

난대지역 붉가시나무의 수간곡선식 도출 및 수간재적표 작성

정수영¹ · 이광수¹ · 김현수¹ · 박준형² · 김재엽² · 박천희² · 손영모^{1,2*}

¹국립산림과학원 난대아열대산림연구소, ²한국산지보전협회

Derivation of Stem Taper Equations and a Stem Volume Table for *Quercus acuta* in a Warm Temperate Region

Suyoung Jung¹, Kwangsoo Lee¹, Hyunsoo Kim¹, Joonhyung Park²,
Jaeyeop Kim², Chunhee Park² and Yeongmo Son^{1,2*}

¹Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science,
Jeju 63582, Korea


²Korea Forest Conservation Association, Daejeon 35262, Korea

요약: 본 연구는 난대상록수종인 붉가시나무에 대한 수간곡선을 도출하고 이를 이용하여 수간재적표를 작성하기 위함이고 목적이다. 분석에 사용된 공시목은 전남, 경남, 제주 등에서 수집된 688본이며, 수간곡선 도출을 위하여 적용한 수간곡선 모형은 Max & Burkhart 모형, Kozak 모형 및 Lee 모형 등이다. 3가지 모형 중 우리나라 붉가시나무 수간형태를 가장 잘 설명하는 것은 Kozak 모형인 것으로 분석되었다. 이 모형의 적합도는 0.9583, 편의는 0.0352, 추정치 표준오차의 백분율은 1.1439, 평균절대편차는 0.6751로 각각 나타났다. 붉가시나무의 수간재적표는 수간곡선을 설명하는데 최적인 것으로 나타난 Kozak 모형을 이용하였으며, 재적 계산은 수간고별 직경으로 Smalian 식을 적용시켜 산출하였다. 그리고 이전에 만들어진 붉가시나무 수간재적표 2가지(2007년, 2010년)와 이번에 만든 재적표(2023년) 간을 서로 비교하기 위해 분산분석을 실시하였다. 그 결과 2007년 완도지역에서 만든 재적표가 2010년과 2023년에 만든 재적표 보다 약 2배가 많은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이번에 작성된 수간재적표(2023년)는 공시재료의 지역별 수집범위와 공시목이 많을 뿐만 아니라, 충분한 과학적 기반 하에서 만들어졌다. 따라서 전국단위의 공식적인 붉가시나무 수간재적표로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract: The aim of this study was to derive stem taper equations for *Quercus acuta*, one of main evergreen broad-leaved tree species found in warm temperate regions, and to prepare a stem volume table using those stem taper equations. A total of 688 individual trees were used in the analysis, which were collected from Jeonnam-do, Gyeongnam-do, and Jeju-do. The stem taper models applied to derive the stem curve pattern were the Max and Burkhart, Kozak, and Lee models. Among the three stem taper models, the best explanation of the stem curve shape of *Q. acuta* was found to be given by the Kozak model, which showed a fitness index of 0.9583, bias of 0.0352, percentage of estimated standard error of 1.1439, and mean absolute deviation of 0.6751. Thus, the stem taper of *Q. acuta* was estimated using the Kozak model. Moreover, the stem volume calculation was performed by applying the Smalian formula to the diameter and height of each stem interval. In addition, an analysis of variance (ANOVA) was conducted to compare the two existing *Q. acuta* stem volume tables (2007 and 2010) and the newly created stem volume table (2023). This analysis revealed that the stem volume table constructed in the Wando region in 2007 included about twice as much as the stem volume tables constructed in 2010 and 2023. The stem volume table (2023) developed in this study is not only based on the regional collection range and number of utilized trees but also on a sound scientific basis. Therefore, it can be used at the national level as an official stem volume table for *Q. acuta*.

Key words: analysis of variance (ANOVA), *Quercus acuta*, evergreen broad-leaved tree, stem volume table, kozak model

* Corresponding author
E-mail: pine21c@kfca.re.kr

ORCID
Yeongmo Son  <https://orcid.org/0000-0002-9346-4351>

서론

임목의 직경은 수간(줄기, stem)의 그루터기부터 초두부로 이동함에 따라 점차 감소하며, 이러한 높이별 직경을 연결한 것을 수간곡선(stem taper, stem profile)이라고 부른다. 이런 수간곡선은 임목의 재적을 계산하는데 활용되는데, 수간 상부로 이동할수록 부위에 따라 각기 다른 직경 감소율을 가지며, 수중에 따라서도 서로 다르게 나타나기 때문에 하나의 정형화된 곡선을 수종별로 동일하게 적용할 수가 없다(Kozak et al., 1969; Clark et al., 1980; Sterba, 1980; Bruce et al., 1989; Bonnor et al., 1990). 수종별로 고유의 수간형을 분석하고 이해함에 따라 수간재적을 산출할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 이용한 바이오매스의 추정, 목재생산량과 현존량 추정, 임목의 성장조건과 밀도 경쟁의 이해 등에 대한 정보를 추가로 획득할 수도 있다(Parresol et al., 1986; Newnham, 1992).

