

목 차

국가산림자원조사 자료를 활용한 산림의 연간 고사량 추정방법 개발	임종수 · 이선정 · 이민우	1
임상도를 활용한 주요 밀원수의 시계열 공간 변화 연구 - 아까시나무 · 밤나무 · 백합나무를 중심으로 -	김원빈 · 강병옥 · 김규섭 · 이창훈	9
임분표예측기법을 활용한 굴참나무 직경분포 변화에 관한 연구	정상현 · 이대성 · 최정기	19
Airborne Laser Scanning 기반 일본잎갈나무의 산림자원정보 추출	서연옥 · 박정목 · 강진택	29
국산 낙엽송 원목의 이용 방식에 따른 부가가치 변화	안은정 · 장윤성 · 한 희	41
부산물의 고부가가치 이용 측면에서의 열처리된 신갈나무 목재칩의 물리적 특성	장윤성 · 권순길	49
Estimation and Comparison of Local Stem Volume for <i>Pinus densiflora</i> in Three Regions Using a Suitable Stem Taper Model	Jin-Taek Kang · Yeonok Seo · Jeongmook Park · Chiung Ko	55

국가산림자원조사 자료를 활용한 산림의 연간 고사량 추정방법 개발

임종수^{1*} · 이선정¹ · 이민우²

¹국립산림과학원 산림탄소연구센터 · ²한국산지보전협회 산지정책연구센터

Development of an Estimator of Annual Mortality from the National Forest Inventory of South Korea

Jongsu YIM^{1*} · Sunjeong Lee¹ · Minwoo Lee²

¹National Institute of Forest Science, Forest Carbon Center on Climate Change, 02455 Seoul, Republic of Korea

²Korea Forest Conservation Association, Forestland Policy Research Center, 35262 Daejeon, Republic of Korea

요약 : 고사목은 산림생태계에서 주변 입목간의 경쟁 및 다양한 자연적 요인에 발생하게 된다. 고사목은 경제적 측면에서 이용가능한 자원의 손실을 의미하므로 산림에서 고사량의 발생특성을 규명하여 산림자원을 효율적으로 관리하기 위한 방안이 요구된다. 우리나라의 경우, 국가단위의 고사목에 관한 조사는 2006년부터 시작된 제5차 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)부터 고정표본점을 활용한 고사목의 모니터링이 수행되고 있다. 본 연구는 국가산림자원조사 고정표본점에서 수집된 고사목 자료를 활용하여 연간 고사량을 추정하기 위한 방법을 개발하기 위하여 수행되었다. 최근 5년간 부후등급 1등급으로 조사된 고사목을 신규로 고사된 것으로 가정하였으며, 전체 조사대상 표본점 대비 부후등급 1등급이 출현한 표본점 개소수의 비율과 부후등급 1등급의 고사량을 활용하여 연간 고사량을 분석한 결과, 2020년 기준의 ha당 연간 고사량은 0.19 m³/ha/년으로 전차기(0.22 m³/ha/년)보다 감소된 것으로 나타났으며, 결과적으로 2020년 기준의 연간 고사량은 1,139 천m³이며, 연간 고사율은 0.11%로 분석되었다. 일반적으로 임령의 증가는 입목간 경쟁이 심화되어 고사량이 증가하는 추세이지만, 본 연구에서는 소폭 감소하였는데 표본의 오차 및 표본의 대표성과 우리나라의 산림특성을 고려한 고사목 발생원인에 관한 시계열 분석에 관한 연구가 필요하다.

ABSTRACT : Deadwood in forest ecosystems arises due to competition among standing trees and various natural factors. From an ecological perspective, deadwood plays crucial roles, such as maintaining biodiversity and acting as a carbon reservoir. However, from an economic perspective, it signifies a loss of usable resources. Therefore, identifying the characteristics of deadwood occurrence in forests is necessary to manage forest resources effectively. In South Korea, monitoring of deadwood at a national level began with the 5th National Forest Inventory (NFI), initiated in 2006, which applied a permanent sample plots (PSP). Therefore, recently deceased trees identified as decay class 1 over the last five years were assumed to have newly died. Using the ratio of sample plots with decay class 1 to the total number of sample plots surveyed, and the volume of trees in decay class 1, the annual mortality was analyzed. The results showed that as of 2020, the annual mortality per hectare was 0.19 m³/ha/year, a decrease from the previous period (0.22 m³/ha/year). The total annual mortality in 2020 was analyzed to be 1.1 Mm³, with an annual mortality rate of 0.11%. In general, an increase in stand age tends to intensify competition among trees, resulting in a trend of increasing mortality rate. However, this study observed a slight decrease. This indicates the need for further research on potential sampling errors, the representativeness of the sample for deadwood, and a time-series analysis of the causes of deadwood occurrence, taking into account the characteristics of forests in South Korea.

Key words : *Daed wood, Annual mortality, Permanent sample plot, National forest inventory, Korea*

Corresponding author : Jongsu YIM

Tel : 02-961-2892

E-mail : yimjs@korea.kr

I. 서 론

산림내 고사목(Dead wood)은 생태학적 측면에서 산림 생태계의 다양성을 유지하는 중요한 구성요소로 영양소 순환과 서식지 다양성 제공에 기여하며, 또한 다양한 미생물과 곤충의 서식지로 생물다양성 유지에 필수적인 역할을 수행한다(Stevens, 1997; Woodall et al., 2009). 이러한 고사목은 주변 입목간의 경쟁에 의해 도태되거나, 풍해 및 병충해 등에 의해 자연적으로 발생하게 된다. 또한, 경제적 측면에서 고사목은 이용가능한 목재자원의 손실을 의미하며 OECD는 매년 회원국을 대상으로 목재생산량과 자연 손실량(Natural loss) 등의 통계자료를 수집 및 발표하고 있다(OECD, 2023).

UN 기후변화협약에 따른 토지이용 및 토지이용 변화, 임업(LULUCF) 분야에서 고사목은 중요한 탄소저장고 중 하나로 간주하고 있다. IPCC 지침에서 산림생태계의 탄소 저장량을 정확히 파악하기 위해 각 탄소저장고의 역할을 명확히 하고, 물질순환을 고려한 관점에서 고사목의 현황과 탄소 변화 특성에 대한 연구를 기반으로 통계를 산출할 것을 권고하고 있다(IPCC, 2006). 고사량은 산림 내에서 생물학적 물질순환과 탄소 이동을 파악하는 데 있어 중요한 지표로 작용하며, 지속 가능한 산림관리와 기후 변화 대응 전략 수립을 위해 반드시 평가되어야 하는 대상이다. 예를 들어, 미국에서는 산림 부문의 탄소 저장고별 탄소 저장량 분석 결과, 고사 유기물(고사목과 낙엽층)이 전체 탄소 저장량의 약 14%를 차지한다고 보고되었으며(Heath et al., 2003), 우리나라의 산림 내 고사목은 약 2,895천 톤(전체 탄소 저장량의 약 0.3%)의 탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났다(NiFOS, 2021). 즉 고사목이 비록 비교적 작은 비율을 차지하더라도, 산림생태계의 탄소순환과 저장 기능에서 중요한 역할을 담당하고 있음을 보여준다. 따라서 고사량의 정량적 분석은 산림생태계 건강 상태를 평가하고 온실가스의 배출 및 저장 정책을 수립하는 데 필수적인 요소로 작용하고 있다.

고사량의 변화를 탐지하기 위해서는 고정표본점을 설치하여 주기적인 모니터링이 요구된다. 국가단위의 고사목 현황을 파악하기 위하여 많은 국가는 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI)에서 고정표본점을 설치하고 고사목에 관한 자료를 수집하고 있다(Tomppo et al., 2010; Crecente-Campo et al., 2016). Rondeux et al.(2012)는 고사목을 조사하고 있는 10개 국가들을 대상으로 고사목의 정의(최소 흉고직경 및 수고 등)와 고사량 추정을 위한 표본설계를 분석한 결과, 국가별 정의 및 표본설계에 차이가 있음을 확인하였으며, 국가간 고사량의 통계를 비교하기 위해서는 일관된 정의를 적용한 방안을 제시한

바 있다. 일반적으로 고사목은 고사입목과 쓰러진 고사목을 구분하여 고사목의 수종, 가슴높이 직경(중앙직경), 나무높이(길이), 부후등급 등을 조사하고 있다(Woodall et al., 2009).

스웨덴 산림의 경우 연평균 고사량은 6.1m³/ha이며 연간 고사량은 0.18m³/ha이며(Fridman and Walheim, 2000), 독일의 연간 고사량과 연간 고사율은 2.4백만m³과 1.8%로 추정되었다(BMEL, 2015). 또한, 핀란드는 연간 고사량이 7백만m³에 달하지만 연간 고사율은 상대적으로 낮은 0.3%로 보고하였다(Korhonen KT et al., 2021). 산림에서 입목간의 경쟁 및 자연재해에 의해 발생하는 입목의 고사는 경제적 손실을 나타내는 것으로 산림자원의 손실량에 관한 통계를 확보하여 발생요인을 파악하고 고사량을 줄이기 위한 산림관리 방안 수립에 필요한 기초자료를 제공하고 있다. 즉 많은 국가에서 생태적 측면과 온실가스 흡수량 평가 등을 위하여 고사목에 관한 기초자료를 수집 및 분석하여 산림생태계의 모니터링 및 온실가스 통계 산정 등에 활용하고 있다(Tomppo et al., 2010, Korhonen KT et al., 2021).

우리나라는 제5차 NFI(2006-2010)부터 고사목에 관한 기초자료가 수집되고 있으며, 부후등급 및 고사목에 관한 국가고유계수를 활용하여 탄소저장량을 평가할 수 있는 기반을 구축하였다(Moon and Yim, 2021). Moon et al. (2022)은 NFI 고정표본점에서 모니터링이 가능한 표본점의 고사목 자료를 활용하여 조사차수별 고사량을 추정한 결과, 23.04(NFI5)에서 14.83 m³/ha(NFI7)으로 감소하는 추세를 발표하였다. 이러한 특정 시점의 고사량 및 탄소저장량은 5년간의 순 변화를 나타낸 것으로 연간 고사량에 관한 통계자료는 제공하지 못하는 한계가 있다. 따라서 본 연구는 시계열 국가산림자원조사의 고사목 자료를 활용하여 연간 고사량을 추정하기 위한 방법을 개발하고 이에 따른 연간 고사량을 추정하기 위하여 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 한국의 전체 산림을 대상으로 수행되었으며, 2022년 기준의 산림면적은 6,291 천ha로 전체 국토의 62.3%를 차지하고 있다. 임상구분에 따른 산림 면적은 침엽수림, 활엽수림, 혼효림이 각각 37%, 32%, 그리고 27% 분포하고 있으며, 임령별 면적을 비교하면 31~50년생(IV~V영급)의 면적이 전체 산림면적의 75.4%를 차지하고 있다(KFS, 2021).

한국은 지리적으로 온대지역에 위치하고 있으며 연평균 기온은 13.2℃로 생태권역에 따른 구분에서 일부 남부 지역의 아열대지역을 제외한 대부분의 산림은 온대림에 속한다(Yim, 1977). 연간 강수량은 1,306mm이지만 계절에 따른 편차가 심하여 봄·가을은 상대적으로 강수량이 적으나, 대부분의 강수량은 여름에 집중되고 있다(KFS, 2021). 이러한 연간 강수량의 계절적 편차는 가뭄, 집중호우 및 태풍은 임목의 생장에 영향을 주고 있다.

2. 국가산림자원조사(NFI)

제5차 NFI는 한반도에서 임의의 한점을 기준으로 4km×4km의 일정한 간격으로 표본점을 배치하는 계통추출법(Systematic sampling)을 적용하고 있으며, 4개의 부표본점이 집락 표본점(Cluster plot)의 형태로 설계되어 있다(Figure 1). 또한, 시간경과에 따른 산림자원의 변화를 모니터링하기 위하여 고정표본점으로 설치되어 있으며, 매 5년마다 재조사가 수행되고 있다(KFS and KoFPI,

2017).

NFI에서 고사목 조사는 모든 집락표본점의 중앙부표본점(S1)에서 수행되며, 고사목 조사가 이루어지는 중앙부표본점은 기본조사원(0.04ha)으로 중심으로부터 반경이 11.3m인 원형이다. 산림의 중요한 생태적 역할을 담당하는 고사목(Dead wood)은 자연적 또는 인위적 원인으로 인해 임분내에 서 있거나 쓰러져 죽은 나무를 지칭하며 (Harmon et al., 1986; Clark et al., 2002), 존재 상태에 따라 서 있는 고사목(Standing dead trees)과 쓰러진 고사목(lying dead trees)으로 구분하고 있다. 본 연구에서 고사목의 범위는 NFI의 고사목 조사기준(KFRI, 2011)을 따르며, 고사목의 부후정도는 최근에 고사한 것부터 부패의 초기단계, 부패의 중간정도 진척 단계, 그리고 부패가 심화된 단계인 4등급으로 구분된다(Table 1; Figure 2). 본 연구는 연간 고사량을 추정하기 위하여 조사차수별 부후정도가 1등급에 해당하는 고사목만 추출하여 분석대상으로 하였다.

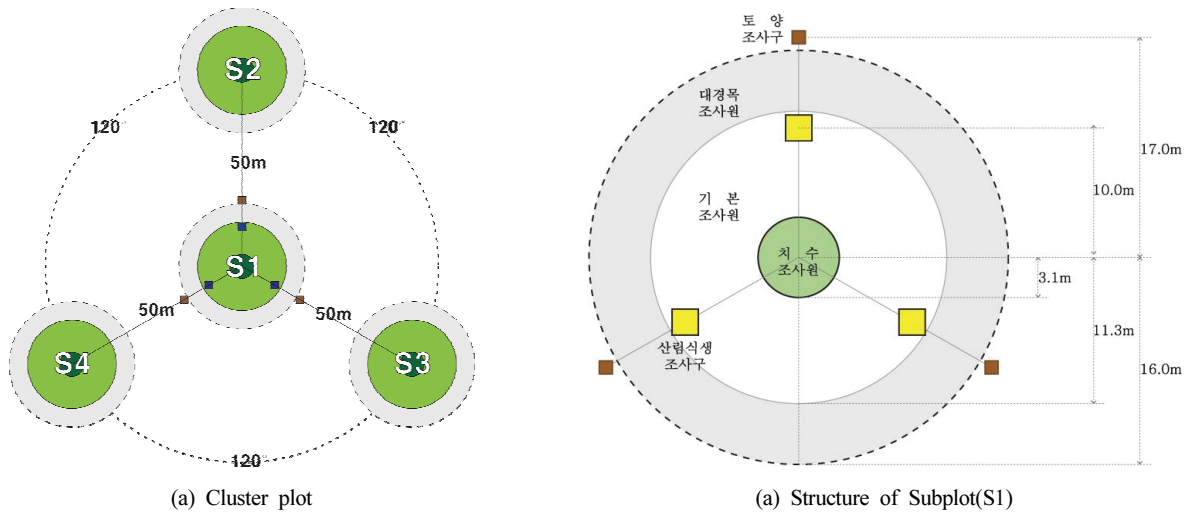


Figure 1. Sampling and plot designs for dead wood (DW) in the Korean NFI (KFS and KoFPI, 2017)

Table 1. Criteria for the classification of dead wood by decay class

Decay class	Classification criteria	Description
I	Recently dead	soon after being dead, but with leaves or branches
II	Incipient decay	The stage in which there are neither branches nor leaves, with the stem decayed partly
III	Progressed decay	The stage in which the stem is not only decayed completely but the sapwood is also partly decayed
IV	Intense decay	The stage in which only the empty shell of the tree remains to the extent to which it can be destroyed by just one touch

Source: KFS and KoFPI(2017).

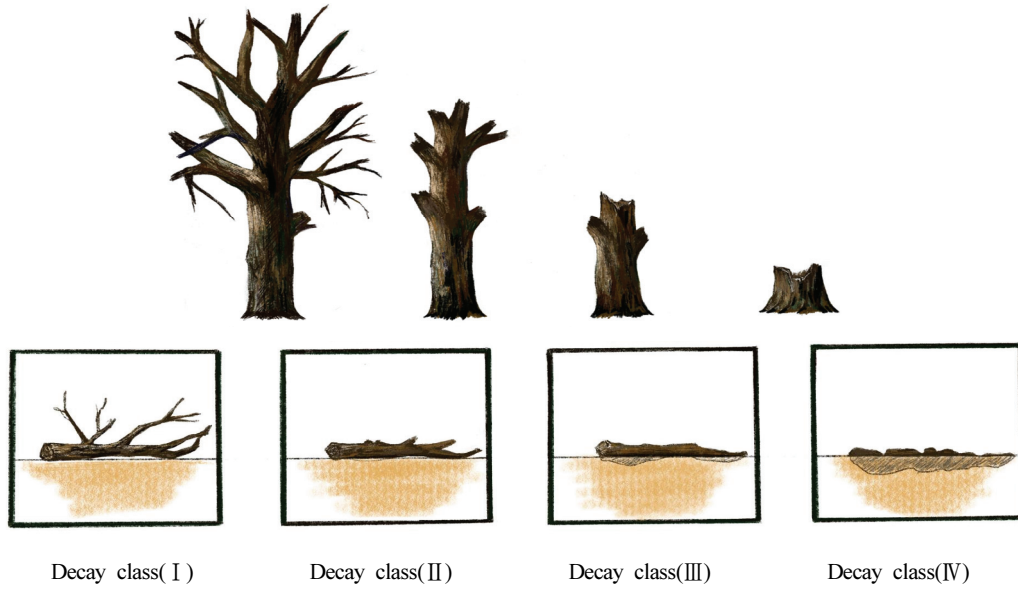


Figure 2. Decay classes of dead wood(KFS and KoFPI, 2017)

3. 분석대상 표본점의 추출

본 연구는 제5차, 제6차 및 제7차 NFI에서 수집된 고사목 자료를 활용하였다. 연간 고사량을 추정하기 위해서는 고정표본점에서의 변화를 탐지하여야 한다. 따라서 수집된 자료 중에서 입목지로 유지되며 시간경과에 따른 고사량의 변화를 탐지할 수 있는 표본점을 선정하였다. 또한 조사차수간 고사목의 부후등급을 비교하여 신규로 부후등급 1등급이 증가한 표본점을 재추출하였다. 즉, 연간 고사량은 산림내 현재까지 누적된 고사량이 아닌 고정표본점에서 최근 5년내 신규로 고사목으로 발생한 고사목(부후등급 1등급)을 추출하여 연간 고사량 추정에 활용하였다.

4. 연간 고사량 추정

NFI에서 수집된 고사 입목과 쓰러진 고사목의 재적(고사량)은 수종, 흉고직경(중양직경)과 수고(길이)를 수종별 재적식을 이용하여 재적을 산출하였다. 표본점 단위의 고사량은 표본점의 실제크기와 표본점내 고사량의 합계를 활용하여 식(1)에 의해 산출하였다.

$$y_{c,i} = \frac{\sum_j y_{c,j}}{a_{i,j}} \quad (1)$$

여기서, $y_{c,i}$ 는 부표본점(i)의 ha당 고사량(m^3/ha)을 나타내고, $y_{c,j}$ 는 기본조사원($a_{i,j}$)에 포함된 부후등급 1등급의

고사량, 그리고 $a_{i,j}$ 는 기본조사원의 실제 산림면적이다 (KFRI, 2011).

고사목은 모든 표본점에 출현하는 것이 아니므로 전체 표본점 대비 부후등급(I)이 증가한 중앙부표본점(S1)의 비율을 도출하여야 하며, 이러한 자료를 활용하여 최근 5년간의 ha당 고사량(자연손실량) 자료를 활용한 연평균 ha당 고사량을 추정할 수 있다. 각각의 산출식은 식 (2) 및 식 (3)과 같으며, 식(4)는 연간 총 고사량 추정에 적용한 식이다.

$$\text{Mean of Increased mortality for last 5 year} \quad \overline{y_m} = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} y_{m,i}}{n} \quad (2)$$

$$\text{Mean of annual mortality for stocked forests} \quad \overline{y_{m/yr}} = \frac{\overline{y_m}}{5} \times \frac{n_i}{n} \quad (3)$$

$$\text{Total annual mortality} \quad T = A_s \times \overline{y_{m/yr}} \quad (4)$$

$\overline{y_m}$: Mean of Increased mortality for last 5 year,

y_m : Increased mortality in decay class I for last 5 year,

n : Number of plots which observed dead wood for last 5 year

i : Sample plots which increased mortality in decay class I for last 5 year

T : Total annual mortality, A_s : Area of stocked forest (surveyed year)

Table 2. The number of samples stocked and observed dead woods

Survey	NF15(2006-2010)		NF16(2011-2015)		NF17(2016-2020)	
	Stocked	Observed dead wood	Stocked	Observed dead wood	Stocked	Observed dead wood
N. of samples	3,591	3,235	3,491	2,911	3,462	2,629

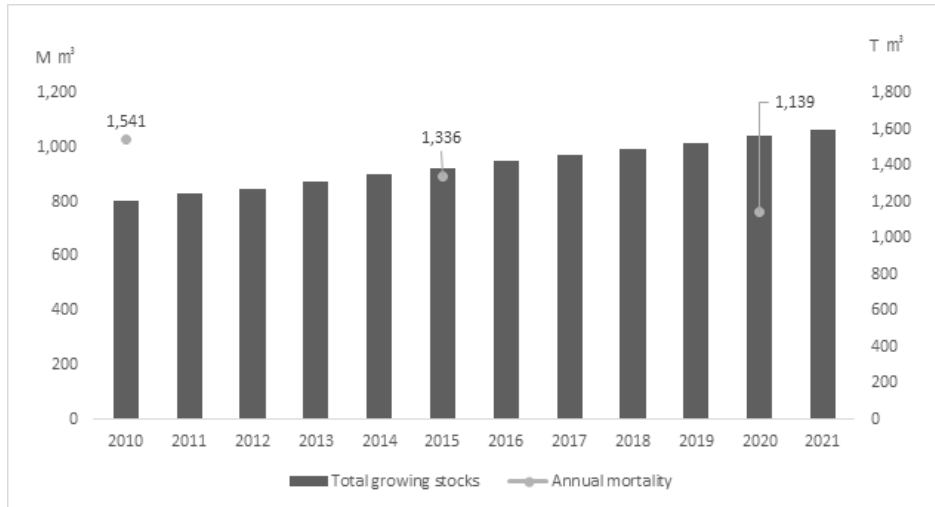


Figure 3. Total forest growing stocks and annual mortality

III. 결과 및 고찰

1. 분석대상 표본점 추출

국가산림자원조사의 고정표본점은 매년 산지전용 및 산림경영활동, 자연재해 등에 의해 고정표본점으로서의 기능을 할 수 없는 표본점이 발생하고 있으며, 이러한 영향으로 조사차수간 모니터링이 가능한 표본점의 개소수는 차이가 있다. Table 3은 국가산림자원조사의 조사차수별 반복적으로 수행되고 모니터링이 가능한 표본점 개소수를 나타낸 것으로 각각 2,704 및 2,683 개소수로 나타났다. 이 중에서 부후등급 1등급에 해당하는 고사목의 본수에 차이가 없는 표본점은 각각 1,363 및 1,631 개소수로 시간경과에 따라 증가하였는데, 전차기 대비 신규 고

사목이 발생하지 않았다는 것을 의미한다. 한편 부후등급 1등급의 고사목이 증가된 표본점도 563개에서 515 개소수로 감소하였다. 따라서 본 연구는 부후등급 1등급의 고사목이 증가하는 표본점을 대상으로 연간 고사량을 추정하였다.

임종에 따른 신규 고사목의 발생현황을 비교한 결과, 천연림보다 인공림에서 증가되는 표본점의 비율이 각각 25.4%와 21.8%로 천연림(19.9%와 18.8%)보다 높은 것으로 나타났다. 천연림은 상대적으로 다층구조로 인해 입목간 경쟁이 양호하여 신규로 발생하는 고사목이 적은 반면에 인공림에서 입목간 경쟁이 심화되어 고사목이 많이 발생하고 있는 것으로 나타났다. 한편, 차수별로 비교하면 전차기 보다 최근 5년간 신규 고사목이 발생하는 표본점은 임종에 관계없이 감소한 것으로 나타났다. 우리나라는 공익용 산지를 제외한 천연림에서도 천연림 보육과

Table 3. Selection of analysed samples for estimating annual mortality

Classification	Permanent sample plots	N. of plots					
		Not changed		Decreased		Increased	
		NF	PF	NF	PF	NF	PF
NF15vsNF16	2,704	1,171	192	624	154	445	118
NF16vsNF17	2,683	1,409	222	457	80	431	84

*NF: Natural forest, PF: Planted forest

Table 4. Statistical indicators related to annual mortality for decay class I

Classification	Increased mortality for last 5 year (m ³ /ha/period)	Annual mortality in increased plots (m ³ /ha/year)	Annual mortality for stocked forests (m ³ /ha/year)	Total annual mortality (m ³)
NFI5vsNFI6	6.43	1.286	0.22	('15) 1,366,226
NFI6vsNFI7	5.38	1.076	0.19	('20) 1,139,282

같이 산림 기능을 유지 및 증진을 위한 산림사업이 수행되어 천연림과 인공림의 차이가 크지 않은 것으로 판단되며, 인공림의 경우 동령의 단층으로 구성되어 있으므로 입목간 경쟁이 심화된 산림을 대상으로 간벌 등의 숲가꾸기 사업이 필요한 것으로 판단된다.

2. 연간 고사량 추정

Table 3에서 도출된 고사목 표본점과 해당 표본점에서 관측된 부후등급(I)의 고사목 자료를 활용하여 조사차수에 따른 최근 5년간의 ha당 고사량, 연평균 ha당 고사량, 그리고 전체산림의 연평균 고사량을 산출한 결과는 Table 4와 같다. 식 (2)에 의한 최근 5년간 평균 ha당 고사량은 최근 조사자료(NFI6vsNFI7)에서 5.38 m³/ha로 전차기 대비 감소한 것으로 나타났으며, 이러한 영향으로 연평균 ha당 고사량 및 전체산림의 연평균 고사량도 전차기 대비 감소하였다. 국가산림자원조사 자료의 최종년도를 기준으로 연간 고사량을 추정한 결과, 2015년과 2020년의 연간 총 고사량은 각각 1,336천m³과 1,139천m³으로 분석되었다. 문가현과 임종수(2021)는 우리나라의 적극적인 숲가꾸기 사업과 미이용 바이오매스의 이용 증진에 의해 신규 고사목이 관측되지 않는 것으로 제시하였는데, 쓰러진 고사목 또는 병충해 피해를 입은 고사목이 임내에서 제거되어 관측에 누락될 수도 있다. 특히, 임내 정리가 완료되어 그루터기만 있을 경우 고사목과 간벌목의 구분이 불가하여 고사목이 관측되지 않은 영향으로 판단된다. 그러나, 영급별 산림면적 등을 고려할 때 고사목의 감소 경향은 표본설계를 고려한 표본오차에 관한 추가적인 분석이 필요하며, 생태적인 측면에서 우리나라 산림의 구조를 고려한 심층적인 분석이 필요한 것으로 판단된다.

국가별 연간 고사량은 국가가 산림조건에 따라 직접적인 비교는 어렵지만 연간 고사율은 국가간 비교가 가능하다. 연간 고사율은 해당년도의 입목축적 대비 연간 고사량을 비율로 나타낸 것으로 우리나라의 2015년 및 2020년도에 연간 고사율은 각각 0.144% 및 0.104%으로 나타났다. 우리나라의 경우 산림자원의 미래 전망을 위하여 연간 고사율을 입력변수로 이용하고 있는데 2007년도의 전망모델에서는 3~5%를 적용한 바 있으며(KFRI,

2007), 주요 산림수종의 동적성장모델에서는 0.09%를 적용하였다(NiFOS, 2018). 그러나 이러한 연간 고사율은 고정표본점의 모니터링에 의한 추정치보다는 연간 피해목의 피해재적 등을 이용한 자료로 현실을 반영하는데 한계가 있으므로 고정표본점의 모니터링에 의한 고사량 자료를 활용한 추정치를 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 한편, 독일(BMEL, 2015)과 핀란드(Korhonen et al., 2021)의 연간 고사율은 각각 1.8% 및 0.3%로 보고하였는데 결과적으로 국가별 산림조건 및 자연환경에 따라 차이가 있는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 산림생태계에서 생물다양성의 유지, 탄소저장고의 역할을 담당하고 있으며, 경제적 측면에서 자연적 손실을 야기하는 고사목의 현황을 파악할 수 있는 통계를 산출할 수 있는 방법을 도출하였다. 특히, 주기적으로 수행하고 있는 국가산림자원조사 자료를 활용하여 산림에서 매년 발생하고 있는 연간 고사량에 관한 통계를 산출할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

시간경과에 따른 고사목의 현황을 파악하기 위해서는 고정표본점을 설치하여 주기적인 모니터링을 수행하여 고사목의 출현본수 및 발생요인에 관한 분석이 필요하다. 우리나라는 전국 산림을 대상으로 고사목에 관한 조사는 2006년부터 수행된 제5차 국가산림자원조사에서 조사항목으로 포함하여 현황 및 시간경과에 따른 변화를 모니터링하고 있다. 따라서 본 연구에서는 주기적으로 조사되는 고사목 자료 중 부후등급 1등급(최근에 고사) 자료를 활용하여 연간 고사량을 추정하였다. 결과적으로 연간 고사량은 0.22에서 0.19m³/ha/년으로 감소하는 것으로 나타났으며, 연간 고사율은 0.11%이며, 2020년 기준의 연간 고사량은 1,139천m³으로 분석되었다. 그러나 고사량의 증감 원인으로는 산림 생태계내의 생물적 요인뿐만 아니라 숲가꾸기 등의 인위적 경영활동에 의한 효과가 있으므로 자연적 요인과 산림경영활동이 연간 고사량 추정에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 “국립산림과학원 일반과제 (파리체제 대응 산림흡수원의 온실가스 감축실적 평가체계 개발 (FM0200-2023-01-2024))”의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- BMEL. 2015. The forests in Germany. - Results of the third national forest inventory.
- Clark, DB., Clark, DA., Brown, S, Oberbauer, SF and Veldkamp, E. 2002. Stocks and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest nutrient and topography gradient. *Forest Ecology and Management* 164(1-3): 237-248.
- Crecente-Campo, F, Pasalodos-Tato, M, Alberdi, I, Hernández, L, Ibañez, J, Cañellas, I. 2016. Assessing and modelling the status and dynamics of deadwood through national forest inventory data in Spain. *Forest ecology and management* 360:297-310
- Harmon, ME, Franklin, JF, Swanson, FJ, Sollins, P, Gregory, SV, Lattin, JD, Anderson, NH, Cline, SP, Aumen, NG, Sedell, JR, Lienkaemper, GW, Cromack, K. and Cummins, KW. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecology research* 15: 133-302.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventory. IGES, Japan.
- Korhonen, KT, Ahola, A, Heikkinen, J, Henttonen, HM, Hotanen, J, Ihalainen, A, Melin, M, Pitkanen J, Raty, M, Sirviö and Strandström, M. 2021. Forests of Finland 2014-2018 and their development 1921-2018. *Silva Fennica* 55(5) article id : 10662.
- Korea Forest Research Institute(KFRI). 2007. Status and Long-term Predictions of Forestry sector. Research report 07-19. (in Korean)
- Korea Forest Research Institute(KFRI). 2011. The 5th National Forest Inventory Report. Seoul: Korea Forest Research Institute. 187p. (in Korean)
- KFS(Korea Forest Service) 2021. Statistical Yearbook of Forestry. Daejeon. (in Korean)
- KFS(Korea Forest Service) and KoPFI(Korea Forestry Promotion Institute). 2017. The 7th National Forest Inventory and Forest Health Monitoring. -Field Manual-. Seoul: Korea Forestry Promotion Institute. 86p. (in Korean)
- Fridman, J. and Walheim, M. 2000. Amount, structure, and dynamics of dead wood on managed forestland in Sweden. *Forest ecology and management* 131 23-36.
- NiFOS(National Institute of Forest Science). 2018. Development of dynamic growth model for major tree species. Research report 18-15. (in Korean)
- NiFOS(National Institute of Forest Science). 2021. 2020 Forest Resources in Korea (in Korean).
- Moon, GH and Yim, JS. 2021. Changes in Carbon Stocks of Coarse Woody Debris in National Forest Inventories: Focus on Gangwon Province. *Journal of Korean Society of Forest Science* 110(2): 233-243. (in Korean with English abstract).
- Moon, GH, Yim, JS and Kang, JT. 2022. Estimation of Carbon Stocks in Coarse Woody Debris Using Permanent Sample Plot Data from the Korean National Forest Inventory. *Journal of Climate Change Research* 13(1): 107-115. (in Korean with English abstract).
- OECD. 2023. OECD Environment Statistics. <https://doi.org/10.1787/env-data-en>.
- Rondeux, J, Bertini, R, Bastrup-Birk, A, Corona, P, Latte N, McRoberts RE, Stahl G, Winter S, and Chirici G. 2012. Assessing Deadwood Using Harmonized National Forest Inventory Data. *Forest science* 58(3): 269-283.
- Stevens, V. 1997. The ecological role of coarse woody debris: an overview of the importance of CWD in BC Forests. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work. 30p.
- Tomppo, E, Gschwantner, T, Lawrence, M, and McRoberts, RE. 2010. National forest inventories –Pathways for common reporting-. Springer. pp. 612.
- Woodall, CW, Rondeux, J, Verkerk, PJ, and Stahl, G. 2009. Estimating dead wood during national forest inventories: A review of inventory methodologies and suggestions for harmonization. *Environmental management* 44: 624-631.
- Yim, YJ. 1977. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula : IV. Zonal distribution of forest vegetation in relation to thermal climate. *Japanese Journal of Ecology* 27(4): 269-278.

