

입목수간재적표 기반의 입목재적 추정치의 불확실성과 이에 따른 탄소축적 추정치의 편향: 강원도 홍천군을 대상으로

신중훈*† · 한희** · 김영환*** · 임종수**** · 장윤성**

*국립산림과학원 산림정책연구과 석사연구원, **국립산림과학원 산림정책연구과 연구사,
국립산림과학원 산림정책연구과 연구관, *국립산림과학원 산림ICT 연구센터 연구사

Uncertainty in Estimating Forest Growing Stock from Volume Estimation of a Standing Tree by Stem Volume Table and the Resulting Bias in Carbon Stock Estimation: A Case Study in Hongcheon-Gun, Republic of Korea

Shin, Joong Hoon*† · Han, Hee** · Kim, Young Hwan*** · Yim, Jong Su**** · Chang, Yoon Seong**

*Postmaster Researcher, Forest Policy and Economics Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

**Research Scientist, Forest Policy and Economics Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

***Senior Research Scientist, Forest Policy and Economics Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

****Research Scientist, Forest ICT Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

ABSTRACT

The purpose of this study was to quantify the uncertainty in the estimation of forest growing stock and carbon stock that occurs as DBH (Diameter at Breast Height) and HT (Height) are rounded when locating stem volumes in a stem volume table, and to present a case study using the Hongcheon-gun NFI (National Forest Inventory) data. We quantified the uncertainty of the estimated value of the stem volume obtained from the stem volume table, assuming that the stem volume calculated by the stem taper equation is the true value, and the resulting bias in carbon stock estimation, using two indicators. In all the indices, as DBH and HT increased, a trend was observed in which the absolute values of these indicators increased. BIAS appeared as a positive value in all sections, which means that the stem volume table with rounding DBH and HT underestimated stem volumes. BIAS was found to range from 0.0134 m³ to 0.0178 m³ depending on the species. RMSE (Root Mean Square Error) was about 4~7 times greater than BIAS with the same tree sizes. The increase rate of stem volume was almost constant regardless of HT, but increased as DBH increased. This indicates that DBH is more effective in reducing rounding-induced uncertainty when using stem volume tables. Note that rounding DBH combined with this characteristic led to systematic underestimation of stem volume. As a result of estimating the growing stock in the forests of Hongcheon-gun, Gangwon-do using the stem taper equation and the stem volume table, it was confirmed that the stem volume table underestimated the growing stock by 1,475,606 m³, and accordingly, did the carbon stock by 860,232 tC. Even if the figure was limited to Hongcheon-gun, it was difficult to consider it a small value. As projects related to greenhouse gas reduction are expected to become more active in the future compared to the past, uncertainty in such estimates may affect the reliability of such projects. Therefore, it is necessary to provide a tool that can calculate stem volume and carbon stock by directly inputting DBH or HT values.

Key words: Uncertainty, Growing Stock, Forest Carbon Stock, Stem Volume Table, Stem Taper Equations

1. 서론

산림은 중요한 탄소흡수원 중 하나로서 대기 중 온실가스

의 농도를 줄이는 데 중요한 위치를 차지한다. 현재 국내 산림지의 탄소축적량은 토양탄소 및 고사유기물 부분은 변화가 없다는 가정 아래 산림지의 입목 바이오매스 축적량을

†Corresponding author : jhshin96@korea.kr (Hoegi-ro 57, Dongdaemun-gu, Seoul 02445, Korea. Tel. +82-2-961-2824)

ORCID 신중훈 0000-0001-5318-1632
한희 0000-0002-2588-7176
김영환 0000-0001-6820-2723

임종수 0000-0001-7316-6093
장윤성 0000-0001-7986-2049

기반으로 추정되고 있다(GIR, 2020). 그러므로 산림에서 온실가스의 배출과 흡수를 정확하게 모니터링하기 위해서는 산림에 존재하는 입목의 바이오매스 축적량, 즉 입목의 탄소 축적량을 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 입목의 탄소 축적량은 입목의 수간재적(stem volume)에 관련된 여러 계수를 곱하여 계산한다(2.2.3 참조). 이 계수들은 수종별 혹은 임상별로 고유한 값을 가진 상수이기 때문에, 입목의 탄소 축적량 추정의 정확성은 입목의 수간재적을 얼마나 정확하게 추정하느냐에 전적으로 영향을 받는다고 할 수 있다.

산림기본통계(KFS, 2021a)나 국가 온실가스 인벤토리 보고서와 같은 국가 단위 통계에서 입목의 수간재적은 Kozak (1988)의 수간곡선식(stem taper equation)에 입목의 흉고직경(Diameter at Breast Height: DBH)과 수고(Height: HT)를 그대로 입력하고 수치적분(numerical integration)의 과정을 거쳐 계산되는 반면, 일반에 공개되어 있는 입목수간재적표(KFS and NIFoS, 2021)는 DBH 2 cm 간격, HT 1 m 간격의 표로 제공되고 있다. 이것은 수간재적 계산의 복잡성을 고려하여 사용자들의 편의를 도모하고자 하는 목적이지만, DBH와 HT를 각각 2 cm와 1 m 단위로 팔약함에 따른 오차가 필연적으로 발생하게 된다.

