

ORIGINAL ARTICLE

제주도 삼나무 수간재적표 개발을 위한 주요 수간곡선식 비교

김현수 · 정수영* · 이광수

국립산림과학원 난대·아열대산림연구소

Evaluation of Major Taper Equation Models for Developing a Stem Volume Table of *Cryptomeria japonica* in Jeju Island

Hyun-Soo Kim, Su-Young Jung*, Kwang-Soo Lee

Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science, Jeju 63582, Korea

Abstract

This study was conducted to provide data and stem information to establish a local volume table of *Cryptomeria japonica* in Jeju Island. Stem analysis was performed on 26 trees by selecting two average trees from each site of the 13 plots of *C. japonica* stands in 2021 and 2022. During the analysis stage, one outlier tree was rejected, and a total of 260 observations of the specific stem height of 25 trees were used. Of the seven major taper equation models applied for parameter estimation and statistical verification, the Muhairwe 1999 model was found to be the best fit and selected as the optimal model. Stem shape-related estimates were acquired through the selected model, and sectional measurements according to the Smalian formula applied at an interval of 10 cm from the height of the stem were used to develop a volume table. A paired t-test comparison between the *C. japonica* volume obtained from the present study and those selected from the current yield table by NIFoS(2020), revealed significant differences ($p < 0.05$), highlighting the necessity of a local volume table for *C. japonica* in Jeju Island.

Key words : *Cryptomeria japonica*, Sectional measurement, Taper equation, Volume table

1. 서론

지난 수 백년 동안 목재생산은 산림경영의 주요 목적이었으며, 이러한 목재의 생산량 측정 및 추정은 산림경영에서 중요한 요소에 해당한다. 일반적으로 목재의 생산량은 임목의 재적(volume)으로 결정되며, Clark(1902)에 의하면 재적표(volume table)나 방정식을 이용한 재적의 측정은 200년 전부터 실행되었다고 한다. 현재 우리나라의 재적표는 수간곡선식(taper

equation)을 통해 추정된 수간형상을 Smalian 식에 의한 구분구적법(sectional measurement)으로 재적을 계산하여 작성한다. 또한 우리나라 목재판매를 위한 재적측정은 말구직경자승법에 의해 결정되며, 말구직경자승법을 적용하기 위해 말구에 해당하는 높이, 즉, 판매 가능한 높이(merchantable height)의 직경을 측정하고 추정하는 것은 매우 중요하다. 벌채목에 대한 말구직경의 측정은 매우 간단한 일이지만 임목에 대한 측정은 어려우므로 수간곡선식에 의한 추정이 일반적이다.

Received 21 September, 2022; Revised 5 October, 2022;
Accepted 5 October, 2022

*Corresponding author : Su-Young Jung, Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science, Jeju 63582, Korea
Phone : +82-64-730-7250
E-mail : suyoun.jung@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Growth characteristics of *C. japonica* stands in study area

Plots	Diameter at breast height (cm)	Height (m)	Dominant tree height (m)	H/D ratio (%)	Stand density (tree ha ⁻¹)	Basal area (m ² ha ⁻¹)	Stand volume (m ³ ha ⁻¹)
1	25.3±6.9	16.7±2.7	19.3±0.6	69.8±15.6	1,625.0	87.7	733.5
2	26.9±6.5	17.4±2.4	20.0±1.3	66.4±8.9	1,125.0	67.9	583.0
3	36.6±10.5	21.7±4.7	27.6±2.2	60.6±5.2	725.0	82.4	898.0
4	34.9±5.7	20.7±2.5	24.2±0.6	59.9±3.2	775.0	76.1	743.6
5	43.0±8.5	22.7±4.0	27.4±2.9	53.4±5.4	575.0	86.9	935.0
6	31.6±10.1	19.3±3.9	24.1±1.0	64.3±10.9	825.0	71.5	700.0
7	26.4±5.4	18.1±2.2	19.9±1.4	69.8±6.3	1,275.0	72.4	643.1
8	50.0±22.7	25.1±5.5	32.2±3.2	54.7±10.0	400.0	94.8	1,264.1
9	30.3±3.9	17.0±0.8	17.8±0.5	56.8±7.1	800.0	58.7	461.3
10	18.6±2.2	12.3±1.5	13.8±1.0	67.1±10.1	1,425.0	39.1	241.4
11	22.1±4.5	11.5±1.0	12.6±0.7	53.7±8.5	1,525.0	60.8	343.1
12	29.6±4.6	15.1±1.2	16.6±0.5	51.9±5.8	850.0	59.8	426.3
13	26.9±5.9	15.5±1.5	17.2±0.9	59.4±8.2	1,075.0	64.2	484.3
Total	28.3±10.1	16.8±4.4	21.9±3.5	61.8±11.3	1,000.0	70.9	650.5

근래 이용되고 있는 수간곡선식은 다양한 형태가 있으며, Max and Burthart(1976)은 수간의 모양에 따라 구분된 3개의 부분을 연결하는 분할 다항식 모델(segmented polynomial model)을 제안하였다. 또한 Kozak(1988, 2004)은 수간형태를 더 유연하게 표현할 수 있는 가변형태(variable-exponent)의 수간곡선식을 개발하였으며, 그 외 다항식(Kozak et al., 1969), 삼각법(Thomas and Parresol, 1991) 및 비모수(Lappi, 2006) 형태의 수간곡선식이 가장 많이 이용되고 있다. 수간곡선식은 임목의 형상과 재적 추정에 가장 적합한 방법 중 하나로 적용의 편의성과 적합성을 높이기 위해 지속적인 모델 개발 및 발전이 이뤄지고 있다. 최근에는 지상라이더(terrestrial laser scanning)를 이용하여 수간의 형태를 정확하게 추출하는 연구가 활발하게 진행 중이다(Heinzel and Huber, 2017; Saarinen et al., 2017; Luoma et al., 2019).