-
- Received 7 November 2024
 - Finally Revised 19 December 2024
 - Accepted 20 December 2024

임상도를 활용한 주요 밀원수의 시계열 공간 변화 연구 - 아까시나무 · 밤나무 · 백합나무를 중심으로 -

김원빈¹ · 강병옥¹ · 김규섭² · 이창훈^{3*}

¹국립목포대학교 조경 · 건축융복합학협동과정 · ²한국산업인력공단 기술자격출제실 ·

³국립목포대학교 도시계획및조경학부

Study on Spatial Changes of Major Honey Plants Using Forest Map - Focusing on *Robinia pseudoacacia* L., *Castanea crenata* Siebold & Zucc., and *Liriodendron tulipifera* L. -

Won-Bin Kim¹ · Byung-Ok Kang¹ · Kyou-Sub Kim² · Chang-Hun Lee^{3*}

¹Dept. of Landscape architecture and Architecture convergence, National University, Mokpo, 58554, Korea

²Technical Qualification Question-Making Bureau, Human Resources Development Service of Korea, Ulsan, Korea

³Dept. of Urban Planning and Landscape Architecture, National University, Mokpo, 58554, Korea

요약 : 본 연구는 문헌조사와 공간 분석을 통해 우리나라 산림 전역에 분포하는 밀원수(蜜源樹)를 대상으로 면적과 변화 요인을 살펴보고자 하였으며, 도출된 결과는 다음과 같다. 첫째, 아까시나무는 서울특별시 산림에 주로 분포하며, 시기를 거듭할수록 면적이 증가하는 것으로 확인되었다. 증가 요인은 ‘제1차 치산녹화(治山綠化)사업’과 ‘아까시나무 존치계획’의 영향으로 확인되었다. 둘째, 밤나무는 충청남도 산림에 주로 분포하며, 시간이 지날수록 면적이 감소하는 것으로 확인되었다. 감소 요인은 ‘밤나무 생산조정’과 ‘복숭아명나방 해충의 지속적인 피해’로 확인되었다. 셋째, 백합나무는 세종특별자치시, 충청북도, 충청남도, 전북특별자치도에 주로 분포하며, 지속적인 면적 상승이 확인되었다. 해당 지역들은 공통적으로 백합나무를 장려하는 국가정책의 견인을 받은 것으로 확인되었다.

ABSTRACT : This study aimed to investigate the distribution area and factors influencing changes in Honey Plants across forests in South Korea through literature review and spatial analysis. The results derived from this study are as follows. Firstly, it was confirmed that the *Robinia pseudoacacia* L. is mainly distributed in the forests of Seoul City, and its area has been increasing over time. The increase was attributed to the impacts of the ‘First Afforestation Project’ and the ‘*Robinia pseudoacacia* L. Preservation Plan.’ Secondly, it was confirmed that the *Castanea crenata* Siebold & Zucc. is mainly distributed in the forests of Chungcheongnam-do, and its area has been decreasing over time. The decrease was attributed to the impacts of the ‘*Castanea crenata* Siebold & Zucc. Production Adjustment’ and the ‘continuous damage caused by pests.’ Thirdly, it was confirmed that the *Liriodendron tulipifera* L. is mainly distributed in Sejong City, Chungcheongbuk-do, Chungcheongnam-do, and Jeonbuk-do, with a continuous increase in area. These regions commonly benefited from national policies promoting the cultivation of *Liriodendron tulipifera* L.

Key words : Biodiversity, Climate change, Forest, Spatial analysis

Corresponding author : Chang-Hun Lee

Tel : 061-450-2366

E-mail : leech4298@nate.com

I. 서론

우리나라는 국토의 약 63%이상을 차지하는 산림을 관리하기 위하여 전국산림자원조사(National Forest Inventory, NFI) 등, 모니터링을 지속하고 있다(Tak et al., 2013; Lee et al., 2019).

산림자원 중 동·식물은 국토의 생태계 유지에 필수적인 요소이다. 그 중 ‘수분매개체(受粉媒介體)’는 생물다양성 유지를 위한 지표로 평가된다. 예를들어 지구상에 존재하는 현화식물(顯花植物) 중 절반이상은 수분매개가 필요하며(Yoon et al., 2017), 전 세계 100대 농작물 중 71종은 꿀벌(Honey Bee)에 의존한다(GREENPEACE, 2023). 반면 기후위기로 인해 꿀벌의 개체 수가 크게 감소하고 있으며(윤형주 등, 2017), 꿀벌의 먹이원인 ‘밀원수(蜜源樹)’의 면적 감소가 주요 원인으로 떠오르고 있다.

국내 밀원수에 대한 연구는 화밀특성을 분석한 연구나 양봉산업에 따른 경제적 가치 함양을 위한 생물, 화학분야의 연구가 주를 이루었으며(Kim et al., 2007; Han et al., 2008), 이후 꿀벌섭식 특성과 밀원수 특징의 상호작용에 대한 연구(Kim et al., 2020), 기후변화로 인한 아까시나무 만개일 예측모형개발(Kim et al., 2021)등, 밀원수 활용 및 관리의 중요성에 입각한 연구가 진행되었다. 초기 밀원수의 생물학적 데이터를 축적하는 연구에서 비롯하여 기후변화에 대응하기 위한 노력으로 전환된 것이다.

Jo et al.(2001)는 우리나라 양봉기술 중 밀원수 공간적 연구의 미흡함을 언급하고 GIS를 활용하여 아까시나무의 적지분석에 대한 데이터를 분석하고자 하였다. 당시 기초적인 공간 분석에 그치는 단계였으나, 일찍이 밀원수 공간적 연구의 필요성을 강조하였다는 데 의의가 있다. Kim et al.(2017)은 천안시를 대상으로 Maxent모형을 활용하여 밀원수와 밀접한 꿀벌의 서식지 보전·관리의 개선방향을 도출하고자 하였으나, 아까시나무림, 과수원에만 한정된 연구로 밀원수와 꿀벌에 대한 영향력을 살펴보기 어렵다는 한계가 있다. Sim et al.(2022)은 기존 연구 중 밀원수에 집중한 서식지 적합성 연구의 미흡한 점을 언급하였으며, 백두대간에 자생하는 밀원수종 3종을 대상으로 서식지 적합성 분석을 진행하였다. 하지만 백두대간이라는 공간적 특수성과 백두대간 마루금으로부터 제한되어 있는 데이터 범위적 한계로 인해 우리나라 밀원수 전체의 특징을 대변하기에 어렵다는 한계를 지니고 있다.

이처럼 밀원수 공간 분석에 대한 연구는 밀원수 단일

종에 국한하거나, 시·군 단위 등 국지적(局地的)인 연구에 머물러 있어, 우리나라 전역의 밀원수 분포를 파악하는 데 어려움이 따르고 있다.

본 연구는 국내 전역 밀원수의 공간 변화를 살펴보기 위한 일환으로, 산림청에서 제공하는 임상도를 활용하였으며, 이를 통해 밀원수의 면적 변화 요인을 시기별로 나누어 살펴보고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구의 범위

본 연구의 공간적 범위는 임상도 범례 중 비산림지역의 면적을 제외²⁾한 대한민국 산림면적(57,402km²)으로 설정하였다.

시간적 범위는 산림청 산림공간정보서비스(<https://map.forest.go.kr/>)에서 ‘대축적 임상도(1:5,000)’ 총 51개를 제공 받았으며, 2013년(T1), 2019년(T2), 2022년(T3)까지 3개 시기별로 나누어 아까시나무, 밤나무, 백합나무의 면적 변화를 살펴보았다.

연구대상은 국립산림과학원, 산림청, 법체제 등 공신력을 갖춘 기관에서 언급하는 밀원수종 중 교목류를 1차 분류하였으며, 교목류 중 3개 기관이 공통적으로 언급한 아까시나무, 밤나무, 백합나무, 칠엽수를 2차적으로 분류하였다. 이후 임상도³⁾ 속성정보에 포함되지 않는 칠엽수 1종을 제외하여 3차 분류과정을 거쳤다.

위 과정으로 최종 선정된 밀원수종은 아까시나무(*Robinia pseudoacacia* L.), 밤나무(*Castanea crenata* Siebold & Zucc.), 백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)이며, 선정과정은 <Figure 1>과 같다.

2. 연구의 방법

본 연구는 문헌조사와 공간분석을 병행하였다. 문헌조사는 지자체별 조림계획이나 보도자료 등 산림정책을 중심으로 밀원수 면적 변화의 요인 분석을 진행하였다. 공간 분석은 QGIS (ver. 3.26.2)를 활용하여 임상도를 통해

- 2) 임상도에서 비산림지역은 미립목지, 제지, 주거지, 초지, 경작지, 수체, 과수원까지 총 7개 항목임.
- 3) 현재 전국단위로 수종별 공간정보자료를 획득할 수 있는 경로는 1:5,000임상도가 유일하며, 1:25,000 임상도는 침엽수, 활엽수 등 세부 수종이 아닌 임상정보 위주로 제한됨. 임상도 제작은 항공사진 판독과 일부 현장조사를 통해 제작되고 있으며, 그 중 항공사진 판독은 사실상 분별력의 한계를 지니므로, 이를 감안하여 관목류와 초본류를 제외한 교목류 성상(性狀)의 밀원수를 최종 연구대상 범위로 한정함.

1) 현재 국내에서 사용되는 ‘밀원수(蜜源樹)’에 대한 사전적 개념은 정립되어 있지 않으나, ‘벌이 꿀을 빨아 오는 원천’을 뜻하는 ‘밀원(蜜源)’이라는 명사에 나무를 뜻하는 ‘수(樹)’의 의미를 더하여 ‘밀원수’란 단어로 통용되고 있음.

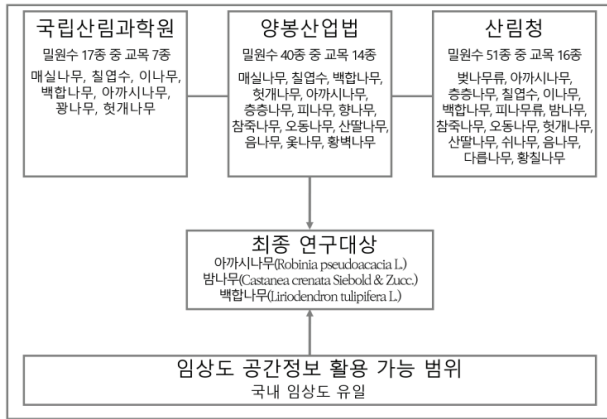


Figure 1. Selection of Study Subjects

Table 1. Research method

Methods	Details
Literature Review	<ul style="list-style-type: none"> Selection of target honey tree species Analysis of factors influencing changes in honey trees
Spatial Analysis	<ul style="list-style-type: none"> GIS analysis (QGIS 3.26.2) Utilization of Forest Map data from the KFS

밀원수의 면적 변화를 살펴보았다<Table 1>. 임상도 특성 상 산림면적 대비 밀원수 면적 비율을 계상하였으며, 변화 비율이 현저히 높은 시도를 대상으로 요인 분석을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 아까시나무 면적 변화 및 요인

T1시기 국내 아까시나무의 면적은 263,535,477㎡로, 산림면적 대비 0.44% 비율로 나타났다. 같은 시기 서울특별시 산림 면적 대비 아까시나무 비율이 10.57%로, 타 시도 면적 대비 현저히 높은 지역으로 확인되었다<Table 2>, <Figure 2a>.

이후로도 서울특별시는 10.78%(T2), 11.16%(T3)로 지속적인 아까시나무 면적 상승을 유지하였으며<Figure 2b,c>, 해당 변화 요인을 분석하고자 하였다.

서울특별시는 1973년부터 시행된 ‘제1차 치산녹화 10개년 계획’의 영향을 받아, 당시 산림 복구 및 조림 작업의 결과로 인해 아까시나무가 포함된 인공림이 서울특별시 산림의 대부분을 차지하게 되었다(Kwak, 2011). 또한 산림청은 2013년부터 2024년까지 주요업무 세부추진계획

에서 3ha(‘13)→150ha(‘24)로 밀원수 면적 확대 필요성에 대한 내용을 포함하고 있다(KFS, 2013; KFS, 2024). 그 중 ‘아까시나무 존치 계획’은 밀원 생산성을 고려하여 조림 사업 시 아까시나무를 최대한 유지·관리하려는 내용으로(KFS, 2022), 해당 정책은 서울특별시 아까시나무 면적 보존에 영향을 미친 것으로 판단된다.

2. 밤나무 면적 변화 및 요인

T1시기 국내 밤나무 면적은 863,493,142㎡로, 산림면적 대비 1.44% 비율로 나타났다. 같은 시기 충청남도는 산림면적 대비 밤나무 비율은 6.13%로, 타 시도 면적 대비 현저히 높은 것으로 확인되었다<Table 3>, <Figure 3a>

이후 T2시기에서 8.31% 감소, T3시기까지 2.77%로 감소하는 지속적인 양상이 이어졌으며<Figure 3b,c>, 이를 바탕으로 밤나무 면적 감소 요인을 분석하고자 하였다.

충청남도는 2003년부터 1ha당 394본 규모의 밤나무 주산단지(主産團地)로서 명맥을 이어왔으나(Son et al., 2004), 밤나무의 과도한 우점으로 인해 2010년 산림청의 ‘국내 밤나무 생산 조정’의 영향을 받았다. ‘국내 밤나무 생산 조정’은 충청남도의 밤나무가 식재면적 대비 밤(열매) 생산성이 낮다고 판단하여, 밤나무를 다른 작물로 대체하고자 했던 정책이다. 아울러 밤나무 해충의 일종인 복숭아명나방(*Conogethes punctiferalis*)이 충청남도 산림에 지속적인 피해를 가하고 있는 것도 원인 중 하나로 추정된다(<http://www.chungnam.go.kr/>).

3. 백합나무 면적 변화 및 요인

T1시기 국내 백합나무 면적은 70,452,506㎡로, 산림면적 대비 0.12%를 나타낸 것을 시작으로 0.47%(T2), 0.53%(T3)의 꾸준한 증가율이 확인되었다<Table 4>, <Figure 4a,b,c>.

산림청 주요업무 세부추진계획에 따르면, 백합나무는 2006년부터 경제림 육성단지 수종으로 언급되었다(KFS, 2006). 2009년부터는 ‘바이오순환림4)’의 주요 수종으로 백합나무가 언급되었으며(KFS, 2009), 2013년부터는 주요 밀원수로 각광받기 시작하였다(KFS, 2013). 이렇듯 백합나무는 우수한 이산화탄소 흡수량, 오존 흡수율, 꿀채밀량 등으로 인해 현재 국내 산림산업의 핵심수종으로 자리 잡고 있다.

본 연구결과, 백합나무 면적은 세종, 충북, 충남, 전북의 4개 시도에서 확인한 면적비율이 나타났다. 이에 백합나무 면적 변화요인은 세종, 충북, 충남, 전북지역을 대상으로 분석하였다.

4) 생장이 빠르고 벌기령(速成樹)이 짧은 수종을 조립하여 산업용재, 바이오에너지 등의 원료로 활용 목적을 둔 국가사업임.

Table 2. Temporal Changes in the Area of *Robinia pseudoacacia* L.

Region Name	'2013(T1)			'2019(T2)			'2022(T3)				
	Forest Area	Area of <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	ratio(%)	Forest Area	Area of <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	ratio(%)	Rate of Change (%)	Forest Area	Area of <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	ratio(%)	Rate of Change (%)
Seoul	150,086,106	15,861,159	10.57	154,827,899	16,687,526	10.78	5.21 ▲	151,501,220	16,907,770	11.16	1.32 ▲
Busan	340,961,600	-	-	343,960,520	170,436	0.05	-	338,330,833	94,991	0.03	-44.27 ▼
Daegu	971,212,610	13,949,799	1.44	988,132,326	16,368,237	1.66	17.34 ▲	972,515,807	18,830,414	1.94	15.04 ▲
Incheon	109,163,935	5,722,470	5.24	111,771,090	7,700,449	6.89	34.57 ▲	201,983,199	7,594,558	3.76	-1.38 ▼
Gwangju	177,355,782	233,472	0.13	174,844,193	261,698	0.15	12.09 ▲	179,625,393	241,544	0.13	-7.70 ▼
Daejeon	274,929,330	1,037,653	0.38	274,163,780	3,334,378	1.22	221.34 ▲	279,304,747	3,320,986	1.19	-0.40 ▼
Ulsan	687,773,702	394,983	0.06	670,534,341	920,351	0.14	133.01 ▲	650,799,990	2,073,981	0.32	125.35 ▲
Sejong	230,451,395	1,108,909	0.48	218,141,923	1,794,405	0.82	61.82 ▲	216,593,357	1,793,412	0.83	-0.06 ▼
Gyeonggi	4,456,821,793	60,942,277	1.37	4,269,261,816	72,943,349	1.71	19.69 ▲	4,209,984,122	71,779,903	1.70	-1.59 ▼
Chungbuk	4,785,942,821	27,901,058	0.58	4,703,704,394	44,935,073	0.96	61.05 ▲	4,705,318,935	44,240,679	0.94	-1.55 ▼
Chungnam	3,622,192,316	10,986,606	0.30	3,490,038,282	12,965,526	0.37	18.01 ▲	3,457,132,442	13,094,455	0.38	0.99 ▲
Jeollabuk	4,154,440,733	4,619,893	0.11	3,997,116,422	5,913,626	0.15	28.00 ▲	4,087,788,394	6,783,514	0.17	14.71 ▲
Jeollanam	6,285,585,462	373,923	0.01	6,340,408,931	3,158,441	0.05	744.68 ▲	6,414,848,963	3,639,041	0.06	15.22 ▲
Gyeongsangbuk	14,467,836,189	104,106,778	0.72	12,808,434,292	143,265,181	1.12	37.61 ▲	12,596,009,305	150,682,994	1.20	5.18 ▲
Gyeongsangnam	6,923,767,587	9,540,659	0.14	6,775,885,841	14,117,487	0.21	47.97 ▲	6,752,206,825	14,781,736	0.22	4.71 ▲
Jeju	650,035,572	-	-	623,731,375	-	-	-	634,697,511	-	-	-
Gangwon	11,651,856,734	6,755,838	0.06	11,494,040,736	13,425,631	0.12	98.73 ▲	11,552,991,803	14,162,517	0.12	5.49
total	59,940,413,667	263,535,477	0.44	57,438,998,161	357,961,795	0.62	35.83 ▲	57,401,632,846	370,022,496	0.64	3.37 ▲

Decrease in Growth Rate :

Table 3. Temporal Changes in the Area of *Castanea crenata* Siebold & Zucc

Region Name	'2013(T1)			'2019(T2)			'2022(T3)			Rate of Change (%)
	Forest Area	Area of <i>Castanea crenata</i> Siebold & Zucc	ratio(%)	Forest Area	Area of <i>Castanea crenata</i> Siebold & Zucc	ratio(%)	Forest Area	Area of <i>Castanea crenata</i> Siebold & Zucc	ratio(%)	
Seoul	150,086,106	120,862	0.08	154,827,899	63,497	0.04	151,501,220	63,248	0.04	-0.39 ▼
Busan	340,961,600	338,782	0.10	343,960,520	332,447	0.10	338,330,833	300,686	0.09	-9.55 ▼
Daegu	971,212,610	1,129,819	0.12	988,132,326	1,226,013	0.12	972,515,807	1,199,274	0.12	-2.18 ▼
Incheon	109,163,935	170,938	0.16	111,771,090	203,359	0.18	201,983,199	221,872	0.11	9.10 ▲
Gwangju	177,355,782	164,002	0.09	174,844,193	83,906	0.05	179,625,393	313,242	0.17	273.32 ▲
Daejeon	274,929,330	2,178,440	0.79	274,163,780	1,928,181	0.70	279,304,747	1,874,713	0.67	-2.77 ▼
Ulsan	687,773,702	2,925,062	0.43	670,534,341	2,671,862	0.40	650,799,990	2,349,270	0.36	-12.07 ▼
Sejong	230,451,395	7,093,685	3.08	218,141,923	19,033	0.01	216,593,357	9,243,417	4.27	48,465.21 ▲
Gyeonggi	4,456,821,793	46,455,555	1.04	4,269,261,816	52,125,915	1.22	4,209,984,122	50,135,801	1.19	-3.82 ▼
Chungbuk	4,785,942,821	33,325,042	0.70	4,703,704,394	35,984,650	0.77	4,705,318,935	34,118,441	0.73	-5.19 ▼
Chungnam	3,622,192,316	221,974,333	6.13	3,490,038,282	203,518,051	5.83	3,457,132,442	197,874,238	5.72	-2.77 ▼
Jeollabuk	4,154,440,733	47,364,674	1.14	3,997,116,422	48,475,545	1.21	4,087,788,394	50,380,621	1.23	3.93 ▲
Jeollanam	6,285,585,462	154,957,620	2.47	6,340,408,931	137,685,114	2.17	6,414,848,963	133,517,319	2.08	-3.03 ▼
Gyeongsangbuk	14,467,836,189	12,257,079	0.08	12,808,434,292	12,354,227	0.10	12,596,009,305	12,173,535	0.10	-1.46 ▼
Gyeongsangnam	6,923,767,587	320,205,429	4.62	6,775,885,841	267,668,774	3.95	6,752,206,825	256,325,378	3.80	-4.24 ▼
Jeju	650,035,572	-	-	623,731,375	-	-	634,697,511	25,852	0.00	-
Gangwon	11,651,856,734	12,831,820	0.11	11,494,040,736	14,896,669	0.13	11,552,991,803	15,008,973	0.13	0.75 ▲
total	59,940,413,667	863,493,142	1.44	57,438,998,161	779,237,242	1.36	57,401,632,846	765,125,880	1.33	-1.81 ▼

Decrease in Growth Rate :

Table 4. Temporal Changes in the Area of *Liriodendron tulipifera* L.

Region Name	'2013(T1)			'2019(T2)			'2022(T3)			
	Forest Area	Area of <i>Liriodendron tulipifera</i> L.	ratio(%)	Forest Area	Area of <i>Liriodendron tulipifera</i> L.	ratio(%)	Forest Area	Area of <i>Liriodendron tulipifera</i> L.	ratio(%)	Rate of Change (%)
Seoul	150,086,106	4,858	0.003	154,827,899	2,813	0.002	151,501,220	2,813	0.002	-
Busan	340,961,600	-	-	343,960,520	-	-	338,330,833	-	-	-
Daegu	971,212,610	130,550	0.01	988,132,326	204,540	0.02	972,515,807	139,192	0.01	-31.95 ▼
Incheon	109,163,935	-	-	111,771,090	70,413	0.06	201,983,199	68,414	0.03	-2.84 ▼
Gwangju	177,355,782	42,757	0.02	174,844,193	331,643	0.19	179,625,393	414,897	0.23	25.10 ▲
Daejeon	274,929,330	1,504	0.001	274,163,780	90,050	0.03	279,304,747	162,306	0.06	80.24 ▲
Ulsan	687,773,702	-	-	670,534,341	50,043	0.01	650,799,990	137,160	0.02	174.08 ▲
Sejong	230,451,395	1,947,773	0.85	218,141,923	2,537,296	1.16	216,593,357	2,387,862	1.10	-5.89 ▼
Gyeonggi	4,456,821,793	9,657,529	0.22	4,269,261,816	26,340,821	0.62	4,209,984,122	30,300,319	0.72	15.03 ▲
Chungbuk	4,785,942,821	13,711,505	0.29	4,703,704,394	63,656,443	1.35	4,705,318,935	71,453,646	1.52	12.25 ▲
Chungnam	3,622,192,316	19,241,619	0.53	3,490,038,282	50,781,733	1.46	3,457,132,442	56,964,007	1.65	12.17 ▲
Jeollabuk	4,154,440,733	6,615,517	0.16	3,997,116,422	58,121,917	1.45	4,087,788,394	73,382,970	1.80	26.26 ▲
Jeollanam	6,285,585,462	4,690,117	0.07	6,340,408,931	32,391,700	0.51	6,414,848,963	36,689,552	0.57	13.27 ▲
Gyeongsangbuk	14,467,836,189	6,748,480	0.05	12,808,434,292	14,990,469	0.12	12,596,009,305	12,961,775	0.10	-13.53 ▼
Gyeongsangnam	6,923,767,587	3,330,746	0.05	6,775,885,841	11,198,976	0.17	6,752,206,825	12,351,520	0.18	10.29 ▲
Jeju	650,035,572	-	-	623,731,375	-	-	634,697,511	-	-	-
Gangwon	11,651,856,734	4,329,551	0.04	11,494,040,736	9,391,636	0.08	11,552,991,803	9,654,730	0.08	2.80 ▲
total	59,940,413,667	70,452,506	0.12	57,438,998,161	270,160,493	0.47	57,401,632,846	307,071,163	0.53	13.66 ▲

Decrease in Growth Rate :

임상도를 활용한 주요 밀원수의 시계열 공간 변화 연구

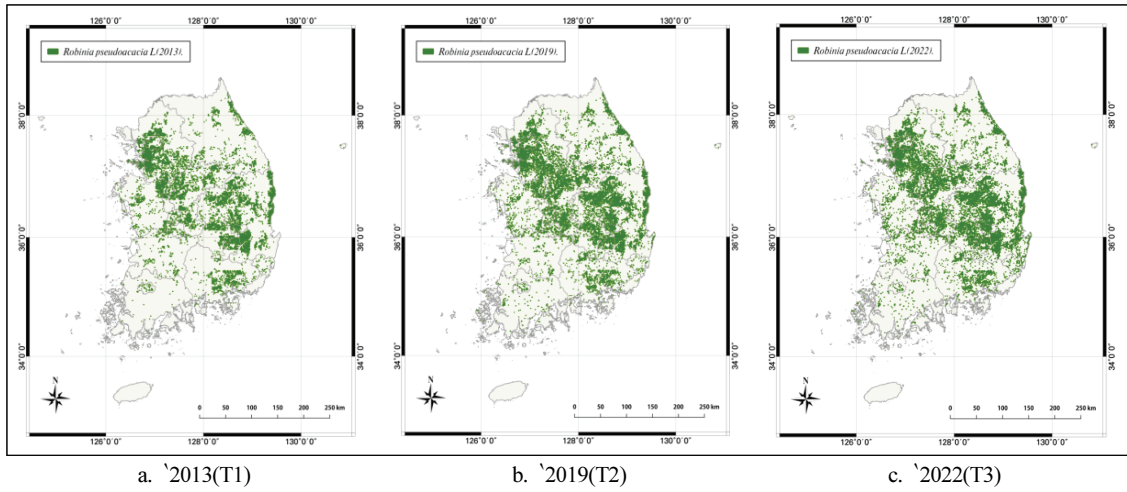


Figure 2. Temporal Changes Map of *Robinia pseudoacacia* L.