임목수간의 형상은 복잡하지만 몇 가지의 기하학적 형태로 개략적인 모양을 그릴 수 있다. 즉, 임목 수간형태는 크게 포물선형(paraboloid), 원추형(conoid) 및 나이로이드형(neiloid) 3가지로 나눌 수 있다(Burkhart et al., 2018; National Institute of Forest Science, 2018; Moya et al., 2020; Yang et al., 2020). 이들에 대한 일반적인 식의 형태는 $y=kx^r$ 로서, k는 간곡선률(rate of taper), r는 회전체의 형태(shape of the solid), y는 반경 또는 직경, x는 정점 또는 마지막으로부터의 거리를 나타낸다. 수간의 각 부분은 이들 3부분이 결합되어 형성된다. 임목의 근주부는 나이로이드형이며 초두부는 원추형을 가지게 되는데, 이를 제외한 임목의 대부분은 포물선형이 차지하게 된다.

1903년 Höjer는 수간고별 직경, 흉고직경, 수간형상지수 등을 이용하여 수간곡선 수식을 처음 개발하게 되었는데, 그 당시는 개념 이해 부족 등으로 사용빈도는 아주 낮았다(Wenger et al., 1984). 이후 수많은 학자들이 수종별 다양한 수간곡선식을 개발하였으며, 대체적으로 1940년대 초반까지는 수간을 단순한 식으로 표현하는데 그쳤다. 1940~50년대에는 간곡선 이론을 재정립하고 이를 발전시킨 시기라 볼 수 있으며, 1960년대 이후는 다양한 수간곡선 형태를 전자계산기로 분석하게 됨에 따라 아주 복잡한 수간곡선식이 개발되기도 하였다(Goulding et al., 1976; Sterba, 1980). 수간곡선모형은 단순 방정식모델, 부분적 모델 및 변량지수모델로 크게 나뉘는데, 이 중 단순방정식 모델로는 1969년 Kozak 등이 개발한 식이 가장 유명하며, 줄기를 부분적으로 분리하여 만든 모델은 Max & Burkhart가 1976년 만든 식이 대표적이다. 그리고 변량지수모델로는 Kozak(1988, 2004), Newnham(1992) 등이 만든 식이 널리 알려져 있다.

붉가시나무는 참나무과의 상록교목으로 우리나라 제주도 및 남부 도서, 남부 해안 산지 등에 주로 분포하고 있다. 이 수종은 목재의 색이 붉어 붉가시나무로 불리어지고 있으며, 목재의 이용 측면에서는 건축, 가구, 기구재 등으로 쓰임새가 있으나, 생산 가능한 면적이 넓지 않은 관계로 고급용재임에도 불구하고 그다지 많이 알려져 있지 않다. 또한 용재로서 거래가 거의 되지 않기 때문에 매매의 기준이 되는 공식적인 재적표 또는 중량표가 마련되어 있지 않고, 국소지역을 대상으로 붉가시나무의 직경 및 수고생장, 탄소저장량, 간벌효과, 군집구조 등의 일부 연구만 수행된 상태이다(Kim et al., 2000; Lee et al., 2005; Hwang et al., 2006; Jung et al., 2015; Park et al., 2015).

본 연구는 기후온난화 등으로 한반도에서 점차 생육분포 영역 확대가 예상되는 붉가시나무의 임목 성장특성을 반영한 수간곡선의 형태를 파악하고, 이를 이용하여 목재 거래 및 탄소계정의 기준이 되는 재적표를 도출하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 공시 재료

붉가시나무 수간곡선식 도출 및 수간재적표 작성을 위하여 조사, 측정된 임목 개체수는 총 688본이었는데, 조사 자료는 2007년부터 현재까지 국립산림과학원에서 수집된 모든 자료를 취합한 것이다. 이들은 경남 고성과 진주, 전남 완도, 그리고 제주 서귀포 등지에서 정상적으로 생육하고 있는 개체목을 대상으로 임목을 벌목하여, 현장에서 수간고 0.2 m, 1.2 m, 3.2 m, 5.2 m...에서 수피를 포함한 직경을 각각 측정하였다. 그리고 이들 부위에서 원판을 채취하여 실험실로 이동한 후, 수간석해에 의한 방법에 의해 5년 단위로 수간고별 직경 자료를 측정하였다. 5년 단위의 원판 내부에서 측정되는 직경은 수피에 대한 정보가 없기 때문에, 수피가 측정된 원판 자료를 모두 모아 수간고 직경별 수피두께 추정식을 만들어 적용하였다.

Table 1에서, 조사된 개체목의 흉고직경급은 최대 약 33 cm, 수고는 약 17 m 였으며, 수령은 54년생까지 분포하는 것으로 나타났다.

2. 분석 방법

1) 적용한 수간곡선모형

붉가시나무의 최적 수간곡선 모델을 개발하기 위해 이용된 모델은 국립산림과학원에서 국내 10여 수종 이상의 수간재적표를 만들기 위해 검증하여 적용하였던 Max & Burkhart 수간곡선모형, Kozak 모형 그리고 Lee 모형 등을

Table 1. General characteristic of sample plots in *Quercus acuta*.

Species	Growth factors	No. of sample trees	DBH (cm)	Height (m)	Tree age
<i>Quercus acuta</i>		688	$\frac{10.6}{1.1-32.9}$	$\frac{10.5}{3.2-16.8}$	$\frac{31}{4-54}$

그대로 원용하였으며, 이들 식의 형태는 Table 2와 같다.