Jung et al.(2020)은 이러한 팔약에 의한 수간재적 추정치의 불확실성을 보고한 바 있다. 우리나라 남부에서 소나무의 재적이 지역에 따른 차이보다 DBH 2 cm 증가에 의한 차이가 더 크다고 보고하면서 팔약에 의한 불확실성을 줄이기 위해 수간재적표의 DBH 간격을 1 cm로 할 것을 제안하였다. 또한 입목의 크기(DBH와 HT)가 커질수록 수간재적 추정치의 불확실성이 커지는 현상이 관찰된다고 하였다. 우리나라 산림에서 대경목이 차지하는 비중이 과거에 비해 크게 늘어나면서 기존 입목수간재적표의 정확성을 제고해야 한다는 요구에 따라 입목수간재적표(KFS and NIFoS, 2021)가 최근 수정·발간되었다. 하지만 앞서 제기된 팔약에 의한 불확실성은 고려되지 않았다. 수간재적표 상에서 입목의 크기를 팔약함에 따라 발생하는 이러한 수간재적 추정치의 불확실성에 대한 구체적인 연구사례는 국내에서 아직까지 보고된 바가 없다.

해외에서도 이와 관련된 연구는 흔하지 않는데 그 까닭은 과거와 달리 현대에 들어서는 일반적으로 식을 이용하여

재적을 추정하기 때문이다(Avery and Burkhart, 2002). 유사한 사례로서 Hosoda et al.(2010)은 일본에서 사용하는 83개의 수간재적표를 이용하여 구한 수간재적과 해당 재적표를 작성하는데 사용된 수간재적식(stem volume equation)을 이용하여 계산한 수간재적 간의 차이에 대해 연구하였다. 저자들은 수간재적표를 작성할 때 흉고직경 구간 별로 각각 추정한 수간재적식의 수간재적값들이 흉고직경 접합부에서 매끄럽게 이어지도록 하는 방식이 두 방법 간의 차이를 대부분 발생시킨다고 하였다. 이 차이를 줄이기 위해 재적표 별로 수정방법을 제시하였으나, 근본적으로는 수간재적표 보다는 수간재적식을 이용한 직접 계산이 이러한 오차를 피할 수 있는 방법이라고 기술한 바 있다.

본 연구의 목적은 수간곡선식을 이용하여 계산된 재적 추정치를 입목수간재적표를 이용하여 구한 재적 추정값과 비교하여 팔약이 가져오는 수간재적 추정치의 불확실성과 이러한 불확실성에 따라 발생하는 탄소축적 추정치의 오차를 정량화하고자 하였다. 이를 위하여 강원도 홍천군의 제7차 국가산림자원조사(National Forest Inventory: NFI) 자료를 추출하여 팔약에 의한 수간재적 추정치의 불확실성 및 그에 따른 탄소축적 추정치의 오차를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구자료

수간재적 추정치의 방법에 따른 임목축적의 차이와 이에 따른 탄소축적량 차이를 알아보기 위하여 제7차 NFI (2016 ~ 2020) 자료 중에서 강원도 홍천군에 소재한 집락표본(Cluster plot) 91개의 자료를 사용하였다. 집락표본에 속한 부표본점(Subplot) 중 무림목지를 제외한 총 326개 부표본점 자료가 분석되었다. 강원도 홍천군의 전체 산림면적은 148,328 ha(무림목지 2,526 ha 포함)이며, 그중 침엽수림, 활엽수림, 혼효림은 각각 52,656 ha(35.5%), 57,245 ha(38.6%), 35,901 ha(24.2%)이다(KFS, 2021a). 산림을 구성하는 수종으로는 신갈나무(*Quercus mongolica*), 소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*P. koraiensis*), 굴참나무(*Q. variabilis*), 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*)가 주로 관측되었다. 사용된 자료에 포함된 표본목의 기술통계량은 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Descriptive statistics of sample trees

Number of trees	Number of species	Number of clusters	Number of subplots	DBH (cm)	Height (m)
13,872	86	91	326	18.9 6 - 114	13.4 2.9 - 39.2

2.2 수간재적 및 탄소량 계산

2.2.1 입목수간재적표를 사용한 수간재적 계산

입목재적·바이오매스 및 입분수확표(KFS and NIFoS, 2021)에 제시된 입목수간재적표를 이용하여 표본목의 DBH와 HT에 따라 수간재적을 구하였다. 입목수간재적표에 포함된 수종이 아닌 경우 ‘재적표에 없는 수종의 현재재적표 적용 기준’(KFS and NIFoS, 2021)에서 입목수간재적표에 포함되지 않은 해당 수종을 대체할 수종을 확인한 후에, 그 대체 수종의 수간재적값을 적용하였다(예: 전나무 → 일본잎갈나무, 고로쇠나무 → 신갈나무 등).

2.2.2 수간곡선식을 이용한 수간재적 계산

수간곡선식은 입목의 초두부에서부터 지상부에 이르기까지 수간 전체 구간에 걸쳐 수간의 직경 변화를 나타내는 함수식이다(Burkhardt and Tomé, 2012). 입목수간재적표(KFS and NIFoS, 2021)의 제작에 사용된 Kozak (1988)의 수간곡선식은 적분이 가능하지 않기 때문에 수치적분법(numerical integration)을 사용하여 수간의 재적을 계산하게 된다. 먼저 수간 전체 구간에 대하여 10 cm 간격으로 수간곡선식을 이용하여 수간직경을 추정하고 각 간격마다 수간의 재적을 계산하였다. 이때 재적을 계산하는 공식은 수간의 위치에 따라 총 3가지를 적용하였다(Fig. 1). 수간곡선의 블록에서 오목으

