

38년 간 장기모니터링을 통한 잣나무 인공림의 생장변화 분석

정상현^{ID¹} · 이대성^{ID²} · 진희준^{ID¹} · 서영완^{ID³} · 최정기^{ID^{1*}}

¹강원대학교 산림경영학과, ²핀란드 자연자원연구원, ³강원대학교 산림과학연구소

Analysis of Growth Changes in Korean White Pine Plantations over 38 Years of Long-term Monitoring

Sanghyun Jung^{ID¹}, Daesung Lee^{ID²}, Heejun Jin^{ID¹}, Yeongwan Seo^{ID³} and Jungkee Choi^{ID^{1*}}

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

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

³Institute of Forest Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

요약: 본 연구는 잣나무 인공림의 영구표준지 3개소를 1981년부터 2021년까지 9회 반복 조사한 장기모니터링 자료를 활용하여 생장 변화를 분석하고자 수행되었다. 이들 표준지는 시기를 달리하여 1-2차 간벌이 시행되었고, 조사시기별로 흉고 직경과 수고가 측정되어 개체목의 흉고직경, 수고, 흉고단면적, 재적생장 변화를 분석하고, 임분단위별로는 흉고단면적, 재적, 임분밀도(SDI), 상대밀도(RD), 임목축적도(%Stocking), 지위지수, 형상비를 분석하였다. 개체목의 경우 지위가 좋고 간벌강도가 높은 표준지에서 모든 인자의 생장이 좋은 것으로 나타났으며 임분단위에서는 본수가 많은 표준지가 흉고단면적과 재적이 가장 높은 것으로 파악되었다. 1-2차 간벌량이 가장 많은 표준지(47년생 기준)에서 대경목(흉고직경 30cm 이상)이 73% 이상으로 가장 높은 비율을 차지했으며 형상비도 안정적이고 상대밀도도 낮아 자연고사목이 가장 적은 것으로 나타났다. 간벌시기와 간벌량 선정은 대경목 목재생산을 위해 필수적임을 시사하는 바가 크며 앞으로 잣나무 경제림 육성을 위해 다양한 간벌 모니터링 연구가 활성화되길 기대한다.

Abstract: This study was conducted to analyze the changes in growth in three permanent plots of *Pinus koraiensis* plantations using long-term monitoring data. The plots were investigated nine times from 1981 to 2021. In these plots, the first and second thinning were conducted at different times, with measurements of DBH and height collected during each inventory period to analyze changes in diameter at breast height (DBH), height, basal area, and volume growth at the individual tree level and basal area, volume, stand density index, relative density (RD), %Stocking, site index, and height-to-diameter ratio at the stand level. For individual trees, all variables of growth were observed to be higher in the plot with a superior site index and heavier thinning intensity, whereas at the stand level, the plot with the greatest number of trees exhibited the highest basal area and volume. In the plot with the highest thinning during the first and second thinning (47 years old), more than 73% trees were large-diameter trees (DBH over 30 cm), with a stable height-to-diameter ratio and low relative density, resulting in the lowest mortality. The timing and intensity of thinning are crucial for the production of large-diameter timber, suggesting the necessity for further research into various thinning methods to enhance the management of *P. koraiensis* plantations.

Key words: *Pinus koraiensis*, height-diameter ratio, mortality, thinning intensity, height-diameter allometry, stand density

* Corresponding author

E-mail: jungkee@kangwon.ac.kr

ORCID

Sanghyun Jung ^{ID} https://orcid.org/0009-0001-1481-5839

Daesung Lee ^{ID} https://orcid.org/0000-0003-1586-9385

Heejun Jin ^{ID} https://orcid.org/0009-0001-9483-7877

Yeongwan Seo ^{ID} https://orcid.org/0000-0002-0009-9675

Jungkee Choi ^{ID} https://orcid.org/0000-0001-8205-267X

서론

잣나무(*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.)는 우리나라 주요 조림수종 중 하나로 침엽수림 면적의 6.5%를 차지한다(Korea Forest Service, 2023a). 잣나무는 우수한 목재와 종자의 활용성으로 인해 1970년대부터 많은 양이 조림되었으며, 경제적 가치가 매우 높은 것으로 알려져 있다(Korea

Forest Research Institute, 2012). 잣나무 목재는 제재, 합판, 펄프 등 다양한 용도를 가지고 있으며, 최근 5년간 조림면적은 1,196 ha로 그 활용도는 높다(Korea Forest Research Institute, 2012; Korea Forest Service, 2023a).

우리나라 경제수종의 장기모니터링은 임목 및 임분생장을 파악하기 위해 필수적이며, 또한 생장 예측 정확성을 높여 임분수확량을 산정하는데 기여한다(Choi et al., 2014). 이러한 자료는 효율적인 시업매뉴얼을 제작하고, 체계적인 산림경영계획을 수립하는데 중요한 역할을 한다(Pretzsch et al., 2019). 특히, 임업선진국에서는 정확도 높은 임분 및 개체목 생장수확모델 개발을 위해 장기 모니터링 자료를 활용한 연구가 지속적으로 추진되고 있다(Buckman, 1962; Sullivan and Clutter, 1972; Burkhart, 2008; Hu et al., 2020; Pretzsch, 2021).

반면 우리나라는 장기 모니터링을 통한 생장 자료가 임업선진국에 비해 부족한 실정이다. 간벌에 따른 생장변화와 생장수확모델 연구가 수행되기도 하였으나, 임분생장 주기 및 벌기령에 비해 모니터링 기간이 매우 짧다는 연구한계가 존재한다(Choi et al., 2014; Lee et al., 2015a; Lee and Choi, 2022; Lee et al., 2022; Seo et al., 2023). 특히, 목재생산량을 대상으로 하는 주요 경제수종을 연구함에도 불구하고, 많은 연구가 국가산림자원조사 데이터에만 의존하고 있는 실정이다. 국가산림자원조사 자료는 국가단위의 산림자원량 파악을 우선적인 목적으로 표본점이 설계되었기 때문에 인공림의 시업체계에 따른 개체목 생장변화를 파악하기엔 어려움이 있다. 즉, 인공림을 대상으로 한 시업별 표준지로부터 장기간 데이터를 수집하고 분석하는 임분생장 수확 연구가 필요하다.

이러한 배경에서 잣나무림의 목재생산을 위해 체계적인 시업체계 및 방법이 지속적으로 요구됨에 따라 장기 모니터링을 통해 생장변화를 파악하는 연구가 필요하다(Seo et al., 2018; Lee et al., 2022; Jung et al., 2022; Lee and Choi, 2022). 따라서 본 연구는 잣나무 인공림의 생장변화

에 관한 기초자료를 제공하기 위해 9차 반복 모니터링 자료를 이용하여 임령별 흉고직경, 수고, 흉고단면적, 재적 생장변화를 분석하고 나아가 임분밀도, 임지생산성과 안정성을 진단하고 목재수확량을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구대상지는 강원대학교 학술림 내 위치한 잣나무 인공림 3개소이며, 행정구역상 강원도 춘천시 동산면에 소재하고 있다. 개소별로 1972년, 1976년, 1975년에 잣나무가 조림되었으며, 각각 1981년, 1981년, 1984년에 0.25 ha(50 m × 50 m)의 크기로 영구표준지가 설치되어 2020년, 2020년, 2021년까지 9회 반복조사 되었다. 최종 조사 시기인 9차 조사 시점 기준 표준지1, 2, 3의 평균 흉고직경은 각각 24.1 cm, 22.8 cm, 30.3 cm였으며, 평균 수고는 20.0 m, 17.4 m, 21.5 m였다.

