

제주시험림의 붉가시나무 수간형태와 수간곡선식 추정

정영교 · 김대현* · 김철민
국립산림과학원 난대산림연구소

Development of Stem Profile and Taper Equation for *Quercus acuta* in Jeju Experiment Forests

Young Gyo Chung, Dae Hyun Kim* and Cheol Min Kim

Warm Temperate Fores Research Center, Korea Forest Research Institute, Seougiipo 679-050, Korea

요 약: 본 연구는 난대산림연구소의 제주시험림에 있는 붉가시나무(*Quercus acuta*)에 대한 개체목의 수간곡선식 추정 및 간제적을 추정하기 위하여 수행되었다. 최적의 추정식을 선택하기 위하여 Max and Burkhart식, Kozak식 및 Lee식을 적용하여 각 식의 직경 추정에 대한 검정 통계량 및 실측치와 추정치간의 오차분포를 검증하였다. 그 결과 Max and Burkhart식 및 Lee식이 특정 구간에서 과대치 또는 과소 추정치를 보인데 반하여 Kozak식은 전구간에서 고른 분포를 보였다. 추정력이 가장 좋은 Kozak식을 활용하여 수피포함 재적표를 작성하였다.

Abstract: Data with collected from 278 trees sampled through out the climatic range of *Quercus acuta* in Jeju Experiment Forests. The models tested to select the best-fit equations form the Max & Burkhart's model, Kozak's model, and Lee's model. Performance of the equations in predicting of residuals on predicted values. In result, all three models gave slightly better values of fit statistics. In plotting residuals against predicted diameter, Max & Burkhart's model showed underestimation in predicting small diameter and Lee's Model did the same in predicting small diameter. Based on the above analysis of three models in predicting stem taper, Kozak's model was chosen for the best-fit stem taper equations, and its parameter estimates was given for *Quercus acuta*. Kozak's model was used to develop a stem volume table outside bark for *Quercus acuta*.

Key words : *Quercus acuta*, taper equation, stem, kozak's model, jeju experiment forests

서 론

임분생장의 중요한 기초를 이루는 것은 수간의 형태 및 생장이라 할 수 있으며, 수간의 형태 및 생장이 반영된 것이 수간의 재적이다. 수간의 재적은 일반적으로 흉고직경과 수고 같은 기본적인 특성을 바탕으로 결정이 된다. 하지만, 수간의 형태는 나무의 수고 성장량 차이와 서로 다른 수간들의 높이로 인한 직경생장의 비율에서의 차이로 인하여 수간형의 변화가 나타나며, 이러한 수간형의 변화는 재적에 대한 오류로 나타나게 된다. 수간형의 변화에는 많은 요인들이 관여하게 되는데, 품종의 변이, 기후적인 요인, 입지조건, 나무의 수령, 나무의 위치, 낙엽시기, 입목 밀도 등도 영향을 미칠 수 있다(Muhairwe, 1994).

수간의 생장이 반영된 재적 파악은 수확량 결정, 시장

으로의 판매계획 수립, 생장과 비례하는 벌채량 결정과 같은 산림경영에 있어서 의사결정에 필요하다(Ormerod, 1973). 나무의 재적 파악에는 흉고직경, 수고 또는 형수등과 같은 인자들에 의하여 미리 재적을 계산하여 쉽게 볼 수 있도록 만든 수간재적표가 주로 활용되고 있는데, 수간재적표를 작성하는 방법에는 여러 가지 방법이 활용되고 있으며, 최근에는 수간곡선식 모델이 많이 활용되고 있다. 하지만, 다양한 요인들 때문에 모든 나무의 수간모양을 설명할 수 있는 수간곡선식 모델이 없기 때문에 아직도 많은 연구자에 의해서 연구되고 있다(Demaerschalk, 1972; Goulding and Murray, 1976; Max and Burkhart, 1976; Biging 1984; Kozak, 1988a, 2004b; Newnham 1992; Bi 2000; Fang *et al.*, 2000). 국내에서는 강원지방 소나무, 중부지방소나무, 신갈나무, 상수리나무 등 몇몇 수종에 대하여 수간곡선식 모델을 활용하여 해당수종의 가장 적합한 수간곡선식 모델에 대한 연구가 있었으며(이