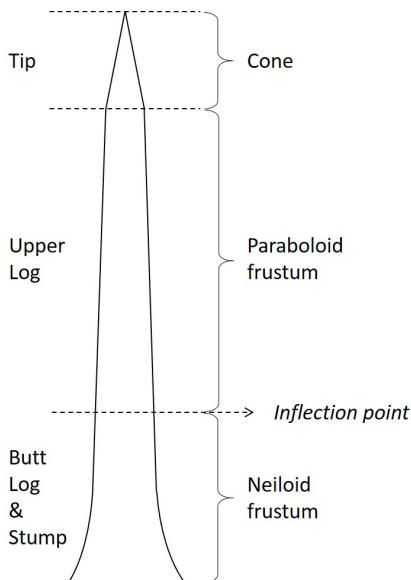


Fig. 1. Geometric forms of a tree stem used to estimate the stem volume using the Kozak's stem taper equation

로 혹은 그 반대로 변화하는 지점인 수간의 변곡점(inflection point) 아래 부분에서는 나일로이드체(neiloid frustum), 초두부(tree tip)를 제외한 변곡점 이상의 부분은 포물면체(paraboloid frustum), 초두부는 원뿔로 가정하여 그 재적을 계산하고, 이들을 모두 합산하여 입목의 수간재적을 산출하였다. 나일로이드체, 포물면체 및 원뿔의 재적을 계산하는 공식은 아래의 Eq.1 ~ Eq.3과 같다(Kershaw et al., 2017).

$$\begin{aligned} & \text{Volume of neiloid frustum} && \text{(Eq. 1)} \\ & = \frac{L}{4} (A_b + \sqrt[3]{A_b^2 A_t} + \sqrt[3]{A_b A_t^2} + A_t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Volume of paraboloid frustum} && \text{(Eq. 2)} \\ & = \frac{L}{2} (A_b + A_t) \end{aligned}$$

$$\text{Volume of cone} = \frac{1}{3} (A_b H) \quad \text{(Eq. 3)}$$

A_b : area of buttend,
 A_t : area of topend,
 L : length of frustum,
 H : height of cone

2.2.3 입목의 탄소축적 계산

한 그루의 입목에 저장된 지상부 및 지하부의 탄소량은 수간재적으로부터 아래의 수식(eq. 4)을 이용하여 전환할 수 있다.

$$C = V \times WD \times BEF \times (1 + R) \times CF \quad \text{(Eq. 4)}$$

C : carbon stock,
 V : stem volume,
 WD : wood density,
 BEF : biomass expansion factor,
 R : root-shoot ratio,
 CF : carbon fraction.

WD(목재밀도), BEF(바이오매스 확장 계수) 및 R(뿌리-지상부 비율)은 Son et al.(2014)에 제시된 수종별 고윳값을 사용하였으며, 해당 수종의 고윳값이 없는 경우에는 수간재적 계산에 적용했던 ‘재적표에 없는 수종의 현재재적표 적용 기준’(KFS and NIFoS, 2021)을 다시 따랐다. CF(탄소전환계수)는 2006 IPCC 가이드라인에 제시된 값(침엽수 0.51, 활엽수 0.48)을 사용하였다(IPCC, 2006).

2.2.4 ha당 임목축적·탄소축적 및 총 임목축적·탄소축적의 추정 NFI의 부표본점은 다중 동심원 구조로 설계되었는데,

그 중 기본조사원은 11.3 m의 반경(0.04 ha)을, 대경목조사원은 16.0 m의 반경(0.08 ha: 기본조사원 면적 제외)을 갖는다(KFRI, 2011). 기본조사원에서 측정된 표본목(DBH 6 cm 이상 30 cm 미만)의 재적에는 확장계수 25를, 대경목조사원에서 측정된 표본목(DBH 30 cm 이상)의 경우에는 확장계수 12.5를 곱한 후, 모두 합산하여 부표본점의 ha당 입목재적을 구하게 된다. 부표본점의 ha당 탄소축적은 각 표본목의 탄소량에 확장계수를 위와 같이 곱한 후 합산하여 구했다. 이렇게 계산된 부표본점의 ha당 입목축적 및 탄소축적의 평균값을 얻은 뒤, 여기에 연구대상지의 산림 면적을 곱하여 총 입목축적 및 탄소축적을 추정하였다.

2.3 수간재적표 사용에 따른 수간재적 추정의 불확실성 계산

입목수간재적표(KFS and NIFoS, 2021)가 DBH와 HT를 팔약하여 제시하는 수간재적 추정치와 수간곡선식에 의해 팔약이 없이 계산되는 수간재적 추정치 사이의 오차로 인해 발생하는 수간재적 추정의 불확실성을 정량화하고자 하였다. 홍천군의 주요 수종인 소나무, 잣나무, 신갈나무, 굴참나무 및 일본잎갈나무에 대하여 수간재적표 상에서 동일한 값의 DBH와 HT로 간주되는 입목들을(Table 2) 대상으로 두 가지 성능 지표인 편향(BIAS)과 제공근평균제곱오차(Root mean square error: RMSE)를 아래의 식에 따라 계산하였다(Eq.5 ~ Eq.6). BIAS는 관측치와 추정치 사이의 평균적인 차이를 의미하며 편향성

(biasedness)을 평가하는데 사용된다. RMSE는 어떤 추정량의 분산과 편향 제곱의 합에 제곱근을 취한 형태로서, 추정하려는 모수와 동일한 단위이기 때문에 추정치와의 직접적인 비교가 가능하며, 해당 추정량의 편향성과 정밀성(precision)을 동시에 측정하는 지표로 사용된다(Mehtätalo and Lappi, 2020). 일반적으로 BIAS나 RMSE를 계산할 때에는 관측치에서 추정치를 제하는 형태를 취하여 계산을 수행한다. 그런데 본 연구의 목적은 팔약의 유무에 따른 수간재적 추정의 불확실성과 그에 따른 탄소축적 추정의 오차를 정량화하는 것이기에, 팔약을 적용하지 않는 수간곡선식에 의한 재적 추정치를 관측치로 간주하고 팔약을 적용하는 입목수간재적표 기반의 재적 추정치를 추정값으로 간주하여 두 가지 성능 지표를 계산하였다.