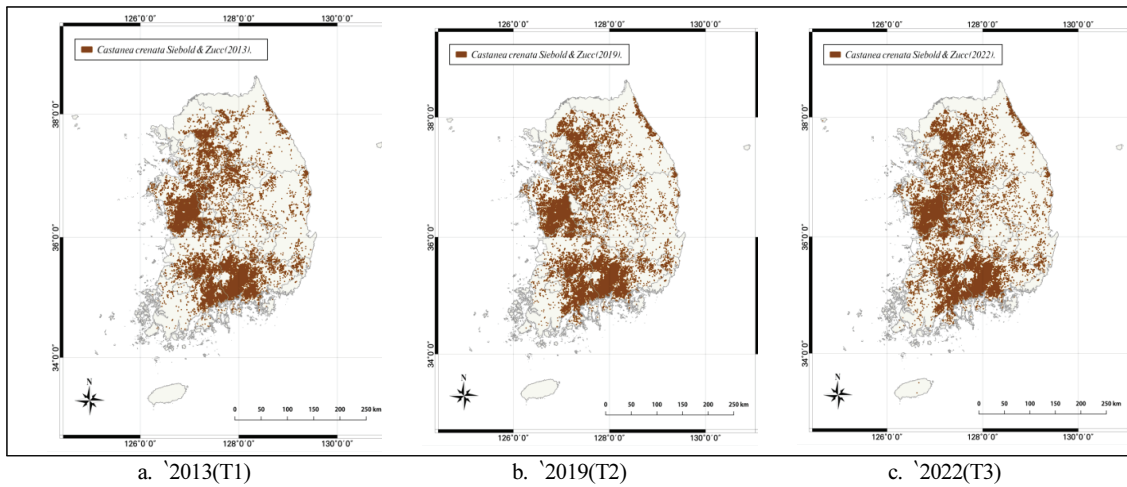


Figure 3. Temporal Changes Map of *Castanea crenata* Siebold & Zucc

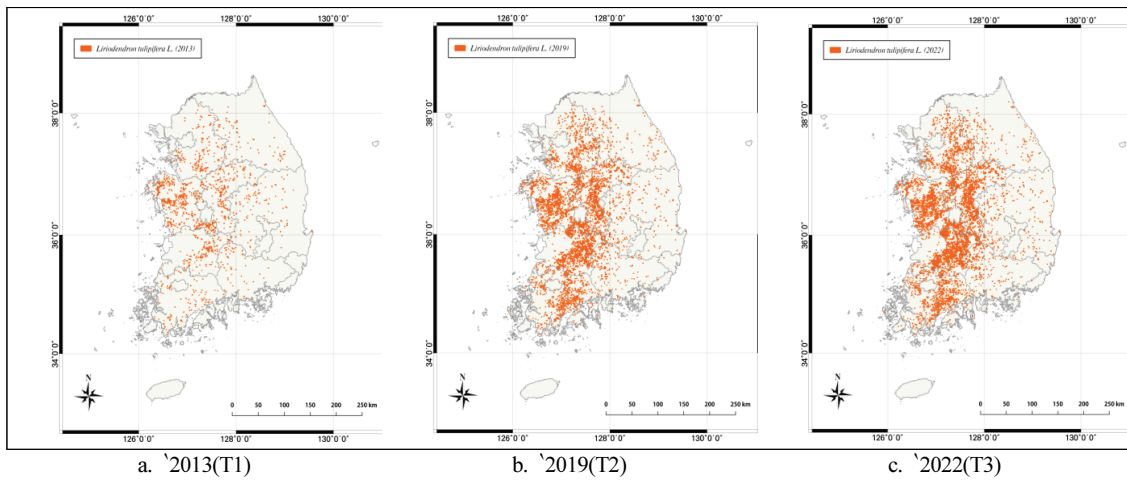


Figure 4. Temporal Changes Map of *Liriodendron tulipifera* L.

세종특별자치시는 2012년에 출범하였으며 산림청에서 백합나무 조림에 대해 본격적으로 언급한 시기와 맞물린다. 이러한 국가정책의 견인을 받은 세종특별자치시는 2016년 국토부 주관하에 백합나무 1000여 그루를 심는 행사 ‘국민이 행복한 나무심기’를 진행한 바 있다(Yoon, 2016). 아울러 세종특별자치시 산림조합 관계자 인터뷰에 따르면, 백합나무의 효율적인 단가, 빠른 생육속도 등은 당시 세종시 산림조성에 적합했던 수종으로 평가하였다.

충청북도는 2016년 ‘5대 테마조림’을 통해 밀원수 면적 50ha를 조성하는 등 밀원수 확장을 위한 조기적인 움직임이 살피볼 수 있으며, 2020년에는 조림사업 추진계획 확대를 위해 백합나무 536만 본을 포함한 2,281ha의 조림사업을 추진한 바 있다(<https://www.chungbuk.go.kr/>).

충청남도는 2018년부터 2022년까지 5개년에 걸친 단계적 밀원 숲 조성을 진행한 바 있으며, 157억 예산으로 2,579ha의 밀원단지를 조성하였다(<http://www.chungnam.go.kr/>). 해당 사업에서 특히 백합나무의 속성수(速成樹) 특징의 장점을 언급하며 백합나무의 경제적 중요성을 강조하였다. 해당 요인은 충청남도의 백합나무 면적 증가의 지속적인 영향으로 판단된다.

전북특별자치도는 산림환경연구소를 통해 1970년부터 2006년까지 11.5ha에 백합나무 17,950본을 시험림으로 식재하여 백합나무의 뛰어난 경제성을 규명하는 데 힘써왔다. 더불어 2012년 ‘백합나무 클론연구사업’을 추진하며 백합나무 조직배양시설 및 순화실, 재배생산시설 등을 추진한 바 있다. 2019년 4월 5일에는 ‘제74회 식목일 기념 나무심기 행사’를 통해 백합나무를 포함한 밀원수 2,570본을 조성하는 노력들이 이어지며 최근까지도 2023년 9월부터 10월까지 지속가능한 산림자원 기반 구축을 위해 백합나무를 포함하여 66만 본의 조림을 조성하는 등 전북특별자치도는 백합나무 조림을 위한 다양한 사업과 연구를 이어나가는 추세를 보였다(<https://www.jeonbuk.go.kr/>).

IV. 결 론

본 연구는 우리나라 산림 전역에 분포하는 밀원수(蜜源樹)를 대상으로 면적과 변화 요인을 살펴보고자 하였으며, 도출된 결과는 다음과 같다.

첫째, 아까시나무는 서울특별시 산림에 주로 분포하며, 시기를 거듭할수록 면적이 증가하는 것으로 확인되었다. 증가요인은 ‘제1차 치산녹화(治山綠化)사업’과 ‘아까시나무 존치 계획’의 영향으로 확인되었다.

둘째, 밤나무는 충청남도 산림에 주로 분포하며, 시간이 지날수록 면적이 감소하는 것으로 확인되었다. 감소요

인은 ‘밤나무 생산 조정’과 ‘복숭아명나방 해충의 지속적인 피해’로 확인되었다.

셋째, 백합나무는 세종특별자치시, 충청북도, 충청남도, 전북특별자치도에 주로 분포하며, 지속적인 면적 상승이 확인되었다. 해당 지역들은 공통적으로 백합나무를 장려하는 국가 정책의 견인을 받은 것으로 확인되었다.

본 연구는 기구축된 ‘임상도’ 공간데이터의 의존성이 높다는 한계를 지니고 있다. 이에 밀원수 관련 현존식생도 제작을 위한 기술적 연구와 더불어 자연현상에 의한 추가 요인분석 등은 추후 과제로 남기고자 한다.

감사의 글

본 연구는 제1저자의 석사학위논문 수정보완한 것임 (UCI: I804:46002-000000024144).

References

- Chungcheongbuk-do Provincial Government. 2023. Chungcheongbuk-do official website. <https://www.chungbuk.go.kr/>. (2024. 02. 01).
- Chungcheongnam-do Provincial Government. 2023. Chungcheongnam-do official website. <http://www.chungnam.go.kr/>. (2024. 02. 01).
- GREENPEACE. 2023. Proposal for bee crisis and protection policie, Korea. p.5
- Han, J. and Kim, S.H. 2008. Flowering and nectar secretion characteristics of honey plant, *Hovenia dulcis* var. *koreana* Nakai. *Journal of Apiculture* 23(3): 199-205.
- Jeollabuk-do Provincial Government. 2023. Jeollabuk-do official website. <https://www.jeonbuk.go.kr/>. (2024. 02. 01).
- Jo, M.H., Kim, J.B., Jo, Y.W., and Baek, S.R. 2001. Application method of satellite image and GIS for suitability of black locust forest as honey plant area. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 4(2): 27-37.
- Kim, D.W., Jung, C., Jeon, J.B., and Jeong, J.H. 2007. Potential use of wild herbaceous plants as honey plants. *Journal of Apiculture* 22(1): 9-32.
- Kim, S., Kim, T.K., Yoon, S., Jang, K., Lim, H., Lee, W.Y., and Kim, H.S. 2021. Recent changes in bloom dates of *Robinia pseudoacacia* and bloom date

- predictions using a process-based model in South Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 110(3): 322-340.
- Kim, W.M., Song, W.K., Kim, S.Y., Hyung, E.J., and Lee, S.H. 2017. Habitat analysis of honeybees (*Apis mellifera*) in urban areas using species distribution modeling: focused on Cheonan. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 20(3): 55-64.
- Kim, Y.K., Song, J.H., Park, M.S., and Kim, M.S. 2020. Analysis of nectar characteristics of *Idesia polycarpa*. *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(4): 512-520.
- Korea Forest Service (KFS). 2006. Detailed implementation plan for major tasks in 2006. Korea Forest Service, Daejeon, South Korea.
- Korea Forest Service (KFS). 2009. Detailed implementation plan for major tasks in 2009. Korea Forest Service, Daejeon, South Korea.
- Korea Forest Service (KFS). 2013. Detailed implementation plan for major tasks in 2013. Korea Forest Service, Daejeon, South Korea.
- Korea Forest Service (KFS). 2022. Detailed implementation plan for major tasks in 2022. Korea Forest Service, Daejeon, South Korea.
- Korea Forest Service (KFS). 2024. Detailed implementation plan for major tasks in 2024. Korea Forest Service, Daejeon, South Korea.
- Kwak, J.I. 2011. A study on vegetation structure characteristics and ecological succession trends of Seoul urban forest, Korea. (Dissertation). Seoul. University of Seoul.
- Lee, D.G., Kim, K.D., Yang, S.R. and Lee, H.J. 2019. Forest spatial information generation and forest change analysis using time series aerial photographic image database. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science* 27(2): 31-41.
- Sim, H.S., Lee, M.K., and Lee, C.B. 2022. Evaluation of habitat suitability of honey tree species *Kalopanax septemlobus* Koidz., *Tilia amurensis* Rupr., and *Styrax obassia* Siebold & Zucc. in the Baekdudaegan Mountains using MaxEnt model. *Journal of Korean Forest Science* 111(1): 50-60.
- Son, C.H., Jang, W.H., and Jang, C.S. 2004. Cultivation status and policy directions of chestnut trees. *Journal of Rural Development* 27(2): 73-86.
- Tak, H.M., Kim, S.H. and Son, I. 2013. A study on distributions and spatial properties of geomorphological mountain area. *Journal of the Korean Geographical Society* 48(1): 1-18.
- Yoon, H.J., Lee, K.Y., Lee, H.S., Lee, M.Y., Choi, Y.S., Lee, M.L., and Kim, G.H. 2017. Survey of insect pollinators use for horticultural crops in Korea, 2016. *Journal of Apiculture* 32(3): 223-235.
- Yoon, K.J. 2016. MOLIT, Infrastructure and Transport Plants 1,000 Tulip Trees. [https://www.molit.go.kr/english/intro.do\(2016.04.05.\)](https://www.molit.go.kr/english/intro.do(2016.04.05.)).

-
- Received 8 November 2024
 - Finally Revised 23 December 2024
 - Accepted 23 December 2024

임분표예측기법을 활용한 굴참나무 직경분포 변화에 관한 연구

정상현¹ · 이대성² · 최정기^{1*}

¹강원대학교 산림경영학과 · ²핀란드 자연자원연구원

A Study on Changes of Diameter Distribution of *Quercus variabilis* through Stand Table Projection

Sanghyun Jung¹ · Daesung Lee² · Jungkee Choi^{1*}

¹Department of Forest Management, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

²Natural Resources Institute Finland (Luke), Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki, Finland

요약 : 본 연구는 굴참나무의 반복 조사 자료를 바탕으로 임분표예측기법(Stand Table Projection)을 활용하여 3년 후의 직경분포 변화를 예측하고 임분재적을 추정하였다. 연구대상지에는 간벌구와 무간벌구가 포함되었으며, 3년 간의 간벌여부에 따른 성장지수율(Growth Index Ratio for 3 years; GIR₃) 차이를 분석하였다. 분석 결과, 간벌구의 평균 GIR₃은 0.49로 무간벌구의 0.41보다 높게 나타나, 간벌을 통해 직경생장이 촉진됨을 확인할 수 있었다. 또한, 예측된 직경분포를 활용하여 임분재적을 산출한 결과, 3년 후 예측 임분재적은 평균 246 m³/ha로 실측된 245 m³/ha와 유사한 수준을 보였다. 본 연구에서 도출된 결과는 굴참나무의 직경분포 변화 예측과 합리적인 시업 계획 수립에 유용한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

ABSTRACT : This study was performed using stand table projection to predict changes in diameter distribution and estimate stand volume in *Quercus variabilis* based on repeated inventory data. The study area included both thinned and unthinned plots, and differences in growth index ratio for 3 years (GIR₃) according to thinning treatment were analyzed. The results showed that the average GIR₃ in thinned plots was 0.49, higher than 0.41 in unthinned plots, indicating that thinning promoted diameter growth. In addition, the stand volume was calculated using the predicted diameter distribution, and the predicted stand volume after 3 years was 246 m³/ha on average, which was similar to the observed 246 m³/ha. The results are expected to serve as valuable basic data for predicting diameter distribution changes and establishing rational silvicultural plans in *Quercus variabilis*.

Key words : Stand table projection, Diameter distribution, Growth index ratio, *Quercus variabilis*, Thinning.

1. 서론

굴참나무(*Quercus variabilis*; Qv)는 우리나라 대표 낙엽 활엽수종 중 하나로 표고버섯의 골목, 약기재, 코르크, 숯 등 다양한 용도로 활용되는 수종이다(Korea Forest Research Institute, 2012). 특히 재질이 단단하고 무늬가 아름다워 가구재로서 활용도가 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 목재로서의 활용성 및 수익성이 높은 침엽수종에 비해 성장특성에 관한 연구가 부족한 실정이다. 이에 따라 목

재로서 활용을 위해 굴참나무의 성장변화를 파악하고 목재수량 예측에 관한 연구가 필요한 실정이다.

직경분포는 산림경영에 있어 가장 기초적인 정보로서 개체목의 직경생장과 함께 임분 단위의 성장특성이 고려되어야 합리적인 시업체계 수립이 가능하다. 특히 간벌강도 및 시기 또는 임분수량 등 산림경영의 의사결정과정에 필수적인 요소를 예측하는 데 있어 직경분포에 관한 자료는 필수적이다. 임업선진국에서는 임분의 직경생장을 예측하고자 임분생장모델 및 Weibull 분포를 활용한 직경분포모델 개발 연구를 시행해왔다(Maltamo, 1995; Cao, 2004; Poudel and Cao, 2012; Siipilehto and Mehtatalo, 2013; Lee et al., 2021). 위와 같은 모델은 임령, 입목본수

Corresponding author : Jungkee Choi
E-mail : jungkee@kangwon.ac.kr

등 임분에 관련된 인자를 이용하여 직경분포를 예측하고 수확량을 산정하는데 활용도가 높다(Lee and Lee, 2018). 그러나 위와 같은 모델은 방대한 자료에 근거하여 개발되나, 우리나라의 경우 특정 수종 및 지역에 대한 자료가 미흡한 실정이다.

임분표예측기법(Stand Table Projection)의 경우 통계적 모델 방식과 달리 임분의 성장을 예측하는 데 자료의 규모에 제약이 적어 우리나라와 같이 장기 모니터링 자료가 미흡한 상황에 유용하다고 볼 수 있다(An, 2001). 또한 임령, 밀도 등 특정 시점 및 조건의 직경분포를 예측하는 직경분포모델과 달리 임분표예측기법은 경급별 본수의 이동을 의미하는 상위성장량(upgrowth)을 예측하여 분포의 이동을 추정할 수 있다는 장점이 있다(Son et al., 2000; Kwon et al., 2004). 임분표예측기법은 정밀한 직경분포모델을 개발하기 위해 방대한 모니터링 자료가 구축되기 전 직경분포변화를 예측하기 위한 대체방안으로 의의가 있다고 판단된다. 본 연구는 굴참나무를 대상으로 임분표예측기법을 활용하여 직경분포 변화를 예측하고, 임분재적을 추정하고자 한다. 본 연구를 통해 굴참나무의 합리적인 산림경영계획 수립 및 시업에 필요한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

시험구는 무간벌구, 2개 시험구는 간벌구로 구성되어 있다. 간벌구는 2014년에 표준지 설치 및 1차 조사가 실시된 이후 흉고단면적 기준 12.9%~35.0%의 다양한 강도로 간벌이 실시되었다.

표준지의 측정인자로는 수종, 흉고직경, 고사여부가 있으며, 2014년부터 3년 간격으로 4회 반복조사되었다. 흉고직경은 직경테이프(D-tape)를 활용하여 경사 위쪽에서 지상 1.2 m 부분의 직경을 측정하였다. 표준지 내 모든 입목을 측정하였으나, 본 연구에서는 굴참나무의 직경분포 예측을 위해 타수종 및 진계목은 연구대상에서 제외하였다.

최종 4차 조사 기준 표준지의 평균 임령은 62년이며, 최소 53년, 최대 73년이다. 무간벌구와 간벌구의 평균 흉고직경은 각각 22.5 cm, 26.7 cm였으며, 평균 입목본수는 921 본/ha, 630 본/ha이다(Table 1). 연구대상지에서 굴참나무가 차지하는 비율은 흉고단면적 기준 무간벌구, 간벌구 각각 평균 79.0%, 90.1%였다. 굴참나무를 제외하고 가장 비율이 높았던 수종은 신갈나무로 무간벌구, 간벌구 각각 평균 20.8%, 14.6%였다. 연구자료 84개(연구대상지 7개소, 시험구 3개소, 4차 반복조사) 중 굴참나무가 차지하는 비율이 50% 미만인 자료는 2개로 가장 높은 비율을 차지한 수종은 신갈나무였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구재료

연구대상지는 북부지방산림청 관할 국유림 내 위치한 굴참나무림이며, 2014년 표준지가 설치되었다. 행정구역 상으로 강원도에 위치하고 있으며, 양구군 2개소, 인제군 1개소, 춘천시 1개소, 홍천군 2개소, 화천군 1개소로 총 7개소이다. 표준지 1개소 당 3개의 시험구가 있으며, 1개

2. 임분표예측기법

임분표예측기법(Stand Table Projection)은 미래 임분의 성장량 추정 뿐만 아니라 성장에 따른 직경급별 본수의 이동과 변화를 예측하기 위한 방법이다(An, 2001). 선행 연구에 따르면 단기 성장기간 동안의 임분성장 변화에 대해 높은 예측력을 보이는 것으로 알려져 있다(Avery and Burkhart, 2019). 직경급별 본수의 이동은 성장지수율(Growth Index Ratio; GIR)을 산출하여 다음 경급으로 본수의 이동인 상위성장량(upgrowth)을 예측한다(Kwon et al., 2004). 본 연구에서는 3년간의 직경성장량과 경급의

Table 1. Summary statistics of the experimental plots in this study

Thinning	Statistics	Age (year)	Average DBH (cm)		Average height (m)		Stand basal area (m ² /ha)		No. of stems (trees/ha)		Proportion of Qv basal area ¹⁾ (%)
			Qv	All	Qv	All	Qv	All	Qv	All	
Unthinned	Mean	62	22.5	22.1	15.4	14.9	39.3	39.7	921	968	79.0
	SD	7	5.9	6.6	3.3	3.6	6.9	6.8	271	301	14.2
	Min	53	10.4	6.6	4.3	2.7	27.1	27.1	491	491	52.5
	Max	73	40.3	40.3	21.6	21.6	47.1	47.1	1267	1329	96.7
Thinned	Mean	62	26.7	25.6	17.6	16.7	36.1	36.5	630	654	90.1
	SD	7	6.7	7.5	3.3	4.1	8.8	9.0	189	212	13.4
	Min	53	10.9	6.0	1.8	1.8	19.1	19.1	333	333	47.0
	Max	73	47.2	47.2	26.2	26.2	51.7	51.7	898	1001	100.0

괄약을 통해 3년에 대한 성장지수율(GIR₃)을 산출하여 3년 뒤의 직경분포 변화를 예측하고자 한다. 본 연구에서는 경급의 괄약을 2 cm로 정하였으며, 성장지수율의 산출식은 식 1과 같다.

$$GIR_3 = \frac{g}{i} \quad (1)$$

g = Diameter increment for 3 years (cm);
i = Diameter class interval in centimeters

산출된 성장지수율을 활용하여 3년 후의 입목본수 변화를 예측하였다. 예를 들어 특정 임분에서 경급 20 cm 입목본수가 100 본/ha, 3년 간의 직경성장량이 0.8 cm라고 가정하였을 때, 직경성장량을 경급의 괄약인 2 cm로 나누어, GIR₃는 0.4로 산출된다. 이 임분은 3년 뒤 경급 20 cm에 해당하는 100 본/ha 중 40%인 40 본/ha은 한 단계 상위성장하여 경급 22 cm로 이동하며, 이를 제외한 60 본/ha은 경급 20 cm에 유지되는 것으로 예측한다. 가령 GIR₃가 1.2일 경우 20%인 20 본/ha은 2단계 상위성장하여 경급 24 cm로 이동하며 나머지 80%는 1단계 상위성장하여 경급 22 cm로 이동하는 것으로 예측한다(Son et al., 2000; Avery and Burkhart, 2019).

예측된 직경분포를 통해 임분재적을 산출하고자 개체목 수고곡선을 개발하고, Choi et al.(2007)의 재적 추정식을 활용하였다. 개체목 수고곡선은 Chapman-Richards 함수(식 2)를 활용하여 개발하였으며, 모델의 적합성을 검증하기 위하여 결정계수(R²), 평균 제곱근 오차(RMSE), 평균 절대 오차(MAE), 평균 절대 비율 오차(MAPE)를 산출하였다(Richards, 1959; Chapman, 1961). 개발된 수고곡

선을 통해 추정된 개체목 수고를 재적추정식(식 3)에 대입하여 경급별 재적을 산출한 후 현재 시점의 입목본수, 3년 후 추정된 입목본수, 3년 후 측정된 입목본수에 각각 곱하여 임분재적을 산출하였다.

$$H = 1.2 + a(1 - e^{-bD})^c \quad (2)$$

$$Volume (m^3) = 0.0182 + 0.0000335 \times D^2 \times H \quad (3)$$

H = Tree height(m);
D = Diameter at breast height(cm);
a, b, c = Parameters for the formula;
e = The base of the natural logarithm.

III. 결과 및 고찰

1. 성장지수율(GIR) 산출

직경분포 변화의 예측을 위해 산출된 GIR₃는 경급이 증가함에 따라 꾸준히 증가하는 경향을 보였다(Figure 1). 본 연구에서 활용된 연구자료는 평균 임령이 62년생인 임분으로, 평균 흉고직경이 22.5-26.7 cm인 임분에서 소경목은 피압목일 것으로 판단된다. 경급이 작은 입목일수록 임분 내 경쟁에서 밀려 성장량이 낮아져, 결과적으로 GIR₃이 낮게 나타난 것으로 보인다. 평균 GIR₃는 0.45로 나타나 대략적으로 굴참나무 임분에서 입목의 절반은 3년 동안 1단계의 상위성장, 즉 2 cm 이상 성장한다고 볼 수 있다. 또한 모든 경급에서 GIR₃는 1 미만으로, 3년 동

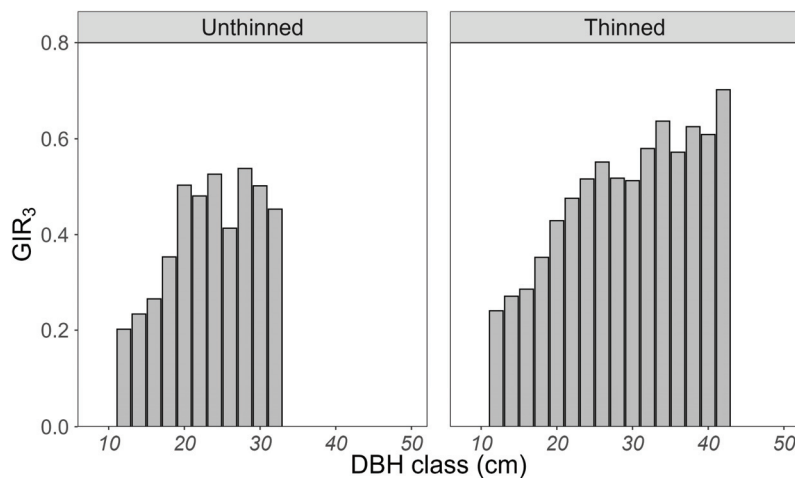


Figure 1. Growth index ratio for 3 years (GIR₃) by DBH class in unthinned and thinned plots

안 2단계 이상의 상위생장은 예측되지 않았다.

밀도 변화에 의해 영향을 받는 흉고직경의 특징을 고려하여 간벌여부에 따라 산출된 GIR₃의 경향을 분석하였다(Lee et al., 2022). GIR₃를 산출하는 과정에서 성장량이 산출되는 대상 개체목 본수가 부족하여 해당 등급의 성장량을 대표하지 못할 가능성을 고려하여, 등급별 본수가 10 본 미만인 등급은 인접한 등급과 함께 GIR₃를 산출하였다. 무간벌구에서 10 cm 이하, 32 cm 이상, 간벌구에서 10 cm 이하, 44 cm 이상 등급에서 등급별 본수가 10 본 미만으로 나타나 인접한 등급과 함께 GIR₃를 산출하였다. 무간벌구의 평균 GIR₃는 0.41로 나타났으며, 간벌구의 경우 0.49로 나타나 간벌구의 상위생장이 비교적 우세하였다. 간벌구의 모든 등급에서 전체적으로 무간벌구에 비해 GIR₃가 높아 간벌구의 직경분포 변화가 빠르게 나타났다. 이러한 결과는 간벌로 인해 개체목들의 생육공간 경쟁 감소로 인해 직경생장이 비교적 높았던 것으로 판단된다(Lee et al., 2010).

2. 직경분포 변화 예측

굴참나무의 직경성장량 자료를 통해 산출된 등급별 GIR₃를 활용하여 임분별 상위생장을 추정하였다. 연구대상지 중 평균 흉고직경이 대상지의 평균에 가까운 무간벌구와 간벌구의 상위생장 추정 결과를 각각 Table 2, 3로 제시하였다. 무간벌구는 임령 56년, 평균 흉고직경 23.9 cm, 입목본수 679 본/ha이었으며, 간벌구의 경우 임령 56년, 평균 흉고직경 25.6 cm, 입목본수 679 본/ha인 표준지로, 측정된 시점인 2014년에 흉고단면적 기준 39.2%의 간벌이 실시되었다. 등급 20 cm는 전체 본수인 68 본/ha 중 45%인 31 본/ha이 1단계 이동하여 등급 22 cm로 이동할 것으로 보인다. 나머지 55%인 37 본/ha은 등급 20 cm를 유지하는 것으로 예측되었다. 등급 38 cm의 경우 현재 본수가 0 본/ha으로 다음 등급으로 이동하거나, 현재 등급으로 유지되는 입목본수가 없었다.

Table 2. An example of *Quercus variabilis* unthinned stand applying stand table projection method with growth index ratio (GIR) of 3 years

DBH class	Present No. of stems (trees/ha)	GIR ₃	Upgrowth		Predicted No. of stems (trees/ha)	Observed No. of stems (trees/ha)
			No change	1 class		
12	90	0.20	72	18	72	60
14	0	0.23	0	0	18	30
16	120	0.26	88	32	88	60
18	90	0.35	58	32	90	120
20	150	0.50	74	76	106	120
22	150	0.48	78	72	154	150
24	90	0.53	43	47	115	90
26	30	0.41	18	12	65	90
28	30	0.54	14	16	26	0
30	30	0.50	15	15	31	60
32	60	0.45	33	27	48	60
34	0	0.45	0	0	27	0
Total	840		493	347	840	840

Table 3. An example of *Quercus variabilis* thinned stand applying stand table projection method with growth index ratio (GIR) of 3 years

DBH class	Present No. of stems (trees/ha)	GIR ₃	Upgrowth		Predicted No. of stems (trees/ha)	Observed No. of stems (trees/ha)
			No change	1 class		
16	13	0.29	9	4	9	13
18	54	0.35	35	19	39	27
20	68	0.43	39	29	56	68

DBH class	Present No. of stems (trees/ha)	GIR ₃	Upgrowth		Predicted No. of stems (trees/ha)	Observed No. of stems (trees/ha)
			No change	1 class		
22	137	0.48	72	65	103	123
24	123	0.52	59	64	124	96
26	68	0.55	30	38	97	96
28	27	0.52	13	14	48	54
30	54	0.51	26	28	40	41
32	41	0.58	17	24	46	27
34	41	0.64	15	26	39	68
36	13	0.57	6	7	31	27
38	0	0.63	0	0	7	0
40	27	0.61	11	16	11	13
42	13	0.70	4	9	20	13
44	0	0.70	0	0	9	13
Total	679		336	343	679	679

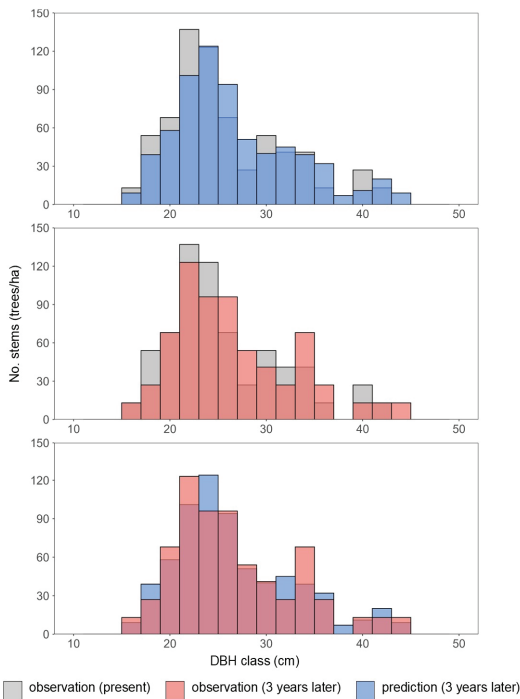


Figure 2. An example of present, predicted, and observed diameter distributions after 3 years in *Quercus variabilis* stand from thinned plot

현재와 3년 후 예측, 실제 경급의 입목분수가 어떻게 분포하는지 간별구의 사례를 도식화하였다(Figure 2). 임분표예측기법을 통해 예측된 직경분포는 현재 시점의 직경분포와 유사한 형태를 유지하면서 우측으로 이동하는 경향을 보였다. 3년 후 실제 직경분포 또한 현재 시점의 직경분포와 유사한 형태로 나타났다. 3년의 기간이 비교적 짧아 분포의 형태가 크게 변하지 않은 것으로 판단된다.