*Corresponding author
E-mail: dhkim1973@gmail.com

우균 1993a, 1994b; 이경학 등 1999; 손영모 등 2002; 산림청 2008), 수간곡선식 모델을 활용하여 재적표를 만들기도 하였다(이경학 등 1999; 산림청 2008). 하지만, 이러한 연구는 전국적인 단위로 이루어져 특정지역에서 우점하고 있는 수종에 대한 수간곡선식 모델에 대한 연구나 재적을 파악할 수 있는 자료가 부족한 실정이다. 특히 제주시험림에는 서어나무 및 붉가시나무 등이 우점하고 있어 이들 수종에 대한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제주시험림에서 우점하고 있는 수종인 붉가시나무의 수간곡선식 모델을 개발하고, 이를 바탕으로 산림경영에 활용할 수 있는 붉가시나무의 재적표를 작성하는데 있다.

재료 및 방법

1. 재료

본 연구에서는 활용된 붉가시나무의 자료는 국립산림과학원 난대산림연구소에서 관리하고 있는 제주시험림에 있는 붉가시나무 임분에서 경급을 고려하여 선정된 표준목들을 측정 한 것이다. 선정된 표준목은 0.2 m, 1.2 m부위는 직경테이프를 활용하여 직접 측정하였으며, 1.2 m 위의 부분 1~2 m간격을 두고 Criterion400을 활용하여 단면고 및 단면직경을 각각 측정하였다. 측정된 표준목은 모

Table 1. Mensurational characteristics of sample tree in this study.

Number of sample trees	DBH(cm)			Height(m)		
	Mean	S.D	Range	Mean	S.D	Range
278	23.9	8.16	10.7-58.8	11.6	2.15	5.9-16.7

두 278본이었다. 이들은 DB화되어 수간곡선식 모델 개발에 이용되어졌다.

2. 분석

제주시험림의 붉가시나무의 수간곡선식 모델을 개발하기 위하여 이용된 모델은 Max and Burkhardt식(Max and Burkhardt, 1976), Kozak식(Kozak, 1988), Lee식(Lee, 1993) 등 3가지이며, 각 식의 형태는 Table 2와 같다. 본 연구에서 활용된 모형 외에도 많은 연구자에 의해서 수간곡선식 모델이 제시되었다(Newnham 1994; Bi 2000; Fang *et al.* 2000; Kozak 2004). 본 연구에서는 현재 산림청(2008)에서 우리나라 주요 수종들에 대하여 발표한 재적·중량표(입목 및 원목)에 활용된 수간곡선식 모델이 Max and Burkhardt모델 등을 활용하였기에 본 연구에서도 이들 세 모델만을 이용하였다.

각 수간곡선식의 수간높이별 수간직경 추정 이행능력을 평가하기 위해 먼저 표본목 자료를 적합을 위한 표본

Table 2. Taper equations selected for this study.

	Taper Equation
Max and Burkhardt	$d = DBH \sqrt{b_1 \left(\frac{h}{H} - 1\right) + b_2 \left(\frac{h^2}{H^2} - 1\right) + b_3 \left(a_1 - \frac{h}{H}\right)^2 I_1 + b_4 \left(a_2 - \frac{h}{H}\right)^2 I_2}$ <p>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 = inflection points (i=1; upper, i=2; lower) I_i = 1, if $\frac{h}{H} < a_i$, 0 otherwise</p>
Kozak	$d = a_1 DBH^{a_2} a_3^{DBH^X}$ $Z = \text{relative height} \left(= \frac{h}{H} \right)$ $X = \frac{1 - \sqrt{\frac{h}{H}}}{1 - \sqrt{\frac{HI}{H}}} \left(p = \frac{HI}{H}, HI: \text{inflection point} \right)$ <p>a_i, b_i = parameters</p>
Lee	$d_x = b_1 DBH^{b_2} \left(1 - \frac{x}{h} \right)^{c_1 \left(\frac{x}{h} \right)^2 + c_2 \left(\frac{x}{h} \right) + c_3}$ <p>$\frac{x}{h}$ = relative height</p>

Table 3. Number of trees and sections for fitting and validation of taper equations in predicting diameter outside bark.