Max & Burkhart 모형(1976)은 수간을 세 부분으로 나누어 2개의 변곡점에서 연결하는 부분모델회귀식(segmented model regression)으로 수간곡선 추정에 많이 이용되고 있으며, 정확성 면에서 인정받아 많은 활용 연구가 이루어진 바 있다(Cao et al., 1980; Parresol et al., 1986; Clark et al., 1991). Kozak 모형(1988)은 변량지수식(variable exponent taper equation)으로, 수간을 두 부분으로 나누고 하나의 변곡점(p)을 갖는데, 이는 일반적으로 표본목의 상대 수간높이에 대한 상대 수간직경 산포도를 그려 결정하게

된다. 이 모형은 미국과 캐나다에서 널리 이용되고 있다 (Figueiredo, 1995). Lee식(1999)은 우리나라에서는 처음 개발된 수간곡선식으로 수간형태를 그루터기부터 나일로 이드형, 포물선형, 포물선·원추형 및 원추형으로 구분하여 지수식으로 표현한 것으로, 안면도 소나무림 수간곡선 형태 구명 등에 적용한 바 있다.

2) 수간곡선모형의 통계적 검증

각 수간곡선 모형의 수간높이별 수간직경 추정 이행능력을 평가하기 위해, Table 3과 같이 추정모형의 적합성

Table 2. Taper equations selected for this study.

Model	Taper Equation
Max and Burkhart (1976)	$d = DBH \sqrt{b_1 \left(\frac{h}{H} - 1\right) + b_2 \left(\frac{h^2}{H^2} - 1\right) + b_3 \left(a_1 - \frac{h}{H}\right)^2 I_1 + b_4 \left(a_2 - \frac{h}{H}\right)^2 I_2}$ <p>where d = diameter outside bark at height (cm) DBH = diameter at breast height outside bark (cm) h = height along stem (m) H = total height (m) b_i = parameters a_i = parameters (i=1; upper, i=2; lower)</p> $I_i = 1, \text{ if } \frac{h}{H} < a_i$ $0, \text{ otherwise}$
Kozak (1988)	$d = a_1 DBH^{a_2} a_3^{DBH} X^{b_1 Z^2 + b_2 \ln(Z+0.001) + b_3 \sqrt{Z} + b_4 e^Z + b_5 \left(\frac{DBH}{H}\right)}$ <p>where Z = relative height ($= \frac{h}{H}$)</p> $X = \frac{1 - \sqrt{\frac{h}{H}}}{1 - \sqrt{p}} \quad (p = \frac{HI}{H}, \text{ HI; inflection point})$ <p>a_i, b_i = parameters</p>
Lee (1994)	$d_x = b_1 \cdot DBH^b \cdot \left(1 - \frac{x}{h}\right)^{[c_1 \cdot \left(\frac{x}{h}\right)^2 + c_2 \cdot \left(\frac{x}{h}\right) + c_3]}$ <p>where $\frac{x}{h}$ = relative height</p>

Table 3. Statistics for evaluating performance of taper equations.

Statistics	Equation
Fitness index (FI)	$FI = 1 - \sum (Y_i - \widehat{Y}_i)^2 / (\sum (Y_i - \bar{Y})^2)$
Bias	$\bar{D} = \sum (Y_i - \widehat{Y}) / n$
Standard error of estimate as percent of the mean (SEE%)	$SEE\% = \sqrt{(\sum (e_i - \bar{D})^2) / (N-1) / \bar{Y}} \times 100$
Mean absolute difference (MAD)	$ \bar{D} = \sum Y_i - \widehat{Y} / n$

(Fitness index, FI), 편의(Bias), 추정치 표준오차의 백분율(Standard error of estimate, SEE%), 평균절대편차(Mean absolute deviation, MAD) 등의 검정통계량을 이용하였다.

각종 검정통계량의 기능을 알아보면, 적합도지수(FI)는 회귀분석에서의 결정계수(R^2)의 개념으로 실측치와 추정치와의 관계 정도를 구명하기 위하여 이 지수를 도출한다. 편의(Bias)는 추정량이 평균적으로 모수의 참값에 대해 어느 정도 과소치 혹은 과대치를 주는 지를 나타내 주며, 추정치 표준오차의 백분율(SEE%)은 모델의 상대적인 정도(accuracy)를 평가하고, 평균절대편차(MAD)는 각 추정치 잔차의 절대값을 평균한 값으로 개개 추정치의 평균적인 편차 크기를 나타내 주는 것이다(National Institute of Forest Science, 2004).

3) 붉가시나무 수간재적표 작성 및 기존 수간재적표와의 비교

최적의 수간곡선모형이 도출되면 수간재적표를 만드는데, 본 분석에서는 먼저 측정된 수간고별 직경을 최적의 수간곡선식으로 곡선화한 후 이 곡선을 이용, 수간고 10 cm 간격으로 직경을 추정하고, Smalian식의 구분구적법 적용으로 개체목별 재적을 산출하였다(Kim, 1992). 개체목에 대한 재적을 수고와 직경급별로 배열한 것이 수간재적표가 된다.