각 영구표준지는 2차례 간벌이 실시되었는데, 1차 간벌은 임목의 생육공간 확보를 위하여 정량 및 정성을 고려한 하층간벌이 수행되었다. 2차 간벌 또한 피압목과 열세목 위주로 벌채목이 선정되었고 현지 여건에 따라 측정 후 1-2년 사이에 재선충 방제를 위해 임목간격을 고려하여 간벌이 실시되었다(Table 1). 이에 따라 간벌목의 평균 흉고직경을 간벌 전 모든 임목의 평균 흉고직경으로 나눈 비(Thinning quotient)에서 나타나듯이 1차 및 2차 간벌은 모두 1보다 낮은 하층간벌로 진행되었다. 흉고단면적 기준 간벌강도는 1차 간벌의 경우 표준지3에서 28.4%로 가장 높았고, 2차 간벌의 경우 표준지 간 큰 차이가 없었다.

2. 조사인자 및 측정방법

잣나무 인공림의 생장변화를 분석하기 위하여 각 표준지는 총 9차례 조사되었으며, 본 연구에 이용된 조사인자는 수종, 흉고직경, 수고, 고사여부이다. 표준지 내 모든

Table 1. Thinning intensity by experimental plot in Korean white pine plantations.

Experimental plot	Thinned age	1st thinning					2nd thinning				
		No. of trees before thinning (trees/ha)	Thinning intensity (%)		No. of trees after thinning (trees/ha)	Thinning quotient	Thinned age	No. of trees before thinning (trees/ha)	Thinning intensity (%)		No. of trees after thinning (trees/ha)
			Stem number basis	Basal area basis					Stem number basis	Basal area basis	
1	19	2372	30.6	13.1	1591	0.638	45	1153	27.1	29.2	699
2	15	2020	19.9	12.5	1599	0.759	41	1464	26.3	28.2	904
3	25	2273	64.5	43.5	805	0.867	38	782	40.2	28.2	465

Note : Thinning quotient is the quotient between the mean diameter of removed trees and the mean diameter of all trees before thinning.

입목을 측정하였으며, 진계목은 발생하지 않아 기존 입목만을 대상으로 하였다. 표준지1, 2의 경우 6차 조사(1997년)까지 줄자를 이용하여 흉고둘레를 측정하였으며, 표준지3은 3차 조사(1999년)까지 윤척을 이용하여 흉고직경을 측정하였다. 이후 조사부터는 직경테이프를 이용하여 흉고직경을 측정하였다. 따라서, 초기 측정 시기에 흉고둘레로 측정된 자료는 원주율(π)을 통해 흉고직경으로 환산하여 본 연구에 활용하였다. 수고측정의 경우 수고봉과 Suunto 클리노미터를 초기 조사시기에 이용하였고, 표준지1, 2는 7차 조사(2010년) 이후, 표준지3은 4차 조사(2004년) 이후부터 Haglof사의 Vertex 수고측정기를 이용하였다.

3. 분석방법

본 연구에서는 잣나무 인공림의 성장변화를 파악하고자 현장에서 수집된 측정자료를 바탕으로 성장인자를 산출하였다. 수간재적 추정을 위해 Table 2의 이변수 재적모델을 사용하였다(Lee et al., 2017). 연평균성장량(Mean annual increment, MAI)은 총생장량을 임령으로 나누어 계산되었다. 우세목 수고는 표준지 내 상위 20%에 해당하는 개체목 수고의 평균을 통해 산출하였으며, 지위지수(Site index, SI)는 우세목 수고와 기준임령 40년을 이용하여 추정하였다(Lee and Choi, 2022). 형상비(Height-Diameter ratio, HD ratio)는 흉고직경에 대한 수고의 백분율로 계산되었다. 상대밀도(Relative density, RD)는 Lee and Choi(2019)가 제시한 임분밀도지수(Stand density index, SDI)와 최대임분밀도지수(Maximum stand density index, SDI_{max})의 비를 활용하였으며, 입목축적도(%Stocking)는 Lee and Choi (2020)의 식을 통해 산출하였다.

개체목의 성장변화 분석 시 흉고직경, 수고, 흉고단면적, 재적에 대한 총생장량과 연평균성장량(MAI)을 Seo et al. (2023)가 제시한 모델과 비교분석하였다(Table 2). 임분흉고단면적과 임분재적의 비교를 위해 National Institute of Forest Science(2021)의 잣나무 현실림 임분수확표와 Lee and Choi(2022)의 가변밀도수확모델을 활용하였다.

흉고직경에 따른 수고의 성장 추세를 파악하기 위하여 표준지별로 전체자료를 이용하여 Chapman-Richards 함수를, 조사 차수별로는 $\ln(H) = a + b \times \ln(D)$ 형식을 활용하여 수고곡선을 도출하였다(Richards, 1959; Chapman, 1961). 수고곡선의 적합성을 검정하기 위하여, 결정계수(R^2)를 산출하였으며, 수고생장의 비교분석을 위하여 Lee(2015)의 잣나무 수고곡선식을 활용하였다. 본 연구의 모든 통계분석 및 모델 파라미터 추정은 통계 소프트웨어인 R 프로그램을 통해 수행되었다.

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

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$\hat{H}$: Predicted height (m); a, b, c: Parameters for the formula; e: Base of natural logarithm; D: Diameter (cm) at breast height above 1.2 m from the ground; R^2 : Coefficient of determination; y_i : The observed value of sample i ; $\hat{y}_i$: The predicted value of the sample i ; $\bar{y}$: The observed average value; n: The number of samples.

Table 2. The computed variables and equations applied in the present study.

Variables	Equations	References
Volume (V, m^3)	$V = 0.01097 + 0.00003772D^2H$	Lee et al. (2017)
Site index (SI, m)	$SI = H_d \left(\frac{1 - e^{-0.0370A}}{1 - e^{-0.0370A_0}} \right)^{1.5956}$	Lee and Choi (2022)
Stand density index (SDI, trees/ha)	$SDI = TPH \times \left(\frac{25}{D_q} \right)^{-1.2141}$	Lee and Choi (2019)
Relative density (RD)	$RD = \frac{SDI}{SDI_{max}} (SDI_{max} = 1089 \text{ trees/ha})$	
%Stocking	$\%Stocking = \frac{TPH \times (0.9221 + 0.0951\bar{D}_q)^2}{10000} \times 100$	Lee and Choi (2020)

Note : D: Diameter (cm) at breast height above 1.2 m from the ground; H : Tree height (m); H_d : Dominant height (m); e: Base of natural logarithm; A_0 : The base age at 40 years; A : Stand age (year); TPH : Number of Trees (trees/ha); $\bar{D}_q$: Quadratic mean diameter (cm); SDI_{max} : Maximum stand density index (trees/ha at 25 cm of $\bar{D}_q$).

결과 및 고찰

1. 흉고직경과 수고 성장 변화

흉고직경 성장 변화를 각 표준지별 9차 조사 기준으로 분석한 결과, 평균 흉고직경은 표준지1에서 24.1 cm(48년생), 표준지2에서 22.8 cm(44년생), 표준지3에서 30.3 cm(47년생)이었다(Figure 1). 우리나라 대경목 기준인 흉고직경 30 cm에 도달한 표준지는 유일하게 표준지3으로 47년의 기간이 필요한 것으로 나타났다. 이 결과는 Seo et al. (2023)의 임령 42년에서 흉고직경 30 cm가 나타나는 모델보다 본 연구의 표준지 3개소 모두 이에 미치지 못하는 것으로 파악되었다. 이는 모든 수관급의 입목에 대한 흉고직경 평균값인 본 연구의 결과보다 대부분 우세목 자료를 기반으로 개발된 Seo et al.(2023)의 모델이 높을 수 밖에 없기 때문이다. 간벌에 따른 각 표준지별 흉고직경의 성장 변화가 차이가 있는지를 검토한 결과 1차 간벌 후 표준지3이 급격히 높은 성장을 보였다. 이와 같은 경향은 2차 간벌 후에도 나타났는데, 이는 표준지3이 표준지1, 2에 비해 간벌강도가 월등히 높았기 때문이며, 선행연구의 결과와 일치한다(Lee et al., 2022).

