.
 18. Liu, C.J. 1980. Log volume estimation with spline approximation. *Forest Sci.* Vol.26. No.3 : 361-369.
 19. Martin, J. 1984 : Testing volume equation accuracy with water displacement techniques. *For. Sci.* 30 : 41-50.
 20. Max, T.A., Burkhart, H.E. 1976. Segmented polynomial regression applied taper equations. *Forest Sci.*, Vol.22, No.3 : 283-289.
 21. Nagel, J., Athari, S. 1982. Stammanalyse und ihre Durchführung, *Allg. Forstu. J-Ztg.* 153, Jg. 9/10 : 179-182.
 22. Nagel, J. 1985 : Wachstumsmodell für Bergahorn in Schleswig-Holstein. Dissertation, Göttingen.
 23. Pollanschütz, J. 1974 : Formzahlfunktionen der Hauptbaumarten Österreichs. *AFZtg* : 341-343.
 24. Pollanschütz, J. 1976 : Schaftholz-volumentabellen der Hauptbaumarten Österreichs. *AFZtg* : 191-194.
 25. Raile, G.K. 1981 : A net volume equation for northeastern Minnesota. *USDA Forest Serv. Gen. Tech. Rep. NC-66.*
 26. Reed, D.D., Green, E.J. 1984 : Compatible stem taper and volume ratio equations. *For. Sci.* 30 : 977-990.
 27. Rööß, M. 1990. Zum Wachstum der Vogelkirsche (*Prunus avium* L.) in Nordrhein-Westfalen und angrenzenden Gebieten. Dissertation der Univ. Göttingen.
 28. Saborowski, J., Sloboda, B., Junge, A. 1981. Darstellung von Schaftformen durch Kubische Spline-Interpolation und Reduktion der Stützstellenanzahl. *Forest Archiv* 4 : 127-130.
 29. Sloboda, B. 1977. Die Beschreibung der Dynamik der Schaftformfortpflanzung mit Hilfe der Ähnlichkeitsdifferentialgleichung und der Affinität. *Mitt. der Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien* 120 : 53-60.
 30. Sloboda, B. 1977. Spline und Bitterlich'sche Interpolation bei der Wiedergabe der Baumschaftform. *Mitt. Der Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien* 120 : 61-70.
 31. Sloboda, B., Saborowski, J. 1981. Stand Taper Form as a Stochastic Process with an Example of Application. *Proceedings IUFRO Congress Kyoto.* : 137-150.
 32. Sloboda, B., Saborowski, J. 1981. Einige neuere empirische und biometrische Aspekte der Produktionsprognose des Schaftholzes. *Schriften aus der Forstl. Fak. der Uni. Göttingen und Niedersächs. Forstl. Versuchsanstalt.* Bd. 69 : 107-125.
 33. Sloboda, B. 1984. Bestandesindividuelles biometrisches Schaftformmodell zur Darstellung und zum Vergleich von Formigkeit und Sortimentenausbeute sowie Inventur. *Tagungsbericht bei der Tagung Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbades Forstl. Versuchsanstalten in Neustadt.* : 4/1-4/35.
 34. Tietz, b. 1979. Die Konstruktion von Schaftformkurvenfunktionen mittels lokalangepaßter Spline-Funktionen. *Beiträge f.d. Forstwirtschaft.* heft 4 : 30-33.