본 연구에서 새롭게 만든 붉가시나무 재적표를 기존(2007년, 2010년)에 만들어진 붉가시나무 수간재적표와 차이를 비교하고, 재적표 활용에 대한 기준을 설정하기 위하여, 각 재적표에서 개체목의 수고와 직경급별 대표 재적을 추출하여 상호간 비교(ANOVA 분석) 하였다(Kim, 2000).

결과 및 고찰

1. 붉가시나무 수간곡선식 추정

3가지 수간곡선 모형을 이용하여 붉가시나무 수간곡선식을 도출한 결과, Table 4와 같이 각 모형별 파라미터 및 검정통계량을 산출할 수 있었다.

Table 4에서 Kozak 모형이 적합도지수 및 기타 검정통계량 값에 있어 가장 우수함을 알 수 있었으며, 이 모형이 붉가시나무 수간곡선을 추정하는데 있어 최적적임을 알 수 있었다. 국내의 학술연구에서도 수종별 수간곡선을 설명함에 있어 Kozak 모델이 최적임을 제시한 사례가 다수 존재하고 있다(Son et al., 2002; Lee et al., 2014; Chiu et al., 2015; Shahzad et al., 2020; Sandoval et al., 2022).

Kozak 모형으로 붉가시나무 수간곡선을 도출한 연구는 2007년에 Son et al.(2007)이 수행한 바 있고, 2010년에는 Chung et al.(2010)에 의해 연구된 바 있는데, 2007년에 수행한 연구에서의 Kozak 모형의 변곡점은 0.25, 2010년은 0.22로 나타난 것으로 보고되었다. 금번 연구는 0.20이었는데, 즉 수간의 상대적인 높이인 20% 수준에서 변곡점이 형성되는 것으로 나타났다. 이는 동일 수종이라 하더라도 연구자의 관점 또는 조사된 자료의 특징에 따라 수간형태가 달라질 수 있음을 보여 주는 사례라 볼 수 있겠다.

Max & Burkhart 모형, Kozak 모형, Lee 모형을 이용하여 표준목을 대상으로 수간곡선을 도식화한 바 Figure 1과 같다. 3가지 모형으로 표현된 상대수고별 직경의 분포 패턴은 유사한 것으로 나타났다. 다만 Figure 1로만 볼 때, Max & Burkhart 모형으로 붉가시나무의 직경을 도출할

Table 4. Parameter estimates for three taper equations in *Quercus acuta*.

Model	Max and Burkhart			Kozak			Lee		
		Estimate	S.E.		Estimate	S.E.		Estimate	S.E.
Parameters	a_1	0.6594	0.0382	a_0	1.0744	0.0237	b_1	1.5453	0.0181
	a_2	0.0919	0.0302	a_1	0.9756	0.0112	b_2	0.8899	0.0040
	b_1	-3.3047	0.1833	a_2	0.9958	0.0005	c_1	0.7607	0.1245
	b_2	1.5770	0.1027	b_1	1.0632	0.1675	c_2	-0.9747	0.1606
	b_3	-1.2926	0.1220	b_2	-0.2155	0.0389	c_3	1.0789	0.0534
	b_4	26.2685	19.6839	b_3	1.9649	0.3850	-	-	-
	-	-	-	b_4	-0.9399	0.2049	-	-	-
	-	-	-	b_5	0.1848	0.0056	-	-	-
FI	0.9306			0.9583			0.9412		
Bias	0.3557			0.0352			0.1001		
SEE	1.4744			1.1439			1.3577		
MAD	0.8514			0.6751			0.8128		

(note) S.E.: Standard error of the estimated parameter, FI: Fitness index, SEE: Standard error of estimate (%), MAD: Mean absolute deviation

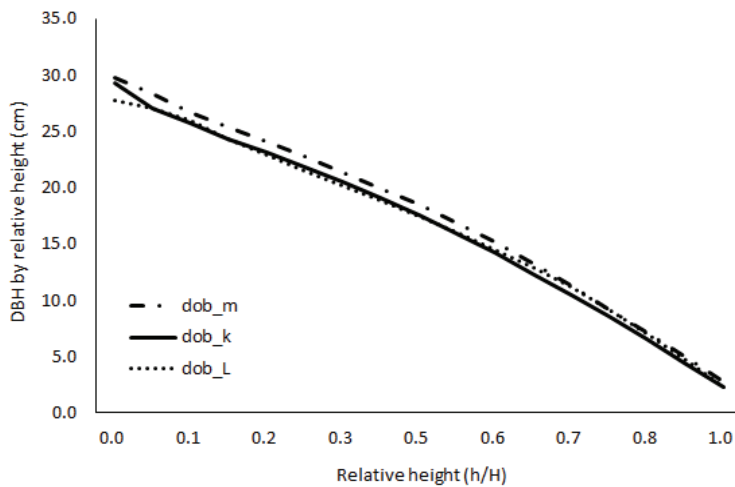


Figure 1. Stem taper curve pattern by taper models.