삼나무(*Cryptomeria japonica*)는 1900년대 초 편백과 함께 일본에서 도입된 이후 남부지방의 대표적인 수종으로, 수간이 통직하고 재질이 우수하며 생장이 빨라 용재로서의 가치가 높아 일본 및 대만 등에서 주요 조림수종으로 알려져 있다(Jin and Chon, 1987; Lee et al., 2001; Gwon et al., 2014). 이러한 삼나무는 1970년대 이후 제주도의 주요 조림수종으로 선정되었으며, 1

차, 2차 치산녹화 기간에 약 4만 ha 정도가 조림되었다. 현재 우리나라 삼나무의 전체 면적은 6,296 ha이며, 전체 면적 중 약 61%에 해당하는 3,818 ha의 넓은 면적이 제주도에 분포하고 있다(National Institute of Forest Science, 2020). 제주도는 화강암을 모재로 하는 화산회산림토양군이 97%로 내륙의 산림토양과는 차이가 있으며(NiFoS, 2004), 지난 20년간 종관기상관측장비에 의한 제주도의 평균기온은 16.1℃, 평균강수량은 1,676.2 mm로 우리나라 평균 기온 및 강수량(12.8℃, 1,332.6 mm)과 비교하였을 때 임목의 생장과 형질에 영향을 미칠 정도의 차이가 나타나므로 제주도 삼나무에 대한 차별화된 관리체계 개발이 필요하다.

따라서 본 연구는 제주도 삼나무를 대상으로 7개의 주요 수간곡선 모델에 대한 모수를 추정하고 통계적 검정에 따른 최적의 모델을 선별하고, 선별된 모델을 통한 지방적 재적표를 제작하여 제주도 삼나무를 체계적으로 관리할 수 있는 기초자료 제공을 목적으로 실행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 분석자료

제주도 삼나무 재적표 개발을 위해 임분밀도 및 직경 분포가 다양한 형태를 이루고 있는 13 plots의 삼나무

Table 2. Status of *C. japonica* using stem analysis

Species	Number of trees	Ages (years)	Average diameter at breast height(cm)	Average height(m)
<i>C. japonica</i>	25	48 34-60	28.58 16.13-47.96	18.01 11.4-27.0

Table 3. General forms of taper equations applied to data

Model(yrs)	Equations
Kozak (1988)	$\hat{d}_i = a_1 D^{\alpha_2} a_3^D X_i^{b_1 z_i^2 + b_2 \ln(z_i + 0.001) + b_3 z_i^{1/2} + b_4 e^{z_i} + b_5 (D/H)}$ where: $X_i = [1.0 - (h_i/H)^{1/2}] / [1.0 - p^{1/2}]$, p = proportional height of the "inflection point" 0.1-0.3, depending on the species
Kozak (1994)	$\hat{d}_i = a_1 D^{\alpha_2} a_3^D X_i^{b_1 + b_2 z_i^{1/4} + b_3 z_i^{1/3} + b_4 z_i^{1/2} + b_5 \arcsin(Q_i) + b_6 [1/(D/H + z_i)] + b_7 H}$ where: X_i = as above, $Q_i = [1.0 - (h_i/H)^{1/2}]$, $p = 0.01$
Kozak (2001)	$\hat{d}_i = a_1 D^{\alpha_2} X_i^{b_1 + b_2 [1/e^{D/H}] + b_3 D^X + b_4 X_i^{D/H}}$ where: $X_i = [1.0 - (h_i/H)^{1/4}] / [1.0 - p^{1/4}]$, $p = 0.01$
Kozak (2002)	$\hat{d}_i = a_1 D^{\alpha_2} H^{\alpha_3} X_i^{b_1 z_i^4 + b_2 [1/e^{D/H}] + b_3 X_i^{0.1} + b_4 [1/D] + b_5 H^Q + b_6 X_i}$ where: $X_i = [1.0 - (h_i/H)^{1/3}] / [1.0 - p^{1/3}]$, $Q_i = [1.0 - (h_i/H)^{1/3}]$, $p = 1.3/H$
Bi (2000)	$\ln \hat{d}_i = \ln B (\beta_1 + \beta_2 \sin(z_i \pi/2) + \beta_3 \cos(z_i \pi/2) + \beta_4 \sin(z_i \pi/2)/z_i + \beta_5 D + \beta_6 z_i \sqrt{D} + \beta_7 z_i \sqrt{H})$ where: $B = \ln \sin(\frac{\pi}{2} z_i) / \ln \sin(\frac{\pi}{2} b)$, $b = \frac{1.3}{H}$
Muhairwe (1999)	$\hat{d}_i = a_1 D^{\alpha_2} (1 - \sqrt{z_i})^{b_1 z_i + b_2 z_i^2 + (b_3/z_i) + b_4 e^{z_i} + b_5 D + b_6 (D/H)}$
Sharma and Parton (2009)	$\frac{\hat{d}_i}{D} = \beta_1 \left(\frac{H - h_i}{H - 1.37} \right) \left(\frac{H}{1.37} \right)^{\beta_2 + \beta_3 z_i + \beta_4 z_i^2}$