3년 후의 예측분포와 실제 3년 후 직경분포를 비교했을 때, 일부 입목분수에 차이가 있는 경급이 존재하지만, 중심위치 및 범위 등 분포의 형태가 유사한 것으로 판단된다. 본 연구에서 산출된 GIR₃은 우리나라 굴참나무의 직경분포 변화 예측에 활용될 수 있도록 Appendix 1로 제시하였다.

3. 개체목 수고 및 임분 재적 추정

경급에 따른 수고의 성장을 추정하기 위해 Chapman-Richards 함수를 활용하여 수고곡선을 개발하였다(Figure 3). 수고곡선의 모든 계수는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다($p < 0.001$). 결정계수(R^2)는 0.48, RMSE는 2.360, MAE는 1.850, MAPE는 0.124로 나타났다. Kim et al. (2023)에서 개발된 굴참나무의 최적 상대성장식과 비교했을 때 검정통계량이 유사한 수준으로 재적 추정을 위해 해당 수고곡선의 활용이 가능하다고 판단하였다.

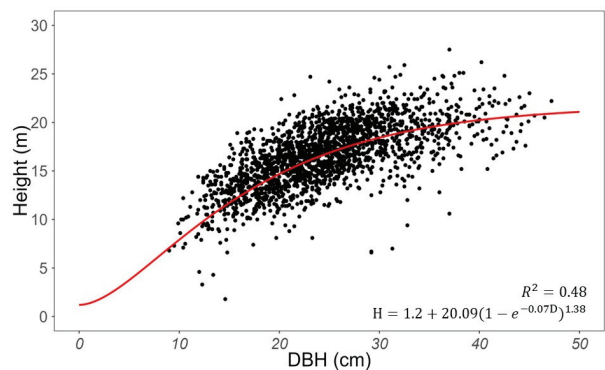


Figure 3. Allometric curve on scatter plot of height-DBH for *Quercus variabilis*

Table 4. An example of the predicted stand volume by DBH class according to stand table projection method in *Quercus variabilis* thinned stand

DBH class	Tree height (m)	Stem volume (m ³)	Stand volume (m ³ /ha)	Predicted stand volume after 3 years (m ³ /ha)	Observed stand volume after 3 years (m ³ /ha)
16	13.2	0.1317	1.7	1.2	1.7
18	14.3	0.1735	4.7	6.8	4.7
20	15.3	0.2227	15.1	12.9	15.1
22	16.1	0.2793	34.4	28.2	34.4
24	16.9	0.3434	33.0	42.6	33.0
26	17.5	0.4147	39.8	39.0	39.8
28	18.1	0.4932	26.6	25.2	26.6
30	18.6	0.5787	23.7	23.1	23.7
32	19.0	0.6712	18.1	30.2	18.1
34	19.4	0.7705	52.4	30.0	52.4
36	19.8	0.8764	23.7	28.0	23.7
38	20.1	0.9888	0.0	6.9	0.0
40	20.3	1.1076	14.4	12.2	14.4
42	20.6	1.2327	16.0	24.7	16.0
44	20.8	1.3640	17.7	12.3	17.7
Total			321.4	323.3	321.4

임분표예측기법을 활용하여 예측된 직경분포를 통해 현재와 3년 후 예측, 실제 임분재적을 추정하였다(Table 4). 본 연구에서 개발된 수고곡선에 경급을 대입하여 수고를 추정하였으며, 추정된 수고를 재적추정식에 적용하여 개체목 재적을 산출하였다. 산출된 개체목 재적과 Table 3에서 추정된 임목본수를 활용하여 임분재적을 추정하였

다. 예시로 활용된 표준지의 경우 예측된 임분재적은 실제 3년 후 임분재적보다 1.9 m³/ha 컸다.

현재와 3년 후 예측, 실측된 직경분포를 통해 추정된 임분재적의 분포를 도시한 결과, Table 4의 사례와 같이 추정된 임분재적이 비교적 크게 나타났다(Figure 3). 현재 기준, 무간벌구와 간벌구 각각 현재의 평균 임분재적이

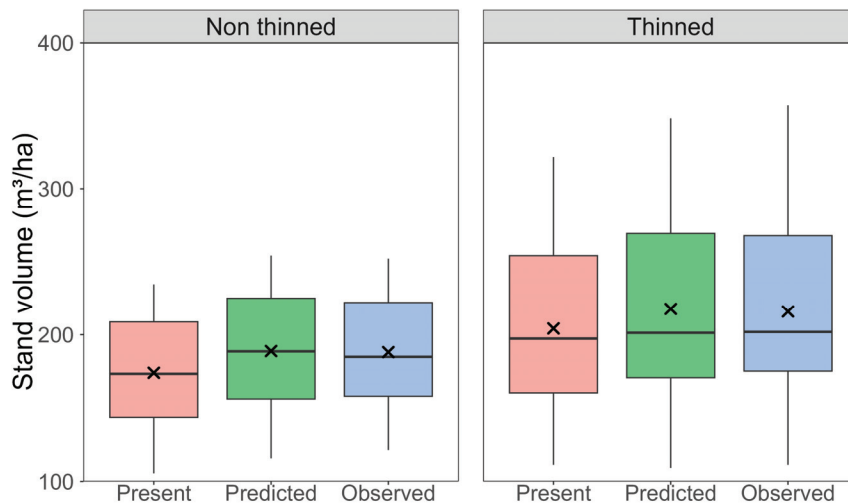


Figure 4. Comparison of stand volume between the initial diameter distribution, the 3-year growth distribution based on the stand table projection method, and the measured distribution after 3-year

204 m³/ha, 236 m³/ha로 나타났다. 3년 후의 예측된 임분 재적은 평균 246 m³/ha로 실측된 245 m³/ha와 유사한 수준을 보였다. 3년 후 예측된 무간벌구의 평균 임분재적은 222 m³/ha, 간벌구는 261 m³/ha였으며, 실측된 무간벌구의 평균 임분재적은 222 m³/ha, 간벌구는 259 m³/ha였다. 간벌구의 GIR₃이 높아 무간벌구에 비해 높게 예측된 것으로 보인다. 간벌구의 추정된 임분재적은 실측된 임분재적보다 높았는데, 이는 추정된 재적에 고사량으로 인한 재적의 감소가 반영되지 않았기 때문으로 판단된다. 추정된 임분재적과 실측된 임분재적 간에 차이가 있는지 확인하고자 쌍체t검정을 실시한 결과, 무간벌구는 $p=0.63$, 간벌구는 $p=0.32$ 로 유의적인 차이가 없었다.

그러나, 임분표예측기법의 경우 단기간 직경분포 변화를 예측하는 데에 높은 예측력을 가지고 있으나, 해당 기간 동안 고사목이 발생하지 않는다고 가정하는 단점이 존재한다(Son et al., 2000). Table 3과 4에서 예시로 제시한 표준지의 경우 3년 간 고사목이 발생하지 않았으나, 본 연구대상지에서 3년 간 발생한 임분 당 평균 고사목본수는 51.4 본/ha이다. 즉, 추정된 임분재적이 실제 임분재적보다 크게 나온 것은 임분표예측기법에는 고사목을 고려되지 않은 영향으로 판단된다. 향후 굴참나무의 고사율 추정 모델이 개발된다면 더욱 정밀한 임분재적 추정이 가능할 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 굴참나무의 반복조사자료를 바탕으로 임분표예측기법을 활용하여 직경분포 변화를 예측하고 임분재적을 추정하였다. 분석 결과, 간벌구에서의 GIR₃이 무간벌구에 비해 비교적 높게 나타났으며, 간벌의 직경생장 촉진 효과 때문에 상위생장량이 높은 것으로 판단된다. 또한, 예측된 직경분포를 통해 산출한 임분재적은 실제 측정된 재적과 유사한 양상을 보였으나, 일부 임분에서 고사목 발생이 고려되지 않은 영향으로 다소 높은 수치를 보였다. 임분표예측기법은 단기적인 직경분포 변화와 임분재적 예측에 있어 효과적인 방법으로 확인되었으며, 본 연구에서 산출한 GIR₃표는 직경분포 변화를 간편하게 추정하는 데 기여할 것으로 판단된다. 향후 방대한 굴참나무의 측정자료를 바탕으로 한 수고 및 재적추정식과 고사율 추정 모델이 적용된다면, 더욱 정밀한 임분재적 추정이 가능해져 목재수확 과정에서 중요한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산림청 연구용역 「2024년 국유림 내 주요 조림수종 간벌효과 장기 모니터링 및 간벌모델 개발 연구」와 교육부(한국연구재단) 기초연구사업(No. NRF-2016R1D1A1B02011648)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- An, H. 2001. Use of stand table projection technique for the estimation of growth rate by forest types and age classes : laying Stress on Kangwon province. Kookmin University Seoul, Korea.
- Burkhart, H.E., Avery, T.E., Bullock, B.P. 2018. Forest measurements. 6th ed. Long Grove, IL, USA: Waveland Press.
- Cao, Q.V. 2004. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. Forest Science. 50(5):68-685.
- Chapman, D.G. 1961. Statistical problems in dynamics of exploited fisheries populations. In: Vol. 4. : University of California Press Berkeley. p153-168.
- Choi, J., You, B., Burkhart, H. 2007. Allometry, basal area growth, and volume equations for *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis* in Gangwon province of Korea. Journal of Korean Forest Science. 96(2):189-196.
- Kim, M., Park, T., Ko, Y., Choi, G., Son, S., Kang, Y., Yoo, J., Kim, M., Park, H. and Lee, W. 2023. Analysis of changes in tree height-diameter allometry for major tree species in South Korea. Journal of Korean Society of Forest Science. 112(1):71-82.
- Korea Forest Research Institute. 2012. Commercial tree species 2 Quercus.
- Kwon, S., Son, Y., Lee, K., Chong, S., Kim, J. 2004. Stand growth analysis and carbon storage/removals assesment using the data of forest growth monitoring plots. Journal of Korean Society of Forest Energy. 23(2): 1-8.
- Lee, D., Jung, S. and Choi, J. 2022. Analysis of tree growth characteristics by first and second thinning in korean white pine plantations. Journal of Korean Society of Forest Science. 111(1):150-164.
- Lee, D.K., Kwon, K.W., Kim, J.H. and Kim, G.T. 2010.

- Silviculture. Hyangmunsa, Seoul, Korea, pp. 334.
- Lee, S., Lee, Y. 2018. Influences of forest management activity on growth and diameter distribution models for *Larix kaempferi* Carriere stands in South Korea. Journal of Agriculture & Life Science. 52(6):37-47.
- Lee, D., Siipilehto, J., Hynynen, J. 2021. Models for diameter distribution and tree height in hybrid aspen plantations in southern Finland. Silva Fennica. 55(5).
- Maltamo, M., Puumalainen, J., Päivinen, R. 1995. Comparison of beta and Weibull functions for modelling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. Scandinavian Journal of Forest Research. 10(1-4):284-295.
- Poudel, K., Cao, Q. 2013. Evaluation of methods to predict Weibull parameters for characterizing diameter distributions. Forest Science. 59(2):243-252.
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical Use. Journal of experimental Botany. 10(2):290-301.
- Siipilehto, J., Mehtätalo, L. 2013. Parameter recovery vs. parameter prediction for the Weibull distribution validated for Scots pine stands in Finland. Silva Fennica. 47(4): 1057.
- Son, Y., Rho, D., Kong, G., Sim, W., Kim, C., Seo, S., Shin, M. 2000. Growth prediction in permanent sample plots using stand table prejection. Korean Journal of Forest measurements. 3(1):22-28.
-
- Received 8 November 2024
 - Finally Revised 28 December 2024
 - Accepted 28 December 2024

부 록

Appendix 1. Growth index ratio (GIR) of 3 years by thinning in *Quercus variabilis* stands for stand table projection

Unthinned			Thinned		
DBH class (cm)	GIR ₃	Number of samples (trees)	DBH class (cm)	GIR ₃	Number of samples (trees)
10~12	0.20	25	10~12	0.24	15
14	0.23	24	14	0.27	35
16	0.26	38	16	0.29	81
18	0.35	43	18	0.35	114
20	0.50	55	20	0.43	143
22	0.48	59	22	0.48	174
24	0.53	46	24	0.52	186
26	0.41	45	26	0.55	144
28	0.54	27	28	0.52	103
30	0.50	16	30	0.51	98
32~42	0.45	20	32	0.58	75
			34	0.64	48
			36	0.57	49
			38	0.63	18
			40	0.61	17
			42~44	0.70	18

Airborne Laser Scanning 기반 일본잎갈나무의 산림자원정보 추출

서연옥 · 박정묵* · 강진택
국립산림과학원 산림경영연구과

Extraction of Forest Resource Information using Airborne Laser Scanning for *Larix kaempferi* in South Korea

Yeonok Seo · Jungmook Park* · Jintaek Kang

Forest Management Research Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약 : 본 연구는 ALS 기반 산림자원정보(개별 나무, 흉고직경, 수고)를 추출하기 위해 수행되었다. 대상지는 강원도 국립품종관리 센터에 위치한 일본잎갈나무로 ALS 기반 점군 정보를 취득하였으며, 산림자원정보 비교·분석을 위해 현장조사를 수행하였다. CHM 모델은 보간방법 3개(IDW, Kriging, TIN)를 기준으로 개별 나무를 추출하고 수고를 추정하였다. 또한 추출된 개별 나무의 DBH를 추정하기 위해 4개 조사 자료(국가산림자원조사, 고정수확지, 지상라이다, 현장조사) 기반의 DBH 추정식을 도출하여 적용하였다. 분석 결과, 가장 적합한 개별 나무 추출 및 수고 추정의 보간방법은 Kriging-Radius variable에서 나타났고 DBH 추정식은 고정수확지에서 추정된 $y=1.2829x + 0.6252$ 의 식이 가장 적합한 것으로 확인되었다. 개별 나무 추출 결과, Kriging (80본) > IDW (79본) > TIN (84본) 순으로 현장조사 개별 나무 개수인 82본과 유사하게 나타났고 수고는 Kriging (13.4m), IDW (13.5m), TIN (13.0m)로 나타났다. DBH 추정식은 고정수확지 (28.8cm), 라이다 (28.3cm), 현장조사 (33.9cm), 국가산림자원조사 (16.6cm)로 추정식에 따라 차이가 큰 것으로 확인되었다. 향후 ALS 기반 DBH 추정의 정확도를 향상시키기 위해서는 임종, 임상, 임령 등을 고려한 맞춤형 DBH 추정식의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

ABSTRACT : This study aimed to extract forest resource information—individual trees, tree height, and diameter at breast height (DBH)—using airborne laser scanning (ALS). The study site was *Larix kaempferi* forests in the National Forest Seed and Variety Center (NFSV) in Gangwon-do Province, South Korea. Point clouds for the three variables were obtained using ALS, and a field survey was conducted to compare the accuracy between the ALS method and field measurements. A canopy height model (CHM) based on three interpolation methods—IDW, Kriging, and TIN—was applied to identify the number of individual trees and estimate their heights. For DBH estimation, equations were derived using data from four different sources: the National Forest Inventory (NFI), Fixed Yield Experimental Forest (FYEF), LiDAR, and field surveys. The findings showed that the optimal interpolation method for extracting individual trees and estimating their heights was Kriging-Radius Variable, while the optimal DBH estimation equation was $y=1.2829x+0.6252$ derived from FYEF data. The individual tree extraction results were as follows: Kriging (80 trees), IDW (79 trees), and TIN (84 trees), closely aligning with the field survey result (82 trees). The estimated heights were 13.4 m (Kriging), 13.5 m (IDW), and 13.0 m (TIN). For DBH, the results were 28.8 cm (FYEF), 28.3 cm (LiDAR), 33.9 cm (field survey), and 16.6 cm (NFI), showing significant differences among the equations. These results suggest that improving ALS-based DBH estimation requires the development of customized DBH estimation equations tailored to forest species, forest type and age.

Key words : LiDAR, Canopy Height Model (CHM), Diameter of Breast Height (DBH), Interpolation methods, National Forest Inventory (NFI), Fixed Yield Experimental Forest (FYEF)

Corresponding author : Jungmook Park

Tel : 02-961-2883

E-mail : pjm7@korea.kr

I. 서론

산림의 효율적인 관리를 위해서는 임목의 특성, 즉 흉고직경과 수고와 같은 개체목 지표를 정확하게 측정하고 취득하는 것이 중요하다. 또한, 임목 재적, 바이오매스 및 임분단위의 성장정보는 산림 경영에서 중요한 요소 중에 하나이다.

산림자원조사는 전통적인 조사방법으로 직접 측정하는 것이 일반적이지만, 이는 인력과 시간이 많이 소요되고 조사자의 숙련도에 따라 오차가 많이 발생할 수 있다. 특히 수고는 Vertex laser와 같은 장비를 이용하여 수고를 측정하는데 흉고직경과 달리 간접측정 방법이기 때문에 측정할 때 오차가 더 발생할 수 있다. 기존 연구에서는 수고 측정 시 모든 수종의 수고를 약간 과대평가(약 30cm) 했다고 지적한 바 있다(Päivinen et al., 1992). 또한, Hyypä et al.(2020)이 광범위한 지역 조사에 개체목 측정에 많은 시간과 비용을 소비하는 것은 노동집약적 조사로서, 이 방법은 표준지 내 모든 나무의 구조정보를 취득하는 것은 비효율적인 방법이라고 표현하기도 하였다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 드론 라이다 기반의 기술이 각광받기 시작하였고 국내외에서 다양한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 특히, 드론 라이다는 고해상도 3D 점군(Point cloud)을 생성하며 나무의 구조적 특성을 정밀하게 측정할 수 있는 도구로 대면적 산림자원을 효율적으로 조사하는데 적합한 방법이다.

본 연구에서는 ALS 기반의 산림자원정보를 개별 나무로 추출하여 개체목 수, 흉고직경과 수고 등을 추정하고자 하였으며 관련 연구로는 드론 영상 활용 개체목 및 수고 추출(Song et al., 2021), 항공 라이다 자료 이용 도시지역 가로수에 대한 구조정보 취득(Cho and Kim, 2012), 수목고도모델과 히스토그램을 이용한 평균수고 추

정방법(Hwang et al., 2012), 라이다 자료를 이용한 산림자원 추출(Choi et al., 2015), 자연림의 임상별 수목 개체 추출 품질분석(Park et al., 2024) 등 이외에도 지속적으로 연구가 진행되고 있다. 그러나 ALS 기반의 한계인 흉고직경을 정확하게 추정하는 방법들에 대한 연구는 다소 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 ALS 기반 최적의 산림자원정보를 추출하는 방법으로 개체 나무 추출, 래스터 추출, 적정 점군 밀도 선정 등을 현장상황과 가장 적합한 방법으로 흉고직경과 수고를 추정하는 과정을 연구하고자 하였다. 이를 통해 ALS 기반 기술의 활용성을 입증하고, 향후 산림관리 및 전략 수립 등에 기여할 수 있는 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 더 나아가, 이러한 정밀데이터는 산림 정책 결정에 있어서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지역

본 연구는 강원도 춘천시 국립산림품종관리센터 일본잎갈나무 재증원으로 일정한 간격으로 규칙적으로 식재되어 있으며, 개체목별 정보가 명확하며 식재 도면을 보관하고 있는 정돈이 잘 된 대상지로 0.2ha(82개 나무)를 선정하였다(Figure 1).

2. ALS 자료 취득

ALS 자료 취득을 위해 일본잎갈나무 0.2ha를 대상으로 Riegl사(社) Mini VUX-1UAV 센서를 이용하여 ALS



Figure 1. Study area photograph of a drone LiDAR

Table 1. Target species and survey factors

Location		<i>Larix kaempferi</i> clone bank in Chuncheon
Site	Recording area	Total: approximately 33 ha site: approximately 0.2 ha
	Cluster point density	593 points per m ²
LiDAR	Laser sensor	RieglLtd.Mini VUX-1UAV
	Scan distances	Max 250 m
	Number of returns	5
	Data collection speed	Max 500,000 point/sec
	Accuracy	± 3 cm
Flight (Cinematography terms)	Recording altitude	60 metre relative altitude
	Overlapping rate	transverse: 80%, longitudinal: 70%
	Flight speed	2.7 m/sec
	Collection time	20 minute

기반의 정보를 취득하였다. ALS 자료 취득에 사용된 드론은 DJI 사(社)의 Matrice 600 Pro로 촬영고도 60m 상대 고도 비행, 비행속도 2.7m/sec, 자료수집 속도 50만 pte/sec, 점군 점밀도는 593m² 촬영조건에서 수행하였다(Table 1). ALS 자료는 2023년 9월 생육시기에 취득하였다.

3. 연구 방법

본 연구는 ALS 기반의 산림자원정보 추출 가능성을 평가하기 위해 고밀도 점군데이터를 취득하고, 이를 전처

리하여 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM) 및 수치표면모델(Digital Surface Model, DSM)을 생성한 뒤, 수관고모델(Canopy Height Model, CHM)을 작성하였다. 이후 CHM 분석을 통해 개별 나무를 식별하고 수고와 수관정보를 산출하였으며, 지상라이다 정보와 연계하여 흉고직경(Diameter of Breast Height, DBH)을 추정하였다. 마지막으로 추정된 DBH 값을 현장 조사 기반 자료(7차 국가산림자원조사, 장기모니터링 시험구, 현장 실측 자료)와 비교·검증하여 ALS 기반의 산림자원정보 추출의 가능성을 평가하였다(Figure 2).

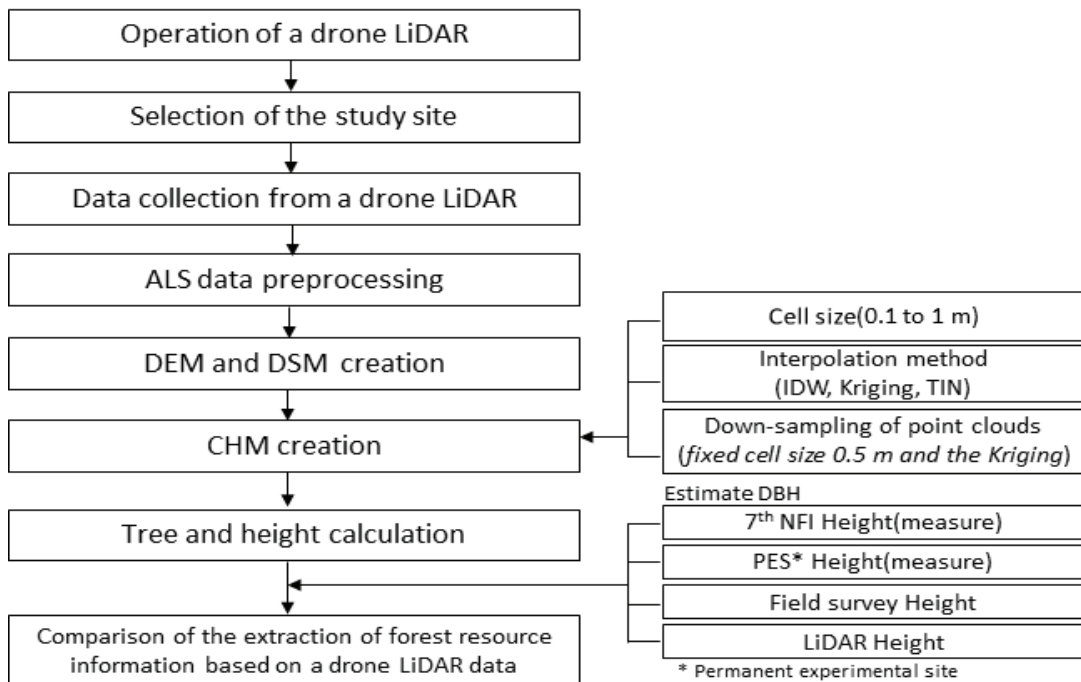


Figure 2. Individual tree extraction using drone LiDAR data

1) 개체 나무 추출 방법

ALS를 통한 산림정보 추출 시 상부에서 취득한 정보를 활용하기 때문에 수간부에 해당되는 정보를 이용한 개체목 추출에는 한계가 있다(Zhang et al., 2021). 이에 따라, CHM을 작성한 후 유역분석방법(Watershed method)을 적용하여 수관부 경계 및 개별 나무를 추출하였다. 임목의 상층부에서 작성한 DSM과 최저 지표면에서 작성한 DEM의 차이를 이용하여 CHM을 추정하였으며, 이를 각각 3가지 선택사항(적정 셀 크기 · 보간방법 · 점군개수)을 고려하여 적용하였다.

(1) 적정 셀 크기 선정 방법

개별 나무는 ALS로 취득한 정보를 점군 분할(Point cloud segmentation)을 통해 추출할 수 있다. 적절한 간격 임계값은 개체목의 수관 반경과 거의 같아야 하며 임계값이 너무 작으면 가지나 긴 나무가 과도하게 분할 될 수 있고 임계값이 너무 크면 주변 임목을 놓칠 수 있어 미분류 또는 과분류가 발생할 수 있다. 따라서 임계값은 수관의 반경과 거의 같아야 한다(Li et al., 2012). 정확한 개별 나무 추출 방법은 0.1m~1m 간격으로 시행착오 방식을 적용하여 추출하였다.

(2) CHM 작성을 위한 적정 래스터 보간방법

CHM 작성을 위한 DEM 및 DSM 작성에 사용된 보간 방법은 IDW(Inverse Distance Weighting), Kriging, TIN(Triangulated Irregular Network)의 3가지 방법을 적용하였다. IDW, Kriging, TIN은 ALS에서 취득한 정보를 래스터로 변환하는 보간방법으로 IDW의 경우 계산이 간단하고 직관적인 방법으로, 인접한 점의 영향을 더 크게 반영하지만, 점밀도나 분포가 일정치 않으면 불확실성이 커질 수 있고, 이상치에 매우 민감하다(White et al., 2013). Kriging의 경우 공간적 자기상관을 모델링하여 더 높은 정확도를 제공하고 불확실성을 예측할 수 있지만, 모델링에 필요한 연산이 복잡하고 시간이 많이 소요된다(Gonzalez-Ferreiro et al., 2014). TIN의 경우 주어진 점들을 삼각형으로 연결하여 유연하게 지형을 반영하지만, 점군 밀도와 분포에 따라 결과의 안정성에 영향을 미칠 수 있다(Vauhkonen et al., 2012). 따라서 ALS 기반 산림자원 정보 추출 시 정보의 특성과 점군 밀도, 점군 분포 패턴 등에 따라 최적의 보간방법이 달라질 수 있다.

(3) 적정 점군 밀도(서브샘플링) 선정 방법

ALS는 초당 최대 수백만 점군 정보를 취득하여 3차원 정보를 구축할 수 있다. ALS를 통해 수집된 점군 정보의 양이 많아 자료를 처리하는데 많은 시간과 노력이 필요

하므로 효율적인 자료 처리를 위해 개체목 단위 점군 개수를 다운샘플링 처리하였다. 점군 다운샘플링은 Nominal point spacing(NPS)을 사용하였으며 포인트 간격은 포인트 밀도의 제곱근의 역수로 계산된다. 원 자료 100%에서 0.78% 수준까지 다운샘플링을 통한 개체목 추출에 적합한 방법을 비교 분석하였다.

(4) 개별 나무 추출 방법

적정 셀 크기 · 보간방법 · 점군 밀도가 선정되면, DEM과 DSM의 수관 높이 차이를 이용하여 CHM을 작성하고 유역분석 방법을 통해 개별 나무 수관부의 중심점을 추출하였다. 개별 나무 수관부의 중심점이 추출되면, 가우시안 필터링을 통해 수관부 경계(범위)를 탐색하여 수관폭과 수관면적을 산출하였다(Zhen et al., 2016).

2) 흉고직경 및 수고 추정 방법

산림자원정보 추출 비교는 개체목 추출의 경우 생성된 CHM의 높이 차이를 이용하여 유역분석을 통해 추출하였으며, 수고의 경우 분할된 수관부 객체별 최상단 높이 값을, 흉고직경은 수고를 이용한 흉고직경 추정식 4개를 비교 · 분석하였다. 7차 국가산림자원정보를 이용한 추정식은 전체 및 실측 수고값을 이용한 흉고직경 추정 회귀식을 도출하였으며, 고정수확지, 현장측정과 라이다 기반 추정 회귀식을 각각 도출하여 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 적정 셀 크기 선정

1) 셀 크기에 따른 개체목 추출 비교

ALS 기반 산림자원정보 추출의 한계인 개별 나무의 DBH를 추정하기 위하여 정확한 개별 나무 추출 방법을 도출하였다. 먼저 정확한 개별 나무 추출을 위하여 IDW, Kriging, TIN의 3가지 방법으로 수관정보에 의한 개별 나무 추출의 최적 셀 크기를 도출하였으며 셀 크기가 작을수록 개별 나무의 개수가 증가하는 경향을 보였다. ALS 기반 점군 정보 취득 시 지면의 점군 정보가 불충분하여 보간 방법에 의한 DEM 추출에 한계가 있는 것을 확인하였다. 현장조사와 비교한 결과, 적정 셀 크기는 0.5m~0.6m에서 Kriging (80본) > IDW (79본) > TIN (84본) 순으로 현장조사 82본과 유사하게 나타났다(Table 2 & Figure 3.).