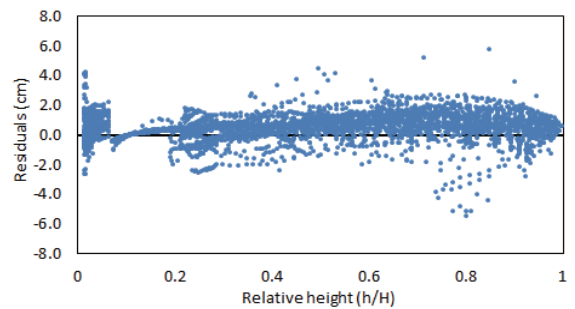
(Note) dob: Diameter outside bark (cm), dob_m: Stem taper curve presented in Max & Burkhart model, dob_k: Kozak model, dob_L: Lee model

시, 다른 두 개 모형보다 상대수간고 중앙부위 이하에서는 직경이 더 큰 값을 보일 수도 있음을 알 수 있었다. 이런 가시적인 현상을 정확하게 판단할 수 있는 것이 잔차분석인데, 우리가 사용한 3개 모형들이 실측치를 얼마나 잘 설명해 줄 수 있는 지에 대한 잔차분포를 Figure 2와 같이 도식화 하였다.

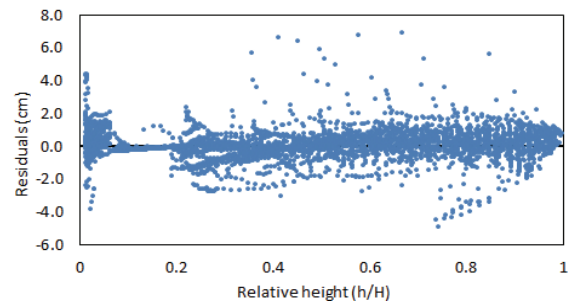
Figure 2에서 Max & Burkhart 모형과 Lee 모형은 그루터기 부분의 직경을 과소 추정하고 있으며, 상대수고 (relative height) 약 50% 이상부터는 과소 추정하고 있음을 알 수 있었다. 잔차도 그림에서 보다시피, 이 두가지 모형의 잔차분포가 “0”을 중심으로 위쪽에 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이에 반해 Kozak 모형은 앞선 두 모델과는 달리 그루터기 부분의 직경은 잘 설명하고 있었으며, 상대수고 전반에서 잔차도 “0”을 중심으로 상하 균형적으로 잔차가 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 결론적으로 세 모형의 잔차분포에서도 역시 Kozak 모형이 붉가시나무의 수간고별 직경을 추정하는데 최적임을 알 수 있었다.

2. 붉가시나무 수간재적표

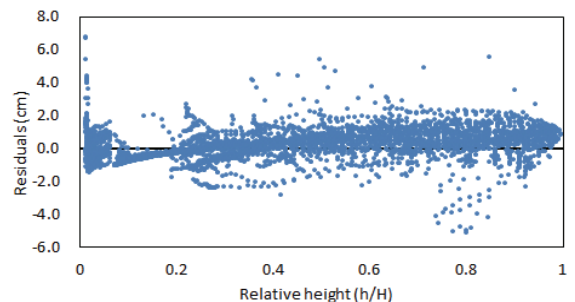
Kozak 수간곡선모형을 이용하여 붉가시나무의 수간재적표를 작성할 수 있으며, 그 중 일부 구간의 재적표를 Table 5와 같이 표현할 수 있었다. 이 표를 이용하면 붉가시나무의 흉고직경과 수고에 따른 단목 재적을 얻을 수 있을 것이며, 용재의 매각 거래에 물량을 산정하는 기준이 될 수 있을 것이다. 본 붉가시나무 재적표는 그간 일부 지역 즉, 완도 수목원 지역만의 조사(Son et al., 2007)와 제주도 지역만의 조사(Chung et al., 2010) 분석결과와는 다르게 이들 자료를 포함함은 물론이고, 전남 완도지역에



(a) Residuals of Max & Burkhart's taper model



(b) Residuals of Kozak's taper model



(c) Residuals of Lee's taper model

Figure 2. Residual error scattergram for the diameter estimation by stem taper models.

Table 5. Stem volume table for *Quercus acuta*.

(단위; D(DBH): cm, H(Height): m)