또한, 표준지별 흉고직경 연평균성장량(MAI) 변화를 파악한 결과, 흉고직경 MAI의 최대값은 표준지1에서 0.63 cm/year(25년생), 표준지2에서 0.74 cm/year(16년생), 표준지3에서 0.66 cm/year(30년생)으로 최대값에 도달한 시점

이 다른 것으로 파악되었다. 특히 표준지2의 초기 흉고직경 MAI가 다른 표준지에 비해 높은 성장을 보였는데 이는 표준지2에서 1-4차 조사 시기의 흉고직경이 다른 표준지에 비해 상대적으로 컸기 때문이다(Figure 1). 표준지3의 경우는 1-2차 간벌 후 계속 흉고직경 성장량이 상향하는 것으로 나타났다. 표준지 3개소를 종합한 결과 흉고직경 MAI는 1차 간벌 이후 최댓값을 갖고 감소하는 경향이 나타났다. 본 연구의 표준지 3개소 흉고직경 MAI를 Seo et al.(2023)의 모델과 비교했을 때 대체로 낮은 성장량을 갖는데, 그 이유는 전술한 바와 같이 Seo et al.(2023)가 우세목 자료를 사용했기 때문이다.

수고 성장의 경우 9차 조사 기준 표준지1에서 20.0 m(48년생), 표준지2에서 17.4 m(44년생), 표준지3에서 21.5 m(47년생)였다(Figure 1). 표준지1과 3의 평균 수고 값은 성장학적으로 최댓값에 근사한 것으로 판단된다(Seo et al., 2018). 표준지 3개소 모두 1차 간벌 직후에 수고 성장이 급격하게 증가한 것으로 관측되었는데 이는 하층간벌로 인해 작은 입목들이 별도로되어 상대적으로 평균 수고가 커지게 되었기 때문이다. 또한, 표준지1의 경우 38-43년생 사이에 수고 성장이 급격하게 증가한 원인도 227 본/ha의 자연고사목이 다수 발생하여 평균 수고에 영향을 주었기 때문이다. 해당 시점에서 전체 입목의 평균 수고는 14.3 m였으며, 자연고사목의 평균 수고는 10.3 m였다. 이러한 자연고사목의 발생이 평균 수고의 감소를 야기한 것으로

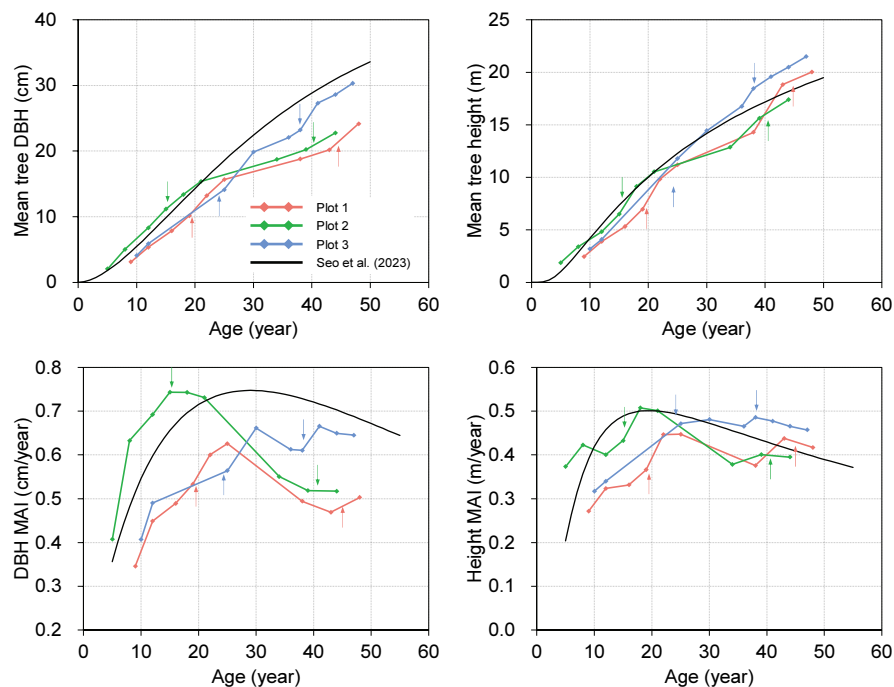


Figure 1. Individual mean tree growth and mean annual increment (MAI) of DBH and height. The year of thinning by plot is marked with the arrow.

판단된다. 표준지별 수고 연평균성장량(MAI)의 최댓값은 표준지1에서 0.45 m/year(25년생), 표준지2에서 0.51 m/year(18년생), 표준지3에서 0.49 m/year(38년생)였다. 표준지1과 2는 임령 20년 전후로 수고 MAI가 최댓값에 도달한 반면 표준지3은 임령 38년에서 가장 높은 값이 나타났다. 전체적으로 수고 생장은 흉고직경 성장과 유사한 시기에 MAI가 최고점에 도달한 이후 감소하는 경향을 보였다(Figure 1).

흉고직경에 따른 수고의 성장 변화를 파악하기 위해 각 표준지별 산점도 상에 조사차수별로 $\ln(H)=a+b \times \ln(D)$ 식을 조정하여 제시하고(빨간색), 전체자료를 이용하여 Chapman-Richards식(파란색)과 Lee(2015)가 개발한 함수식(검은색)을 각각 도시하였다(Figure 2). 조사차수별 함수식은 3개 표준지 모두 시간이 경과에 함에 따라 일정한 간격으로 평행이동하는 패턴을 보여주고 있으며, 전체자료를 이용한 Chapman-Richards 모델식과 Lee(2015)가 개발한 함수식은 모든 표준지에서 유사한 형태를 보이는 것

으로 나타났다. 흉고직경에 따른 수고의 예측은 산림사업에 있어 가장 중요한 부분으로 본 allometry model들을 활용할 때 수고의 예측정확도를 높일 수 있을 것으로 기대된다(Lee et al., 2021a).

2. 흉고단면적과 재적 성장 변화

개체목 평균 흉고단면적 생장은 흉고직경과 유사한 패턴으로 증가하였다(Figure 3). 따라서 표준지3의 흉고단면적은 흉고직경과 같이 표준지1, 2보다 1차 간벌 이후 높은 성장을 보였으며, 2차 간벌 이후 성장 차이는 더욱 커졌다. 이는 표준지3의 2차 간벌강도가 다른 표준지보다 상대적으로 높아 다른 표준지에 비해 흉고직경 및 흉고단면적 성장을 지속적으로 촉진하였기 때문이다(Table 1).

개체목 재적 성장의 경우 흉고단면적 성장의 패턴과 유사하게 나타났으며, 표준지1에서는 38년생, 표준지2에서 34년생, 표준지3에서 25년생 이후 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 특히 표준지1에서 초기 임령에는 재적 생장이 가장 낮았으나, 임령 44년을 기점으로 표준지2보다 높아지는 경향을 나타냈다. 이는 표준지1의 임분에서 자연고사의 영향으로 평균 수고가 상대적으로 높아졌기 때문이다. 본 연구의 임분에서 Seo et al.(2023)의 모델보다 모두 흉고단면적 생장이 낮은 것으로 나타났으며, 재적의 경우는 2차 간벌 이후 표준지3이 Seo et al.(2023)의 모델을 능가하는 것으로 나타났는데 이는 표준지3의 수고 생장이 월등히 좋아 재적 성장에 영향을 미친 것으로 판단된다.