Number of trees			Number of sections		
Total	Fitting sample data	Validation independent data	Total	Fitting sample data	Validation independent data
278	139	139	3,723	1,850	1,873

Table 4. Statistics for evaluating performance of taper equations.

Statistics	Equation
Fitness index(FI)	$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y - \hat{Y}_g)^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2}$
Bias	$\bar{D} = \frac{\sum(Y_i - \hat{Y})}{n}$
Mean absolute difference (MAD)	$ \bar{D} = \frac{\sum Y_i - \hat{Y} }{n}$
Standard deviation of difference (SDD)	$s_D = \sqrt{\frac{\sum((Y_i - \hat{Y}) - \bar{D})^2}{(n-1)}}$

자료와 검증용을 위한 독립자료로 무작위로 구분하였다(Table 3). 이자료를 이용한 추정결과를 평가하기 위한 검증통계량은 Table 4와 같이 비선형회귀식의 추정치의 적합도를 나타내는 적합도지수(FI)와 편의(Bias), 평균절대편차(Mean absolute deviation, MAD) 및 잔차의 표준편차(Standard deviation of differences, SDD)등 4가지 검증통계량을 이용하였다. 이외에도 실측치와 오차간의 차이를 그래프로 표현하여 세 개의 수간곡선식 모델의 추정체계를 판단하는데 활용하였다.

결과 및 고찰

1. 수간곡선식의 직경 추정 이행능력 평가

Max and Burkhardt식 등 세 가지 수간곡선식의 붉가시나무 직경포함 직경 추정이행 능력 평가를 위한 통계량 값은 Table 5과 같다. 각 곡선식의 적합 및 이의 검증 결과 세 가지 통계량 모두에서 Kozak식이 가장 우수한 이행능력을 보이고 있으며, 그 다음으로는 Lee식이 약간 떨어지고, Max and Burkhardt식이 가장 낮은 추정이행 능력을 나타내었다. 세 식 모두 과소치를 주는 경향이 있으며, 특히 Max and Burkhardt식이 다른 두식에 비해서 심한 것으로 나타났다.

Table 5. Values of the statistics for evaluating three taper equations in predicting diameter outside bark.

Data	Equation	Bias(cm)	MAD(cm)	SDD(cm)
Fitting sample data	Max and Burkhardt	0.3842	2.0511	2.8297
	Kozak	0.0001	1.8127	2.5444
	Lee	0.1396	2.1100	2.8443
Validation independent data	Max and Burkhardt	0.3710	2.0439	2.7304
	Kozak	0.0033	1.6552	2.3318
	Lee	0.1025	1.9621	2.6144

Table 6. Parameter estimates for three taper equations on the total data.

Equation	Max and Burkhardt		Kozak		Lee	
Parameter estimates	a_1	0.4781	a_0	1.7195	b_1	2.0607
	a_2	0.0929	a_1	0.7767	b_2	0.8609
	b_1	-1.7628	a_2	1.0026	c_1	1.5522
	b_2	0.7683	b_1	0.8350	c_2	-2.9998
	b_3	1.1812	b_2	-0.3058	c_3	2.3433
	b_4	79.1246	b_3	2.2732		
			b_4	-1.0666		
			b_5	0.1887		
FI	0.9149		0.9391		0.9233	
Bias	0.3804		0.0003		0.1273	
MAD	2.0521		1.7422		2.0503	
SDD	2.7916		2.4616		2.7503	

2. 수간곡선식 모수추정치 및 설명력

전체자료에 대하여 Max and Burkhardt식 등 세가지 수간곡선식의 모수추정치와 직경추정 이행능력 평가를 위한 통계량값은 Table 6과 같다.

통계검증량을 바탕으로 직경추정 이행능력을 분석한 결과 Kozak식이 93.91%를 보이므로서 가장 높았으며, 그 다음으로는 Lee식이 92.33%, Max and Burkhardt식이 91.49%인 것으로 나타나, 강원지방소나무의 97.2%~97.0%, 중부지방소나무 97.0%~96.7%, 잣나무 98.0%~97.4%, 리기다소나무 97.1%~96.8%, 낙엽송 98.6%~98.1%, 상수리나무 96.8%~96.4%, 신갈나무 96.4%~95.2%보다 떨어지나(이경학 등, 1999; 손영모 등, 2002), 캐나다 Yukon지역 주요 수종에 대한 수간곡선식 모델의 적합결과(결정계수 0.90~0.97)과 비교해 볼 때 낮지 않은 이행능력을 보여주고 있다(Bonner and Boudewyn, 1990).