H \ D	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
2	0.0003	0.0011	0.0021	0.0033	0.0047	0.0063	0.0081	0.0100	0.0122	0.0145	0.0172	0.0201	0.0232	0.0267	0.0306
3	0.0005	0.0019	0.0038	0.0062	0.0090	0.0122	0.0157	0.0195	0.0238	0.0284	0.0335	0.0389	0.0449	0.0514	0.0584
4	0.0008	0.0027	0.0056	0.0092	0.0134	0.0183	0.0236	0.0294	0.0358	0.0427	0.0501	0.0580	0.0665	0.0756	0.0853
5	0.0010	0.0036	0.0074	0.0123	0.0180	0.0245	0.0318	0.0397	0.0482	0.0574	0.0672	0.0776	0.0887	0.1004	0.1128
6	0.0012	0.0044	0.0092	0.0153	0.0226	0.0309	0.0401	0.0501	0.0609	0.0725	0.0848	0.0978	0.1115	0.1259	0.1411
7	0.0014	0.0053	0.0110	0.0185	0.0273	0.0374	0.0486	0.0608	0.0739	0.0880	0.1028	0.1185	0.1349	0.1522	0.1702
8	0.0017	0.0061	0.0129	0.0216	0.0320	0.0439	0.0572	0.0716	0.0871	0.1037	0.1212	0.1396	0.1589	0.1790	0.2000
9	0.0019	0.0070	0.0147	0.0247	0.0367	0.0505	0.0658	0.0825	0.1005	0.1197	0.1399	0.1611	0.1833	0.2064	0.2304
10	0.0021	0.0078	0.0165	0.0279	0.0415	0.0571	0.0745	0.0935	0.1140	0.1358	0.1588	0.1829	0.2081	0.2343	0.2613
11	0.0023	0.0087	0.0184	0.0310	0.0463	0.0638	0.0833	0.1046	0.1276	0.1521	0.1779	0.2050	0.2332	0.2625	0.2928
12	0.0026	0.0095	0.0202	0.0342	0.0511	0.0705	0.0921	0.1158	0.1413	0.1685	0.1972	0.2272	0.2585	0.2910	0.3246
13	0.0028	0.0104	0.0221	0.0374	0.0559	0.0771	0.1010	0.1270	0.1551	0.1850	0.2166	0.2496	0.2841	0.3198	0.3567
14	0.0030	0.0112	0.0239	0.0406	0.0607	0.0839	0.1098	0.1383	0.1689	0.2016	0.2361	0.2722	0.3099	0.3489	0.3891
15	0.0032	0.0121	0.0258	0.0437	0.0655	0.0906	0.1187	0.1495	0.1828	0.2183	0.2557	0.2949	0.3358	0.3781	0.4218
16	0.0035	0.0129	0.0276	0.0469	0.0703	0.0973	0.1276	0.1609	0.1967	0.2350	0.2754	0.3178	0.3619	0.4076	0.4547
17	0.0037	0.0138	0.0295	0.0501	0.0751	0.1041	0.1366	0.1722	0.2107	0.2518	0.2952	0.3407	0.3881	0.4371	0.4878
18	0.0039	0.0147	0.0313	0.0533	0.0800	0.1108	0.1455	0.1836	0.2247	0.2686	0.3150	0.3637	0.4144	0.4669	0.5210
19	0.0041	0.0155	0.0332	0.0565	0.0848	0.1176	0.1545	0.1950	0.2388	0.2855	0.3349	0.3868	0.4408	0.4967	0.5544
20	0.0044	0.0164	0.0350	0.0597	0.0896	0.1244	0.1634	0.2064	0.2528	0.3024	0.3549	0.4099	0.4672	0.5266	0.5879

Table 6. ANOVA procedure table among 3 stem volume table in *Quercus acuta*.

Source	DF	SS	F-value	Pr. > F
Model	2	2.4792	5.24	0.0073
Error	81	19.1769		

(note) DF: degree of freedom, SS: sum of square due to error

Table 7. Duncan test grouping by the time of developing a volume table.

Volume table	Mean stem volume	Significant grouping
Volume table (Wando, 2007)	0.6930	A
Volume table (Jeju, 2010)	0.3439	B
Volume table (this study, 2023)	0.3149	B

서의 추가 자료수집 및 전남 해남군, 경남 고성군 및 진주시 시험지 등에서의 수간석해 자료를 모두 포함하였기 때문에 현 수준에서는 공식적으로 불가시나무 재적표로 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

3. 불가시나무 수간재적표 비교

상기 언급한 바 있지만, 2007년과 2010년에 불가시나무에 대해 수간곡선이 도출되고 재적표가 작성된 바 있는데,

2007년은 전남 완도지역을 대상으로 약 30본의 입목을 대상으로 조사한 결과이며, 2010년은 278본을 대상으로 조사한 결과를 제시한 것이다(Son et al., 2007; Chung et al., 2010). 기존 재적표(2 종류)와 금번 재적표와의 비교를 위하여 직경 40 cm 내 재적으로 3개 재적표를 비교한 결과 Table 6, Table 7과 같다.

시기별로 작성된 불가시나무 재적표의 비교하기 위한 분산분석 결과(Table 6), 3개 재적표 집단에서 1% 이상의

유의수준에서 유의성이 인정되어, 시기별(2007년, 2010년, 2023년)로 작성한 재적표 간 일부 재적의 평균값이 차이가 있음을 알 수 있었다.

붉가시나무 임분에서 도출된 시기별 재적표를 상호 비교한 결과(Table 7), 완도지역에서 조사한 자료로 작성한 재적표의 평균값이 가장 높았으며, 제주지역(2010)과 이번(2023)에 조사 분석한 재적표 집단 간은 평균적으로 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 분산분석에 따르면 재적표는 크게 두 그룹(2007년 재적표(A)와 2010년·2023년 재적표(B))으로 나누어지는 것으로 나타났다. 이런 결과는 2007년 조사된 완도지역에서 조사한 수간고별 붉가시나무 직경 측정 자료가 30여본에 불과하여, 전국 단위의 붉가시나무의 재적 특성을 제대로 반영하지 못하였을 것으로 판단된다. 다만 이 자료도 조사한 완도지역에 한해서 재적 생장은 설명할 수 있을 것이라고 본다.