$$BIAS_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (V_{ij, taper} - V_{ij, table}) \quad (Eq. 5)$$

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (V_{ij, taper} - V_{ij, table})^2} \quad (Eq. 6)$$

- i*: the *i*th set of trees with different DBHs and HTs but the same stem volume by rounding DBH and HT in stem volume table,
- j*: the *j*th tree in the *i*th set,
- n_i*: the number of trees in the *i*th set,
- V_{ij, taper}*: the stem volume of the *j*th tree in the *i*th set obtained by using stem taper equation,
- V_{ij, table}*: the stem volume of the *j*th tree in the *i*th set obtained by using stem volume table

Table 2. Examples of DBH and HT rounded up/down in stem volume tables

HT	HT rounded	...	DBH							...
			DBH rounded							
			7.1	7.2	...	8.0	...	8.9	9.0	
4.6	5.0	...	8.0							...
4.7										
⋮										
5.0			<i>S₂</i>	...						
⋮										
5.4										
5.5										
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮						
34.6	35.0	...	<i>S₃₀₂</i>							...
34.7										
⋮										
35.0										
⋮										
35.4										
35.5										

(Note) *S_i* means a set of trees with DBHs and HTs which are considered as the same DBH and HT when locating a stem volume value in a stem volume table. In other words, all the trees in a set *S_i* will have the same stem volume.

2.4 수간재적 증가율 분석

입목의 크기(DBH 또는 HT)가 한 단위 증가함에 따라 증가하는 수간재적의 양이 입목의 크기에 따라 변화하는지 확인하기 위해 수간곡선식을 이용하여 계산한 수간재적값의 입목 크기에 대한 미분값을 구하고자 하였다. 그런데 수간재적값은 수간곡선식으로 얻은 수간직경을 수간단면적으로 변환시킨 후 수간 전체 구간에서 수치적분을 실시하여 얻은 값의 집합으로, 수간재적값과 입목의 크기를 직접적으로 연결하는 별도의 미분가능한 함수는 존재하지 않는다. 따라서, 임의의 수간재적값이 입목의 크기에 따라 변화하는 정도를 구하기 위하여 Eq. 7처럼 중앙차분을 이용한 수치미분의 근사값(centered difference approximation for numerical

differentiation)을 계산하였다(Burden et al., 2016).

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \tag{Eq. 7}$$

f : stem volume with a tree size of x ,

$f'(x)$: approximation for the derivative of f at x ,

h : a small value, which was 0.01 for this study.

2.5 분석 도구

본 연구에서 수행된 모든 분석은 통계분석 프로그램 R version 4.1.2 (R Core Team, 2021) 및 R 통합개발환경 RStudio version 2021.9.2.382 (RStudio Team, 2022)을 통해 이루어졌다. 또, 분석을 위한 R 패키지로서 수간곡선 계산에는 *nlme*

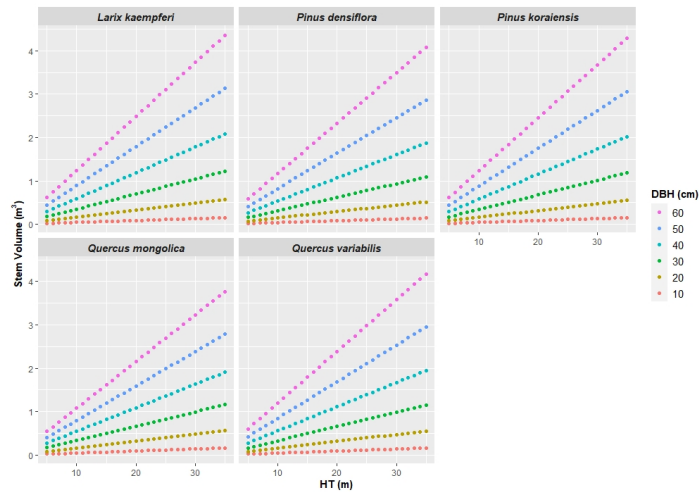


Fig. 2. Stem volume from stem taper equation by species and DBHs as HT increases

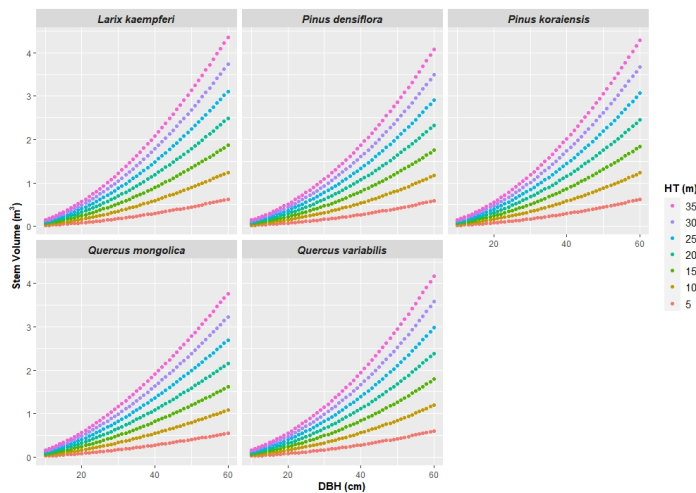


Fig. 3. Stem volume from stem taper equation by species and HTs as DBH increases

(Pinheiro et al., 2021), 자료 정리에 *dplyr* (Wickham et al., 2021), 그림 출력에는 *ggplot2* (Wickham, 2016)가 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수간재적표 상에서 입목 크기의 팔약에 따른 수간재적의 불확실성