*Note: \hat{d}_i is predicted outside bark diameter at h_i height from ground(cm); D is a diameter at breast height (cm); h_i is an upper height (m); H is a total height (m); $z_i = \frac{h_i}{H}$; a_i, b_i are parameters to be estimated.

임분 자료를 수집하였으며 해당 임분의 현황은 Table 1과 같다. 각 plot별 2본의 표준목을 선별하여 총 26본에 대한 수간석해를 실행하였으며, 수간석해 결과, 수령의 증가에 따른 직경과 수고 생장이 비정상적인 표준목 1본을 기각하여 25본을 대상으로 분석하였다. 이때 삼나무림의 흉고직경급별 임분밀도에 따른 생육환경 특성을 파악하고자 H/D율을 분석해 본 결과 해당 임분 대부분이 70% 미만으로 나타나 적정 생육환경을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 그리고, 수간고별(0.2 m, 1.2 m, 3.2 m, 5.2 m, …) 원판을 추출하여 총 260개의 관측치를 분석자료로 사용하였으며, 개체목의 성장 과정을 정밀하게 분석하기 위해 1년 단위로 연륜의 생

장량을 측정하였다. 재적표 개발을 위해 선별된 표준목의 평균 수령은 48년, 흉고직경은 28.58 cm, 수고는 18.01 m로 나타났다(Table 2).

2.2. 수간곡선식 개발

본 연구의 수간곡선식 개발을 위해 일반적으로 많이 사용되는 Kozak 1988, 1994, 2001, 2002, Bi 2000, Muhairwe 1999 및 Sharma and Parton 2009 등 7개의 주요 모델을 선택하였다(Table 3). Kozak(1988)은 줄기의 나일로드체(neiloid), 포물선체(paraboloid) 및 원뿔(conic) 형태를 설명하는 변화지수(changing exponent)를 사용하여 현재 변량지수식(variable-

Table 4. Model performance evaluation criteria(fitting and testing procedures)

Criterion	Symbol	Formula	Optimum value
Coefficient of determination	R^2	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{d}_i - d_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}$	1
Root mean square error	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{d}_i - d_i)^2}{n}}$	0
Mean absolute deviation	MAD	$\frac{\sum_{i=1}^n \hat{d}_i - d_i }{n}$	0
Bias	Bias	$\frac{\sum_{i=1}^n \hat{d}_i - d_i}{n}$	0

*Note: \hat{d}_i is predicted diameter for the i th tree, d_i is measured diameter for the i th tree, n is the number of observations.

Table 5. Estimated parameter of taper equations for experimental models

Model names(yrs)	Estimated coefficients									
	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
Kozak 1988	1.485	0.823	1.002	0.596	-0.059	-1.219	0.511	0.120		
Kozak 1994	1.592	0.836	1.001	85.406	-126.7	81.132	-38.857	-51.517	-0.281	0.003
Kozak 2001	1.782	0.840		0.616	-0.043	0.001	-0.229			
Kozak 2002	1.088	0.932	0.056	0.524	-0.287	0.464	-1.534	0.054	-0.077	
Bi 2000				45.716	0.984	2.299	-30.239	0.004	-0.604	1.772
Muhairwe 1999	1.263	0.896		0.653	-0.880	-0.037	0.830	0.002	0.033	
Sharma and Parton 2009				1.339	-0.067	-0.228	0.488			

exponent taper equation)으로 알려져 있는 모델을 개발하였다. 이 후 Kozak(1994)은 Kozak 1988을 기반으로 대부분의 수종에 적용할 수 있는 새로운 모델을 개발하였으나, 다중공선성(multicollinearity) 문제가 발생한다는 의견이 제기되었다. Kozak 2001과 2002 역시 Kozak 1988을 기반으로 만들어졌으나, 기존 Kozak 1988 및 1994와 비교하였을 때 다중공선성이 낮다는 장점이 있다(Kozak, 2004).