4. 모델의 활용

우리나라에서 생육하고 있는 붉가시나무림의 임목 수간형태를 파악하고자 Max & Burkhardt 모형, Lee 모형, Kozak 모형을 후보모형의 추정결과를 비교한 결과 Kozak 모형이 3개 모형 중 최적 모형으로 선정되었다. 현재 우리나라의 난대상록활엽수종 중 조립수종으로 붉가시나무가 가장 대표적인 자원화 수종인데 이에 대한 재적표는 현재 상수리나무 등 낙엽성 참나무류의 재적표를 적용하고 있으나, 직경 수고급에 따른 재적의 차이가 발생하고 있어 본 연구결과로부터 작성된 재적표는 그 활용성이 높다고 할 수 있다. 하지만 본 재적표는 전국의 붉가시나무림을 대상으로 작성한 결과로서, 향후 붉가시나무 재적표 활용에 있어서 생육분포대별 예를 들면, 제주도, 진도, 완도 등의 서남해안 지역별 재적표 활용에 있어서는 지역별 생장특성을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 향후 연구에서 상수리나무 등 낙엽성 참나무류, 지역별 붉가시나무림에 대한 재적표에 관한 비교 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다.

결 론

우리나라 남부지방의 대표 상록활엽수인 붉가시나무에 대한 수간형태를 파악하고, 이를 이용하여 재적표를 개발하고자 본 연구를 수행하였다. 그동안 붉가시나무에 대한 재적표는 2007년과 2010년, 2회에 걸쳐 국소적인 지역의 표본목을 대상으로 만들어진 바 있다. 그러나 이들은 표본수의 부족 또는 일부 지역에만 국한되어 측정된 자료였기 때문에 전국단위의 재적표로 사용하기에는 다소 무리가

있었다.

수종별 수간곡선을 가장 잘 설명한다고 알려져 있는 Max & Burkhardt 등 3가지 수간곡선 모델을 붉가시나무에 적용한 후, 각 모델의 적합도지수 및 기타 검정통계량 값으로부터 모델 적합도를 비교분석 해 본 결과 Kozak 식의 모형이 가장 높게 나타났다. 따라서 Kozak 수간추정모형을 이용하여 각 개체목의 수간고별 직경을 추정하고 이를 Smalian 식으로 구분구적하여 직경 및 수고급별 수간재적을 산출하였다. 또한 2007년과 2010년 작성하였던 붉가시나무 수간재적표와 이번에 만든 수간재적표(2023년) 간에 어떠한 차이가 있는지를 다중검정(Duncan's multiple test) 하였는데, 재적 평균값이 2007년 수간재적표와 2010년·2023년 수간재적표로 크게 2개 그룹으로 구분되었다. 2007년에 만들었던 재적표는 완도지역에 국한된 표본수가 적었던 자료(약 30본)로 만들었던 관계로, 동일 직경과 수고에서 나타나는 재적의 평균값이 비교 대상 그룹(2010년, 2023년)과는 약 2배 정도 높은 값을 보였다. 이상의 결과로부터 2007년 재적표 자료를 전국단위로 확장시켜 활용하기에는 신뢰성 확보가 어려울 것으로 판단되었다. 이번에 작성된 수간재적표는 지역적으로 경남, 전남, 제주 등지의 붉가시나무 주요 생육지에서 확보한 표본목 688본 자료를 활용하여 과학적 기반하에 도출된 것으로, 해당 수종의 공식적 수간재적표로 활용하는데 충분한 신뢰성을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

국립산림과학원에 의하면 현재 남부 및 제주도 지역에 약 1,800 ha 정도의 붉가시나무가 생육하고 있음을 밝혔고 (Yoo et al., 2014), 이 수종은 향후 기후변화에 따라 분포 범위가 점차 북상할 것으로 예상하고 있다. 이 수종에 대한 용재로서의 거래뿐만 아니라 탄소계정 등 탄소경영을 위해서는 현실림의 생장특성을 반영한 재적(m³, 부피)에 대한 기준을 명확하게 하여야 한다. 본 연구로부터 도출된 붉가시나무의 수간재적표는 현재의 임목 축적량 산정과 아울러 미래 시점에 남부 및 중부권 주요 수종이 될 붉가시나무림의 산림경영계획 수립 및 이행시 다양한 의사결정 자료로서 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 국립산림과학원 일반연구사업(SC0 600-2021-01)의 지원에 의해 수행된 연구결과입니다.