우선 수간곡선식에 의해 계산된 수종별 수간재적값이 DBH와 HT에 따라 어떻게 분포하는지는 Fig. 2와 Fig. 3

에 산점도로 표시하였다. 수종마다 그 정도에서는 차이가 있었지만, 수간재적은 DBH가 고정된 상태에서 HT가 증가함에 따라 선형의 1차 함수의 모습을 보였고, HT가 고정된 상태에서는 DBH가 증가함에 따라 포물선의 2차 함수 형태로 증가하는 모습을 나타내었다. 동일한 DBH와 HT를 갖는 경우 일본잎갈나무와 잣나무가 비교적 더 큰 수간재적을 보여주었고, 신갈나무는 상대적으로 작은 수간재적값을 띄었다.

계산된 BIAS와 RMSE를 일부 HT 값별로 DBH를 따라 산점도를 작성하였다(Fig. 4 ~ Fig. 5). 예상한 바와 같이

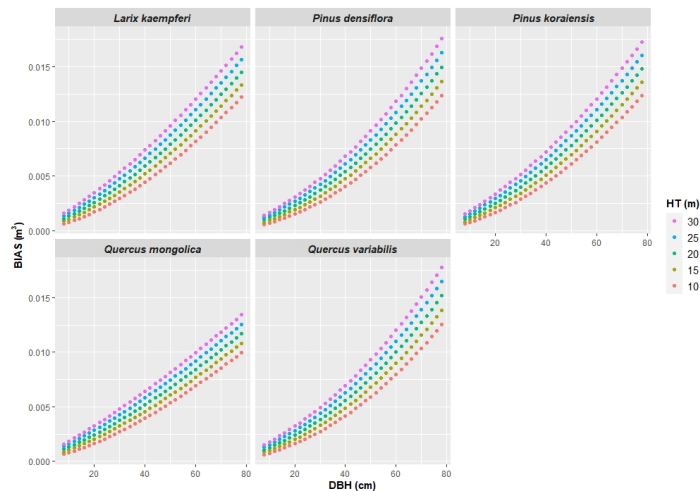


Fig. 4. BIAS by species and HTs in stem volume estimation introduced by rounding DBHs and HTs when using a stem volume table

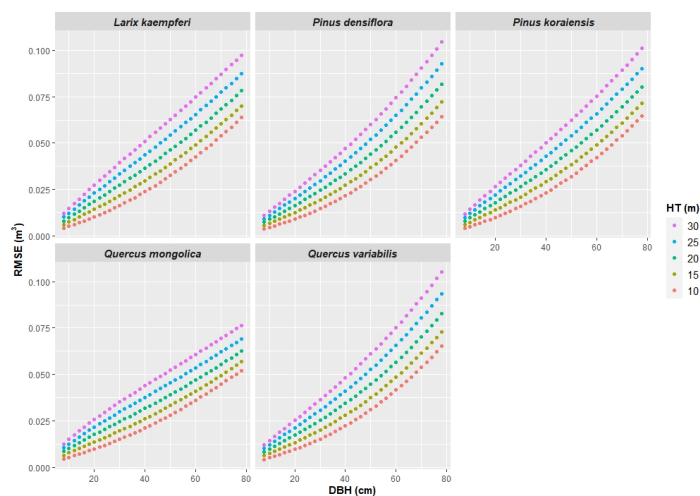


Fig. 5. RMSE by species and HTs in stem volume estimation introduced by rounding DBHs and HTs when using a stem volume table

모든 수종에서 DBH와 HT가 증가함에 따라 두 지표의 절대값이 증가하는 모습을 나타내었다. 이는 입목의 크기가 클수록 수간재적표 상에서 DBH와 HT의 팔약에 의한 불확실성이 커진다는 것을 의미하며, 따라서 크기가 큰 입목들의 경우 수간재적표를 사용하여 수간재적을 구할 경우, 작은 입목들에 비하여 상대적으로 더 큰 오차가 발생할 수 있다. Hosoda et al.(2010)은 수간재적표와 수간재적식을 비교하여 확인된 대부분의 오차는 0.01m³ 이하였다고 하였다. 하지만 일부의 경우에는 오차의 절대값이 0.05 m³를 넘었으며, 흉고직경 90 cm 이상의 대경목이 여기에 속했다고 보고하였다. 이러한 점을 고려한다면 대경목이 주를 이루는 입분에서는 수간재적표의 사용을 신중히 고려해야 할 것으로 판단된다.

BIAS의 최댓값은 수종에 따라 변화하였으나 DBH 80 cm, HT 30 m에서 0.0134 m³에서 0.0178 m³의 범위를 나타내었다(Fig. 4). 매우 작은 값으로 보이지만 개체목 수준에서의 차이라는 점을 간과해서는 안된다. 이것을 대규모의 산림에 적용할 경우에는 불확실성의 크기가 훨씬 증가할 것이다. 그런데 위의 BIAS 계산 시에 실제 입력된 개별 편향들의 절대치 중 가장 극단적인 값들은 수종에 따라 0.199 m³에서 0.273 m³에 이르는 것으로 확인되었다. 이러한 값들은 수고와 흉고직경 모두 아주 큰 값을 갖는 대경목의 경우에만 해당 되지만, 위에서 제시한 BIAS의 최댓값을 크게 넘어설 수도 있다는 점을 주지해야 한다.