Table 2. Selection of optimal cell size

Classification	DEM / DSM / CHM			No. of trees (extracted)	No. of trees (survey)
	Parameters				
Interpolation Method	X size (m)	Y size (m)	Etc.		
IDW	0.1	0.1	Default	1186	82
	0.4	0.4		88	
	0.5	0.5		79	
	1.0	1.0		52	
Kriging	0.1	0.1		1198	
	0.4	0.4		85	
	0.5	0.5		80	
	1.0	1.0		53	
TIN	0.1	0.1		3004	
	0.4	0.4		132	
	0.5	0.5		104	
	0.6	0.6		84	
	1.0	1.0	54		

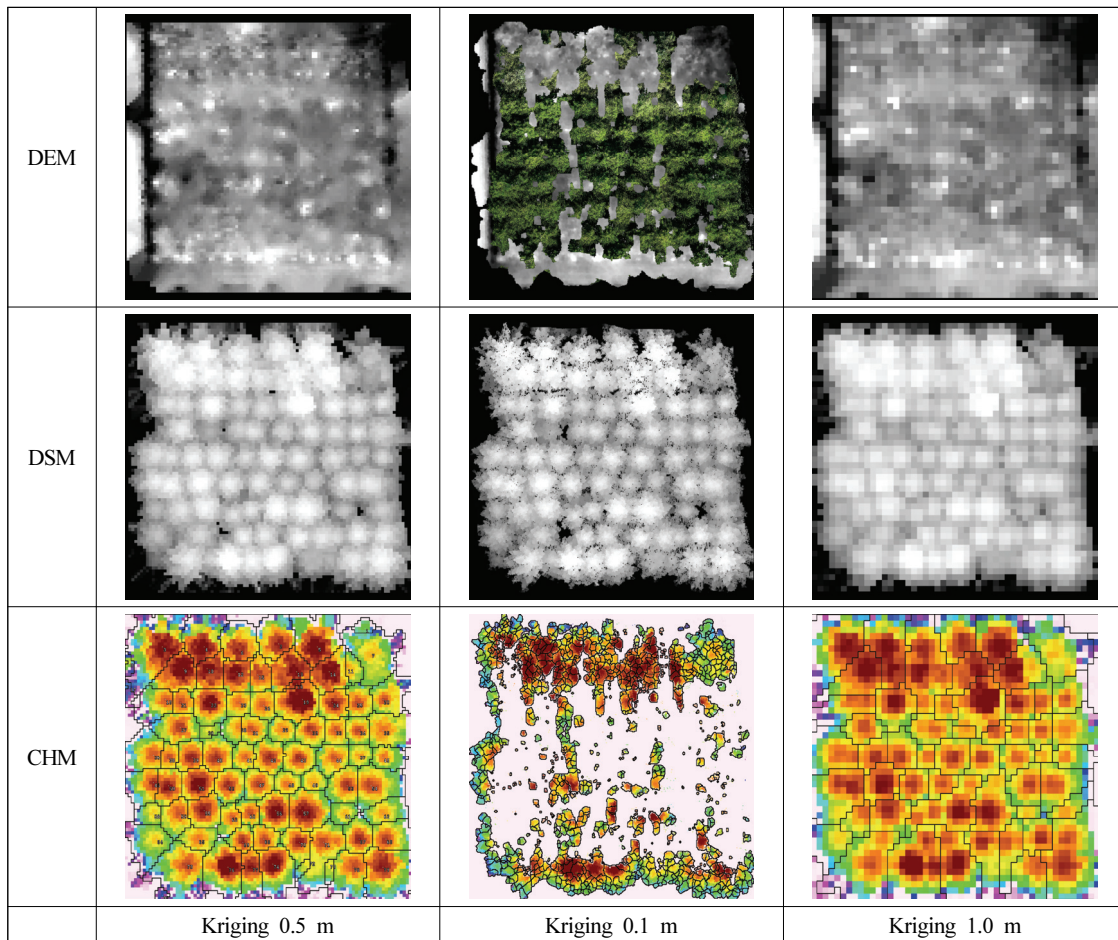


Figure 3. Comparison of Crown delineation by spatial resolution

2) 보간방법에 따른 개별 나무 추출 비교

개별 나무 추출의 최적 셀 크기를 0.5m로 고정하고 IDW, Kriging, TIN의 3가지 보간방법으로 CHM 추출 및 유역분석 방법에 의한 개별 나무를 가장 정확하게 추출한 보간방법은 Kriging-Radius Variable 방법으로 분석되었다. 이 방법은 개별 나무 추출 개수와 추출된 형태적 특징 등을 모두 고려했을 때 가장 적합한 방법이다(Figure 4. & Table 3). 특히, 침엽수를 대상으로 Kriging 보간법 적용 결과가 TIN 보간법 적용보다 미세한 차이로 품질이 향상된다는 결과와 유사하였다(Jo et al., 2023). 다만, 개별 나무 추출 오류 원인으로 보간방법(필터링)에 의해 대

부분 수관부 경계(범위)에서 오류가 발생하는 것을 확인하였다. Figure 5와 같이 CHM의 공통점은 인접해 있는 나무 중 수고가 비슷하면 하나로 인식하고 있는 것을 확인할 수 있다(분홍색, 갈색). 또한, 개체목의 양옆이나 주위 개체목보다 상대적으로 수고가 작은 개체목은 인식이 불가하였고(녹색), 수고 차이가 많이 나지만 자연스럽게 인접해 있으면 하나로 인식하는 경우도 발생하였다(노란색, 빨간색). 수고가 비슷하고 인접해있는 나무는 빨간색과 녹색으로 인식하였고 평균수고 이하의 나무 3개가 인접해 있으면 가장 큰나무 하나로 인식하는 경향을 보였다(빨간색).

Table 3. Comparison of individual trees using interpolation methods

Classification	Method	Number of individual trees
3D	Field survey	82
	Handhel	82
	Drone ALS	140
	Handhel+Dron	82
TIN	Delaunay	104
	Spike Free TIN	74
	Radius Fixed	82
	Radius Variable	79
2D (Cell size 0.5m)	Radius Fixed	81
	Radius Variable	80

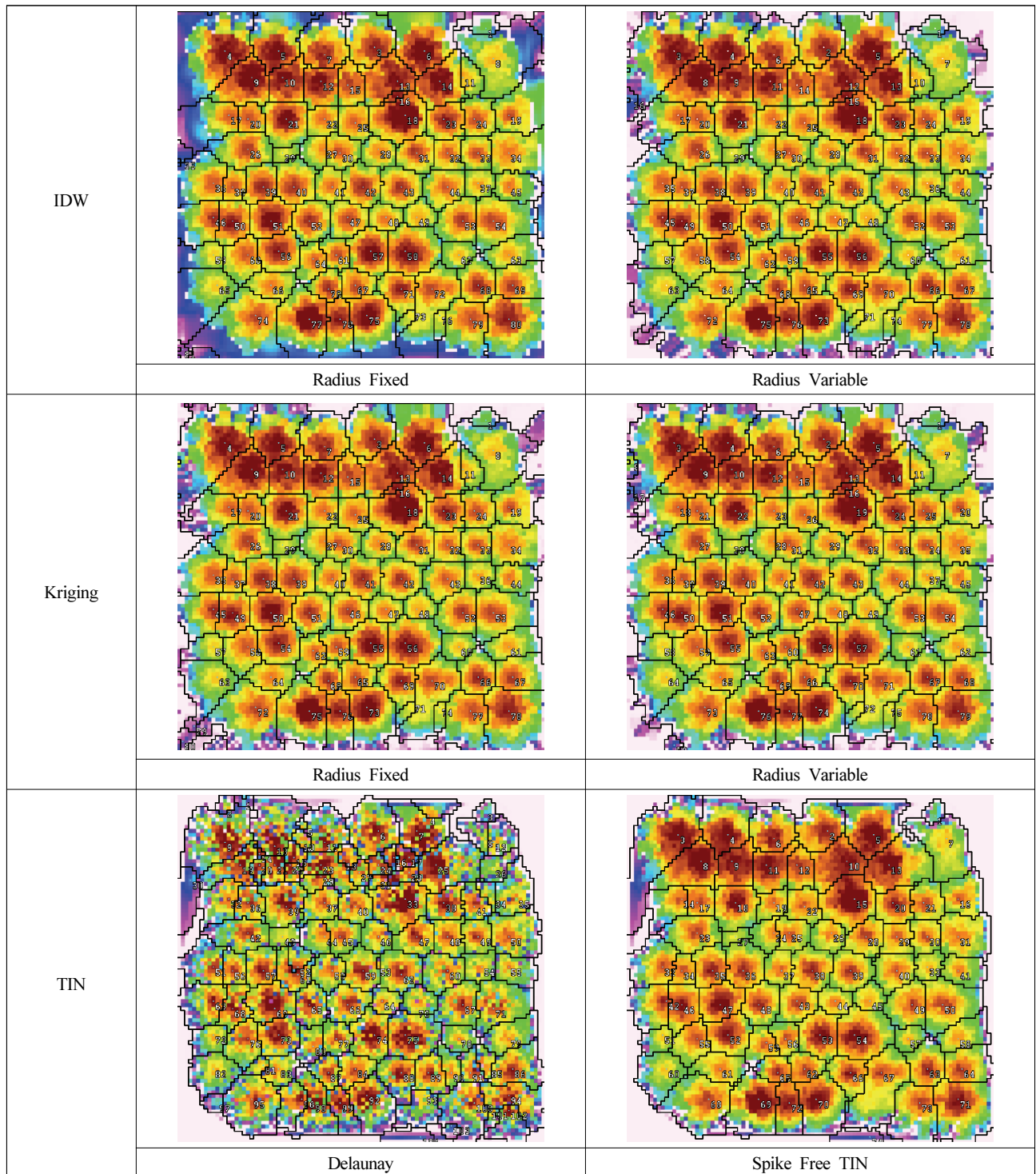


Figure 4. Comparison of crown delineation by interpolation methods

Compare	Handhel / DronCHM(2D)	Handhel / DronCHM(3D)	Dron / DronCHM
1			
2			
3			
4			
5			

* CHM shp file : IDW > DSM, DEM x,y size 0.5m > Ridus Fixed

Figure 5. Causes of errors in Individual tree extraction

3) 점군 다운샘플링에 따른 개체목 추출 비교

셀 크기는 0.5m, 보간법은 Kriging으로 고정하고 다운샘플링에 따른 개체목 추출 결과, 적정 점군 개수는 최소 150점/m² 이상이 되어야 현장조사 개체목 수와 유사한 것으로 나타났다(Figure 6 & Table 4). 낮은 점군 개수를 통해 CHM 추출은 가능하지만 개체목에는 추출에 한계가 있는 것을 확인하였다.

2. 흉고직경 결정계수 추정식

ALS 기반 최적 흉고직경 추정식 도출을 위하여 국가산림자원조사(추정식 1) 고정수확지(추정식 2), 현장조사

(추정식 3), 라이다 조사(추정식 4) 자료에 의한 일본잎갈나무의 수고기반 흉고직경 추정식을 도출하였고(Table 5), 흉고직경 추정 회귀식 적용은 라이다 조사의 수고값을 이용하였다. 도출된 흉고직경 추정식에 의해 흉고직경을 추정된 결과, 개체목 수 및 수고 측정값은 유사하나 흉고직경 측정값은 추정식에 따라 차이가 큰 것으로 나타났다. 추정 흉고직경의 값 차이는 고정수확지 (28.8cm) > 라이다 (28.3cm) > 현장조사 (33.9cm) > NFI (16.6cm) 추정식 순으로 나타났다(Table 6). 흉고직경 측정값은 추정식에 따라 차이가 크며 특히 국가산림자원조사 추정식을 적용한 값은 현장조사에 비해 약 2배 낮게 나타났다. 이는 국가산림자원조사 자료의 개체수가 많고 다방면에 활

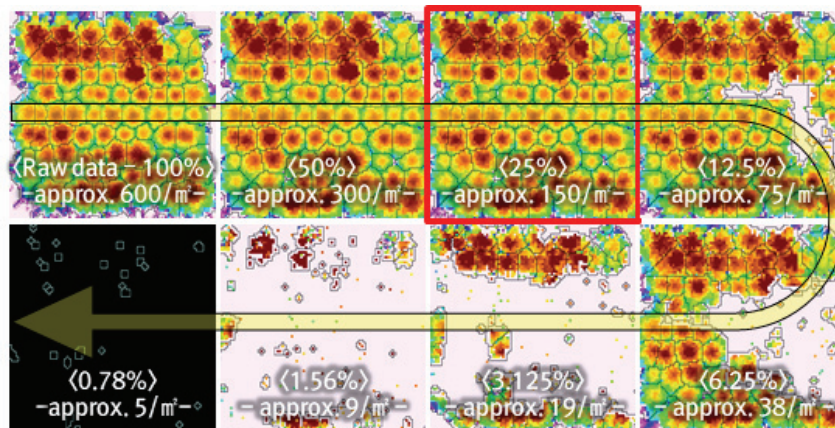


Figure 6. Comparison of individual tree extraction by downsampling raw data to 100~0.78%

Table 4. The optimal number of downsampling points

Rate (%)	Number of point clouds	Point/m ²	Individual tree	Avg. height (m)
100	1,122	593	76	13.53
50	561	296	81	13.16
25	280	148	78	13.49
12.5	140	74	78	12.35
6.25	70	37	75	10.62
3.125	35	18	63	8.28
1.56	17	9	55	4.66
0.78	9	5	27	2.33

Table 5. DBH equation of the 7th NFI and the field survey

Species	DBH equation	R ²	Number of individual trees	Note
Larix kaempferi	(eq. 1) Y = 1.3712x-2.6600	0.5181	7,145	NFI Height(measure)
	(eq. 2) Y = 1.2829x-0.6252	0.5353	2,598	PES Height(measure)
	(eq. 3) Y = 2.5328x-0.0973	0.6423	17	Field survey Height
	(eq. 4) Y = 1.5626x-7.2817	0.1342	82	LiDAR Height

Table 6. Optimal equation to estimate DBH

Method	Number of individual trees	Height (m)	DBH equation (cm)				
			NFI	FYEF	Field survey	LiDAR	
TIN	Delaunay	104	11.2	13.8	25.6	28.3	24.8
	Spike Free TIN	74	13.0	16.1	26.8	32.9	27.6
IDW	Radius Fixed	82	13.2	16.3	27.6	33.3	27.9
	Radius Variable	79	13.5	16.7	28.2	34.1	28.4
Kriging	Radius Fixed	81	13.2	16.3	28.0	33.3	27.9
	Radius Variable	80	13.4	16.6	28.8	33.9	28.3

* Field survey data: (the number of individual trees) 82 / (Height) 13.4cm / (DBH) 30.1cm

용되지만 일본잎갈나무는 전국을 대상으로 한 자료이므로 주변 대상지를 고려한 고정수확지 보다 오차가 크게 발생한 것으로 판단된다. 향후 국가산림자원조사 자료 활용 시에는 표준지와 유사한 임분환경 또는 동일한 지역 자료를 활용하여 이러한 문제를 개선해 나갈 필요가 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 ALS 기반 최적 흉고직경 추정을 위한 흉고직경 추출 표준화를 진행하고자 하였다. 최적 셀 크기 선정을 위해 개별 나무 추출 비교, 적정 보간법 선정으로 수관 구획 형태 산정, 적정 점군 개수 선정을 통해 최소 필요 점군 개수를 고려하여 개체목 추출을 표준화하고자 하였다. 그 결과 개별 나무 추출 최적화 방법으로 셀 크기 0.5m, 보간법은 Kriging, 다운샘플링은 최소 m² 당 150점 인 것으로 확인되었다. ALS를 활용하면 넓은 면적을 짧은 시간에 촬영하는 장점이 있는 반면에, 흉고 직경을 측정하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구는 ALS로 취득한 점군 정보를 CHM을 작성하여 흉고직경을 추정하는 방식을 선택하여 자료를 분석하였다. 향후 대면적의 산림자원정보 구축 시 ALS를 활용할 경우 DBH를 정확하게 추정하는 식이 다양한 수종, 임종 및 임상에 따라 개발이 필요할 것으로 판단되며 더 나아가 DBH 추정 시 수고 외 수관폭, 수관면적 등을 포함하여 정확도를 개선할 필요가 있을 것으로 판단된다.

References

Chen, Q., Baldocchi D., Gong. P. and Kelly, M. 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using

small footprint LiDAR Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 72(8):923-932.
 Cho, D.Y. and Kim, E.M. 2012. Extraction of street tree information using airborne LiDAR data. Journal of the Korean Society for Geospatial Information System 20(6):45-57.
 González-Ferreiro, E., Vega Isuhuaylas, L.A., Boyd, D.S., Alboreca, A.R., Mosquera-Losada, R., Miranda, D. 2014. Use of Airborne LiDAR and Aerial Photography in the Estimation of Individual Tree Heights in Forest Plantations in Northwest Spain. Forests 5:1783-1808.
 Hwang, S.R., Lee, M.J. and Lee, I.P. 2012. Detection of individual trees and estimation of mean tree height using airborne LIDAR data. Journal of the Korean Society for Geospatial Information System 20(3):27-38.
 Hyypä, J., Schardt, M., Haggren, H., Koch, H., Lohr, U., Scherrer, Paananen, H.U., Luukkonen, R.H., Ziegler, M. and Hyypä, H. 2001. The first europeanwide attempt to derive single-tree information from laserscanner data, Journal of Finland 17:43-53.
 Jo, S.H., Ban, S.H., Lee, H.J. and Choi, S.K. 2023. Individual tree detection in natural forest using high density airborne laser scanning. Journal of Korean Society for Geospatial Information Science 131(1):29-38.
 Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M.K. and Kelly, M. 2012. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 78(1):75-84.
 Päivinen, R., Nousiainen, M. and Korhonen, K.T. 1992. Accuracy of Certain Tree Measurements, Puutunnusten mittaamisen luotettavuus, Folia Forestalia. Finnish Forest Research Institute, Helsinki, FIN.
 Park, S.I., Jung, S.G. and Lee, H.J. 2024. Quality analysis of individual tree detection in natural forest by forest

- type based on LiDAR technology. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science* 32(2):31-40.
- Song, C., Kim, S.Y., Lee, S.J., Jang, Y.H. and Lee, Y.J. 2021, Extraction of individual trees and tree heights for *Pinus rigida* forest using UAV Images. *Korean Journal of Remote Sensing* 37(6-1):1731-1738.
- Vauhkonen, J., Packalen, P., Maltamo, M., Tokola, T. 2012. Airborne Laser Scanning-Based Forest Inventory in a Heterogeneous North-European Boreal Forest Area. *Forests* 3:180-207.
- White, J.C., Wulder, M.A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N.C., Pitt, D., Woods, M. 2013. A Best Practices Guide for Generating Forest Inventory Attributes from Airborne Laser Scanning Data Using an Area-Based Approach. *Forests* 4:518-536.
- Yim, J.S., Kim, D.H., Ko, C.U., Kim, D.K. and Cho, H.J. 2023. Design and implementation of system for estimation diameter at breast height and tree height using LiDAR point cloud data. *Journal of The Korea Society of Computer and Information* 28(2):99-110.
- Zhang, L., Dawadi, S., Yu, X., Leppänen, V., Kaartinen, H., Liang, X., Hyypä, J. 2021. Estimating Tree DBH from Airborne Laser Scanning Data Using Deep Learning. *Remote Sens* 13:4989.
- Zhen, Z., Quackenbush, L.J., Zhang, L. 2016. Trends in Automatic Individual Tree Crown Detection and Delineation-Evolution of LiDAR Data. *Remote Sens* 8(10):767.
-
- Received 14 November 2024
 - Finally Revised 19 December 2024
 - Accepted 20 December 2024

국산 낙엽송 원목의 이용 방식에 따른 부가가치 변화

안은정¹ · 장윤성^{2*} · 한 희^{1,3}

¹서울대학교 농업생명과학연구원 · ²국립산림과학원 산림경영연구과 · ³서울대학교 농림생물자원학부

Value-Added Changes According to Utilization of Domestic Larch (*Larix kaempferi*) Logs

Eunjeong Ahn¹ · Yoonseong Chang^{2*} · Hee Han^{1,3}

¹Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

²Division of Forest Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Republic of Korea

³Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

요약 : 본 연구는 국산 낙엽송 원목의 경제적 부가가치를 높일 수 있는 이용 방안을 분석하기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위해 원목의 제재공정에 대한 시뮬레이션 분석을 통해 낙엽송의 크기에 따른 생산 가능한 목재제품의 종류와 양을 산출하고, 이용 시나리오별 경제적 편익 차이를 분석하였다. 분석 결과, 토폴가설재만 생산하는 것에 비해 일반용재 생산 시 총 제품가치가 6배, 구조용재까지 생산 시 최대 8배까지 증가하여 낙엽송 원목 생산의 부가가치를 높일 수 있는 것으로 나타났다. 또한 낙엽송의 경우 흉고직경이 26cm 이상에서 구조용 제재목을 생산할 수 있는 것으로 분석되었는데, 이때에도 단일 개체목에서 생산되는 모든 원목에서 구조용재를 생산할 수 있는 것이 아니라 조재된 원목의 크기에 따라 생산 가능한 목재제품이 달라지는 것으로 확인되었다. 따라서 수확 시 생산되는 원목을 용도에 따라 구분하고 이를 필요로 하는 수요처에 공급하는 것이 국산목재의 가치사슬 제고에 필요하다.

ABSTRACT : This study was conducted to analyze utilization methods to increase the economic value-added of domestic larch (*Larix kaempferi*) logs. A simulation of the sawing process was performed to calculate the types and quantities of wood products producible according to the log size and to analyze economic benefits under various utilization scenarios. The results showed that producing sawn timber increased the total product value by up to six times compared to producing only supporting materials. Furthermore, producing structural timber increased the value by up to eight times, demonstrating its potential to enhance the economic value of larch log production. It was also found that structural timber could only be produced from logs with a diameter at breast height (DBH) of 26 cm or more. Even in these cases, the types of wood products that could be produced varied depending on the size of the processed logs. Therefore, sorting harvested logs based on their intended use and supplying them to the appropriate demand sectors is necessary to enhance the value chain of domestic wood.

Key words : Value-added products, Sawing simulation, Utilization methods, Value chain, *Larix kaempferi*

1. 서론

2022년 기준 국내에서 생산된 국산원목의 이용량은 약 3,541천m³로, 같은 해 국내 총 목재이용량 30,800천m³의 11.5%에 불과하다. 반면 해외에서 수입된 목재제품과 원

목의 양은 약 25,750천m³로, 총 목재이용량의 83.6%에 이른다(Korea Forest Service, 2023). 산림청은 목재제품의 부가가치에 따른 단계적 이용원칙(cascading principle)을 통해 국산목재의 이용가치를 높이고 목재자급률을 향상시키고자 하지만(Korea Forest Service, 2021), 국산원목의 이용량은 2016년 4,624천m³, 2019년 4,261천m³, 2022년 3,541천m³로 오히려 지속적으로 감소하고 있다(Korea Forest Service, 2023).

Corresponding author : Yoonseong Chang
E-mail : jang646@korea.ac.kr

국산목재의 이용량을 늘리기 위해서는 수요를 창출하고 목재수확 비용을 줄이는 등의 노력이 필요하지만, 생산된 원목의 부가가치를 높일 수 있는 이용 방안에 대한 고민도 필요하다. 합판·보드류를 제외하고(2022년 기준 생산된 총 국산원목량의 38%를 이용), 현재 우리나라에서 생산되는 국산원목의 20.5%가 “장작”으로 이용된다. 반면, 부가가치가 높은 “제재목”의 이용비율은 19.5%로 장작보다 더 낮다. 여기서 주목할 만한 점은 전체 수입원목 3,034천m³ 중 대부분인 2,836천m³(전체 수입원목량의 93.5%)이 제재목으로 사용되고 있다는 것이다(Korea Forest Service, 2023). 국내 제재목 이용만을 기준으로 살펴봤을 때 수입원목과 국산원목의 원료투입 비율은 약 4대 1 정도로, 우리나라에서 사용되는 제재목 원료의 80%가 외국으로부터 수입되고 있는 것이다.

또한, 국산원목을 이용한 제재목의 이용 형태에 대해서도 주목할 필요가 있다. Figure 1은 2021년 기준 국산원목으로 생산된 제재목 종류와 생산량을 보여준다. 이 그림에 따르면 국산원목이 가장 많이 투입되어 생산된 제재목 제품은 “토목가설재(supporting materials)”로, “구조용재(structural timber)”나 “가구내장재(interior construction materials)” 등 보다 생산 비율이 높은 것으로 나타났다. 토목가설재는 주로 건설 현장에서 임시 구조물로 사용되는 목재제품으로, 부가가치가 낮고 반감기가 짧아 장기적인 탄소저장 효과를 기대하기 어렵다(Jang, 2021). 이로 인해 장수명 제품과 달리 앞서 언급한 단계적 이용원칙

에 부합하지 않는 제품으로 간주되고 있다. 따라서 국산원목의 상당량이 토목가설재 생산에 이용되는 현재의 목재이용 방식은 개선될 필요가 있다.

낙엽송은 국내 산림자원 중 경제적 가치가 높은 주요 수종 중 하나로, 국내 목재산업에서 핵심적인 역할을 담당한다. 제재목으로 이용되는 국산 원목(691,045m³) 중 낙엽송 원목(426,367m³)의 비중은 전체의 61.7%를 차지할 정도로 부가가치가 높다(Korea Forest Service, 2023). 따라서 본 연구는 낙엽송 원목을 대상으로, 국내에서 목재로서의 활용 가치가 높은 특성을 고려하여 그 경제적 부가가치를 극대화할 수 있는 활용 방안을 분석하고자 하였다. 이를 위해 원목의 제재공정에 대한 시뮬레이션 분석을 통해 낙엽송의 크기에 따른 생산 가능한 목재제품의 종류와 양을 산출하고, 이용 시나리오별 경제적 부가가치의 차이를 분석하여 이용 효율성을 높일 수 있는 개선 방안을 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 분석 절차

본 연구는 Figure 2과 같이 총 3단계에 걸쳐 진행되었다. 먼저 낙엽송 임분수확표(National Institute of Forest Science, 2021)를 기준으로 우리나라의 표준적인 낙엽송

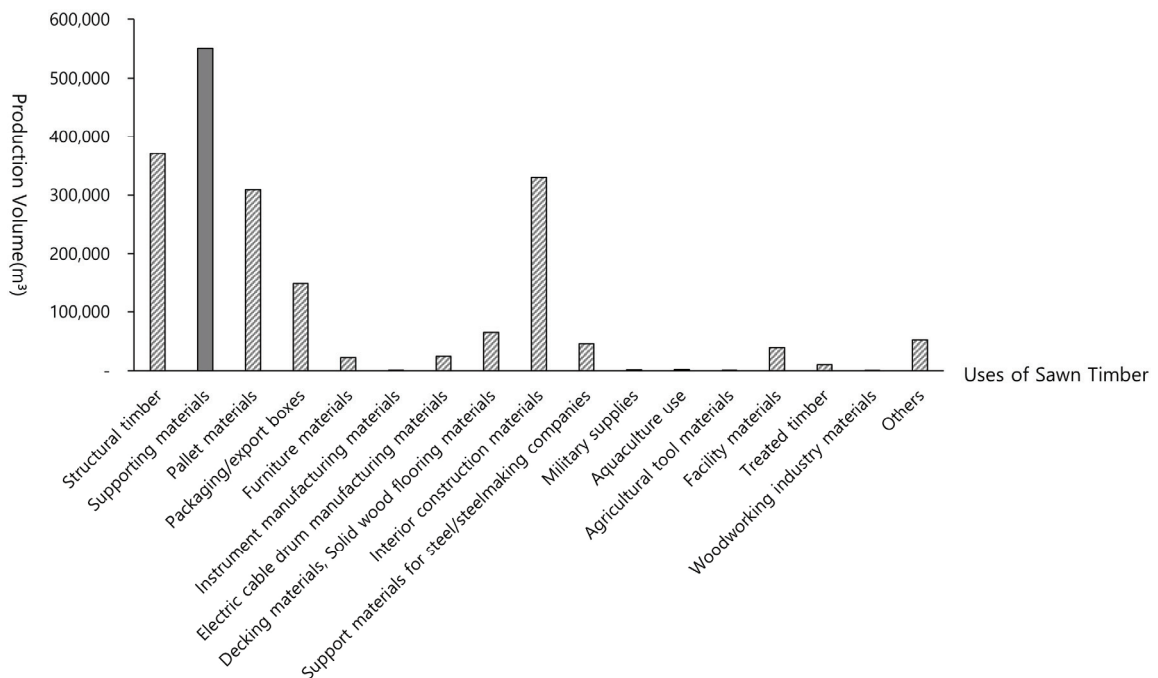


Figure 1. Production volume by usage of sawn timber from domestic logs (Korea Forest Service, 2022)

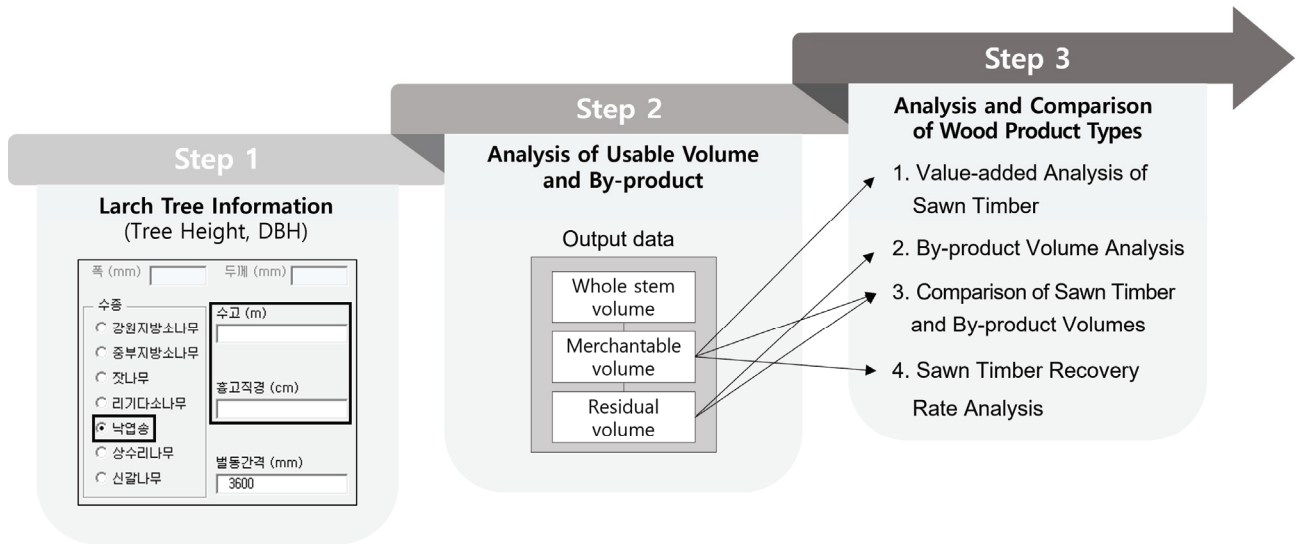


Figure 2. Research Framework

Table 1. Individual tree information of larch trees (*Larix kaempferi*) used in the analysis

Site Index	Stand Age (yrs)	Mean Diameter (cm)	Mean Height (m)	Number of Trees
18~20*	20	13.35	12.30	1,288
	25	16.90	14.95	927
	30	20.25	16.95	723
	35	23.40	18.55	595
	40	26.25	19.80	510
	45	28.85	20.75	451
	50	31.10	21.45	409
	55	33.15	22.05	377
	60	35.00	22.50	353
	65	36.55	22.90	335
70	37.90	23.15	321	

*Calculated as the midpoint between site index 18 and site index 20 from the yield table (National Institute of Forest Science, 2021)

임분의 흉고직경별 수고 정보를 추출하고, 해당 정보를 시뮬레이션 모델에 입력하였다. 이때, 낙엽송의 표준적인 임분 형태를 입력하기 위하여 해당 임분수확표의 지위지수 18과 20의 중간값을 계산하여 개체목 정보로 활용하였다(Table 1). 다음으로 시뮬레이션 모델을 통해 이용재적과 부산물의 생산량을 도출하고, 최종적으로 제품별 판매가격을 고려하여 시나리오에 따른 부가가치를 비교 분석하였다.