Kozak 1988 모델은 삼나무뿐 아니라 우리나라 주요 수종 임목재적표 개발에 사용되고 있을 정도로 적합성과 적용성이 높은 모델이지만(National Institute of Forest Science, 2020), 수종 및 대상 임목의 수간형태에 따른 변곡점(inflexion point)을 추정해야 한다. Muhairwe 1999 모델은 Muhairwe(1993)가 변곡점에 대한 추정치를 제거하기 위해 Kozak 1988 모델을 수정

한 형태를 기반으로 개발되었다(Muhairwe, 1999). Bi(2000)는 삼각법을 이용한 새로운 가변형태(variable-form)의 수간곡선식을 개발하였으며, 식의 앞부분에 있는 세 개의 삼각변수는 수간고별 수간형태의 변화를 나타내고 마지막 세 개의 변수는 크기가 다른 수목 사이의 수간형태 차이를 고려하는 데 사용되었다. Sharma and Parton(2009)은 차원해석(dimensional analysis)적 접근방법을 이용하여 수간곡선 모델을 개발하였다. Sharma and Parton 2009 모델은 비교적 최근에 개발된 모델로 식의 구조가 간단하여 계수 추정에 편의성을 갖고 있으며, 해당 식에서 지수 $\beta_2 + \beta_3x + \beta_4x^2$ 는 수간고별 수간형태의 변화를 나타낸다.

각 모델의 최적 함수 도출을 위해 통계프로그램 SAS

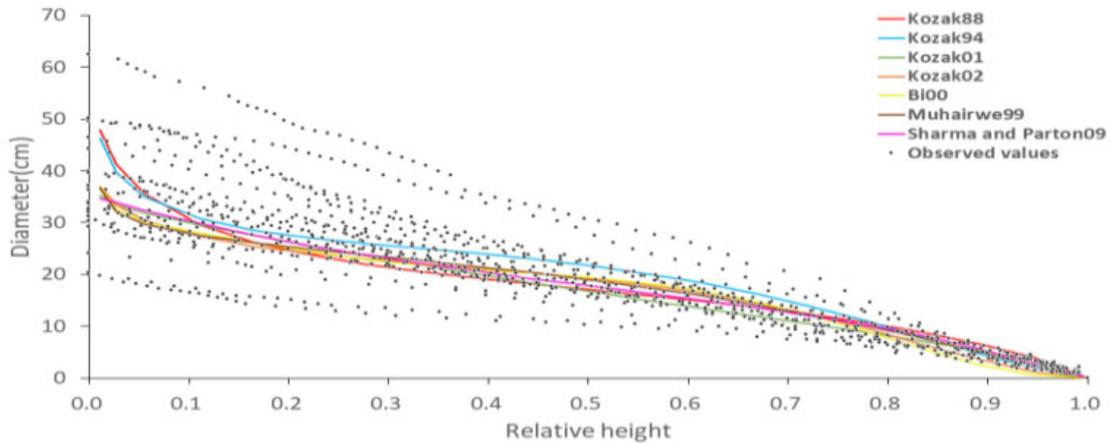


Fig. 1. Comparison of developed taper curves and observed values.

Table 6. Summary of fit statistics for taper models

Model names	FI	RMSE	Bias	MAD
Kozak 1988	0.939	2.791	0.532	2.309
Kozak 1994	0.955	2.404	-1.145	1.810
Kozak 2001	0.964	2.158	0.500	1.767
Kozak 2002	0.985	1.368	0.019	1.013
Bi 2000	0.976	1.775	0.390	1.367
Muhairwe 1999	0.986	1.353	-0.011	0.962
Sharma and Parton 2009	0.967	2.063	-0.007	1.560

ver. 9.4의 PROC NLIN 프로시저의 비선형 최소자승 회귀(nonlinear least squares regression)분석을 실시하였다.

2.3. 통계적 검정

Akaike Information Criterion(AIC)과 Bayesian Information Criterion(BIC)은 비중첩(non-nested) 모델을 비교하기 위해 널리 인정되고 있는 적합도 판정 기준이다(Gregoire et al., 1995). 그러나 본 연구의 경우 각 수간곡선식에 대한 반응변수(response variable)가 모두 동일하지 않기 때문에 AIC와 BIC를 통한 적합성 검증은 적절하지 않다. 따라서 본 연구는 결정계수(coefficient of determination), 오차제곱근(root mean square error), 평균절대편차(mean absolute

deviation) 및 편의(bias)를 통해 추정된 계수의 적합성을 검증하였으며(Table 4), 각 모델의 적합성 검증 결과를 비교하여 제주도 삼나무에 적용할 수 있는 최적의 수간곡선식을 선별하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수간곡선식 모수 추정

Kozak 1988모델의 경우 변곡점(inflexion point) p 를 결정해야 하며, 수간곡선의 변곡점은 나일로드체에서 포물선체로 바뀌는 지점을 선정하고 변곡점의 상대적 높이는 나무의 크기에 상관없이 종(種) 내에서 일정하다고 밝혀진 바 있다(Kozak 1988). Kozak 1988 모델을 사용하고 있는 수확표 상의 재적표 변곡점은

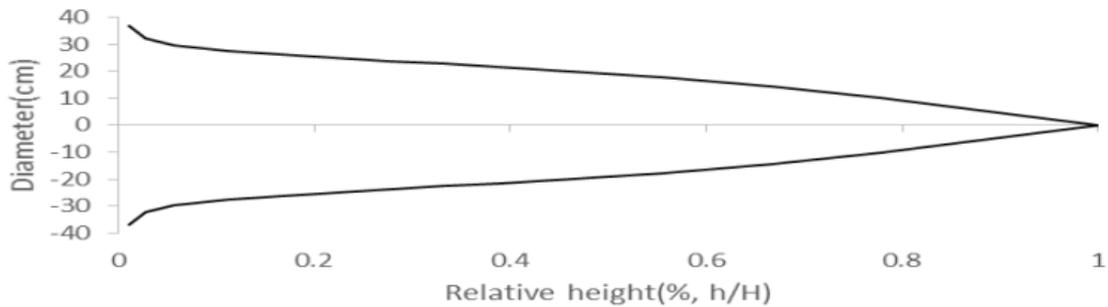


Fig. 2. Stem taper curve pattern for *C. japonica* stands distributed in Juju island.