흉고단면적과 재적의 MAI 변화를 분석한 결과, 흉고직경과 수고 MAI와 달리 지속적으로 증가하는 양상을 띄었다(Figure 3). 이는 선행연구에서도 유사하게 나타났는데 흉고직경, 수고와 같은 1차원적 성장과 달리 재적은 3차원적 성장을 하기 때문이다(Seo et al., 2023). 표준지1, 2의 흉고단면적 MAI는 임령 25, 21년 이후 증가하지 않았고, 흉고직경 MAI가 감소한 시점과 동일한 것으로 고려할 때 간벌강도에 따른 임분밀도의 영향일 것으로 사료된다. 즉, 간벌강도가 낮고 임분밀도가 높게 유지된 결과, 임목의 충분한 생육공간을 확보하지 못해 생장이 저하된 것으로 보인다. 재적 MAI 또한 동일한 이유로 표준지1, 2에서 증가량이 적은 것으로 판단된다. 그러나 표준지3의 재적 MAI는 월등한 수고 성장으로 인해 38년 이후 Seo et al.(2023)의 모델을 능가하는 것으로 나타났다.

임령에 따른 임분흉고단면적 생장은 9차 조사를 기준으로 표준지2에서 가장 높았다(Figure 4). 개체목 단위에서 표준지3의 생장이 가장 우수했던 것과 달리, 임분 단위에서는 표준지2의 생장이 높았던 원인은 표준지2의 임목본수가 904 본/ha으로 가장 많았기 때문이다(Table 3). 본 연

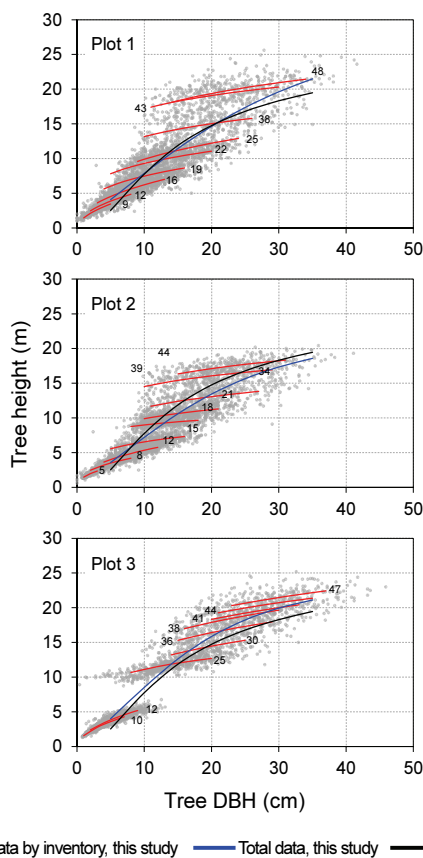


Figure 2. Height-DBH allometric curves with observations of this study. A nonlinear model was fitted to all observations and presented with the equation and the coefficient of determination. Regression lines by measurement year were fitted to observations for each stand age.

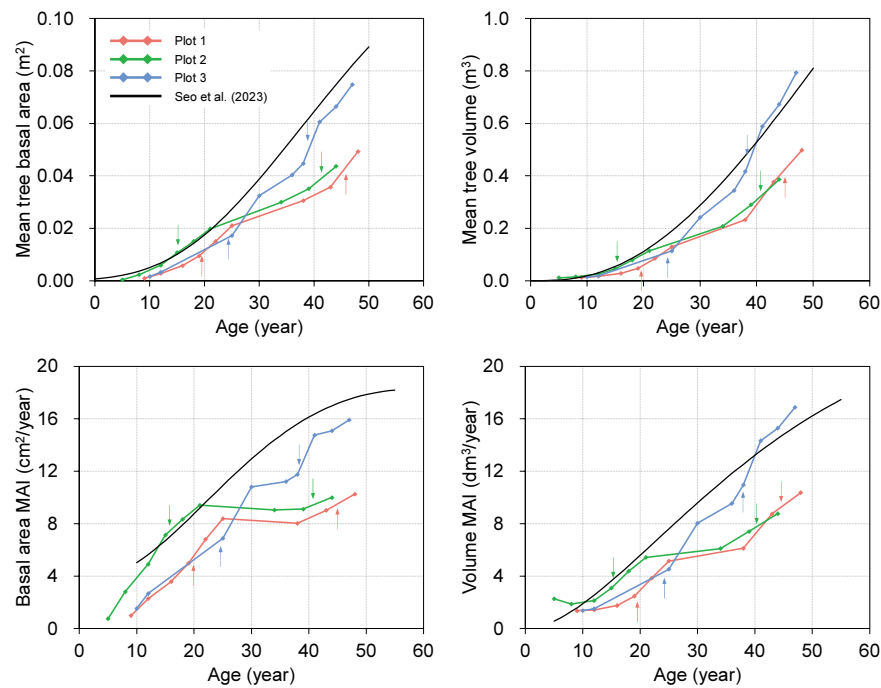


Figure 3. Individual mean tree growth and mean annual increment (MAI) of DBH and height. The year of thinning by plot is marked with the arrow.

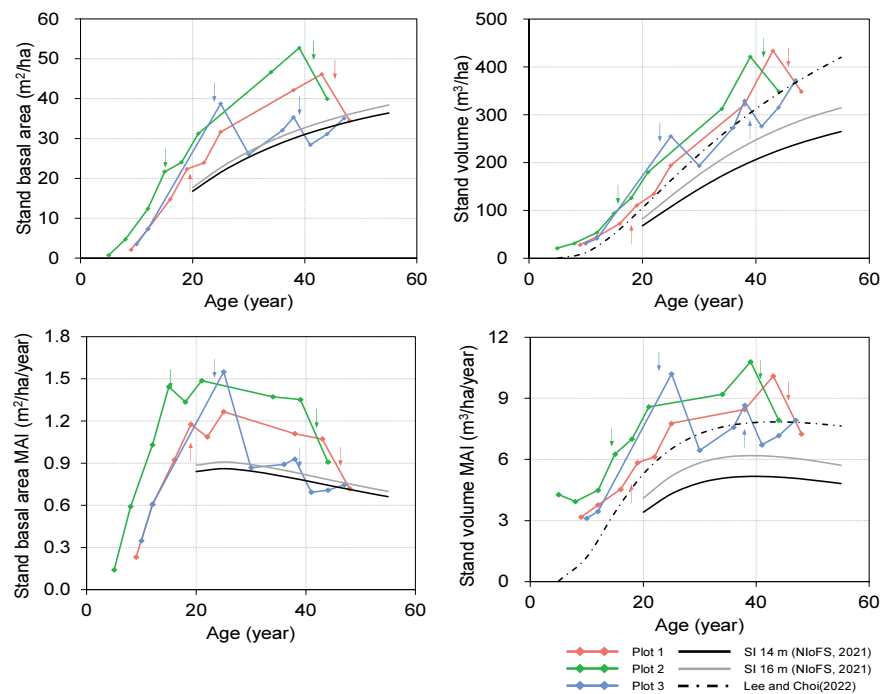


Figure 4. Stand growth and mean annual increment (MAI) of basal area and volume. The year of thinning by plot is marked with the arrow.

구에서는 국립산림과학원(NiFoS, 2021)의 지위지수와 비교를 위해 각 표준지의 우세목수고를 사용하여 지위지수를 산출하였다. 표준지1, 2, 3의 지위지수는 각각 18, 17,

20으로 나타났으며, 해당 지위지수에서 임령 30년 기준의 우세목수고는 각각 14.4 m, 13.6 m, 16.0 m였다. 이를 바탕으로 지위지수 14, 16에 대한 수확표와 비교 가능하도록

하였다. 수확표와 비교한 결과, 표준지1과 표준지2는 임령 30년 기준 임분 성장과 MAI 모두 수확표보다 높은 경향을 보였다. 반면, 표준지3은 임령 30년 이후 수확표와 유사한 패턴을 나타냈다.