References

Bonnor, G.M. and Boudewyn, P. 1990. Taper-volume equa-

- tions for major tree species of the Yukon Territory. Forestry Canada Pacific and Yukon Region-Information Report BC-X-323. pp. 18.
- Burkhart, H.E., Avery, T.E. and Bullock, B.P. 2018. Forest Measurements (6th ed.), Waveland Press, Inc. pp. 455.
- Cao, Q.V., Burkhart, H.E. and Max, T.A. 1980. Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. For. Sci. 26(1): 71-80.
- Chiu, C.M., Chien, C.T. and Nigh, G. 2015. A comparison of three taper equation formulations and an analysis of the slenderness coefficient for Taiwan incense cedar (*Calocedrus formosana*). Australian Forestry 78(3): 159-168.
- Chung, Y.G., Kim, D.H. and Kim, C.M. 2010. Development of stem profile and taper equations for *Quercus acuta* in Jeju experiment forests. Journal of Korean Society of Forest Science 99(1): 57-61.
- Clark, A., Souter, R.A. and Schlaegel, B.E. 1991. Stem profile equations for southern tree species. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. pp. 117.
- Figueiredo-Filho, A., Borders, B.E. and Hitch, K.L. 1996. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in Southern Brazil. Forest Ecology and Management 83: 39-46.
- Goulding, C.J. and Murray, J.C. 1976. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. New Zealand Journal of Forest Science 5(3): 313-322.
- Hwang, J.H., Lee, S.T., Park, N.C., Choi, J.C., Shin, H.C., Lee, K.J. and Lee, K.S. 2006. Changes in soil chemical properties after thinning in *Quercus acuta* stand. Journal of Korean Society of Forest Science 95(6): 657-662.
- Jung, S.Y., Ju, N.G., Lee, K.S., Yoo, B.O., Park, Y.B., Yoo, S.B. and Park, J.H. 2015. Thinning intensity and growth response in a *Quercus acuta* stand. Journal of Korean Society of Forest Science 104(4): 536-542.
- Kim, C.R. 2000. SAS, a statistic box. Data Plus. pp. 592.
- Kim, C.Y., Lee, J.S., Oh, K.I., Jang, S.K. and Park, J.H. 2000. Community ecological study on the *Quercus acuta* forests in Bogildo island. Journal of Korean Society of Forest Science 89(5): 618-629.
- Kim, G.D. 1992. Forest Measurement. Hwangmunsa. pp. 282.
- Kozak, A. 2004. My last words on taper equations. Forestry Chronicles 80(4): 507-515.
- Kozak, A., Munro, D.D. and Smith, J.G. 1969. Taper functions and their application in forest inventory. The Forestry Chronicle 45: 278-283.
- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. Canadian Journal of Forest Research 18: 1363-1368.
- Lee, S.T., Son, Y.M., Lee, K.J., Hwang, J.H., Choi, J.C., Shin, H.C. and Park, N.C. 2005. Aboveground carbon storage of *Quercus acuta* stands by thinning intensity. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 7(4): 282-288.
- Lee, W.K. 1994. Stem and stand taper model using spline function and linear equation. Journal of Korean Society of Forest Science 83(1): 63-74.
- Lee, Y.J., Lumbres, R. and Pyo, J.G. 2014. Development of stem taper equations for *Pinus kesiya* in Benguet province, Philippines. Forest science and technology 10(1): 22-28.
- Max, T.A. and Burkhart, H.E. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. Forest Science 22: 283-289.
- Moya, R., Gaitán-Álvarez, J., Ortiz-Malavassi, E., Berrocal, A. and Fernández, D. 2020. Equations for predicting heartwood merchantable volume and tradable sawlog in *Tectona grandis*. Journal of Tropical Forest Science 32(4): 379-390.
- National Institute of Forest Science (NIFoS). 2004. Assessment and prediction system for major species in Korea. National Institute of Forest Science, Research book, pp. 129.
- National Institute of Forest Science (NIFoS). 2018. Guideline of forest measurement and survey. National Institute of Forest Science, New research book, No. 113. pp. 191.
- Newnham, R.M. 1992. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. Canadian Journal of Forest Research 22: 210-223.
- Park, J.H., Jung, S.Y., Yoo, B.O., Ju, N.G., Lee, K.S., Park, Y.B. and Kim, H.H. 2015. Journal of Agriculture & Life Science 49(6): 19-26.
- Parresol, B.R., Hotvedt, J.E. and Cao, Q.V. 1986. A volume and taper prediction system for bald cypress. Can. J. For. Res. 17: 250-259.
- Sandoval, S. and Acuña, E. 2022. Stem taper estimation using artificial neural networks for nothofagus trees in natural forest. Forests 13(12): 2143-2160.
- Shahzad, M.K., Hussain, A., Burkhart, H.E., Li, F. and Jiang, L. 2020. Stem taper functions for *Betula platyphylla* in the Daxing'an Mountains, northeast China. Journal of Forestry Research 32(2): 529-541.
- Son, Y.M., Lee, K.H., Kim, R.H. and Seo, J.H. 2007. Development of stem profile and taper equations for *Quercus acuta* in Wando. Korean Journal of Forest Measurements 10: 1-6.
- Son, Y.M., Lee, K.H., Lee, W.K. and Kwon, S.D. 2002. Stem

- taper equations for six major tree species in Korea. Journal of Korean Society of Forest Science 91(2): 213-218.
- Sterba, H. 1980. Stem curves -a review of the literature. Forestry Abstracts. 41(4): 141-145.
- Wenger, K.F. et al. 1984. Forestry handbook (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc. pp. 1335.
- Yang, B., Jia, H., Zhao, Z., Pang, S. and Cai, D. 2020. Horizontal and vertical distributions of heartwood for teak plantation. Forests 11(2): 225-237.
- Yoo, B.O. et al. 2014. Resources and distribution by major species in warm temperate region. National Institute of Forest Science (NIFoS), Research Breaking News. pp. 23.

Manuscript Received : July 14, 2023

First Revision : July 28, 2023

Second Revision : September 21, 2023

Third Revision : October 29, 2023

Accepted : October 30, 2023