0.2이며(NIFoS, 2020), 기존 연구에 따르면 Kozak 1988 모델을 통한 제주도 삼나무의 수간곡선식 개발에서 Kang et al.(2015)은 0.2, Seo et al.(2015)은 0.22로 변곡점을 적용한 바 있다. Fig. 1은 실제 관측된 수간고별 직경분포와 개발된 수고곡선식의 관계를 나타낸 것으로 상대수고 20% 지점에서 나일로이드체가 포물선체로 바뀌는 것이 확인되었으며, 기존의 연구들과 유사한 경향을 나타내어 본 연구에서의 Kozak 1988 모델에 대한 변곡점을 0.2로 결정하였다.

7개의 주요 수간곡선 모델에 대한 비선형 최소자승 회귀분석에 의해 추정된 계수 값은 Table 5와 같다. Bi 2000년 식을 제외한 모든 모델은 변량지수식으로 지수에 해당하는 부분은 전체 줄기에 대한 연속함수로 다항식과 수간고별 직경비율의 변환이 포함되어 있다 (McTague and Weiskittel, 2021). 즉, 식의 지수는 수간고별 수간의 형상을 나타내지만 모델 종류에 따른 다양한 다항식의 형태에 의해 계수 값의 범위는 일정한 수준을 나타내지 않는다. 일반적으로 고정계수(fixed parameters)와 랜덤계수(random parameters)가 포함되어 있는 수간곡선식의 혼합모형(mixed effect model)에서 독립변수(D, H 등)에 대응하는 매개변수는 대상 표준지 및 임목 수준을 나타낸다(Zhang et al., 2021). 따라서 혼합모형의 구조가 비슷한 Kozak 1988년, 1994년에 개발된 모델의 표준지 및 임목 수준의 특성을 나타내는 매개변수 $a_1 \sim a_3$ 가 유사하게 분석되었으며, Kozak 모델과 관련된 여타 모델들은 흉고직경에 대응하는 매개변수 a_2 을 제외한 모든 계수 값이 비교적 다양한 범위로 분석되었다.

모수 추정 결과에 따른 각 모델의 수간곡선과 수간고

별 직경의 실측치를 비교한 결과, Kozak 1988, 1994 모델의 경우 다른 모델에 비해 근주부분이 크고 수간고별 직경변화의 폭이 넓은 것으로 나타났다(Fig. 1). 이는 Kozak 1988, 1994 모델의 식의 구조가 다른 모델과 비교하였을 때 상대수고의 변화에 따른 직경의 변화에 민감한 구조($X_i = [1.0 - (h_i/H)^{1/2}] / [1.0 - p^{1/2}]$)를 갖고 있기 때문이라고 판단된다. 한편식에 해당하는 Kozak 2001과 Sharma and Parton 2009 모델은 수간고별 직경변화의 폭이 좁아 직선에 가까운 형태를 보이고 있었다. 그러나 식의 구조가 단순하고 형태가 단순한 것이 활용성이 낮고 모델 적합성이 낮다는 의미는 아니며, Kozak(2004)의 연구에 의하면 Kozak 2001모델은 Kozak에 의해 개발된 다른 3개의 모델보다 판매 가능한 높이(merchantable height)의 추정에 가장 적합한 것으로 나타났다. 추정된 모수를 적용한 모든 수간곡선식은 관측치의 중앙부분을 통과하여 추정과정에서 오류가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

3.2. 적합성 검증

본 연구에서 추정된 7개의 모델에 대한 통계적 검증 결과는 Table 6과 같으며, 제주도 삼나무에 가장 적합한 모델은 Muhairwe 1999인 것으로 나타났다. 강원도와 경상북도 지역의 잣나무에 대한 7개의 수간곡선식을 적용한 연구(Lee et al., 2017)와 중국 남부지역 *Betula alnoides*를 대상으로 28개의 단일, 분할 및 가변형태의 수간곡선식을 적용한 연구(Tang et al., 2017)에서 본 연구와 유사하게 Muhairwe 1999 모델의 적합도가 가장 높게 나타나 다양한 수종과 지역에 적용이 가능한 모

Table 7. Stem volume table for *C. japonica* in Jeju island forests (unit: m³)