BIAS가 양의 값을 보인다는 점 역시 주목할 부분이다. 양의 BIAS는 수간재적표로 구한 수간재적값이 평균적으로 과소추정된다는 것을 의미한다. 또 신갈나무의 경우 다

른 수종들에 비하여 팔약에 의한 BIAS의 불확실성이 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이것은 동일한 DBH와 HT를 가진 경우 다른 수종들보다 수간재적이 비교적 작은 신갈나무의 특성 때문인 것으로 사료된다(Fig. 2와 Fig. 3).

RMSE는 그 계산식(Eq. 6)에 따르면 추정량의 표준편차와 편향을 합한 값에 대한 근사치를 나타낸다. 따라서 RMSE의 값은 BIAS의 절대값보다 항상 클 수 밖에 없으며(추정량의 분산이 0인 경우에만 동일), 대략적으로 RMSE에서 BIAS값 이상의 부분은 추정량의 표준편차라고 간주할 수 있다. 추정량의 표준편차, 즉 변동성이라 간주할 수 있는 RMSE와 BIAS 절대값의 차이의 최댓값은 수종에 따라 0.0686 m³에서 0.0964 m³로 나타났다. 이러한 값은 BIAS 수치보다 약 4~7배 큰 값으로 수간재적표로 구한 수간재적과 수간곡선식으로 구한 수간재적 사이에는 평균적인 BIAS 값보다도 더 큰 불확실성이 존재하고 있음을 알려준다.

3.2 입목의 크기에 따른 수간재적의 증가율 추이

Fig. 6은 HT의 증가에 따른 수간재적의 변화율을 보여준다. 모든 수종에서 DBH 값에 따라 변화율에 차이는 있으나, HT의 증가에 따른 수간재적의 변화율에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이와 상반되게 수간재적은 DBH의 증가에 따라 변화율이 증가하는 것으로 확인되었다(Fig. 7). 이러한 현상은 수간의 재적을 구하기 위해 사용된 입체도형의 부피 계산 공식들(Eq. 1~Eq. 3)의 특성에서 그 원인을 찾을 수 있다. 해당 수식들은 모두 입체도형의 높이와 단면적에 비례하는 것을 볼 수 있는데, 여기서

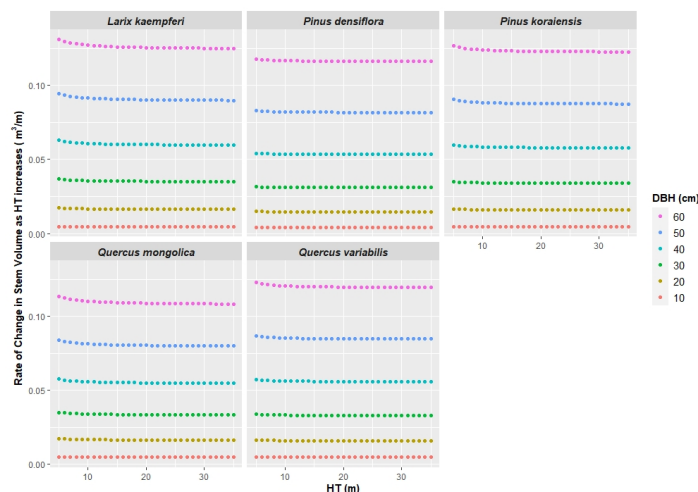


Fig. 6. Rate of change in stem volume by species and DBHs as HT increases

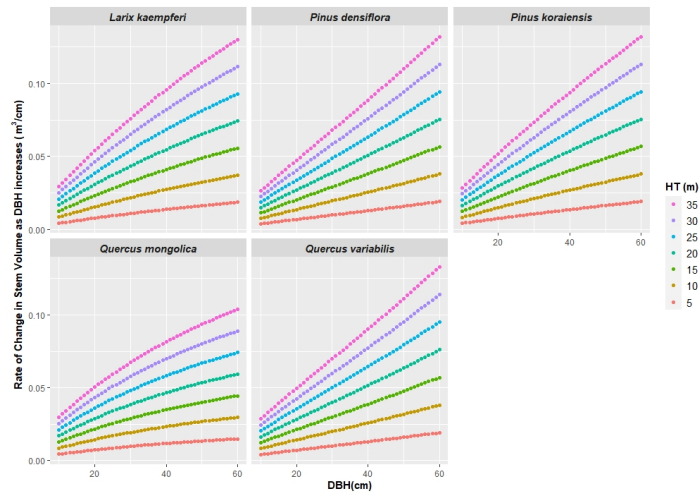


Fig. 7. Rate of change in stem volume by species and HTs as DBH increases

Table 3. Forest growing stock and carbon stock estimates in Hongcheon-Gun by estimation methods

Estimates		Estimation methods	
		Stem taper equation	Stem volume table
Growing stock	per hectare(m³/ha)	274.21	264.09
	total(m³)	39,980,033	38,504,427
Carbon stock	per hectare(tC/ha)	154.36	148.46
	total(tC)	22,506,040	21,645,714

높이는 HT와 비례한다고 할 수 있으며 단면적은 DBH의 제곱에 비례한다고 할 수 있을 것이다. 이런 특성은 수간재 적식(stem volume equation) 중 가장 효과적인 형태 중 하나가 DBH의 제곱과 HT를 하나의 예측변수로 결합하여 사용한다는 점과도 일맥상통한다(Burkhart and Tomé, 2012). 따라서 개념적으로 수간재적을 HT에 대해서 미분한다면 상수값이 나올 것이며(Fig. 6), DBH에 대해서 미분한다면 직선의 방정식을 얻게 될 것이다(Fig. 7). 따라서 수간재적표를 적용할 때 팔약에 의한 불확실성의 영향을 줄이려면 HT보다는 DBH에서 팔약의 간격을 줄이는 것이 더욱 효과적일 것이다. 이는 Jung et al.(2021)이 DBH 팔약의 간격을 줄이는 것을 제안했던 것과도 일치하는 결과이다.