2. 시뮬레이션 모델

분석을 위한 시뮬레이션 모델은 Kwon et al. (2013)이 개발한 「이용재적 산출모델」을 이용하였다(Figure 3). 이 모델은 국내 주요 6개 용재수종(소나무, 잣나무, 낙엽송,

리기다소나무, 상수리나무, 신갈나무)의 수간 형상과 목재제품의 규격을 고려하여 수익 혹은 수율을 극대화할 수 있는 규격재와 제재 부산물의 생산량을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 국산원목의 이용 형태별 부가가치 변화를 살펴보기 위하여 수익 최적화 기준으로 분석을 진행하였다.

부가가치 분석 시 필요한 목재제품별 판매가격은 2023년 9월 기준 산림조합중앙회 중부목재유통센터의 판매가격(National Forestry Cooperation Federation, 2023)과 글루렘 판매가격(Kyung Min Industrial, 2023)을 참고하였다. 토목가설재의 규격과 단가는 같은 시기 지역 제재소에서 생산하고 있는 토목가설재의 일반적인 규격과 판매가격을 참고하였다. 분석에 적용된 각 제품별 규격과 판매가격은 Table 2와 같다.

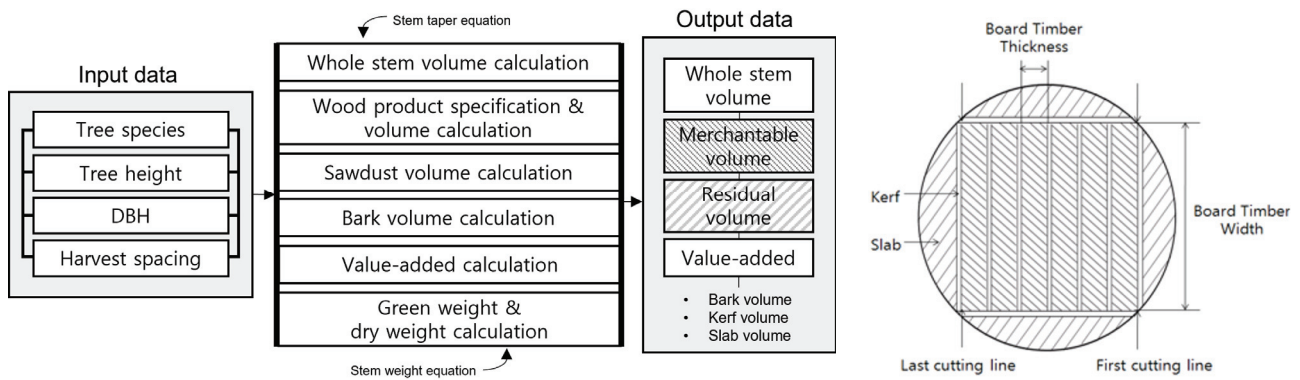


Figure 3. Structure and schematic diagram of the sawing simulation model (Kwon et al., 2013)

3. 분석 시나리오

본 연구는 낙엽송 원목을 대상으로 세 가지 이용 시나리오별 목재제품의 부가가치를 비교 분석하였다. 시나리오 1은 토티가설재, 시나리오 2는 일반용재(각·판재), 시나리오 3은 일반용재와 구조용재를 함께 생산하는 경우로 설정하였다. 이때 토티가설재는 토티 공사 등을 위해 일시적으로 설치했다가 철거하는 목재제품을, 일반용재는 일반적으로 사용하는 각재와 판재를, 구조용재는 구조용 집성재인 글루랩(Glued Laminated Timber, 구조용 집성재) 생산을 각각 가정하였다.

재제품별 부가가치를 나타낸다. 모든 시나리오에서 임령이 증가함에 따라 재제품으로 생산 가능한 재적이 늘어나고 이에 따라 부가가치도 증가하는 것을 확인할 수 있다.

시나리오별 달라지는 부가가치를 살펴보면, 일반용재와 구조용재를 함께 생산하는 시나리오 3에서 가장 큰 부가가치가 발생하고, 토티가설재만 생산하는 시나리오 1에서 부가가치가 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 토티가설재만 생산할 때보다 일반용재를 생산하는 경우 제품가치가 약 6배 증가하고, 일반용재와 구조용재를 함께 생산하는 경우 약 8배까지 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 일반용재와 구조용재를 함께 생산하는 경우에 경제적 효과가 가장 높음을 확인할 수 있다. 특히, 시나리오 2와 3의 경우 40년까지는 생산되는 제품의 부가가치가 동일하였으나 40년 이후부터 차이가 나타났다. 이는 흉고직경이 26cm 이상이 되는 40년생 이후부터 구조용재 생산이 가능해지면서 그 부가가치가 크게 증가하였기 때문이다(Table 3).

III. 연구결과

1. 제품별 부가가치

Figure 4는 낙엽송 1ha를 수확하여 생산할 수 있는 목

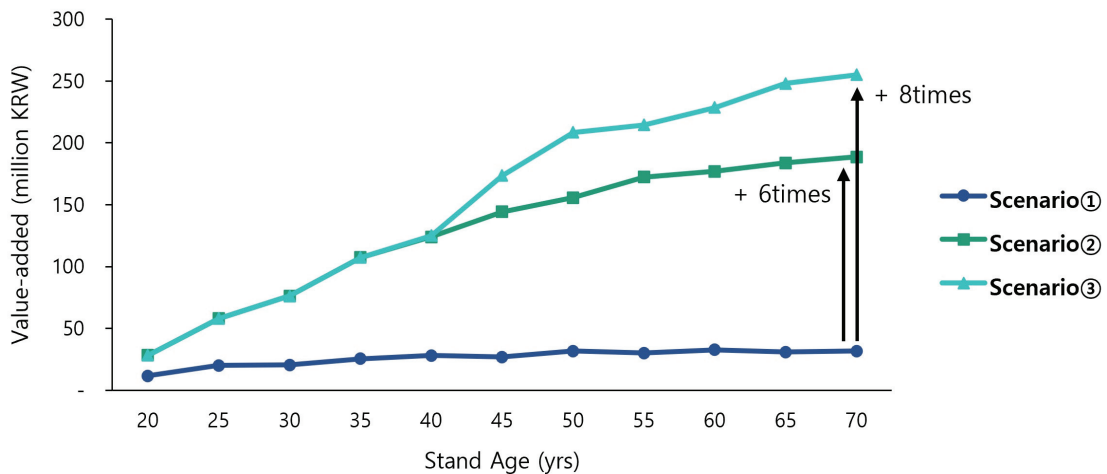


Figure 4. Value-added (million KRW per ha) from wood production by scenario

Table 3. Dimensions and unit prices by wood products

Uses of Sawn Timber	Dimensions (mm)			Unit Price per Product (KRW)	Unit Price per Sai* (KRW)
	Thickness	Width	Length		
Structural Timber	30	210	3,600	48,000	7,069
	38	140	3,600	24,500	4,273
Sawn Timber	20	200	3,600	21,000	4,871
	38	235	3,600	45,000	4,675
	15	95	3,600	7,000	4,558
	38	89	3,600	15,500	4,252
	38	184	3,600	32,000	4,246
	38	38	3,600	6,500	4,176
	89	89	3,600	65,000	4,100
	140	140	3,600	85,000	4,024
	89	140	3,600	54,000	4,021
	180	180	3,600	140,000	4,009
	Supporting Materials	30	65	3,600	3,000
27		27	3,600	1,100	1,400
81		81	3,600	9,300	1,315

*The "Sai" refers to the traditional Korean wood trading unit, representing a bundle of logs measuring 3.03 cm x 3.03 cm x 30.3 cm each.

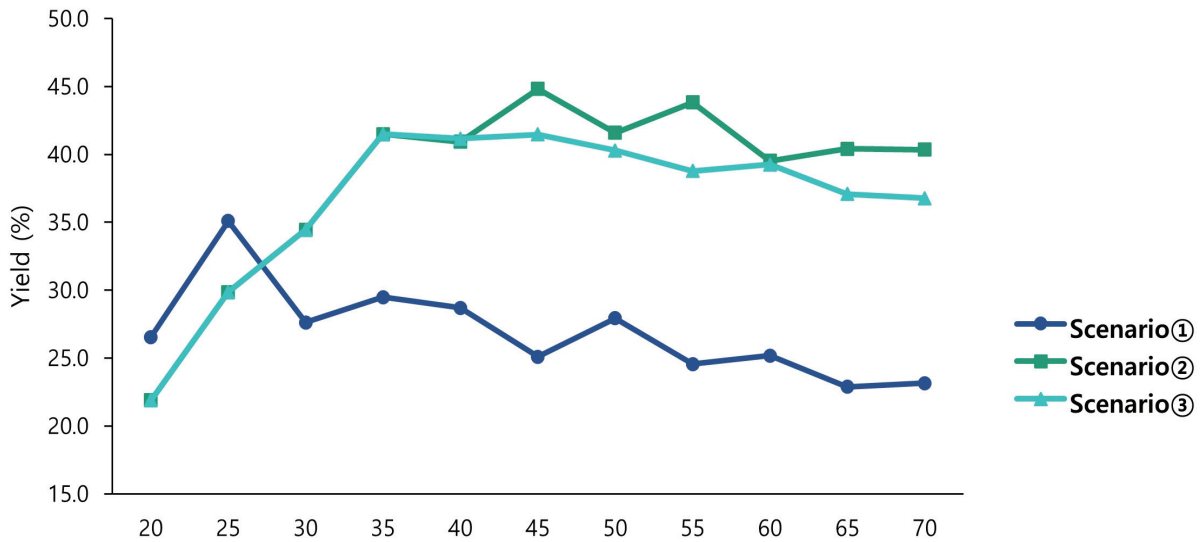


Figure 5. Recovery rate of wood products by scenario

2. 제품별 수율

이용 시나리오에 따른 제품별 수율을 분석한 결과, 개체목의 크기가 상대적으로 작은 25년생 이하 임분에서는 토평가설재를 생산하는 시나리오 1이 시나리오 2, 3보다 더 높은 수율을 나타내었다(Figure 5). 그러나 개체목의 크기가 커지는 30년생 이후 부터는 일반용재와 구조용재를 생산하는 시나리오 2와 3의 수율이 시나리오 1보다

높게 나타났다. 또한 45년생 이상부터는 시나리오 2의 수율이 가장 높았는데, 이는 일반용재와 구조용재를 함께 생산하게 되면서 구조용재 규격을 맞추기 위하여 수율에서 일정 부분 손실이 발생한 결과로 보인다. 하지만 앞에서 분석한 바와 같이 구조용재를 생산할 경우 수율은 낮아지더라도 생산되는 제품의 부가가치가 높아지기 때문에 전체적인 제품 생산 수익은 증가할 수 있는 것으로 판단된다.

Table 5. Product dimensions and value-added (KRW per ha) for scenario 2 and 3

Stand Age (yrs)	Scenario 2			Scenario 3		
	Dimensions (mm)	Quantity (pcs)	Total Value-added (KRW per ha)	Dimensions (mm)	Quantity (pcs)	Total Value-added (KRW per ha)
20	38 X 89 X 3600	1	22,000	38 X 89 X 3600	1	22,000
	38 X 38 X 3600	1		38 X 38 X 3600	1	
25	15 X 95 X 3600	8	62,500	15 X 95 X 3600	8	62,500
	38 X 38 X 3600	1		38 X 38 X 3600	1	
30	89 X 140 X 3600	1	104,500	89 X 140 X 3600	1	104,500
	15 X 95 X 3600	5		15 X 95 X 3600	5	
	38 X 89 X 3600	1		38 X 89 X 3600	1	
35	140 X 140 X 3600	1	180,500	140 X 140 X 3600	1	180,500
	89 X 140 X 3600	1		89 X 140 X 3600	1	
	89 X 89 X 3600	1		89 X 89 X 3600	1	
	38 X 38 X 3600	1		38 X 38 X 3600	1	
40	184 X 38 X 3600	3	243,000	38 X 140 X 3600	4	245,000
	140 X 140 X 3600	1		140 X 140 X 3600	1	
	38 X 89 X 3600	4		38 X 89 X 3600	4	
45	180 X 180 X 3600	1	320,500	30 X 210 X 3600	4	385,500
	140 X 140 X 3600	1		38 X 140 X 3600	4	
	89 X 140 X 3600	1		89 X 140 X 3600	1	
	89 X 89 X 3600	1		89 X 89 X 3600	1	
	38 X 38 X 3600	1		38 X 38 X 3600	1	
50	20 X 200 X 3600	7	381,500	30 X 210 X 3600	8	510,500
	89 X 140 X 3600	2		140 X 140 X 3600	1	
	140 X 140 X 3600	1		15 X 95 X 3600	5	
	15 X 95 X 3600	5		38 X 38 X 3600	1	
	38 X 38 X 3600	1				
55	38 X 235 X 3600	4	458,000	30 X 210 X 3600	9	570,000
	180 X 180 X 3600	1		140 X 140 X 3600	1	
	140 X 140 X 3600	1		38 X 89 X 3600	3	
	38 X 89 X 3600	3		38 X 38 X 3600	1	
	38 X 38 X 3600	1				
60	20 X 200 X 3600	16	501,500	30 X 210 X 3600	10	647,500
	184 X 38 X 3600	3		38 X 140 X 3600	4	
	89 X 140 X 3600	1		89 X 140 X 3600	1	
	38 X 89 X 3600	1		38 X 89 X 3600	1	
65	38 X 235 X 3600	5	549,500	30 X 210 X 3600	14	741,500
	20 X 200 X 3600	7		89 X 140 X 3600	1	
	89 X 140 X 3600	3		38 X 89 X 3600	1	
	38 X 89 X 3600	1				
70	38 X 235 X 3600	9	588,000	30 X 210 X 3600	15	795,000
	89 X 140 X 3600	3		89 X 140 X 3600	1	
	15 X 95 X 3600	3		15 X 95 X 3600	3	

IV. 고찰 및 결론

우리나라는 전 세계적으로 성공한 조림 국가로 꼽히지만, 아직까지 대부분 목재를 수입에 의존하고 있다. 본 연구는 국산목재의 이용량을 늘릴 수 있는 방안을 모색해 보고자 낙엽송 원목의 이용 방식에 따른 부가가치 변화를 분석해 보았다. 분석 결과, 개체목의 크기가 커지면서 일반용재와 구조용재를 생산하는 시나리오에서 토목가설재를 생산하는 경우에 비해 부가가치가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 이번 분석에서는 하나의 개체목에서도 원목의 말구직경의 크기에 따라 생산 가능한 제품이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 낙엽송의 경우 흉고직경이 26cm 이상에서 구조용 제재목을 생산할 수 있는 것으로 분석되었는데, 이때에도 모든 원목에서 구조용재를 생산할 수 있는 것이 아니라 조제된 원목의 크기에 따라 생산 가능한 목재제품이 달라지는 것으로 나타났다. 이에 따라 원목의 용도를 구분하여 국산원목을 목재로 활용할때의 부가가치를 높일 수 있는 이용체계를 구축할 필요가 있다.

따라서 실제 현장에 원목의 용도 구분을 어떻게 적용할 것인가에 대한 구체적인 방안을 모색해야 한다. 실제 임분에서는 동일한 크기의 나무가 집단적으로 생육하고 있는 것이 아니라 다양한 크기의 나무가 혼재해 있기 때문에 수확 시 생산되는 원목을 용도에 따라 구분하고 이를 필요로 하는 수요처에 공급하는 것이 국산목재의 가치사슬 제고에 필요하다.

실제로 미국 등 임업 선진국에서는 조제된 원목을 토장(landing)에서 분류하여 수요처가 원하는 규격을 구분하여 공급하고 있다. 그러나 국내 현실에서는 임도 주변에 원목을 분류할 만한 공간을 찾기가 어렵고, 특히 고부가가치 목재 생산을 위해 가선집재 등의 새로운 방식을 적용할 경우 집재기 인근에서 원목의 조제와 분류를 동시에 할 수 있는 공간을 마련하는 것이 쉽지는 않으므로, 원목을 용도 구분을 포함한 수확공학적 측면에서 가장 효율적인 집재·운송 시스템을 검토하는 것이 필요하다.

국산 목재의 가치를 극대화하고 임업 분야의 경쟁력을 높이기 위해서는 다양한 전략적 접근과 체계적인 관리 시스템이 필요하다. 이를 위해 선진국의 목재이용 방식과 목재수확시스템 등을 참고하면서, 우리나라의 특성과 현실을 고려한 실용적이고 효과적인 방안을 모색해 나가야 한다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 연구과제'(FM0200-2022-02-2024) '의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Jang, E.K. 2021. The ecological efficiency of wood resources utilization - focusing on carbon storage effects for climate change mitigation in Korea. PhD dissertation. Seoul National University, Seoul. p. 134.
- Korea Forest Service. 2021. Forest Sector Strategy for Achieving Carbon Neutrality by 2050. p. 31.
- Korea Forest Service. 2022. 2021 Market Survey of Timber Products. p. 642.
- Korea Forest Service. 2023. 2022 Market Survey of Timber Products. p. 597.
- Kwon, K.B., Han, H., Seol, A., Chung, H.J., and Chung, J.S. 2013. Development of a Wood Recovery Estimation Model for the Tree Conversion Processes of *Larix kaempferi*. Journal of Korean Forest Society 102(4): 484-490.
- Kyung Min Industrial. 2023. Introduction to Products - Glulam (GLULAM). kmbeam.co.kr. (2023.09.25).
- National Forestry Cooperative Federation. 2023. Wood Products - Lumber and Boards. woodkorea.or.kr. (2023.09.25).
- National Institute of Forest Science. 2021. Volume and Biomass of Standing Trees and Yield Tables. p. 401.

- Received 13 December 2024
- Finally Revised 25 December 2024
- Accepted 27 December 2024

부산물의 고부가가치 이용 측면에서의 열처리된 신갈나무 목재칩의 물리적 특성

장윤성* · 권순길
국립산림과학원 산림경영연구과

Physical Properties of Heat-treated Oak Wood Chip in Terms of High Value-added Utilization of Byproduct

Yoon-Seong Chang* · Soon Gil Kwon

Forest Management Research Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Republic of Korea

요약 : 본 연구는 산림부산물의 고부가가치 이용을 위한 에너지 및 고부가가치 물질 추출 시 필요한 재료 내 수분 조절 및 표면적에 대한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해, 대류가열처리 및 전도가열 급해압처리된 신갈나무(*Quercus mongolica*) 목재칩 및 목분의 형태학적 변화와 흡방습성을 평가하였다. 분석 결과, 무처리재에 비해 대류가열처리재에서는 도관 요소 사이의 유연벽공 및 단벽공의 폐색을 관찰하였다. 전도가열 급해압처리된 시료에서는 열압에 의한 조직의 압축과 섬유배향각에 따라 벽공파괴가 일어난 것을 확인하였다. 또한 열처리 조건별 수분 흡탈착곡선 평가 결과, 평형함수율은 무처리재>전도가열 급해압처리>대류가열처리의 순으로 높게 나타났다. 전도가열 급해압처리재는 대류가열처리재에 비해 상대적으로 단시간 동안 고온에 노출되어 대류가열처리재에 비해 상대적으로 높은 평형함수율을 보이고 동일 상대습도 조건에서 큰 흡방습성을 보인 것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 전도가열 급해압처리되는 미이용 산림바이오매스의 비표면적 증대를 가져와 바이오에탄올 생산 및 리파이너리 공정 시 투입되는 화학물질 및 생물학적 시료와의 반응성을 높일 것으로 판단된다. 또한 외기조건 변화에 따른 평형함수율 평가를 통한 원료의 수분제어로 부산물의 저장안정성, 가공품질과 제품성을 향상시킬 것으로 기대된다.

ABSTRACT : This study aimed to provide basic data on moisture control and specific surface area in materials essential for energy conversion and the production of high value-added materials, and promote the use of high value-added forest by-products. To achieve this, we examined the morphological changes and moisture absorption/desorption performance of *Quercus mongolica* wood chips and sawdust treated with convection heating and conduction heating rapid pressure. The analysis showed that, compared to untreated wood, convection-heated wood samples exhibited the closure of bordered fits and simple fits between vessel elements. Conduction heating rapid pressure samples showed aspirated pits due to tissue compression from thermal pressure and fiber orientation angle. In addition, moisture absorption/desorption curve evaluations under different heat treatment conditions showed that equilibrium moisture content followed the order: untreated wood > conduction heating rapid pressure-treated wood > convection-heated wood. This result suggests that conduction heating rapid pressure treated specimens, exposed to high temperatures for shorter durations than convection heated specimens, exhibit relatively high equilibrium moisture content and enhanced moisture absorption/desorption performance under identical relative humidity conditions. These findings suggest that conduction heating rapid pressure treatment increases the specific surface area of unused forest biomass, thereby improving its reactivity with chemicals and biological materials in bioethanol production and biorefinery processes. In addition, it is expected that controlling the moisture content of the raw material through the evaluation of equilibrium moisture content in response to changes in environmental conditions will improve the storage stability, processing quality, and product performance of the by-products.

Key words : Heat treatment, By-products, Oak wood, Morphological changes, Moisture absorption/desorption

Corresponding author : Yoon-Seong Chang
E-mail : jang646@korea.kr

I. 서론

화석자원의 과도한 사용으로 인한 자원고갈과 이로 인해 발생하는 기후변화가 심각한 문제로 인식됨에 따라 이를 대체하기 위한 에너지 자원을 찾기 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 관점에서 지속가능한 자원이용이 가능하고, 식량자원과 상충되지 않으며, 환경적인 측면에서 생산 시 탄소배출이 적은 산림 바이오매스의 이용이 대두되고 있다.

우리나라는 숲가꾸기 및 목재수확시 발생하는 소경재 및 가지 등 부산물을 포함한 미이용 자원이 인력투입 및 비용 등 여러 가지 이유로 인하여 효율적으로 이용되지 못하고 있는 실정이다. 특히 숲가꾸기 산물은 2022년을 기준으로 약 20%만 자원으로 활용되고 있다(Korea Forest Service, 2024). 이러한 미이용 자원을 효율적으로 이용하는 방법들을 제시하는 것은 자원 공급량 확대에 따른 목재산업의 원료난 해소와 더불어 효율적인 자원이용과 목재수확에 따른 환경부담의 최소화를 추구하는 산림순환경영 측면에서 매우 중요하다. 하지만 목질계 바이오매스는 낮은 에너지 밀도, 수집, 전처리 등 높은 생산비용뿐만 아니라 자원 내 존재하는 수분의 부적절한 관리로 인하여 원료의 저장과 보관 시 손실이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 목재의 열처리 기술에 관한 연구가 수행되었다. 목재 열처리는 목재 세포벽을 구성하는 주요 성분의 화학·구조적인 변화가 발생하는 온도 범위(160~260℃)로 가열 및 가압하여 목재의 물리·화학적 특성을 개질하는 방법을 말한다(Kim, 2016). 국내 침엽수를 대상으로 제재목의 재색변화, 흡수성, 치수안정성, 내후성 개선을 위한 열처리 연구는 다수 수행되었으나(Kang et al., 2015; Kim et al., 2010; Park et al. 2012; Yoon et al., 2008), 목재칩 및 목분에 대한 열처리 연구는 상대적으로 미미하다. 에너지원으로 이용되는 목재칩 및 목분은 열처리를 통하여 소수성 증대, 발열량 증가 뿐만 아니라 무게 감소로 인한

보관과 운송비용이 절감되는 장점을 갖게 된다(Lee and Lee, 2008).

신갈나무는 우리나라 활엽수 중 가장 많은 분포를 보이고 있는 중요한 수종이다. 우리나라에 분포하고 있는 주요 참나무류는 약 505천ha 이고, 이 중 신갈나무는 264천ha로 다른 활엽수종보다 넓은 면적을 차지하고 있으며(Korea Forest Service, 2020), 지속적으로 분포면적이 증가하고 있는 추세이다(Kang et al., 2020). 신갈나무를 비롯한 참나무류는 탄소흡수능력이 탁월하고 대체에너지원으로서의 가치가 높으며, 버섯재배용 자목 이외에 톱밥, 숯, 펄프용 칩 등 다양한 부분으로 이용되고 산림 바이오매스 자원으로서도 그 활용도가 높다(Lee and Kim, 2009). 따라서 본 연구에서는 열처리 중 대류가열처리 및 전도가열 급해압처리된 신갈나무(*Quercus mongolica*) 목재칩 및 목분의 형태학적 변화와 흡방습성능을 평가하여 에너지 및 고부가가치 물질 추출 시 필요한 재료 내 수분 조절 및 표면적에 대한 기초자료를 제공하고자 한다. 이러한 물리적 특성에 대한 평가로 부산물을 효율적으로 활용하여 자원 효율성을 높이고, 새로운 바이오제품 생산을 위한 최적 가공기술을 적용하는데 기여하고자 하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 공시 재료

본 실험에서는 경기도에 소재한 안양수목원에서 조립된 35년생 신갈나무(*Quercus mongolica*) 입목을 별채하고 이를 파쇄하여 칩 형태로 제조하였다. 준비된 칩의 일부를 40mesh 크기의 목분으로 분쇄(Cutting Mill pulverisette 15, FRITSCHE GmbH, Germany)하여 실험에 사용하였다. 준비된 목재칩과 목분을 대류가열처리장치를 이용하여 처리온도 210℃, 처리시간 2hr 동안 대류가열처리하여 열처리 시료를 제작하고, 전도가열 급해압장치를 이용하여

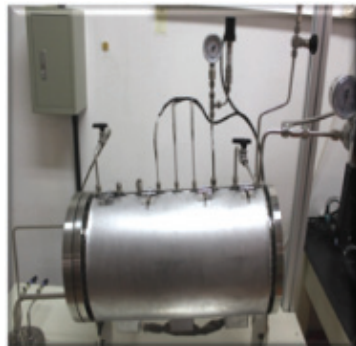


Figure 1. Convection heating treatment device (left) and conduction heating rapid pressure treatment device (right)

처리온도 210℃, 처리시간 10초 동안 열압 후 급속해압처리하였다.

2. 실험방법

1) 형태학적 변화 특성

미이용 산림바이오매스의 바이오리파이너리 등 고부가가치 이용을 위해서는 물리·화학적인 전처리를 통한 반응성 증대가 필요하다. 이를 위하여, 대류가열처리 및 전도가열급해압 처리된 목재칩과 목분의 형태학적 변화 특성을 관찰하였다. 주사전자현미경(SUPRA 55VP, Carl Zeiss)을 이용하여 시료를 백금코팅한 후, 열 및 열압에 의한 목재표면의 미세구조 변화를 관찰하였다. 또한 대류가열처리 및 전도가열급해압 처리된 목재칩과 목분을 Ball milling기로 분쇄하여 제품 수율과 관련 있는 입자 크기 및 입자분포를 관찰하였다.

2) 흡방습성능 변화 특성

열처리된 목재칩과 목분 시료를 알루미늄 접시에 3g씩 정량하여 무처리, 대류가열처리, 전도가열 급해압처리의 처리조건별로 3개씩 반복하여, 총 18개(=2×3×3)를 준비하였다. 이를 항온항습기를 이용하여 온도 25℃ 상대습도 30% 하에서 무게변화가 항량에 도달하여 0.01g 미만이 될 때까지 조습처리한 후, 상대습도를 9단계(30, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 100%)로 증가시키며 조습처리하고 항량에 도달한 무게를 측정하였다. 이후 동일한 방법으로 상대습도를 내려가며 무게를 측정하고, 이후 최종적으로 전건오븐을 이용하여 105℃에서 전건무게를 측정하였다. 측정된 무게값을 이용하여 평형함수율을 구하였다.

$$\text{Equilibrium moisture contents (\%)} = \frac{W_s - W_o}{W_o} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

W_s : Weight of specimen at temperature and humidity condition

W_o : Weight of specimen at oven-dried condition

III. 연구결과 및 고찰

1. 표면 미세구조 변화 분석

전도가열 급해압처리한 목재칩은 처리전 함수율 50%에서 10초간 열압처리 이후에 함수율 12%로 급격하게 감소하였다. 이는 열처리 및 가압으로 인한 시료의 표면과 내부수분의 급격한 배출이 일어난 것으로 판단된다. 또한 육안 및 측정으로 확인한 두께변화도 처리 전 평균 10mm에서 처리 후 평균 1mm로 줄어든 것을 확인하였다.

열 및 열압에 의한 목재표면의 미세구조 변화를 관찰한 결과, 무처리재에 비해 대류가열처리재에서는 도관요소 사이의 유연벽공이 막힌 것을 확인할 수 있었으며 (Figure 3a), 대류가열처리재 방사단면에서는 열에 의해 녹았다가 다시 굳어 막힌 단벽공을 관찰할 수 있었다 (Figure 3b). 전도가열 급해압처리된 시료에서는 열압에 의한 조직의 압축(Figure 3c)과 섬유배향각에 따라 벽공 파괴(Figure 3d)가 일어난 것을 확인하였다.

조건별로 열처리된 바이오매스를 Ball milling기로 분쇄하여 입자분포를 살펴보았다(Figure 4). 무처리 및 대류가열처리재에 비해 전도가열 급해압처리재의 미세입자가 가장 균일하고 입자크기가 작은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 전도가열 급해압처리하는 미이용 산림바이오매스의 비표면적 증대를 가져와 바이오 에탄올 생산 및 리파이너리 공정 시 투입되는 화학물질 및 생물학적 시료와의 반응성을 높일 것으로 판단된다. 따라서 최종제품 생산수율 향상이 기대되므로 시료의 전처리 공정으로 활용가능할 것으로 판단된다.