DBH(cm) Height(m)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	0.0099	0.0161	0.0233	0.0315	0.0404	0.0500	0.0601	0.0707	0.0817	0.0931	0.1048	0.1167	0.1288
6	0.0120	0.0197	0.0286	0.0387	0.0499	0.0619	0.0747	0.0882	0.1023	0.1169	0.1320	0.1474	0.1632
7	0.0142	0.0232	0.0339	0.0460	0.0594	0.0739	0.0895	0.1058	0.1230	0.1409	0.1594	0.1785	0.1981
8	0.0163	0.0268	0.0392	0.0534	0.0690	0.0860	0.1043	0.1236	0.1439	0.1651	0.1871	0.2099	0.2333
9	0.0185	0.0304	0.0446	0.0607	0.0786	0.0981	0.1191	0.1414	0.1649	0.1894	0.2150	0.2414	0.2687
10	0.0207	0.0340	0.0499	0.0680	0.0882	0.1103	0.1340	0.1592	0.1859	0.2138	0.2430	0.2731	0.3043
11	0.0228	0.0376	0.0552	0.0754	0.0979	0.1224	0.1489	0.1771	0.2070	0.2383	0.2710	0.3049	0.3400
12	0.0250	0.0412	0.0606	0.0828	0.1075	0.1346	0.1639	0.1951	0.2281	0.2629	0.2991	0.3368	0.3759
13	0.0272	0.0448	0.0659	0.0902	0.1172	0.1468	0.1788	0.2130	0.2493	0.2874	0.3273	0.3688	0.4118
14	0.0293	0.0485	0.0713	0.0975	0.1269	0.1590	0.1938	0.2310	0.2705	0.3121	0.3556	0.4009	0.4479
15	0.0315	0.0521	0.0767	0.1049	0.1366	0.1713	0.2088	0.2491	0.2917	0.3367	0.3839	0.4330	0.4839
16	0.0337	0.0557	0.0820	0.1123	0.1462	0.1835	0.2239	0.2671	0.3130	0.3614	0.4122	0.4651	0.5201
17	0.0359	0.0593	0.0874	0.1197	0.1559	0.1958	0.2389	0.2851	0.3343	0.3861	0.4405	0.4973	0.5563
18	0.0380	0.0629	0.0928	0.1271	0.1657	0.2080	0.2539	0.3032	0.3556	0.4109	0.4689	0.5295	0.5925
19	0.0402	0.0666	0.0982	0.1346	0.1754	0.2203	0.2690	0.3213	0.3769	0.4357	0.4974	0.5618	0.6288
20	0.0424	0.0702	0.1035	0.1420	0.1851	0.2326	0.2841	0.3394	0.3983	0.4605	0.5258	0.5941	0.6652
21	0.0446	0.0738	0.1089	0.1494	0.1948	0.2448	0.2992	0.3575	0.4196	0.4853	0.5543	0.6264	0.7015
22	0.0467	0.0775	0.1143	0.1568	0.2045	0.2571	0.3143	0.3756	0.4410	0.5101	0.5828	0.6588	0.7379
23	0.0489	0.0811	0.1197	0.1642	0.2143	0.2694	0.3294	0.3938	0.4624	0.5350	0.6113	0.6911	0.7743
24	0.0511	0.0847	0.1251	0.1717	0.2240	0.2817	0.3445	0.4119	0.4838	0.5598	0.6398	0.7235	0.8108
25	0.0533	0.0884	0.1305	0.1791	0.2338	0.2940	0.3596	0.4301	0.5052	0.5847	0.6684	0.7559	0.8472

델로 판단된다.

Kozak의 4가지 모델 중 Kozak 2002 모델의 적합도가 가장 높았으며, Kozak 1988, 1994 모델은 간편식인 Kozak 2001 모델보다 적합도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 Kozak 1988, 1994 모델의 다중공선성(multicollinearity) 문제가 발생하여 데이터 분석에 부정적 영향을 미친 결과라 판단되며, 본 연구의 재료인 제주도 삼나무에 적용하기에 적합하지 않은 것으로 나타났다.

3.3. 지방적 수간재적표 제작

수간곡선식의 모수 추정에 따른 통계적 검증 결과 적합성이 가장 높은 Muhairwe 1999 모델을 통해 수간형상 및 지방적 수간재적표를 제작하였다(Fig. 2, Table 7). 수간형상은 상대수고에 따른 직경을 통해 도식화하였으며, 수간재적표는 최소흉고직경 6 cm를 기

준으로 2 cm 괄약(rounding off)을 적용하였고 최소 수고 5 m를 기준으로 1 m 괄약을 적용하였다. 수간재적은 수간고 10 cm 간격으로 직경을 추정하고, Smalian식에 의한 구분구적법으로 산출하였다(Son et al., 2012; Kang et al., 2014).

본 연구를 통해 제작된 수간재적표와 현재 수확표 상의 수간재적표와 비교하였을 때, 적서로 표시한 부분에서 본 연구의 수간재적표가 낮은 것으로 나타났으며, 그 외 부분에서는 높게 나타났다(Table 7). 다양한 DBH와 수고급별 위치에서의 성장특성 차이를 정확하게 비교·분석을 위해 대응표본 T-test를 실행하였다.