각 수간곡선식 모델별로 실측치와 예측치의 오차를 검증한 결과 통계검증량에서 나타난 결과 비슷한 양상을 보여 주고 있는데, Max and Burkhardt모형은 모든 단면고에서 과대치 오차를 발생시키고 있는 반면에, Lee식은 비교

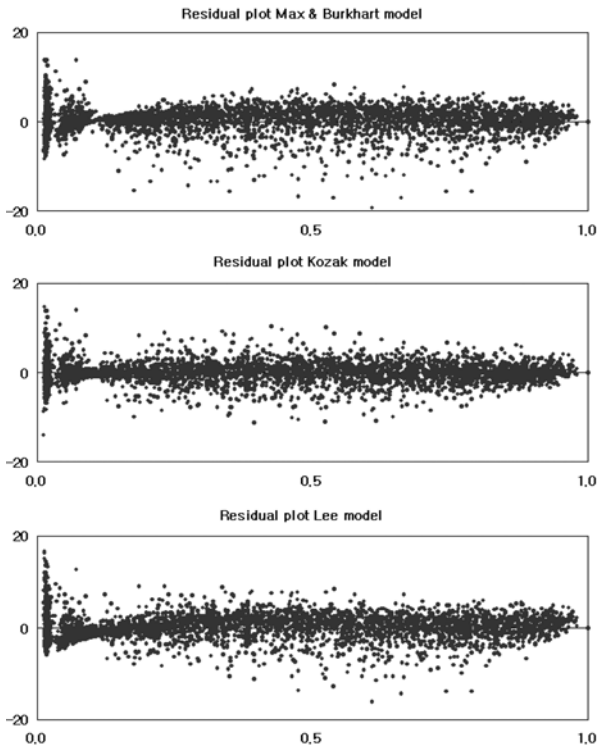


Figure 1. Residual error in diameter outside bark prediction plotted over predicted values.

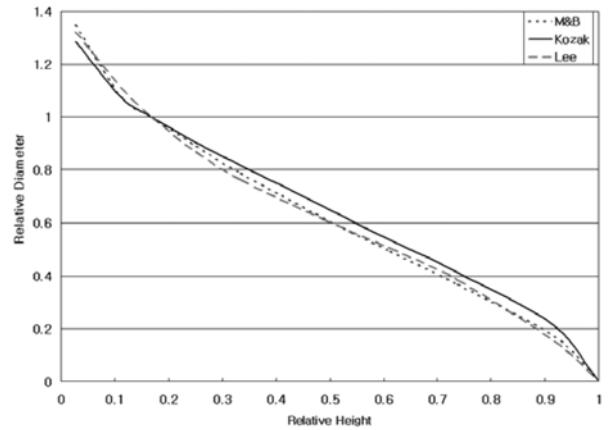


Figure 2. Taper curve pattern by taper model.

적 높은 단면고에서 과대치 오차를 발생시키고 있는 것으로 나타났다. 하지만, 적합도 지수 및 통계검증량이 가장 우수한 Kozak모형의 경우에는 과대치와 과소치가 비교적 고르게 분포하고 있으며, 다른 모형에 비해서 오차의 값이 적은 것으로 나타나 제주시험림 붉가시나무의 수간재 적표 작성에 있어서 Kozak모형을 활용하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 이들 모형의 오차 분포는 Figure 1과 같으며, 수간곡선식 모델을 활용하여 작성한 수간곡선의 모습

Table 7. Stem volume table for *Quercus acuta*.