임분재적 성장의 경우 임분홍고단면적의 성장 변화와 유사하였으나, 임분재적 성장과 MAI 모두 임령 38년 시점에서 표준지2는 표준지1보다 높은 성장을 보였다. 이는 앞서 개체목 재적 성장에서 언급한 바와 같이 자연고사로 인해 평균 수고값이 증가했기 때문이다. 표준지 3개소의 성장을 비교하기 위해 수확표와 더불어 Lee and Choi (2022)의 가변밀도수확모델을 활용하였다. 가변밀도수확모델은 임령, 지위지수, 상대밀도(RD)를 독립변수로 활용하는 모델로서 지위지수와 상대밀도(RD)를 본 연구자료의 9차 조사 기준 평균인 18.3, 0.7로 고정하여 비교하였다. 표준지 3개소의 임분재적 성장은 NIFoS(2021)의 수확표에 비해 전반적으로 높은 생장이 나타났다. 특히 표준지 3에서 임분홍고단면적은 수확표와 유사하였으나, 임분재적은 모든 조사차수에서 뚜렷이 높았다. 그 원인은 표준지 3의 우수한 수고 생장이 재적 성장에 영향을 미쳤기 때문이다. 반면 가변밀도수확모델은 수확표에 비해 본 연구결과에 근사한 값을 보였는데, 이는 지위지수와 밀도를 반영한 수확모델이 임분수확량을 추정하는데 정확성을 높일 수 있다는 점을 시사한다.

3. 임분밀도, 지위지수, 형상비 진단

임분밀도 진단은 양질의 목재 수확량을 극대화하기 위해 산림사업에 있어서 가장 중요한 부분이다. 이에 따라 임분밀도가 표준지 3개소의 성장 변화에 미친 영향을 파악하고자 밀도지수의 특성을 분석하였다(Table 3). 초기 조사 당시 세 개의 표준지 모두 2000본 이상의 입목이 식재되어 성장하였으며, 그 중 표준지1과 2는 유사한 본수를 유지한 반면, 표준지3은 2차례 간벌에서 강도 높은 간벌이 실시되어 465본으로 가장 적은 본수를 보였다. 또한 임분밀도지수(SDI)는 표준지1, 2보다 표준지3에서 97-244 본/ha, 상대밀도(RD)는 0.1-0.2, 임목축적도(%Stocking)는 6.7-21.6% 더 낮았다. 2차 간벌 시 홍고단면적 기준 간벌강도는 표준지별로 큰 차이가 없었으나, 1차 간벌 시 표준지3의 간벌강도는 표준지1보다 30.4%, 표준지2보다 31.0% 높았다(Table 2). 결과적으로, 표준지3의 높은 지위지수와 간벌강도, 상대적으로 낮은 임분밀도가 표준지1과 2에 비해 임목 성장을 촉진시킨 것으로 판단된다. 따라서, 표준지3의 우수한 성장은 지위와 밀도관리의 종합적인 영향에 의한 것으로 분석된다.

임령별 상대밀도(RD)의 경우 1-2차 간벌 후 전반적으로

감소하였다(Table 3). 표준지3의 상대밀도는 1차 간벌 직전을 제외한 모든 시기에서 0.8 미만으로 유지된 반면, 표준지1과 2에서는 3회에 걸쳐 상대밀도가 0.8 이상으로 나타났다. 특히, 표준지1은 최대 0.9, 표준지2는 최대 1.1까지 상승한 것으로 관측되었다. 또한 표준지3에서 임령 38년생 때 자연고사가 6 본/ha만 발생한 것에 비해, 표준지1과 2에서는 평균 91 본/ha, 39 본/ha로 많이 발생하였다. 따라서 선행연구의 결과처럼 상대밀도를 0.8 이하로 관리하면 자연고사 발생을 방지할 수 있을 것이라 사료된다(Jin, 2024; Jin et al., 2024). 표준지3에서 성장량이 우수하고 자연고사목이 발생하지 않음을 고려하면 표준지1, 2보다 표준지3의 밀도 수준을 적용한 시업체계가 합리적이라고 판단된다(Choi et al., 2014; Lee et al., 2022).

표준지 3개소의 임지생산성을 파악하고자 기준임령 40년을 통해 지위지수를 분석한 결과 표준지1에서 18, 표준지2에서 17, 표준지3에서 20으로 나타났다(Figure 5). 수고와 재적 생장이 높았던 순서는 표준지3, 1, 2로 지위지수의 순서와 동일하였다. 따라서 수고와 재적 생장이 표준지3에서 높았던 것은 지위지수의 영향일 것으로 판단된다(Figures 1 and 4). Lee and Choi(2022)의 지위지수곡선을 도시했을 때, 임령이 증가함에 따라 각 표준지의 지위지수는 항상 동일하지 않는 것으로 나타났다. 또한 임령이 증가함에 따라 수고 생장의 패턴이 변화할 뿐만 아니라 자연고사 등의 이유로 우세목 수고 성장 변화에 차이가 발생할 수 있다(Burkhart and Tomé, 2012). 이는 지위지수가 측정된 시점에 따라 변동 가능성이 있음을 보여주며, 특정 시점의 측정값만을 기반으로 지위를 산출할 경우 편차가 발생할 수 있음을 시사한다.

지위지수를 기준으로 개체목 성장을 살펴보면 지위지수가 높을수록 수고와 재적의 생장이 더 크게 나타났다(Figures 1 and 4). 선행연구에서도 지위지수는 수고, 임분재적 등 산림 성장에 높은 영향을 미치는 인자로 보고되었다(Lee and Choi, 2022; Kim et al., 2023). 본 결과와 같이 지위지수는 임지생산력을 평가하는 중요한 지표로 활용할 수 있는데, 이는 우세목 수고가 임분밀도의 영향을 적게 받으며 임지생산성을 잘 대표하기 때문이다(Kim, 2016; Yue et al., 2016; Kim et al., 2018; Lee et al., 2015b; Lee et al., 2021b). 따라서 임령, 임분밀도 뿐만 아니라 지위지수 등 다양한 요인을 바탕으로 보다 정확한 산림생장 수확모델을 개발할 필요가 있다(Lee et al., 2021a; Appiah Mensah et al., 2023; Yue et al., 2023).

목재수확 과정에서 성장 및 개체목 안정성의 척도로 활용되는 형상비를 분석한 결과, 표준지1, 2, 3 모두 60-100% 사이에서 유지되었다(Figure 6). 형상비는 1차 간벌

Table 3. Summary statistics of stand characteristics for each experimental plot in Korean white pine plantations by measurement year.

Plot 1 (Site index ^a : 18 m)					Plot 2 (Site index ^a : 17 m)					Plot 3 (Site index ^a : 20 m)				
Measure- ment year (Age)	Residual trees (trees/ha)	%Stocking	Stand density index (trees/ha)	Relative density	Measure- ment year (Age)	Residual trees (trees/ha)	%Stocking	Stand density index (trees/ha)	Relative density	Measure- ment year (Age)	Residual trees (trees/ha)	%Stocking	Stand density index (trees/ha)	Relative density
1981 (9)	2653	40	215	0.2	1981 (5)	2105	26	102	0.1	1984 (10)	2273	41	277	0.3
1984 (12)	2645	58	459	0.4	1984 (8)	2097	43	323	0.3	1986 (12)	2273	53	433	0.4
1988 (16)	2591	78	701	0.6	1988 (12)	2097	64	579	0.5	1999 (25)	2273	146	1212	1.1
1991 (19)	2372	91	871	0.8	1991 (15)	2020	84	801	0.7	1999 ^b (25)	805	86	796	0.7
1991 ^b (19)	1649	73	711	0.7	1991 ^b (15)	1618	71	681	0.6	2004 (30)	805	65	624	0.6
1994 (22)	1591	80	775	0.7	1994 (18)	1599	80	779	0.7	2010 (36)	790	75	705	0.6
1997 (25)	1507	92	899	0.8	1997 (21)	1580	93	909	0.8	2012 (38)	782	80	743	0.7
2010 (38)	1380	108	1034	0.9	2010 (34)	1506	119	1138	1.0	2012 ^c (38)	465	55	501	0.5
2015 (43)	1153	108	1017	0.9	2015 (39)	1464	128	1212	1.1	2015 (41)	465	59	530	0.5
2015 ^c (43)	799	76	712	0.7	2015 ^c (39)	1066	92	874	0.8	2018 (44)	465	64	561	0.5
2020 (48)	699	76	700	0.6	2020 (44)	904	91	847	0.8	2021 (47)	465	70	603	0.6

a : Site index is calculated by Lee and Choi (2022) with base age of 40 years.

b : After 1st thinning.c : After 2nd thinning.