수간재적이 DBH의 제곱에 비례하는 이러한 특성은 DBH를 팔약하는 방식과 맞물려 필연적으로 과소추정치를 줄 수 밖에 없다. 이해를 돕기 위해 간단한 사례를 제시한다. 동일한 높이를 갖는 밀면의 직경 구간이 19.1 cm ~ 21 cm인 원기둥에서, DBH의 팔약 방식을 적용하면 밀면의 직경 19.1 cm와 21 cm인 원기둥 모두가 직경이 20 cm인 원기둥과 같은 재적을 갖게 된다. 높이가 10 m이고 직경이 19.1 cm, 20.0 cm, 21.0 cm인 원기둥

의 실제 재적은 각각 0.286521 m³, 0.314159 m³, 0.346361 m³이다. 해당 직경 구간에서 팔약을 통해 발생가능한 최대 과대추정값(직경 19.1 cm와 20.0 cm인 원기둥 간 재적 차이)은 0.314159 - 0.286521 = 0.027638 m³이며, 최대 과소추정값(직경 20.0 cm와 21.0 cm인 원기둥 간 재적 차이)은 0.314159 - 0.346361 = -0.032201 m³이다. 이것은 직경 20.0 cm에서 21.0 cm 사이에서 증가하는 밀면 넓이가 19.1 cm에서 20.0 cm 사이에서 증가하는 밀면 넓이보다 크기 때문에 필연적으로 나타나는 기하학적 현상이다. 따라서, 해당 직경 구간에서 과소추정량이 과대추정량보다 커지게 되며, 만약 어떤 임분에서 임목들의 DBH가 고르게 분포하고 있다면 전체적으로 과소추정치를 제공하게 된다. 수간재적표를 사용하는 경우 DBH 팔약에 의해 수간재적이 과소추정되는 이러한 현상은 Table 3에 제시된 강원도 홍천군의 사례 분석 결과에 의해서도 뒷받침되고 있다.

3.3 수간재적 추정 방식에 따른 강원도 홍천군의 임목 축적 추정의 불확실성과 그에 따른 탄소축적의 편향

제7차 NFI 데이터를 이용하여 강원도 홍천군의 ha당 및 전체 임목축적과 탄소축적을 계산한 결과는 Table 3과 같

다. 이 결과에 따르면 수간재적표의 사용으로 인하여 입목축적에서는 1,475,606 m³의 과소추정이 발생하였으며, 이로 인하여 탄소축적에서는 860,232 tC 만큼 과소추정이 발생하는 것으로 나타났다. 단위면적으로는 ha당 10.12 m³, 5.9 tC의 과소추정이 발생하는 꼴이다. 2019년 한 해 동안 증가한 전국 산림의 입목축적 약 2,138만 m³(KFS, 2021b)와 전국 산림면적에서 홍천군 산림이 차지하는 비율이 2.4%에 그치는 것을 고려하면 확인된 과소추정량은 국가 수준에서도 작은 값이라 할 수 없다. 물론 산림청이나 국립산림과학원에서 국가 수준의 통계자료를 작성하는 경우 수간곡선식을 직접 이용하기 때문에 이러한 오차가 발생할 소지는 없다. 하지만 국내 산림탄소상쇄사업과 같이 탄소배출권을 다루는 사업의 경우 프로젝트를 수행하는 기관이나 업체 등에서 수간재적표를 사용하고 있기 때문에 수간재적표 사용에 따른 오차에 노출될 가능성이 있다.

홍천군의 사례에서처럼, 입목수간재적표에는 팔약에 따른 한계점이 분명히 존재한다. 하지만 입목수간재적표는 현장적용성이나 비용효율성 등의 이유로 인하여 현장에서는 여전히 그 필요성이 존재한다. 입목수간재적표의 정확성을 제고하기 위한 방안으로 지역 단위의 수간재적표를 작성하는 것이 과거부터 제기되어 왔다. 입목수간재적표(KFS and NIFoS, 2021)를 추진한 사업에서 지역 단위의 수간재적표와 관련한 연구를 진행하였으나, 입목재적은 지역보다는 입지 조건에 영향을 더 크게 받는 것으로 분석되어 지역 단위의 수간재적표는 조제되지 않았다. 따라서 현재 수행해 볼 수 있는 방법으로 현장에서 팔약 없이 DBH와 HT를 측정하는 것이 있다. 하지만 이 또한 산림경영계획이나 숲가꾸기 사업의 산림조사에서는 비용효율성으로 인하여 팔약을 적용할 수 밖에 없는 상황이다. 따라서 팔약의 적용 여부는 산림자원 조사의 목적을 고려하여 결정할 필요가 있다고 판단된다. 근본적으로 이와 같은 오차를 피하기 위해서는 DBH와 HT 값을 직접 입력하여 입목의 수간재적 및 탄소축적을 바로 얻을 수 있는 도구를 제공할 필요가 있다.