	DBH(cm)																		
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	
H	5	0.012	0.018	0.024	0.032	0.040	0.049	0.059	0.070	0.082	0.095	0.109	0.125	0.142	0.160	0.181	0.203	0.227	0.254
e	6	0.014	0.022	0.030	0.039	0.050	0.061	0.073	0.086	0.100	0.115	0.131	0.149	0.169	0.189	0.212	0.236	0.263	0.291
i	7	0.017	0.026	0.036	0.047	0.059	0.072	0.086	0.102	0.118	0.136	0.155	0.175	0.197	0.220	0.245	0.272	0.301	0.332
s	8	0.020	0.030	0.042	0.055	0.069	0.084	0.101	0.118	0.137	0.157	0.179	0.202	0.226	0.252	0.280	0.310	0.342	0.375
e	9	0.022	0.034	0.048	0.063	0.079	0.096	0.115	0.135	0.157	0.179	0.204	0.230	0.257	0.286	0.317	0.350	0.384	0.421
h	10	0.025	0.039	0.054	0.071	0.089	0.109	0.130	0.153	0.177	0.202	0.229	0.258	0.288	0.321	0.355	0.390	0.428	0.469
t	11	0.028	0.043	0.060	0.079	0.099	0.121	0.145	0.170	0.197	0.225	0.255	0.287	0.321	0.356	0.393	0.432	0.474	0.517
(12	0.031	0.047	0.066	0.087	0.109	0.134	0.160	0.188	0.217	0.249	0.282	0.317	0.353	0.392	0.433	0.476	0.521	0.568
m)	13	0.033	0.051	0.072	0.095	0.120	0.146	0.175	0.206	0.238	0.272	0.308	0.347	0.387	0.429	0.473	0.519	0.568	0.619
	14	0.036	0.056	0.078	0.103	0.130	0.159	0.190	0.224	0.259	0.296	0.336	0.377	0.420	0.466	0.514	0.564	0.617	0.672
	15	0.039	0.060	0.084	0.111	0.140	0.172	0.206	0.242	0.280	0.320	0.363	0.408	0.455	0.504	0.555	0.609	0.666	0.725
	16	0.042	0.064	0.091	0.119	0.151	0.185	0.221	0.260	0.301	0.345	0.391	0.439	0.489	0.542	0.597	0.655	0.716	0.779
	17	0.044	0.069	0.097	0.128	0.161	0.198	0.237	0.279	0.323	0.369	0.418	0.470	0.524	0.581	0.640	0.702	0.766	0.834
	18	0.047	0.073	0.103	0.136	0.172	0.211	0.253	0.297	0.344	0.394	0.446	0.501	0.559	0.620	0.683	0.749	0.817	0.889
	19	0.050	0.078	0.109	0.144	0.183	0.224	0.268	0.316	0.366	0.419	0.475	0.533	0.594	0.659	0.726	0.796	0.869	0.945
	20	0.053	0.082	0.115	0.152	0.193	0.237	0.284	0.334	0.388	0.444	0.503	0.565	0.630	0.698	0.769	0.843	0.921	1.001
	21	0.055	0.086	0.121	0.161	0.204	0.250	0.300	0.353	0.409	0.469	0.531	0.597	0.666	0.738	0.813	0.891	0.973	1.058
	22	0.058	0.091	0.128	0.169	0.214	0.263	0.316	0.372	0.431	0.494	0.560	0.629	0.702	0.778	0.857	0.939	1.026	1.115
	23	0.061	0.095	0.134	0.177	0.225	0.276	0.332	0.391	0.453	0.519	0.588	0.661	0.738	0.818	0.901	0.988	1.078	1.173
	24	0.064	0.099	0.140	0.186	0.235	0.289	0.348	0.409	0.475	0.544	0.617	0.694	0.774	0.858	0.945	1.037	1.132	1.230
	25	0.066	0.104	0.146	0.194	0.246	0.303	0.363	0.428	0.497	0.570	0.646	0.726	0.810	0.898	0.990	1.086	1.185	1.289
	26	0.069	0.108	0.153	0.202	0.257	0.316	0.379	0.447	0.519	0.595	0.675	0.759	0.847	0.939	1.035	1.135	1.239	1.347
	27	0.072	0.112	0.159	0.211	0.267	0.329	0.395	0.466	0.541	0.620	0.704	0.792	0.883	0.979	1.080	1.184	1.293	1.406
	28	0.075	0.117	0.165	0.219	0.278	0.342	0.411	0.485	0.563	0.646	0.733	0.824	0.920	1.020	1.125	1.234	1.347	1.465
	29	0.078	0.121	0.171	0.227	0.289	0.356	0.427	0.504	0.585	0.671	0.762	0.857	0.957	1.061	1.170	1.283	1.401	1.524
	30	0.080	0.126	0.177	0.236	0.299	0.369	0.443	0.523	0.608	0.697	0.791	0.890	0.994	1.102	1.215	1.333	1.456	1.583

은 Figure 2와 같다.