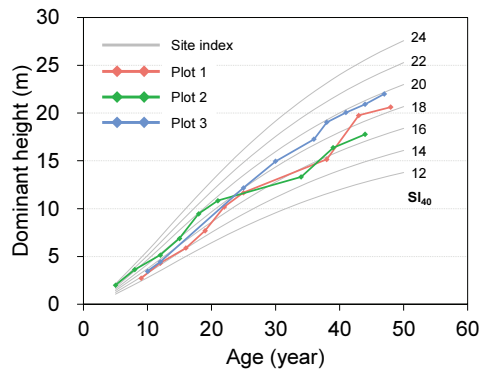


Figure 5. Trajectory of dominant height growth over age with site index curves at a base age of 40 years developed by Lee and Choi (2022).

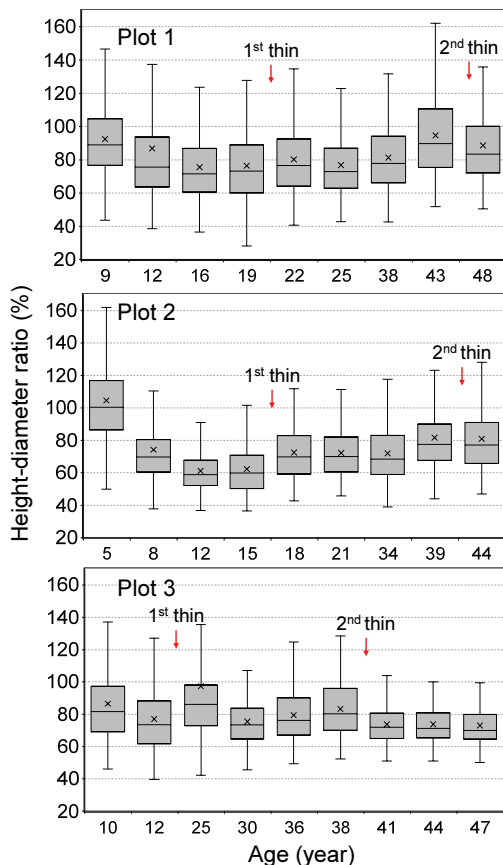


Figure 6. Box and whiskers plots of height-diameter ratio by stand age in Korean white pine plantations. The year of thinning is marked with the arrow.

이후부터 임령에 따른 형상비는 증가하다가 2차 간벌 후 전반적으로 감소하였다. 표준지 3개소의 형상비는 첫 조사 시기인 5-10년생의 경우 86%-104%였으며 1차 간벌 전은 62%-77%로 감소하였고, 1차 간벌 직후에는 73%-97%

로 증가하였다. 1차 간벌 이후인 임령 21-30년에서 하층간별로 평균 수고가 증가하여 형상비가 증가한 반면, 2차 간벌 이후인 임령 41-48년에는 수고 생장이 상대적으로 줄어들면서 형상비가 낮아진 것으로 분석되었다. 형상비의 범위가 임령에 따라 다르기 때문에 적정 형상비 기준도 임령별로 다르게 제시될 필요가 있다고 판단된다.

임분밀도와 관련하여 높은 형상비를 가진 임분은 개체목의 성장 저하, 풍해 및 설해의 피해가 높아진다고 알려져 있기 때문에 임분건정성과 수형(stem form) 관리를 위해 적정 형상비를 파악할 필요가 있다(Kim et al., 2015; NIFoS, 2015; Park, 2016; Kang et al., 2019). 특히, 표준지 1, 2는 2차 간벌 이후에도 임분밀도가 표준지3에 비해 높아 밀도조절을 통한 형상비 관리가 필요하다고 판단된다(Table 3). 이처럼 적정밀도와 형상비를 고려한 임분관리 방안이 적절히 제시된다면 양질의 목재 수확량을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 경급에 따른 목재수확량 평가

목재생산에 있어서 경급(흉고직경) 분포는 목재 품등(대경목, 중경목, 소경목 등)에 따른 수확량을 파악하기 위한 가장 핵심적인 정보이다. 따라서 본 연구에서는 표준지별로 1차 조사부터 9차 조사까지 경급분포가 어떤 양상으로 변화되었는지 파악하였다(Figure 7). 각 표준지의 조사시기별 경급분포는 모두 정규분포의 양상을 띠는 것으로 나타났다으며 고사목들은 작은 경급에서 발생하였고, 간벌목은 하층간별로 경급이 낮은 입목들이 선정되었음을 알 수 있다(Figure 7). 또한 흉고직경 30 cm에 도달하는 입목들은 최소 30년생 이상이 되어야 나타나며 표준지3에서 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다.

임령에 따라 대경목(흉고직경 30 cm 이상), 중경목(흉고직경 18-30 cm), 소경목(흉고직경 18 cm 미만)의 입목축적변화를 분석한 결과, 9차 조사 기준 표준지3에서 압도적으로 중경목과 대경목이 많이 분포하는 것으로 나타났다(Figure 8). 표준지3의 대경목의 경우 41년생부터 크게 증가하여 임령 47년생 때에는 73%까지 차지하는 것으로 나타났다. 임령과 흉고직경 연평균성장량을 고려하면 공·사유림 잣나무 벌기령(50년) 때 표준지별로 최소 50%, 40%, 75% 이상이 대경목에 도달할 것으로 사료된다(Figure 1). 표준지 1, 2에 비해 표준지3의 대경목 비율이 높았는데 이는 높은 지위지수 및 간벌강도의 영향인 것으로 판단된다.

우리나라는 목표생산재별로 임령, 흉고직경 등 다양한 조건을 고려하여 시업기준을 제시하고 있다(Korea Forest Research Institute, 2014). 이 시업체계에 따르면 우량대경재 생산(흉고직경 45 cm)을 위한 1차 간벌 기준은 임령 25년