Figure 2. Macroscopic morphological changes of the oak chips subjected to rapid heating and pressure treatment(left: untreated, right: heat-treated)

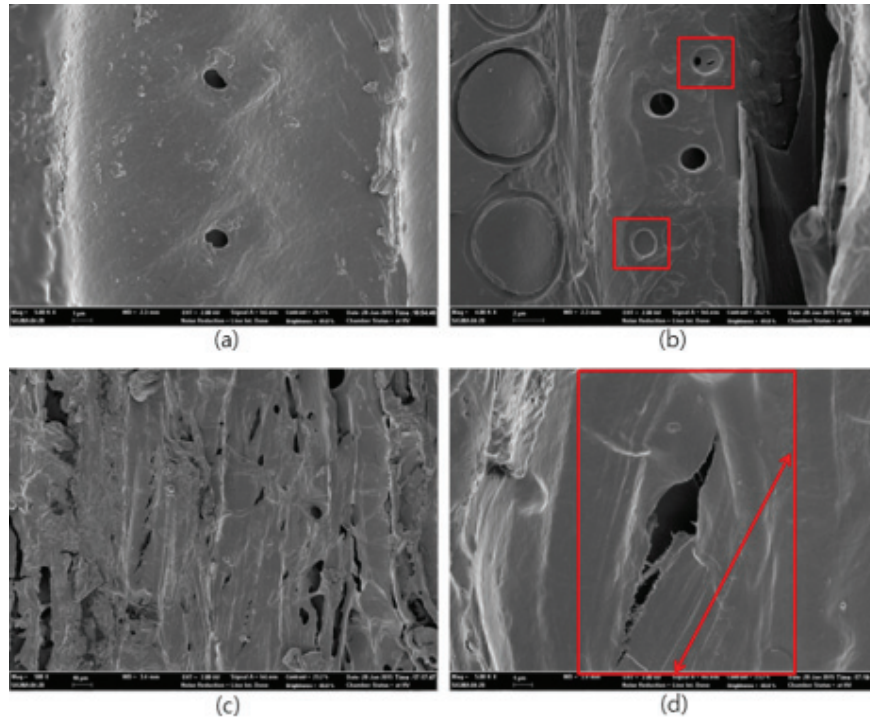


Figure 3. Surface morphology changes of heat-treated oak chips
 ((a) untreated, (b) convection heat treatment, (c), (d) conduction heating rapid pressure treatment)

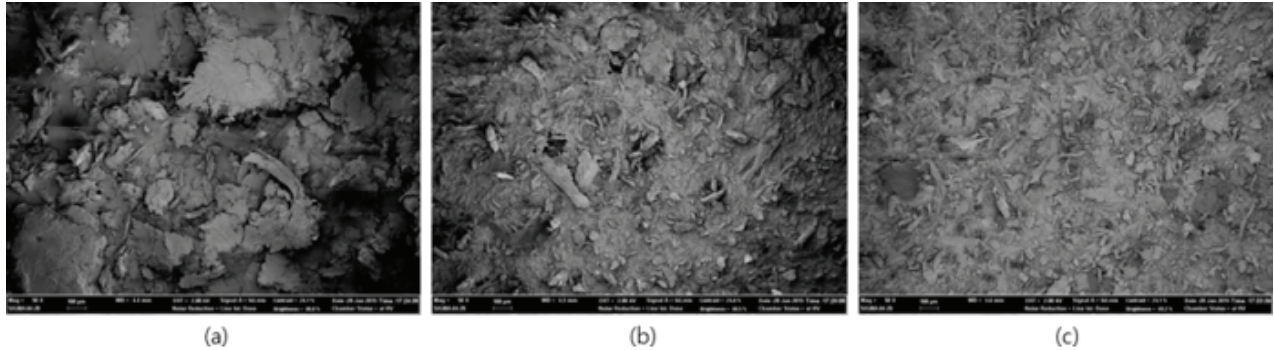


Figure 4. Surface morphology changes of milled oak wood chips after heat treatment
 ((a) untreated, (b) convection heat treatment, (c) conduction heating rapid pressure treatment)

한편, 목분을 전도가열 급해압처리했을 경우, 열압에 의한 목분 섬유간 결합을 확인할 수 있었으며, 목재칩과는 다르게 열압에 의해 벽공이 파괴되지 않고 섬유배향 각 방향으로 막힘을 확인할 수 있었다(Figure 5). 목재칩에 비해 목분은 입자크기가 작으므로 압축력이 시료의 미세구조 변화까지는 야기하지 못한 것으로 판단된다.

2. 외기조건별 평형함수율 분석

열처리 조건별 수분 흡탈착곡선을 Figure 6에 나타내었다. 평형함수율은 생재, 전도가열 급해압처리, 대류가열

처리의 순으로 높게 나타났다. 전도가열 급해압처리재는 대류가열처리재에 비해 상대적으로 단시간 동안 고온에 노출되어 대류가열처리재에 비해 상대적으로 높은 평형함수율을 보이고 동일 상대습도차에 큰 흡방습성을 보인 것으로 판단된다. 높은 상대습도(90% 이상)에서 대류가열처리재의 평형함수율과 전도가열 급해압처리된 목재칩의 평형함수율간의 차이(4%)는 목분의 경우에 비해 컸다. 전도가열 급해압처리 목재칩은 목분에 비해 열압처리되는 단면적이 작으므로 열에 의한 헤미셀룰로오스와 같은 세포벽 구성성분의 OH기 저감이 크지 않기 때문으로 생각된다.

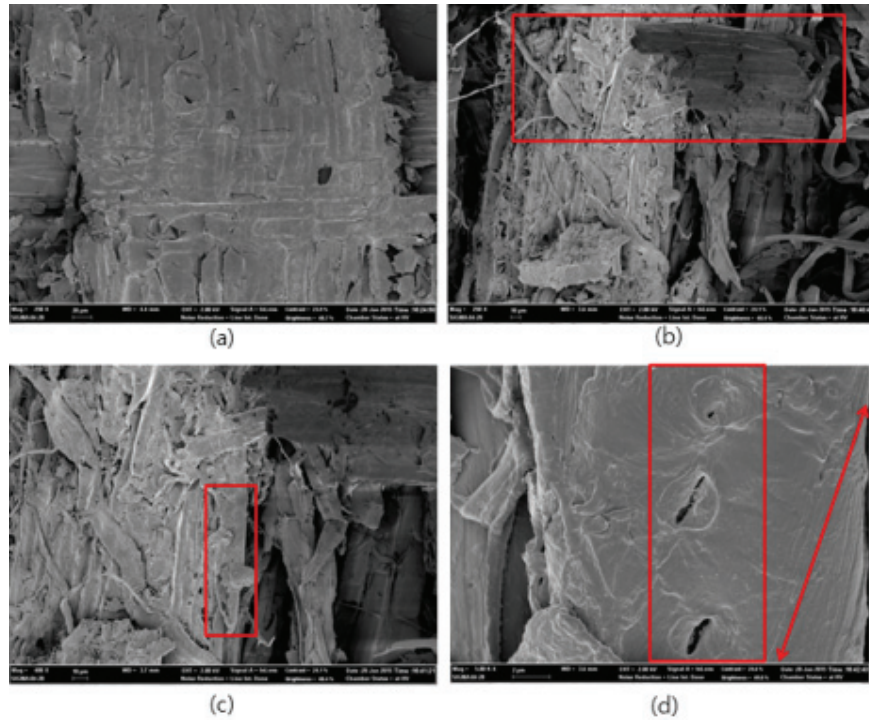
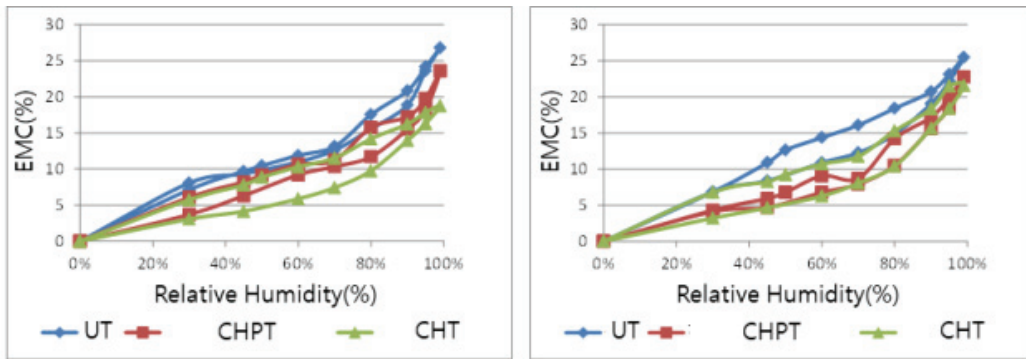


Figure 5. Surface morphology changes of heat-treated oak sawdust ((a) convection heat treatment, (b, c, d) conduction heating rapid pressure treatment)



※UT: untreated, CHPT: conduction heating rapid pressure treatment, CHT: convection heat treatment

Figure 6. Moisture absorption/desorption curves at heat treatment conditions (left: woodchip, right: sawdust)

IV. 결 론

우리나라의 산림은 70~80년대 집중적인 조림 이후, 현재 성숙기에 접어들어 본격적인 목재생산 시대에 접어들었다. 하지만 목재 자급률은 16%대에 머무르고 있으며 대부분 수입에 의존하고 있다. 이를 전환하기 위한 산림 바이오경제로의 전환이 필요하며, 기존 미이용되고 있는

수확 및 가공부산물의 고부가가치 이용이 무엇보다도 중요한 시점이다.

신갈나무는 맹아력이 강하고 성장속도가 빠르며 전국에 걸쳐 분포할 만큼 환경적응력도 우수하여 향후 자원으로로서의 이용가치가 높다. 적절한 산림관리가 수반된다면 활용도 높은 목재를 생산하여 이용가치를 증대시킬 수 있다. 다만 신갈나무는 제재목으로 이용될 수 있는 1~3등급 입목형질의 비율이 47.9%로 주요 참나무류(상수

리나무, 굴참나무, 졸참나무)에 비해 낮은 것으로 보고되었다(Chung et al., 2022). 하지만 분포 면적 및 집약도 등을 고려하면 지속적인 목재생산이 가능할 것으로 판단되므로, 펄프, 보드 및 바이오차, 연료 등으로 이용할 수 있는 소·중경재 생산의 단별기 임업경영에 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 에너지원으로 사용되는 목질계 바이오매스를 대류가열처리 및 전도가열 급해압처리하여 시편의 표면형태변화 및 수분흡방습성을 평가하였다. 열처리된 목질계 바이오매스의 평형함수율 감소는 벽공의 폐색과 같은 형태학적 변화 및 열에 의한 헤미셀룰로오스의 OH기 감소에 의한 소수성 증대에 의한 것으로 판단된다. 전도가열 급해압처리는 무처리재와 비교했을 때 물리·해부학적으로 큰 변화를 보였다. 본 연구결과를 기반으로 바이오에너지 및 리파이너리 공정에 전도가열 급해압처리된 목재칩과 목분 투입 시 투입물의 함수율 측정 및 제어가 가능할 것이라 기대되며, 미이용 산림바이오매스의 바이오리파이너리 공정 투입을 위한 전처리 공정으로 전도가열 급해압처리가 이용가능할 것으로 판단된다. 목재 부산물의 물리적 특성 분석을 통하여 바이오연료 및 바이오플라스틱과 같은 고부가가치 제품을 생산하기 위한 다양한 조건 하에서의 반응성을 예측하고 더욱 적합한 품질과 성능으로 개선할 수 있을 것이라 기대된다.

References

- Chung, S.H., Lee, S.T., and Kim, S.H. 2022. Location and growth characteristics of the *Quercus mongolica* forest. Research Report No.1004. National Institute of Forest Science.
- Kang, C.W., Lim, H.M., and Kang, H.Y. 2015. Investigation on the oil heat treatment of domestic utilization species(I). Journal of the Korea Furniture Society 26(2): 138-144.
- Kang, J.T., Ko, C.U., Moon, G.H., Lee, S.G., Lee, S.J. and Yim, J.S. 2020. Effect of tree DBH and age on stem decay in *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis*. Journal of the Korean Society of Forest Science 109(4): 492-503.
- Kim, K.M., Park, J.H., Park, B.S., Son, D.W., Park, J.S., Kim, W.S., Kim, B.N. and Shim, S.R. 2010. Physical and mechanical properties of heat-treated domestic yellow poplar. Journal of the Korean Wood Science and Technology 38(1): 17-26.
- Kim, Y.S. 2016. Research trend of the heat-treatment of wood for improvement of dimensional stability and resistance to biological degradation. Journal of the Korean Wood Science and Technology 44(3): 457-476.
- Korea Forest Service. 2024. 2022 Wood supply and demand. (<https://kna.forest.go.kr>, accessed: 2024.12.2.)
- Korea Forestry Promotion Institute. 2020. Forest type map (Scale 1:5000).
- Lee, I.J. and Lee, W.H. 2008. Analysis of structure and Physical and Chemical Properties of the Carbonized Pine Wood Powder(I). Journal of the Korean Wood Science and Technology 36(4): 44-51.
- Lee, J.K. and Kim, J.S. 2009. Profit analysis in using small diameter log of *Quercus* species. Journal of Korean Forest Society 98(1): 49-54.
- Park, Y.G., Eom, C.D., Park, J.H., Chang, Y.S., Kim, K.M., Kang, C.W. and Yeo, H. 2012. Evaluation of physical properties of Korean pine lumber heat-treated by superheated steam. Journal of the Korean Wood Science and Technology 40(4): 257-267.
- Yoon, K.J. Eom, C.D., Park, J.H., Lee, Y.W., Choi, I.G., Lee, J.J. and Yeo, H. 2008. Control of discoloration of cedar wood by heat and UV treatment. Journal of the Korean Wood Science and Technology 36(6): 33-40.

-
- Received 13 December 2024
 - Finally Revised 23 December 2024
 - Accepted 24 December 2024

Estimation and Comparison of Local Stem Volume for *Pinus densiflora* in Three Regions Using a Suitable Stem Taper Model

Jin-Taek Kang* · Yeonok Seo · Jeongmook Park · Chiung Ko

Division of Forest Management Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

ABSTRACT : This study aimed to develop local stem volume tables for Jeju, Hongcheon, and Yeongju by reflecting region-specific growth patterns and properties using stem taper equations for *Pinus densiflora*, a widely planted species throughout the country. Because current standard volume tables were created based on broad nationwide data, they may underestimate or overestimate the volume of individual trees in specific regions. To address this issue, three models (Max and Burkhart, Kozak, and Parresol *et al.*) were applied to derive the most suitable taper equation for estimating regional stem volume. The Fitness Index, Bias, and the Standard Error of Bias were used as verification statistics to evaluate the goodness of fit of each model. Among the three models, the Kozak model exhibited the highest Fitness Index for estimating the growth pattern of *Pinus densiflora* and was therefore chosen as the most suitable taper equation to generate local stem volume tables for the species. The results from these newly developed regional stem volume tables were compared with the standard stem volume tables that were constructed from nationwide growth data. The findings indicate that the local stem volume tables for Hongcheon, Yeongju, and Jeju yielded higher values than the existing standard tables, and these differences were statistically significant ($p < 0.05$). Moreover, there was a significant difference ($p < 0.05$) between Jeju and the other two regions, whereas no difference was observed between Hongcheon and Yeongju. In comparing the mean volumes among regions, Jeju exhibited the highest mean stem volume, followed by Yeongju and then Hongcheon.

Key words : Stem volume table, Stem taper equations, Local stem volume table, Kozak model

I. Introduction

Forests exhibit geographical variations in morphological, anatomical, and physiological traits depending on local environmental conditions. *Pinus densiflora*, the predominant pine species on the Korean Peninsula, is distributed from Hamgyeongbuk-do in the north (at approximately 43° 20' N latitude) to Mt. Halla in Jeju (33° 20' N latitude), and from sea level (~10 m) to around 1,300 m in elevation. Owing to its high adaptability to diverse climate conditions and biomes in Korea, *P. densiflora* occupies most of the nation's forests and has traditionally been a major source of construction and pulp materials. Uyeki (1928) classified Korean pine trees into six groups based on their shapes. For instance, he named the group near Mt. Taebaek "Gangsong" (*P. densiflora* for. *erecta*), highlighting its

superior wood quality and commercial value. Besides providing economic benefits such as timber production forests serve multiple functions, including carbon sequestration, ecosystem regeneration, and recreation. Therefore, to maximize these diverse roles, optimal forest management must be implemented. As management intensity influences the quality and structure of a stand, accurate stand-level estimations are essential.

Efforts to enhance the accuracy of forest stand estimation begin by refining the estimation of individual tree volume. Such estimations often rely on an equation that includes diameter at breast height (DBH), height (H), and form factor (F). However, because changes in form factor have minimal influence on outcomes and for certain species, no particular effect regardless of tree size (Clutter *et al.*, 1983) tree volume is generally determined by DBH and total tree height. On this basis, a standard volume table can be developed, and various methods have been proposed internationally, including form factor-based

Corresponding author : Jin-Taek Kang
Tel : +82-2-961-2881
E-mail : beg8bune@korea.kr

methods (Park and Chung, 1985; Seo, 1998) and curve equation-based or stem taper-based approaches (Kim *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 1986). Early volume tables typically used relationships among DBH, height, and relevant empirical formulas (Chapman and Meyer, 1949; Bruce and Schumacher, 1950; Amateis and Burkhart, 1987; Demaerschalk, 1972; Hotvedt and Cao, 1985; Jeon *et al.*, 2007). Recently, advances in computational power and statistical analysis have allowed researchers to generate volume tables with improved accuracy. With the exception of pine trees, however, the volume tables currently employed in Korean forestry (Korea Forest Service, 1981) were established prior to such advancements.

Since the 1970s, Korea's forests have entered a maturation phase, and management and policy objectives for forest resources are gradually diversifying. Although some species-specific volume tables conceived in the 1960s were revised and updated in the 1980s and 2009, much of the data originates from over 40 years ago, making them less representative of current forest conditions and associated management needs. Between 1964 and 2010, the proportion of young stands in age classes II and III (i.e., 11~30 years old) decreased from 69.4% to 23% of the total forest area, while age classes IV and V increased from 22.7% to 65.6% (Korea Forest Service, 2013). Because volume tables in use are largely based on data from younger stands, applying them to today's older stands can lead to significant over- or underestimations, depending on the region. Consequently, from a forest manager's perspective, inaccurate data can hinder the development of effective management strategies.

As Korean forests continue to age, the discrepancy in stem volume among different regions has become more pronounced, and existing stem volume tables often fail to reflect the actual state of mature forests. In response, the current study developed new stem volume tables specifically for pine trees (*P. densiflora*), which cover the largest forest area in South Korea (424,668 ha; Korea

Forest Service, 2012). We derived an optimal stem taper equation for each region and then used it to create regional stem volume tables. Subsequently, these local tables were compared and analyzed against existing national data. Since 2010, various studies in the Republic of Korea have employed the Kozak model to estimate stem taper equations. Examples include the estimation of carbon storage for *P. densiflora* using Kozak-based taper equations (Kang *et al.*, 2017), the development of taper equations for *Quercus serrata* with national carbon emission coefficients (Kang *et al.*, 2015), and the establishment of stem taper equations and stem volume tables for *Chamaecyparis obtusa* in Jeju and southern coastal regions (Kang *et al.*, 2020). More recently, the Kozak model was applied to derive a stem taper equation for bamboo (Kang *et al.*, 2022), and Jang *et al.* (2023) utilized the same model to estimate the stem taper of *Quercus palustris*.

II. Materials and Methods

1. Materials

In this study, a minimum of 30 *P. densiflora* trees per region (with varying DBH classes) were selected from Hongcheon, Yeongju, and Jeju areas where pine trees are widely distributed and then felled for stem analysis. Annual growth of each sampled tree was measured, and the number of sampled trees along with their measured variables are shown in Table 1.

2. Analytical Methods

Recent stem volume tables tend not to rely on exponential or logarithmic formulas popular in the 1970s and 1980s (Korea Forest Service, 1981), but rather on the integration of a stem taper equation. This integration based method allows users to easily estimate a tree's merchantable

Table 1. Data summary of stem analysis by survey regions of *pinus densiflora* used in this study

Region	No. of Trees	DBH(cm)			Height(m)		
		Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
Hongcheon	106	12.0	44.2	27.8	6.5	26.3	17.7
Yeongju	98	8.0	59.0	31.1	3.3	32.6	20.2
Jeju	103	8.0	53.4	23.8	3.0	11.4	15.2

volume by specifying both the small end diameter and the butt end diameter. It also facilitates calculations when logs are cut into segments of several meters (Lee *et al.*, 1999). Owing to this flexibility, various models have been developed to estimate stem taper (Kim *et al.*, 1994; Shin *et al.*, 1996; Son *et al.*, 2009). In this study, we applied three stem taper models Max and Burkhart, Kozak, and Parresol *et al.* to determine the optimal equation for constructing a stem volume table. Model suitability was evaluated using statistical indicators derived from the three taper equations, and the best performing model was then

used to obtain the shape of the stem taper. Stem volume was calculated by rotating the taper curve around the central axis (Lee *et al.*, 2003; Kozak, 1988; Parresol *et al.*, 1987; Max and Burkhart, 1976).

To assess how well each stem taper equation estimates diameters at specific heights, we used test statistics including Fit Index (*FI*), Bias, Standard Error of Estimate (*SEE%*), and Mean Absolute Deviation (*MAD*) (Son *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 1999).

Of these statistical indices, *FI* is analogous to the coefficient of determination (*R*²) in regression but is not

Table 2. Taper equations selected for this study

Function	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, <i>d</i> = diameter outside bark at height (cm) <i>DBH</i> = diameter at breast height outside bark (cm) <i>h</i> = height along stem (m) <i>H</i> = total height (m) <i>b_i</i> = tree total height (m) <i>a_i</i> = function parameters inflection points (<i>i</i>=1;upper, <i>i</i>=2;lower)</p> <p style="text-align: right;"><i>I_i</i> = 1, if $h \leq a_i$ <i>I_i</i> = 0, if $h > a_i$</p>
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 <i>d</i> = tree diameter inside bark at height (cm) <i>DBH</i> = tree diameter at breast height (m) <i>h</i> = tree height along stem (m), <i>H</i> = tree total tree height(m) <i>Z</i> = relative height (=) <i>X</i> = (, = inflection point) <i>a_i</i>, <i>b_i</i> = function parameters</p>
Parresol <i>et al.</i> (1987)	$d_i = d \left(Z^2 (b_1 + b_2 Z) + (Z - a)^2 (b_3 + b_4 (Z + 2a)) \right) I^{0.5}$ <p>Where <i>d_i</i> = tree inside diameter at height <i>h</i> (cm) <i>Z</i> = (<i>H-h</i>)/<i>H</i>, <i>a</i>: join point, <i>I</i> = 1, if $Z \geq a = 0$. if $Z \leq a$ <i>a</i>, <i>b</i> = function parameters <i>h</i> = tree height along stem (m), <i>H</i> = tree total tree height(m)</p>

Table 3. Statistics for evaluating performance of taper equations

Statistics	Equation
Fitness index (<i>FI</i>)	$FI = 1 - \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (\sum (Y_i - \bar{Y})^2)$
Bias	$\bar{D} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i) / n$
Standard error of estimate as percent of the mean (<i>SEE</i>)	$SEE = \sqrt{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - p)}$
Mean absolute difference (<i>MAD</i>)	$ \bar{D} = \sum Y_i - \hat{Y}_i / n$

Where *Y_i* and \hat{Y}_i are observed and estimated of *i*-th sample tree respectively, \bar{Y} is sample mean of observed values, *n* is the number of sample trees, *p* is the number of parameters

strictly significant in nonlinear regression analysis; rather, it indicates the degree of correlation between observed and estimated values. Bias measures the average difference between estimated and observed volumes (over or underestimation), while *SEE%* represents the model's relative accuracy. *MAD* is the average absolute residual, reflecting the mean deviation of individual estimates.

III. Results and Discussion

1. Estimation of Stem Taper Equation Parameters

Stem taper equations for *P. densiflora* were estimated using three different taper models. Table 4 presents the pa-

Table 4. Parameter estimates for three taper equations by regions of Hongcheon and Yeongju for *Pinus densiflora*

Region	Model	Max and Burkhart		Kozak		Parresol. <i>et. al.</i>		
Hongcheon	Parameter	a_1	0.791435	a_0	42.501655	a	0.757252	
		a_2	0.183503	a_1	-0.637761	b_1	2.841149	
		b_1	-3.517518	a_2	1.054574	b_2	-2.346425	
		b_2	2.664500	b_1	-0.525333	b_3	-105.742615	
		b_3	-1.531044	b_2	0.552827	b_4	46.551373	
		b_4	13.890276	b_3	-1.447316			
			b_4	0.943278				
			b_5	0.063409				
		<i>FI</i>	0.87641		0.92073		0.085136	
		<i>SEE</i>	3.07851		2.46757		3.37462	
	<i>Bias</i>	0.30882		-0.01973		0.85225		
	<i>MAD</i>	1.88882		1.92665		2.25658		
Yeongju	Parameter	a_1	0.715325	a_0	1.021054	a	0.747334	
		a_2	0.163323	a_1	0.939454	b_1	2.368578	
		b_1	-3.52380	a_2	0.999953	b_2	-1.807123	
		b_2	1.746077	b_1	-0.248397	b_3	-86.423131	
		b_3	-1.829507	b_2	0.078796	b_4	38.545926	
		b_4	18.923803	b_3	-1.757936			
			b_4	0.995425				
			b_5	0.099022				
		<i>FI</i>	0.97598		0.97828		0.96773	
		<i>SEE</i>	2.11574		2.01540		2.45079	
	<i>Bias</i>	0.14623		0.03500		0.82648		
	<i>MAD</i>	1.58198		1.46198		1.86666		
Jeju	Parameter	a_1	-4.479488	a_0	1.7026520	a	0.854743	
		a_2	0.956972	a_1	0.781606	b_1	1.254265	
		b_1	57.528392	a_2	1.003558	b_2	-2.325452	
		b_2	-30.245778	b_1	0.577590	b_3	-5.658756	
		b_3	-2.189901	b_2	-0.278397	b_4	11.254875	
		b_4	31.142481	b_3	3.3802702			
			b_4	-1.420903				
			b_5	0.009721				
		<i>FI</i>	0.94712		0.97064		0.65482	
		<i>SEE</i>	2.02432		1.51256		2.18542	
	<i>Bias</i>	-0.01021		0.05764		0.34252		
	<i>MAD</i>	1.40922		1.12446		1.52463		

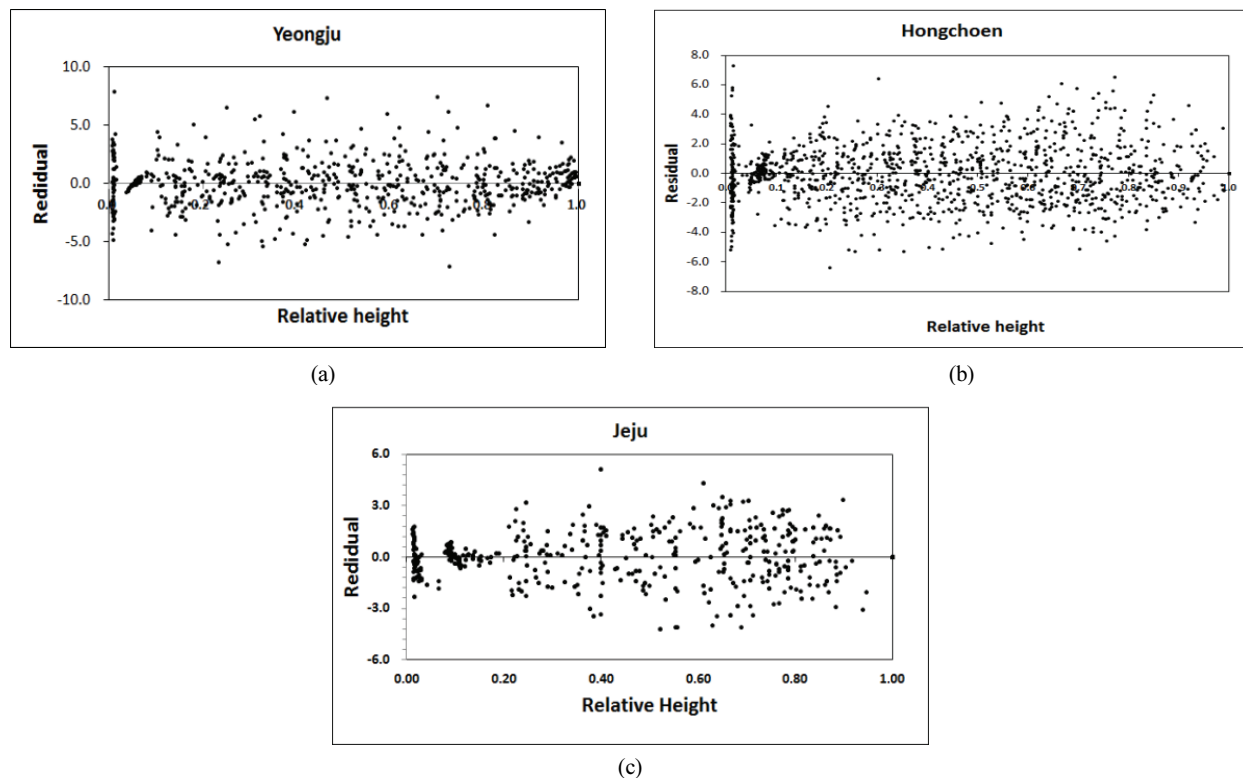


Figure 1. Residual distribution of estimated diameter by relative height of regions, Hongcheon(a), Yeongju(b) and Jeju(c) for *Pinus densiflora*

rameters and test statistics for each model.

As shown in Table 4, model adequacy was evaluated using *FI* and *Bias*, and residual plots were generated to verify whether the residuals were randomly distributed around the mean. The Kozak model demonstrated a 92% fit for Hongcheon and a 97% fit for Yeongju, alongside lower *Bias* compared to the other models, indicating superior performance (Son *et al.*, 2002, 2009, 2012; Chung *et al.*, 2010). To further verify the suitability of the Kozak model, we plotted residuals, which were evenly distributed around zero for both regions (Figure 1).