3. 수간재적

수간곡선식 모델 중에서 붉가시나무의 수간형태를 가장 좋게 설명하고 있다고 판단되는 Kozak식을 수간곡선식 모델로 확정한 후 흉고직경 6 cm, 수고 5 m를 시작으로 흉고직경은 2단위로 수고는 1 m단위로 증가시키면서 수간곡선 모형을 산출한 후 이들 모형을 10단위로 구분적분하여 Smalian식을 활용하여 재적을 산출하였다. 그 결과 붉가시나무 재적표(Table 7)를 만들 수 있었다. 이렇게 만들어진 붉가시나무 재적표를 산림청(2008)에 발표된 상수리나무 재적표와 동일직경에 동일수고일 때의 재적을 비교했을 때보다 재적이 약간 더 많은 것으로 나타났다. 이렇게 만들어진 재적표는 2007년부터 제주시험림에 매년 5전후가 식재되고 있는 붉가시나무임분의 성장모델 구축에 필요한 재적표로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

현재 제주시험림에서 임목재적 산출시 제주시험림에 맞는 붉가시나무 재적표가 없어 산림청(2008)에서 발표한 상수리나무의 재적표를 사용하고 있다. 이번에 조제된 제주시험림 붉가시나무 재적표와 비교한 결과 상수리나무 재적표를 사용할 때보다는 이번에 만들어진 재적표를 사용할 때에 재적이 약간 더 많은 것으로 나타났다. 따라서 본 재적표의 현장 적용성을 검증한 후, 이를 적극 이용할 것을 권장할 계획이다. 그리고 현재 산림경영에서 있어서 현임분의 재적 파악은 향후 산림경영 의사 판단에 기본 자료로 활용되기 때문에 향후 산림경영계획을 수립시에 붉가시나무의 성장을 고려한 별채나 간벌 시기의 결정과 같은 합리적인 경영결정에 필요한 기초 자료로서 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

인용문헌

1. 산림청, 2008. 재적·중량표(임목 및 원목). 산림청. 대전. pp. 228.

2. 손영모, 이경학, 이우균, 권순덕. 2002. 우리나라 주요 6 수종의 수간곡선식. 한국임학회지, 91(2): 213-218.

3. 이경학, 손영모, 정영교, 이우균. 1999. 강원지방소나무의 개체목 수간곡선 및 재적추정시스템. 산림과학논문집 62: 155-166.

4. 이우균, 1994. Spline 함수와 선형방정식을 이용한 수간 및 임분간곡선 모델. 한국임학회지 83(1): 63-74.

5. Bi, H. 2000. Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalyptus. For. Sci. 46, 397-409.

6. Biging, G.S. 1984. Taper equations for second-growth mixed conifers of Northern California. For. Sci. 30: 1103-1117.

7. Bonnor, G.M. and Boudewyn, P. 1990. Taper-volume equations for major tree species of the Yukon Territory. Forestry Canada Pacific and Yukon Region Information Report BC-X-323. 18pp.

8. Demaerschalk, J. 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. For. Sci. 18: 241-245.

9. Fang, Z., Borders, B.E. and Bailey, R.L. 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. For. Sci. 46: 1-12.

10. Goulding, C.J. and Murray, J.C. 1976. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. N. Z. J. For. Sci. 5: 313-322.

11. Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. Can. J. For. Res. 18: 1363-1368.

12. Kozak, A. 2004. My last words on taper functions. For. Chron. 80: 507-515

13. Lee, W.K. 1993. Wachstums-und Ertragsmodelle für Pinus densiflora in der Kangwon-Provinz, Korea. Dissertation, Göttingen.

14. Max, T.A. and Burkhart, H.E. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. For. Sci. 22: 283-289.

15. Charles K. Muhairwe, 1994. Tree form and taper variation over time for interior lodgepole pine. Canadian Journal of Forest Research, 24(9): 1904-1913.

16. Newnham, R. 1992. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. Can. J. For. Res. 22: 210-223.

(2009년 11월 18일 접수; 2010년 2월 23일 채택)