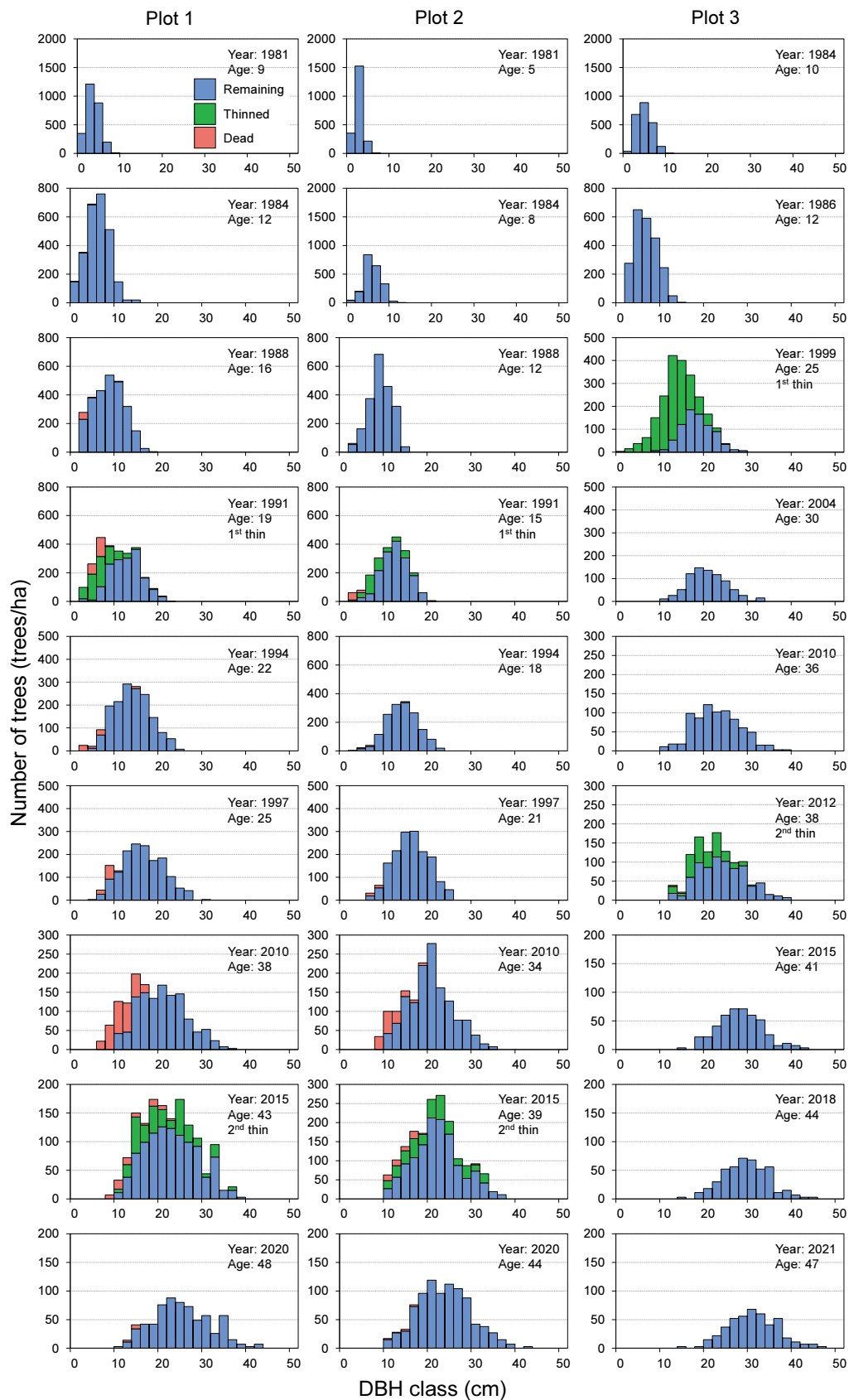


Figure 7. Histogram of diameter distribution by stand age at each of measurement year in Korean white pine plantations.

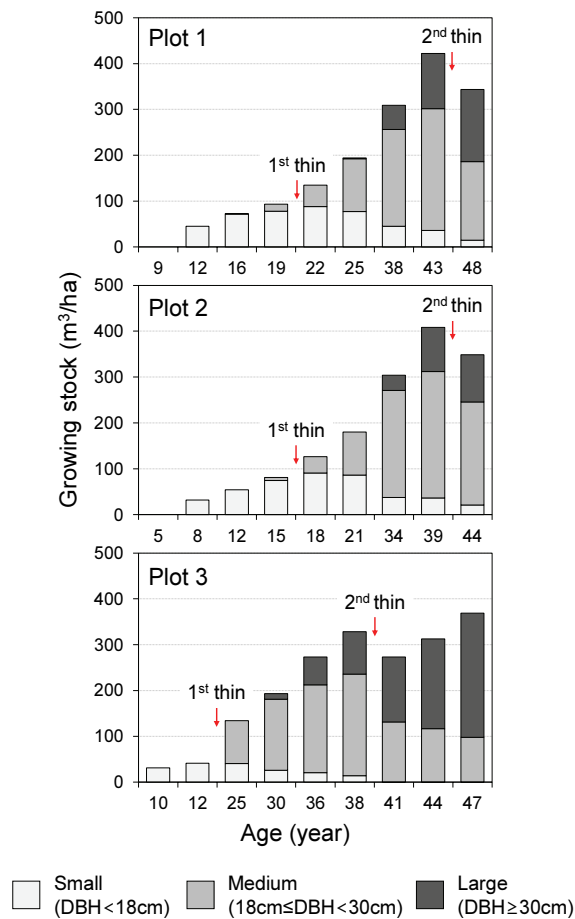


Figure 8. Growing stock by diameter class over age in Korean white pine plantations. The diameter class is classified as small, medium, and large. The year of thinning is marked with the arrow.

(흉고직경 16 cm) 2차 간벌 기준은 임령 35년(흉고직경 21 cm)로 제시하고 있다. 이 기준을 본 연구의 표준지 3개소에서 1차 및 2차 간벌이 시행된 시점과 비교한 결과, 표준지1, 2는 흉고직경이 작은 상태에서 1차 간벌이 실시되었으며, 2차 간벌은 늦은 시기에 실시되었다(Figure 1). 반면 표준지3은 우리나라 우량대경재 생산목표 시업체계에 가깝게 간벌되었다. 따라서 우리나라 시업체계에 맞게 간벌이 시행된다면 효율적인 목재수확이 가능할 것으로 사료된다.

다만, 우리나라 산림시업체계의 밀도관리기준은 지위지수와 같은 임분특성이 반영되지 않은 상태이기에 앞으로 임분특성을 고려한 최적의 간벌강도 및 시기를 파악하여 체계적인 간벌시업이 시행된다면 대경목 비율 및 수확량을 더 높일 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 시업체계를 만들기 위해서는 장기적인 모니터링 자료를 통한 간벌시업을 위한 성장수확모델이 절실히 필요함을 강조하고자 한다.

결론

본 연구는 잣나무 인공림 3개소의 영구표준지를 대상으로 38년 간 9차 반복조사자료를 활용하여 임분 성장 변화를 분석하였다. 연구에서 활용된 표준지1, 2, 3은 각각 9차 조사 기준 임령 48, 44, 47년이며 각기 다른 시기에 2차례의 하층간벌이 실시되었다. 평균 흉고직경의 성장을 분석한 결과, 대경목 기준인 30 cm에 도달한 표준지는 표준지3뿐이며, 1차 간벌과 2차 간벌 이후 높은 성장변화를 보였는데 이는 표준지1, 2에 비해 간벌강도가 높았기 때문이다. 수고생장의 경우 표준지 3개소 모두 1차 간벌 이후 급격한 수고생장이 관측되었는데, 이는 하층간벌로 인해 평균 수고가 커지게 되었기 때문이다. 조사차수별 흉고직경에 따른 수고생장 변화의 경우 Chapman-Richards 모델식이 성장변화를 잘 설명하는 것으로 나타났다. 2차 간벌 이후 개체목 흉고단면적과 재적은 표준지1, 2보다 표준지3에서 더 높은 생장이 관측되었는데 이는 높은 간벌강도와 높은 수고생장의 영향에 의한 것으로 판단된다. 표준지의 임분생장을 국립산림과학원의 현실림수확표와 비교한 결과, 표준지3의 임분흉고단면적은 수확표와 근소한 차이였으나, 임분재적에서는 모든 조사차수에서 높게 나타났다.

표준지에 대한 임분밀도를 비교한 결과, 임분밀도지수(SDI), 상대밀도(RD), 임목축적도(%Stocking) 모두 표준지3에서 가장 낮았다. 특히 표준지3의 상대밀도(RD)는 대체로 0.8 미만으로 유지되고, 자연고사 또한 적게 발생한 반면, 표준지1, 2는 0.8 이상일 때 자연고사가 다수 발생하였다. 각 표준지의 지위지수를 조사차수별로 지위지수곡선에 도시한 결과, 표준지3의 지위지수가 가장 높았으며, 측정 시기별 임령 및 우세목 수고에 따른 지위지수의 예측값은 동일하지 않은 것으로 나타났다. 임령에 따른 형상비는 1차 및 2차 간벌에 따라 차이가 있었으며, 형상비를 고려한 밀도관리를 통해 효율적인 목재수확이 가능할 것으로 판단된다.