3.4. 일반적 수간재적표와 비교검정

본 연구를 통해 제작된 제주지역 삼나무 수간재적표를 현재 수확표 상의 수간재적표(National Institute of Forest Science, 2020) 및 기존 제주도 삼나무 수간

Table 8. Statistic of the paired T-test of this study and other studies

Standard DBH, height (cm, m)	Volume(m ³)		
	This study (2022)	Seo et al. (2015)	NIFoS (2020)
5, 6	0.010	0.008	0.009
8, 7	0.023	0.020	0.021
12, 10	0.068	0.060	0.063
16, 12	0.135	0.123	0.128
20, 14	0.231	0.220	0.223
22, 16	0.313	0.302	0.304
24, 17	0.386	0.380	0.378
28, 19	0.562	0.573	0.558
30, 20	0.665	0.690	0.665
P-value		0.631	0.002

Table 9. Comparison of volume estimations obtained by this presented stand and the current volume table of NIFoS, 2020

Height(m)	DBH(cm)	Volume differences(m ³)				
		6	12	18	24	30
5		0.001	0.002	-0.001	-0.007	-0.019
10		0.002	0.005	0.005	-0.001	-0.012
15		0.004	0.008	0.010	0.006	-0.006
20		0.005	0.012	0.015	0.012	0
25		0.006	0.015	0.020	0.018	0.006

재적표 제작에 관한 연구 결과(Seo et al., 2015)와 비교하였다(Table 8). 수확표에 의한 기준 DBH와 수고를 결정하고 대응표본 T-test를 실행한 결과, 본 연구의 재적추정치는 Seo et al.(2015) 연구의 재적추정치와 유의적 차이가 없는 것으로 나타났으나($p > 0.05$), 수확표 상의 수간재적표와는 유의적 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$).

본 연구의 재적과 현재 수확표 상의 재적을 DBH와 수고급별로 비교한 결과, 모든 직경급에서 수고가 증가함에 따라 본 연구의 재적추정치가 수확표 상의 재적보다 상대적으로 증가하는 추세를 보였다(Table 9). 제주도는 평균 기온과 강수량이 높아 삼나무 생육에 유리한 환경으로 알려져 있으나, 강풍 및 염분 피해에 노출되기 쉬운 환경이다. Eugster(2008)의 연구에 따르면 강한 바람과 염수분부는 초두부 신장을 저해 효과가 있는 것으로 보고한 바 있으며, 제주도 삼나무의 경우 생장과정

에서 직경생장에 비해 초두부 피해에 의한 수고신장 저해로 초살도가 낮은 제주도 고유종 간곡선형태가 나타난 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 우리나라 삼나무 전체 면적의 약 61%를 차지하고 있는 제주도 삼나무림에 대하여 지역적 생육 환경 및 성장특성을 반영한 차별화된 관리체계를 개발하고자 수행되었다. 이와 관련하여 제주권역 맞춤형 재적표를 개발하고자 Kozak 1988, 1994, 2001, 2002, Bi 2000, Muhairwe 1999 및 Sharma and Parton 2009 등 7가지의 주요 수간곡선 모델에 대한 모수를 추정하였다. 모수 추정에 따른 통계적 검정 결과, 최적합식으로 선정된 Muhairwe 1999 모델로부터 재적표를 제작하였으며, 이를 현재 수확표상의 삼나무 재적표와

비교한 결과, 유의적 차이가 있는 것으로 나타났다.