4. 결론

입목수간재적표 상에서 DBH와 HT를 팔약함에 따라 나타나는 수간재적 추정치의 불확실성과 이에 따른 탄소축적 추정치의 편향을 정량화하고자 홍천군 NFI 자료를 활용하여 사례연구를 추진하였다. 홍천군의 주요 수종인 일본잎갈나무, 소나무, 잣나무, 신갈나무, 굴참나무를 대상으로 수간곡

선식으로 계산한 수간재적을 참값으로 가정하여 수간재적표로 얻은 수간재적 추정값의 불확실성을 2가지 지표를 이용하여 정량화하였다. 모든 지표(BIAS, RMSE)에서 DBH와 HT가 증가함에 따라 해당 지표들이 증가하는 경향이 확인되었다. BIAS는 모든 구간에서 양의 값으로 나타나 수간재적표를 이용하면 수간재적을 평균적으로 과소추정하는 것으로 밝혀졌으며, 수종에 따라 최대 0.0134 m³에서 0.0178 m³에 이르는 것으로 확인되었다. RMSE 값은 BIAS에 비해 약 4~7배 더 큰 것으로 나타나 수간재적표와 수간곡선식의 추정치 사이에 실제로 나타날 수 있는 차이는 BIAS가 나타내는 것보다 더 클 수 있음을 확인하였다.

수간재적의 증가율은 HT와는 크게 상관없이 거의 일정하였으나, DBH가 증가함에 따라서는 증가하는 모습을 나타내었다. 특히 DBH에서 이러한 특성은 수간재적표에서 DBH를 팔약하는 방식과 결합하여 필연적인 과소추정으로 이어지는 것으로 분석되었다. 따라서 수간재적표를 사용할 경우 수간재적의 불확실성을 다루는데 있어 HT보다는 DBH가 더 효과적이며, 대경목 위주의 임분에서는 수간재적표의 사용에 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

강원도 홍천군 산림의 입목축적을 수간곡선식과 수간재적표를 각각 이용하여 추정한 결과, 수간재적표에 의한 입목축적은 1,475,606 m³ 만큼 과소추정되었으며, 이에 따라 탄소축적 역시 860,232 tC 만큼 과소추정되었다. 홍천군으로 제한하여 분석한 수치라 하더라도 결코 작은 값이라 간주하기 어려운 수준이었다. 향후 온실가스 감축과 관련된 산림부문 사업들이 이전과 비교하여 활발해질 것으로 예상되는 가운데, 이와 같은 추정치의 불확실성은 사업을 통해 얻은 탄소흡수 추정량의 신뢰성에 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 수간곡선식을 기반으로 DBH나 HT 값을 그대로 입력하여 수간재적과 탄소축적을 계산할 수 있는 도구를 제공할 필요가 있다.

References

Avery TE, Burkhart HE. 2002. Forest measurements. 5th ed. New York: McGraw-Hill.

Burden LR, Faires JD, Burden MA. 2016. Numerical analysis. 10th ed. Singapore: Cengage Learning Asia.

Burkhart HE, Tóme M. 2012. Modeling forest trees and stands. Dordrecht: Springer Science & Business Media.

GIR (GHG Inventory and Research Center). 2020.

- National greenhouse gas inventory report of Korea 2020. Seoul, Republic of Korea: GIR (in Korean).
- Hosoda K, Mitsuda Y, Iehara T. 2010. Differences between the present stem volume tables and the values of the volume equations, and their correction, *Jpn. J. For. Plann.* 44: 23-39 (In Japanese with English abstract).
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventory. Hayama: IPCC/IGES.
- Jung SY, Lee KS, Park JH. 2020. Current growth characteristics of *Pinus densiflora* in the southern region, Korea. *J Agric Life Sci* 54(6): 11-19 (in Korean with English abstract).
- Kershaw Jr. JA, Ducey MJ, Beers TW, Husch B. 2017. *Forest mensuration*. 5th ed. Chichester: John Wiley & Sons.
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011. The 5th national forest inventory report. Seoul, Republic of Korea: KFRI (in Korean).
- KFS (Korea Forest Service). 2021a. Forest basic statistics 2020. KFS Forest and Forestry Statistics Platform; [accessed 2022 Apr 20]. <https://kfss.forest.go.kr/stat/ptl/main/main.do>
- KFS (Korea Forest Service). 2021b. Statistical yearbook of forestry 2021. Daejeon, Republic of Korea: KFS (in Korean).
- KFS (Korea Forest Service), NIFoS (National Institute of Forest Science). 2021. Tree volume, biomass, and stand yield table 2021. Seoul, Republic of Korea: KFS and NIFoS (in Korean).
- Kozak A. 1988. A variable-exponent taper equation. *Can J For Res* 18(11): 1363-1368.
- Mehtätalo L, Lappi J. 2020. *Biometry for forestry and environmental data with examples in R*. Chapman and Hall/CRC. Boca Raton, U.S.A. pp. 411.
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team. 2021. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-153. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- RStudio Team. 2022. RStudio: Integrated development environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA. URL: <http://www.rstudio.com/>.
- Son YM, Kim RH, Lee KH, Pyo JK, Kim SW, Hwang JS, Lee SJ, Park H. 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. Korea Forest Research Institute. Seoul, Republic of Korea (in Korean).
- Wickham H. 2016. *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. New York (NY): Springer-Verlag.
- Wickham H, Francois R, Henry L, Muller K. 2021. dplyr: A grammar of data manipulation. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>.