경급분포 변화를 파악한 결과 흉고직경 30 cm에 도달하는 임목은 최소 30년생 이상일 때 나타났으며 대경목 비율은 표준지3에서 41년생 때 대경목이 52%이었으며, 47년에는 73%에 달하여 다른 표준지보다 월등히 높았다. 그러나 표준지별로 간벌이 시행된 시기는 1차 간벌이 15-25년, 2차 간벌이 38-45년으로 각기 다른 시기에 실시되었기 때문에, 대경목 생산에 최적화된 간벌강도와 시기를 명확히 파악하지 못한 연구 한계가 있었다. 이에 따라 후속 연구에서는 보다 다양한 장기 시업모니터링 데이터를 이용하여 소경목, 중경목, 대경목 수확을 위한 최적 간벌강도 및 시기 등 기준을 보다 명확하게 분석·제시할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 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

- Appiah Mensah, A., Jonzén, J., Nyström, K., Wallerman, J. and Nilsson, M. 2023. Mapping site index in coniferous forests using bi-temporal airborne laser scanning data and field data from the Swedish national forest inventory. *Forest Ecology and Management* 547: 121395.
- Buckman, R.E. 1962. Growth and yield of red pine in Minnesota. US Department of Agriculture: Washington, DC, USA.
- Burkhart, H.E. 2008. Modelling growth and yield for intensively managed forests. *Journal of Forest and Environmental Science* 24(3): 119-126.
- Burkhart, H.E., Tomé, M. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer. pp. 457.
- Chapman, D.G. 1961. Statistical problems in dynamics of exploited fisheries populations. In: Vol. 4. : University of California Press Berkeley. pp. 153-168.
- Choi, J., Lee, B., Lee, D. and Choi, I. 2014. Growth monitoring of Korean white pine (*Pinus koraiensis*) plantation by thinning intensity. *Journal of Korean Forest Society* 103(3): 422-430.
- Hu, J., Herbohn, J., Chazdon, R.L., Baynes, J. and Vanclay, J.K. 2020. Long-term growth responses of three *Flindersia* species to different thinning intensities after selective logging of a tropical rainforest. *Forest Ecology and Management* 476: 118442.
- Jin, H. 2024. A study on model development of stand growth and adequate thinning criteria for major coniferous species using stand density index. M.S Thesis. Kangwon National University.
- Jung, S., Seo, Y., Lee, D. and Choi, J. 2022. A study on the growth change by DBH class in Korean white pine plantations. *Journal of Korean Society of Forest Science* 111(1): 125-135.
- Kang, J., Ko, C., Yim, J., Lee, S. and Moon, G. 2019. Estimating tree shape ratio by region for *Pinus densiflora* and *Larix Kaempferi* in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(4): 600-609.
- Kim, H., Kim, H., Park, S., Park, H. and Lee, S. 2018. Development of site index curves and height-DBH growth model of *Larix kaempferi* for Deogyu mountain in South Korea. *Forest Science and Technology* 14(3): 145-150.
- 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.
- Kim, S., Jeon, G., Park, K., Lim, Y., Yun, J., Kwon, S., Youn, H., Lee, J., Teramoto, Y. and Ezaki, T. 2015. The Necessity and Method of Stand Density Control Considering the Shape Ratio of *Pinus thunbergii* Coastal Disaster Prevention Forests in South Korea. *Journal of Korean Forest Society* 104(3): 411-420.
- Kim, Y. 2016. Developing a large-scale carbon offset project based on forest management - in case of Jin-An Leading forest management zone -. *Journal of Climate Change Research* 7(2): 137-142.
- Korea Forest Research Institute. 2012. Commercial tree species 3 *Pinus koraiensis*.
- Korea Forest Research Institute. 2014. Forest Management Techniques by Function. Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea. pp. 154.
- Korea Forest Service. 2023a. Statistical Yearbook of Forestry. Daejeon, Korea: Korea Forest Service.
- Korea Forest Service. 2023b. Enforcement Regulation of the Composition and Management of Forest Resources [Asterisk 3] Standard of Standard Cutting Ages, Felling, Excavation Standard, and Facility Standard such as Forest Road.
- Lee, D., Seo, Y., Park, G. and Choi, J. 2015. Estimation of site index for *Larix kaempferi* and *Pinus koraiensis* in Gangwon and North Gyeongsang provinces. *Journal of Forest and Environmental Science* 31(3): 202-206.
- Lee, D., Siipilehto, J. and Hynynen, J. 2021a. Models for diameter distribution and tree height in hybrid aspen plantations in southern Finland. *Silva Fennica* 55(5): 10612.
- Lee, D. 2015. A study on growth of main coniferous species. M.S Thesis. Kangwon National University.
- Lee, D., Beuker, E., Viherä-Aarnio, A. and Hynynen, J. 2021b. Site index models with density effect for hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) plantations in southern Finland. *Forest Ecology and Management* 480: 118669.
- Lee, D. and Choi, J. 2019. Evaluating maximum stand density and size-density relationships based on the Competition Density Rule in Korean pines and Japanese larch. *Forest*

- Ecology and Management 446: 204-213.
- Lee, D. and Choi, J. 2020. Stocking diagrams for silvicultural guideline in Korean pines and Japanese larch. *Forests* 11(8): 833.
- Lee, D. and Choi, J. 2022. Development of variable-density yield models with site index estimation for Korean pines and Japanese larch. *Forests* 13(7): 1150.
- 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., Seo, Y. and Choi, J. 2017. Estimation and validation of stem volume equations for *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, and *Larix kaempferi* in South Korea. *Forest Science and Technology* 13(2): 77-82.
- Lee, J., Han, S., Kim, S., Lee, S., Son, Y. and Son, Y. 2015a. A meta-analysis on the effect of forest thinning on diameter growth and carbon stocks in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 104(4): 527-535.
- National Institute of Forest Science. 2015. Thinning and Forest Type of Target. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea. pp 161.
- National Institute of Forest Science. 2021. Stem volume · biomass and Stand Yield Table. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea. pp 373.
- Park, G. 2016. Studies on forest stand management of *Pinus thunbergii* in Jeju Island. Ph.D Thesis. Kangwon National University.
- Pretzsch, H. 2021. Trees grow modulated by the ecological memory of their past growth. Consequences for monitoring, modelling, and silvicultural treatment. *Forest Ecology and Management* 487: 118982.
- Pretzsch, H. et al. 2019. Maintenance of long-term experiments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives. *European Journal of Forest Research* 138(1): 165-185.
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10(2): 290-301.
- Seo, Y., Lee, D. and Choi, J. 2018. Growth pattern analysis of major coniferous tree species in South Korea. *Forest Science and Technology* 14(1): 1-6.
- Seo, Y., Lee, D. and Choi, J. 2023. Developing and comparing individual tree growth models of major coniferous species in south Korea based on stem analysis data. *Forests* 14(1): 115.
- Son, Y., Jeon, J., Lee, S., Yim, J. and Kang, J. 2017. Development of estimated equation for mortality rates by forest type in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 106(4): 450-456.
- Sullivan, A. and Clutter, J. 1972. A simultaneous growth and yield model for Loblolly Pine. *Forest Science* 18(1): 76-86.
- Yue, C., Kahle, H.P., Klädtke, J. and Kohnle, U. 2023. Forest stand-by-environment interaction invalidates the use of space-for-time substitution for site index modeling under climate change. *Forest Ecology and Management* 527: 120621.
- Yue, C., Kahle, H.P., von Wilpert, K. and Kohnle, U. 2016. A dynamic environment-sensitive site index model for the prediction of site productivity potential under climate change. *Ecological Modelling* 337: 48-62.

Manuscript Received : August 19, 2024

First Revision : November 28, 2024

Second Revision : December 9, 2024

Accepted : December 10, 2024