Kozak 1988 모델은 다양한 지역과 수종에 적용되어 높은 적합도를 보인 모델로 삼나무, 편백, 곰솔 등 우리나라 주요 수종의 재적표 제작에 이용된 수간곡선식이다. 그러나 대부분의 수간곡선식은 특정 종에 대해 개발되었으며, 다른 종으로 사용을 확대하기 위해 식의 특성을 추가로 연구하는 과정이 필요하다(Li and Weiskittel, 2010). 이에 특정 수종의 수간곡선식을 개발하는 과정에서 다양한 모델을 적용하고 적합도가 가장 높은 모델을 선정하는 다수의 연구가 진행되었다. 따라서 우리나라 주요 수종에 대한 재적표를 제작하는 과정에서 다양한 수간곡선 모델을 적용한다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 대표적인 Kozak의 4가지 모델을 포함한 총 7가지의 주요 모델을 적용하여 제주도 삼나무에 대한 최적의 모델을 선정하였다. 기존의 제주도 삼나무의 수간곡선식 개발에 관한 연구들과 비교하였을 때 보다 상대적으로 다양한 모델을 적용하였으나, 현재 개발된 수간곡선 모델의 종류는 30개 이상으로 추후 연구를 통해 더 많은 모델을 적용하여 정확도가 높은 재적표의 개발이 필요할 것으로 판단된다. 또한 제주도를 제외한 우리나라 남부지역 삼나무를 대상으로 수간곡선식을 개발하여 지역 및 환경 특성별 맞춤형 임분 관리체계 개발이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 일반연구사업(과제번호: SC0600-2021-01)의 일부 지원으로 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- Bi, H., 2000, Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalyptus, *Forest Science*, 46, 397-409.
- Clark, J. F., 1902, Volume tables and the bases on which they may be built, *Journal of Forest* 1(1), 6-11.
- Eugster, W., 2008, Wind effects. In: Jorgensen SE, Fath BD(eds) *Ecological processes*, vol. 5 of *Encyclopedia of Ecology*, Elsevier, Oxford, 3794-3803.
- Gregoire, T. G., Schabenberger, O., Barrett, J. P., 1995, Linear modelling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent-plot measurements, *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 137-156.
- Gwon, J. H., Seo, H. Y., Lee, K. S., You, B. O., Park, Y. B., Jeong, J. Y., Kim, C. S., 2014, Equations and biomass expansion factors by stand density in *Cryptomeria japonica* plantations, *Journal of Korean Forest Society*, 103(2), 175-181.
- Heinzel, J., Huber, M. O., 2017, Detecting tree stems from volumetric TLS data in forest environments with rich understory, *Remote Sensing*, 9(1), 9.
- Jin, H. O., Chon, S. K., 1987, Classification of needle type and growth characteristics of *Cryptomeria japonica* planted in Cheju province, *Journal of Korean Forest Society*, 76(4), 57-61.
- Kang, J. T., Moon, H. S., Son, Y. M., Ahn, K. W., 2015, An estimation on the stem volume of *Cryptomeria japonica* in Jeju using Kozak's stem taper model, *Journal of Korean Island*, 27(3), 145-160.
- Kozak, A., 1988, A Variable-exponent taper equation, *Canadian Journal of Forest Research*, 18, 1363-1368.
- Kozak, A., 2004, My last words on taper equations, *Forestry Chronicle*, 80(4), 507-515.
- Kozak, A., Munro, D. D., Smith, J. H. G., 1969, Taper functions and their application in forest inventory, *Forestry Chronicle*, 45, 278-283.
- Lappi, J., 2006, A Multivariate, nonparametric stem-curve prediction method, *Canadian Journal of Forest Research*, 36, 1017-1027.
- Lee, D. S., Seo, Y. W., Lee, J. H., Choi, J. K., 2017, Estimation and validation of taper equations for three major coniferous species in Gangwon and North Gyeongsang provinces of South Korea, *Journal of Forest and Environmental Science*, 33(4), 315-321.
- Lee, Y. J., Hong, S. C., Kim, D. G., Oh, S. H., Kim, O. S., Cho, J. U., 2001, Estimation of individual tree volumes for the Japanese Red Cedar plantations, *Journal of Korean Forest Society*, 90(6), 742-746.
- Li, R., Weiskittel, A. R., 2010, Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region, *Journal of Forest Science*, 67, 302.
- Luoma, V., Saarinen, N., Kankare, V., Tanhuanpää, T., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M., 2019, Examining changes in stem taper and volume growth with two-date 3D point clouds, *Forests*, 10, 382.
- Max, T. A., Burkhart, H. E., 1976, Segmented polynomial regression applied to taper equations, *Forest Science*, 22, 283-289.

- Mctague, J. P., Weiskittel, A., 2021, Evolution, history, and use of stem taper equations: a review of their development, application, and implementation, *Canadian Journal of Forest Research*, 51, 210-235.
- Muhairwe, C. K., 1993, Examination and modelling of tree form and taper over time for interior lodgepole pine, Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Canada.
- Muhairwe, C. K., 1999, Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus grandis* for the north coast in New South Wales, Australia, *Forest Ecological Management*, 113, 251-269.
- National Institute of Forest Science, 2004, Forest sites of Korea: forest soil research report, Seoul, Korea, 620.
- National Institute of Forest Science, 2020, Development of forest operation system for the management of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* forests in Korea, Seoul, Korea, 122.
- National Institute of Forest Science, 2020, Stand volume · biomass and stand yield table, Seoul, Korea, 361.
- Saarinen, N., Kankare, V., Vastaranta, M., Luoma, V., Pyörälä, J., Tanhuanpää, T., Liang, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, Xiaowei., Holopainen, M., Hyypä, J., 2017, Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123, 140-158.
- Seo, Y. O., Jung, S. C., Won, H. K., Lee, Y. G., 2015, Taper equation and stem volume table of *Cryptomeria japonica* in Jeju experimental forests, *Journal of Agriculture & Life Science*, 49(1), 71-77.
- Sharma, M., Parton J., 2009, Modeling stand density effects on taper for jack pine and black spruce plantations using dimensional analysis, *Forest Science*, 55, 268-282.
- Tang, C., Wang, C. S., Pang, S. J., Zhao, Z. G., Guo, J. J., Lei, Y. C., Zeng J., 2017, Stem taper equations for *Betula alnoides* in South China, *Journal of Tropical Forest Science* 29(1), 80-92.
- Thomas, C. E., Parresol, B. R., 1991, Simple, flexible trigonometric taper equations, *Canadian Journal of Forest Research*, 21, 1132-113.
- Zhang, S., Sun, J., Duan, A., Zhang, J., 2021, Variable-exponent taper equation based on multilevel nonlinear mixed effect for Chinese fir in China, *Forests*, 12, 126.
-
- Research fellow, Hyun-Soo Kim
Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science
khsggam1@korea.kr
 - Researcher, Su-Young Jung
Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science
suyoung.jung@korea.kr
 - Senior researcher, Kwang-Soo Lee
Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science
beldel660@korea.kr