Kang *et al.* (2017) applied the Kozak model to derive an optimal stem taper equation that maximally reflects the regional growth characteristics of natural *P. densiflora*, aiming for high-accuracy carbon storage estimates. By comparing volumes generated by different stem taper equations with measured volumes, the authors found that the bark-inclusive Kozak model provided the best fit. Similarly, Jung *et al.* (2020) utilized the Kozak function (Kozak, 1988), widely adopted in the United States and Canada and frequently employed in Korea for stem volume table construction, to analyze regional growth characteristics

of *P. densiflora* in southern areas. A notable advantage of the Kozak model is its high explanatory power when using *DBH* and total tree height in a variable-exponent framework, allowing reliable diameter estimations at various heights (Ko *et al.*, 2019).

Therefore, the Kozak model excelled at explaining the stem taper of pine trees in both regions, confirming it as the most suitable equation for stem taper estimation. Consequently, we selected this model to develop the new stem volume table.

In the Kozak model, the user-defined inflection point can be chosen based on relative tree height. For Hongcheon and Yeongju, a relative height of 20% (inflection point 0.2) was appropriate (Figure 2). Kozak (1988) also reported various inflection points for different species, including 0.25 for pine, 0.30 for spruce, and 0.20 for aspen. In an analysis of stem taper equations, Son *et al.* (2012) found that inflection points for *Robinia pseudoacacia* and *Quercus acuta* in Wando, as well as *Q. acuta* in Jeju, were 0.25, 0.25, and 0.22, respectively. These results indicate that inflection points can vary by species and region (Son *et al.*, 2007).

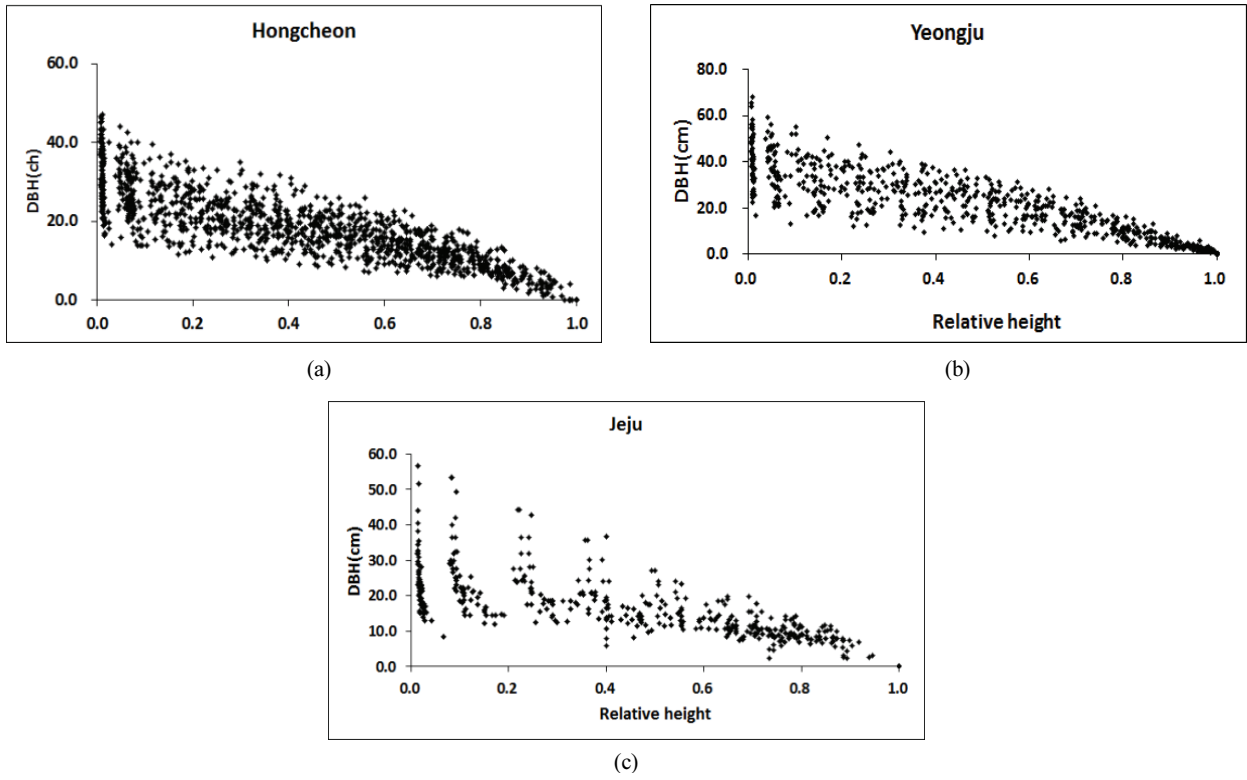


Figure 2. Distribution of estimated diameter by relative height of regions, Hongcheon(a), Yeongju(b) and Jeju(c) for *Pinus densiflora*

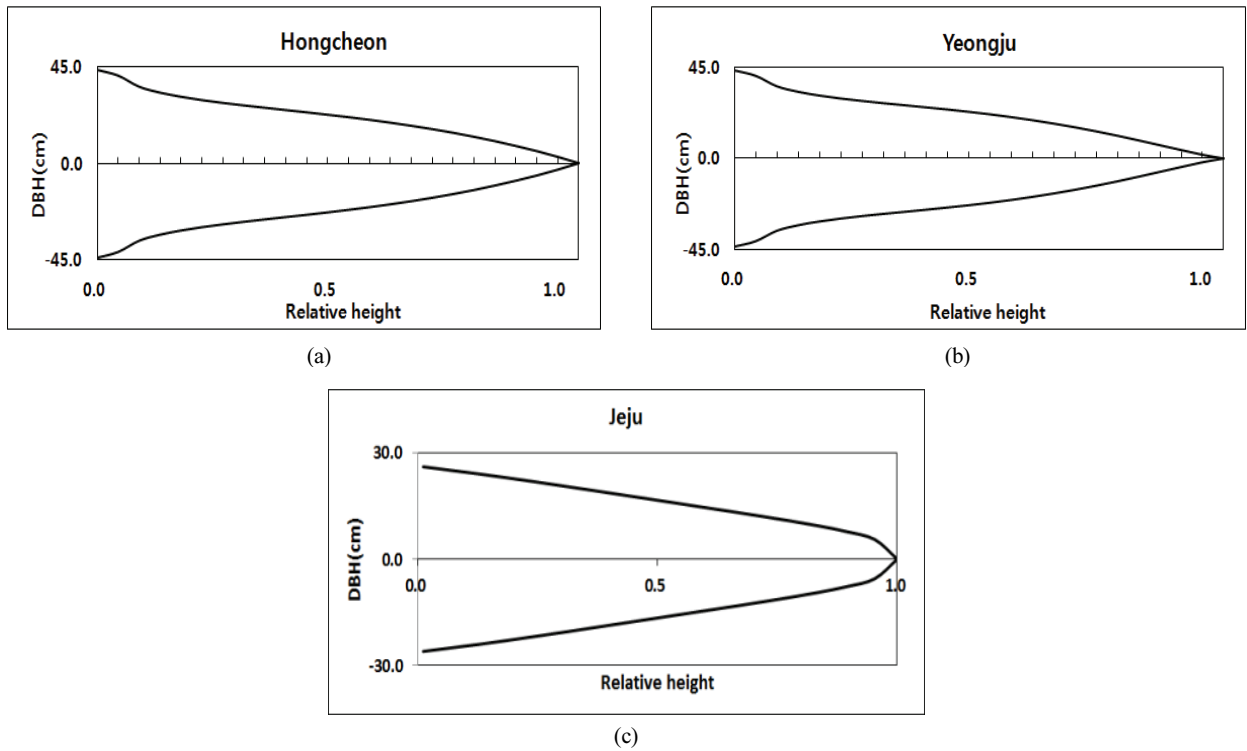


Figure 3. Stem taper curve pattern by regions of Hongcheon(a), Yeongju(b) and Jeju(c) for *Pinus densiflora*

2. Comparison Between Stem Tapers

Using parameters from the Kozak model, we plotted the stem taper of regional pine trees based on relative height (RH) (Figure 3). Although it may be difficult to precisely discern the taper visually, the diagram suggests that pine trees in Hongcheon generally have larger diameters at given heights compared to those in Yeongju. By contrast, *P. densiflora* in Yeongju exhibits a more pronounced taper, resulting in lower total volume.

3. Design of *Larix kaempferi* Stem Volume

Tables by Region

The actual stem volume of each sample tree (including bark) was calculated via the Smalian formula, using the

measured diameter and section length. Estimating volume via the stem taper equation requires first determining the relationship between diameter and height at different points. The resulting taper equation can then be used to calculate stem volumes by applying Smalian's formula in 10-cm increments (Son *et al.*, 2012). Upon comparing measured volumes with those generated by the three taper models, the Kozak equation most accurately represented bark-inclusive stem volume. Table 5 presents the stem volume table derived using the Kozak equation.

To test for differences between the existing national stem volume table and the newly created regional volume tables, a Duncan test was conducted. The results of the variance analysis are shown in Table 6.

Table 6 reveals significant differences ($p < 0.05$) between the existing volume tables for Hongcheon, Yeongju, and Jeju and those derived in this study, particularly regarding

Table 5. Local stem volume table within bark by region of, Hongcheon(a), and Yeongju(b) and Jeju(c) for *Pinus densiflora*

(Unit : D cm, H m)

(a) Hongcheon

H(m) \ D(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	0.0130	0.0216	0.0320	0.0442	0.0581	0.0737	0.0910	0.1100	0.1306	0.1529	0.1767	0.2023	0.2294
6	0.0157	0.0261	0.0387	0.0535	0.0704	0.0893	0.1102	0.1332	0.1582	0.1851	0.2141	0.2450	0.2779
7	0.0185	0.0307	0.0455	0.0628	0.0826	0.1049	0.1295	0.1565	0.1858	0.2174	0.2514	0.2877	0.3264
8	0.0212	0.0352	0.0522	0.0722	0.0949	0.1204	0.1487	0.1797	0.2134	0.2497	0.2888	0.3305	0.3749
9	0.0240	0.0398	0.0590	0.0815	0.1072	0.1360	0.1679	0.2029	0.2410	0.2820	0.3261	0.3732	0.4233
10	0.0267	0.0443	0.0657	0.0908	0.1194	0.1516	0.1872	0.2262	0.2685	0.3143	0.3634	0.4159	0.4718
11	0.0295	0.0489	0.0725	0.1001	0.1317	0.1672	0.2064	0.2494	0.2961	0.3466	0.4008	0.4587	0.5203
12	0.0322	0.0534	0.0792	0.1095	0.1440	0.1827	0.2256	0.2726	0.3237	0.3789	0.4381	0.5014	0.5688
13	0.0350	0.0580	0.0860	0.1188	0.1563	0.1983	0.2448	0.2959	0.3513	0.4112	0.4755	0.5441	0.6172
14	0.0377	0.0625	0.0928	0.1281	0.1685	0.2139	0.2641	0.3191	0.3789	0.4435	0.5128	0.5869	0.6657
15	0.0404	0.0671	0.0995	0.1375	0.1808	0.2294	0.2833	0.3423	0.4065	0.4758	0.5501	0.6296	0.7142
16	0.0435	0.0717	0.1063	0.1468	0.1931	0.2450	0.3025	0.3656	0.4341	0.5081	0.5875	0.6723	0.7627
17	0.0459	0.0762	0.1130	0.1561	0.2053	0.2606	0.3218	0.3888	0.4617	0.5404	0.6248	0.7151	0.8111
18	0.0487	0.0808	0.1198	0.1654	0.2176	0.2762	0.3410	0.4120	0.4893	0.5726	0.6622	0.7578	0.8596
19	0.0514	0.0853	0.1265	0.1748	0.2299	0.2917	0.3602	0.4353	0.5169	0.6049	0.6995	0.8005	0.9081
20	0.0539	0.0894	0.1326	0.1832	0.2409	0.3058	0.3775	0.4562	0.5417	0.6340	0.7331	0.8390	0.9517
21	0.0566	0.0940	0.1394	0.1925	0.2532	0.3213	0.3968	0.4794	0.5693	0.6663	0.7705	0.8817	1.0002
22	0.0594	0.0985	0.1461	0.2018	0.2655	0.3369	0.4160	0.5027	0.5969	0.6986	0.8078	0.9245	1.0486
23	0.0621	0.1031	0.1529	0.2112	0.2778	0.3525	0.4352	0.5259	0.6245	0.7309	0.8451	0.9672	1.0971
24	0.0649	0.1076	0.1596	0.2205	0.2900	0.3680	0.4544	0.5491	0.6521	0.7632	0.8825	1.0099	1.1456
25	0.0676	0.1122	0.1664	0.2298	0.3023	0.3836	0.4737	0.5724	0.6796	0.7955	0.9198	1.0527	1.1941

*H: Height, D: DBH

(b) Yeongju

H(m) \ D(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	0.0096	0.0130	0.0164	0.0197	0.0231	0.0265	0.0298	0.0330	0.0364	0.0398	0.0431	0.0465	0.0498
6	0.0136	0.0183	0.0231	0.0278	0.0325	0.0373	0.0420	0.0465	0.0512	0.0560	0.0607	0.0655	0.0702
7	0.0181	0.0245	0.0308	0.0371	0.0435	0.0498	0.0561	0.0621	0.0685	0.0748	0.0811	0.0874	0.0938
8	0.0233	0.0314	0.0396	0.0477	0.0558	0.0640	0.0721	0.0798	0.0880	0.0961	0.1042	0.1124	0.1205
9	0.0291	0.0392	0.0494	0.0595	0.0697	0.0798	0.0899	0.0996	0.1097	0.1199	0.1300	0.1402	0.1503
10	0.0354	0.0478	0.0602	0.0725	0.0849	0.0973	0.1096	0.1214	0.1337	0.1461	0.1585	0.1708	0.1832
11	0.0424	0.0572	0.0720	0.0867	0.1015	0.1163	0.1311	0.1451	0.1599	0.1747	0.1895	0.2043	0.2191
12	0.0499	0.0673	0.0847	0.1021	0.1195	0.1369	0.1544	0.1709	0.1883	0.2057	0.2231	0.2405	0.2579
13	0.0580	0.0782	0.0985	0.1187	0.1389	0.1591	0.1794	0.1986	0.2188	0.2391	0.2593	0.2795	0.2998
14	0.0667	0.0899	0.1132	0.1364	0.1597	0.1829	0.2062	0.2282	0.2515	0.2747	0.2980	0.3212	0.3445
15	0.0759	0.1023	0.1288	0.1553	0.1817	0.2082	0.2347	0.2598	0.2863	0.3127	0.3392	0.3657	0.3921
16	0.0856	0.1155	0.1454	0.1753	0.2051	0.2350	0.2649	0.2932	0.3231	0.3530	0.3829	0.4127	0.4426
17	0.0960	0.1294	0.1629	0.1964	0.2298	0.2633	0.2968	0.3286	0.3621	0.3955	0.4290	0.4625	0.4959
18	0.1068	0.1441	0.1813	0.2186	0.2559	0.2931	0.3304	0.3658	0.4031	0.4403	0.4776	0.5148	0.5521
19	0.1182	0.1595	0.2007	0.2419	0.2832	0.3244	0.3657	0.4049	0.4461	0.4873	0.5286	0.5698	0.6111
20	0.1302	0.1756	0.2210	0.2664	0.3118	0.3572	0.4026	0.4458	0.4912	0.5366	0.5820	0.6274	0.6728
21	0.1427	0.1924	0.2422	0.2919	0.3417	0.3915	0.4412	0.4885	0.5383	0.5880	0.6378	0.6875	0.7373
22	0.1557	0.2100	0.2643	0.3186	0.3729	0.4272	0.4815	0.5330	0.5873	0.6416	0.6959	0.7502	0.8045
23	0.1692	0.2282	0.2872	0.3463	0.4053	0.4643	0.5233	0.5794	0.6384	0.6975	0.7565	0.8155	0.8745
24	0.1833	0.2472	0.3111	0.3751	0.4390	0.5029	0.5668	0.6276	0.6915	0.7554	0.8194	0.8833	0.9472
25	0.1978	0.2669	0.3359	0.4049	0.4739	0.5429	0.6120	0.6775	0.7465	0.8156	0.8846	0.9536	1.0226

(c) Jeju

H(m) \ D(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	0.0185	0.0294	0.0423	0.0571	0.0737	0.0921	0.1123	0.1343	0.1581	0.1837	0.2112	0.2405	0.2717
6	0.0224	0.0357	0.0513	0.0691	0.0892	0.1115	0.136	0.1626	0.1915	0.2225	0.2558	0.2913	0.3291
7	0.0263	0.0419	0.0602	0.0812	0.1048	0.1310	0.1597	0.1910	0.2249	0.2613	0.3004	0.3421	0.3865
8	0.0302	0.0481	0.0691	0.0933	0.1204	0.1504	0.1834	0.2194	0.2583	0.3001	0.3450	0.3929	0.4439
9	0.0342	0.0543	0.0781	0.1053	0.1359	0.1699	0.2072	0.2477	0.2917	0.3389	0.3896	0.4437	0.5013
10	0.0381	0.0605	0.0870	0.1174	0.1515	0.1893	0.2309	0.2761	0.3250	0.3777	0.4342	0.4945	0.5587
11	0.0420	0.0668	0.0960	0.1294	0.1671	0.2088	0.2546	0.3045	0.3584	0.4165	0.4788	0.5453	0.6161
12	0.0459	0.0730	0.1049	0.1415	0.1826	0.2282	0.2783	0.3328	0.3918	0.4553	0.5234	0.5961	0.6735
13	0.0498	0.0792	0.1139	0.1536	0.1982	0.2477	0.302	0.3612	0.4252	0.4942	0.568	0.6469	0.7309
14	0.0537	0.0854	0.1228	0.1656	0.2138	0.2672	0.3258	0.3896	0.4586	0.5330	0.6126	0.6977	0.7883
15	0.0576	0.0916	0.1317	0.1777	0.2293	0.2866	0.3495	0.4179	0.492	0.5718	0.6573	0.7485	0.8457
16	0.0615	0.0978	0.1407	0.1897	0.2449	0.3061	0.3732	0.4463	0.5254	0.6106	0.7019	0.7993	0.9031
17	0.0654	0.1041	0.1496	0.2018	0.2605	0.3255	0.3969	0.4747	0.5588	0.6494	0.7465	0.8501	0.9605
18	0.0694	0.1103	0.1586	0.2139	0.2760	0.345	0.4206	0.5030	0.5922	0.6882	0.7911	0.9010	1.0179
19	0.0733	0.1165	0.1675	0.2259	0.2916	0.3644	0.4444	0.5314	0.6256	0.7270	0.8357	0.9518	1.0753
20	0.0768	0.1221	0.1755	0.2368	0.3056	0.3819	0.4657	0.5569	0.6557	0.7619	0.8758	0.9975	1.1270
21	0.0807	0.1283	0.1845	0.2488	0.3212	0.4014	0.4894	0.5853	0.6891	0.8007	0.9205	1.0483	1.1844
22	0.0846	0.1345	0.1934	0.2609	0.3367	0.4208	0.5131	0.6137	0.7224	0.8395	0.9651	1.0991	1.2418
23	0.0885	0.1408	0.2024	0.2730	0.3523	0.4403	0.5369	0.642	0.7558	0.8784	1.0097	1.1499	1.2992
24	0.0924	0.1470	0.2113	0.2850	0.3679	0.4597	0.5606	0.6704	0.7892	0.9172	1.0543	1.2007	1.3566
25	0.0963	0.1532	0.2203	0.2971	0.3834	0.4792	0.5843	0.6988	0.8226	0.9560	1.0989	1.2515	1.4140

Table 6. Duncan's multiple range test among stem volume table

Regions	Mean	N	Duncan Grouping	p-value
Hongcheon	0.9923	713	B	<0.05
Yeongju	1.0137	713	B	
Jeju	1.1751	713	A	

stem volume per DBH and tree height (Korea Forest Research Institute, 2009). Jeju exhibited notably significant differences compared to Hongcheon and Yeongju (Table 6). Although individual tree volumes may not differ drastically from previously reported estimates, the total volume per hectare can show large discrepancies. Such differences can lead to insufficient data for sound forest management and to inaccurate valuations of domestic timber resources, potentially impacting national or private property assessments.

IV. Conclusion

By integrating diameter measurements at various stem heights and three commonly used taper equations, we developed local stem volume tables for *Larix kaempferi*, the second most predominant conifer species in South Korea after pine (*P. densiflora*). The principal findings and implications are as follows:

Among the three stem taper equations (Max and Burkhart, Kozak, Parresol *et al.*), the Kozak model yielded the best results in terms of the goodness of fit index and other statistical measures for local *L. kaempferi* stands. Based on the Kozak model, diameter values at each stem segment were calculated, and these segment volumes were summed using Smalian's formula to obtain total stem volume. Compared with existing stem volume tables, the newly derived values were higher in all three regions.

Although no statistically significant difference was found between the two interregional volume tables, mean values did differ slightly. Overall, the results significantly diverged from existing tables, indicating a need for region specific volume tables.

Stem volume tables are essential for assessing the economic value of stands and for compiling accurate forest resource statistics. Given the variations in growth conditions both latitudinal and elevational even the same species can exhibit different stem growth patterns. Hence, the demand

for region-specific stem volume tables is likely to increase, serving as a critical management tool in timber production and precise carbon stock estimation.

References

- Amateis, R. L., Burkhart, H. E. 1987: Cubic-foot volume equations for loblolly pine trees in cutover, site prepared plantations. SJAF: 185-189.
- Bae, E. J., Son, Y. M., Kang, J. T. 2022. Estimation of Stem Taper Equations and Stem Volume Table for *Phyllostachys pubescens* Mazel in South Korea. J. Forest Sci. 111(4): 622-629.
- Bennett, F. A., McGee, C. E., Clutter, J. L. 1959. Yield of old-field slash pine plantations. USDA For. Serv. S.E. Far. Exp. Stn. Paper No. 107.
- 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.
- Bruce, D., Schumacher, F. X. 1950. Forest mensuration. 3rd ed. McGraw-Hill, New York.
- Bruce, D., Max, T. A. 1989. Use of profile equations in tree volume estimation. USDA General Technical Report PNW-GTR-263:213-220.
- Burkhart, H. E., Parker, R. C., Strub, M. R., Oderward, R. G. 1972. Yield of old-field loblolly pine plantations. Va. Poly. Inst. and State Univ. Pub. FWS-3-72: 51.
- Chapman, H. H., Meyer, W. H. 1949. forest mensuration. McGraw-Hill, New York.
- Chung, Y. G., Kim, D. H., Kim, C. M. 2010. Development of Stem Profile and Taper Equation for *Quercus acuta* in Jeju Experiment Forests. Jour. Korean. For. Soc. 99(1): 57-61.
- Clutter, J. R., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., Bailey, R. L. 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons, Inc. 333.

- Demaerschalk, J. P. 1972: Converting volume equations to compatible taper equations. *For. Sci.* 18(3): 241-246.
- Gal, J., Bella, I. E. 1994. New stem taper functions for 12 Saskatchewan timber species. *Can. For. Serv., Northeast Reg., North. For. Cent., Information Report Nor-x-338.*
- Hotvedt, J. E., Cao, Q. V. 1985: Tree volume and stem-profile functions for Bald cypress. *SJAF* 9: 227-232.
- Jang, Y. H., Kang, J. T., Yim, J. S. and Lee, Y. J. 2023. Estimation of Stem Taper Models in *the Quercus palustris* in Central Korea. *Journal of Agriculture & Life Science.* 57(1): 51-59.
- Jeon, B. H., Lee, S. H., Lee, Y. J., Kim, H., Kang, H. M. 2007. Estimation of Site Index and Stem Volume Equations for *Larix leptolepis* Stand in Jinan, Chonbuk. *Jour. Korean For. Soc.* 96(1): 40-47.
- Jung, S. y, Lee, K. S. and Park, J. H. 2020. Current Growth Characteristics of *Pinus densiflora* in the Southern Region, Korea. *Journal of Agriculture & Life Science.* 54(6): 11-19.
- Kan, J. T., Ko, C. U., 2020. The Development of a Stem Taper Equation and a Stem Table for Standing Trees of *Chamaecyparis obtusa* on Jeju Island and in the Southern Regions of South Korea. *Journal of Korean Island.* 32(4): 221-233.
- Kang, J. T., Son, Y. M, Jeon, J. H., and Lee., S J., 2017. Assessment of Carbon Stock and Uptake by Estimation of Stem Taper Equation for *Pinus densiflora* in Korea. *Journal of Climate Change Research.* 8(4): 415-422.
- Kang, J. T., Son, Y. M, Jeon, J. H., and You, B. H., You. 2015. Estimation of Carbon Stock by Development of Stem Taper Equation and Carbon Emission Factors for *Quercus serrata*. *Journal of Climate Change Research.* 6(4): 357-366.
- Kim, J. S., Lee, W. K. Byun, W. H. 1994. Regional Stem Curve and Volume Function Model of *Pinus densiflora* in Kangwon-Province. *Jour. Korean for. Soc.* 83(4): 521-530.
- Kim, Y. W. and Lee, H. K. 1986. Study of Stem Volume Table of *Pinus thunbergii* in the southern Part of Korea. *Jour. For. Sci.* 33: 35-46.
- Ko C. U., Kim, D. G. and Kang, J. T. 2019. Estimating stem volume table of *Quercus acutissima* in South Korea using variable exponent equation. *J. Korean Soc. For. Sci.* 108: 357-363.
- Korea Forest Research Institute. 2009. Stem Volume Table. 261pp.
- Korea Forestry Service. 2013. Assessment of the Korea's Forest Resources. 59pp.
- Korea Forest Service. 1981. Forestry Technology. 1362pp.
- Korea Forest Service. 2012. Statistical Yearbook of forestry. p88.
- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. *Can. J. For. Res.* 18: 1363-1368.
- Lee, K. H., Son, Y. M., Chung, Y. G., Lee, W. K. 1999. A Taper and Volume Prediction System for *Pinus densiflora* in Kangwon Province, Korea. *Korea Forestry Research Institute* 62: 155-166.
- Lee, W. K., J. H., Seo, Y. M. Son, K. H. Lee and K. V. Gadow. 2003. Modelling stem profiles for *Pinus densiflora* in Korea. *Forest Ecology and Management* 172(1): 69-77.
- Max, T. A. Burkhart, H. E. 1976. Segmented polynomial regression applied taper equations. *Forest Science* 22(3): 283-289.
- Park, N. C. and Chung, Y. G. 1985. Studies on the Determination of the Breast-Height Form Factors for Stem of *Pinus thunbergii* and *Cryptomeria japonica*. *Jour. Korea For. Soc.* 70: 28-37.
- Parresol, B. R, Hotvedt J. E. and Cao Q. V. 1987. A volume and taper prediction system for bold cypress. *Can. J. For. Res.* 17: 250-259.
- Seo. J. W. 1998. Studies on Estimation of Stand form Factor for Red Pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) Stands—Focusing on Stands in Kwangwon Province. *Jour. Korean For. Measur.* 1:12-26.
- Shin, M, Y., Yun, J. W., Cha, D. S. 1996. Local Correction of Tree Volume Equation for *Larix leptolepis* by Rati-of-Means Estimator. *Jour. Korean For. Soc.* 85(1): 56-65.
- Smalley, G. W. Bower, D. R. 1968. Volume tables and point factors for loblolly pines in plantations on abandoned fields in Tennessee, Alabama, and Georgia highlands, USDA For. Serv. South For. Exp. Stn. Res. Paper SO-32: 13.
- Son, Y. M., Kim, H., Lee, H. Y., Kim, C. M., Kim, C. S., Kim, J. W., Joo, R. W., Lee, K. H. 2009. Taper Equations and Stem Volume Table of *Eucalyptus pellita* and *Acacia mangium* Plantations in Indonesia. *Jour. Korean for. Soc.* 98(6): 633-638.
- Son, Y. M., Jeon, J. H., Pyo, J. K., Kim, K. N., Kim, S. W., Lee, S. J., Lee, K. H. 2012. Development of Stem Volume Table for *Robinia Pseudoacacia* Using Kozak's

Stem Profile Model. Jour. Agri. & Life Sci. 46(6): 43-49.

Son, Y. M., Lee, K. H., Kim, R. H., Seo, J. H. 2007. Development of Stem Profile and Taper Equation for *Quercus acuta* in Wando. Jour. Korean For. Meas. 10:1-6.

Son, Y. M., Lee, K. H., Lee, W. K., Kwon, S. D. 2002.

Stem Taper Equations for Six Major Tree Species in Korea. Jour. Korean For. Soc. 91(2): 213-218.

-
- Received 13 December 2024
 - Finally Revised 24 December 2024
 - Accepted 26 December 2024

산림경영정보학회지 임원 명단

편집위원회	위원장	박주원(경북대학교)
	위 원	강진택(국립산림과학원), 곽두안(순천대학교), 김문일(평택대학교), 김성용(안동대학교), 김현준(전남대학교), 박진우(강원대학교), 원현규(국립산림과학원), 정왕기(충남대학교), 한 희(서울대학교)
연구윤리위원회	위원장	김형호(경상대학교)
	위 원	임종수(국립산림과학원), 조장환(원광대학교)
고 문		이동섭, 신만용, 정주상, 이우균, 이경학, 정영교, 김철민, 최정기, 이영진, 이상현
회 장		이정수(강원대학교)
부회장		이원희(산림청), 배재수(국립산림과학원), 최돈하(한국임업진흥원), 이성권(산림조합중앙회), 박현재(산림조합중앙회), 김진(한국산지보전협회), 조현국(한국산지환경조사연구회)
이 사		원명수(국립산림과학원), 강진택(국립산림과학원), 지동훈(한국임업진흥원), 최고미(산림조합중앙회), 최인규(한국산지환경조사연구회), 송정은(한국산지보전협회)
감 사		박정목(국립산림과학원), 곽두안(순천대학교)
간 사		이용규(강원대학교)

ISSN 2636-0098

산림경영정보학회지 제14권 제2호

2024년 12월 31일 인쇄

2024년 12월 31일 발행

발행인 : 이정수

발행처 : 사단법인 산림경영정보학회

주 소 : (34417) 대전광역시 대덕구 동서대로 1800, 산림조합중앙회 산림자원조사본부 3층 산림경영정보학회

메 일 : ksfmi20@hanmail.net

홈페이지 : <https://ksfmi.co.kr/>

인 쇄 : 한국학술정보(주)