

편백림의 임분밀도 관리 기준 탐색을 통한 시업체계 개선

정수영¹ · 이광수¹ · 김현수¹ · 박준형^{2*}

¹국립산림과학원 난대아열대산림연구소, ²한국산지보전협회

Improvement of the Thinning System by Exploring the Stand Density Management Criteria for *Chamaecyparis obtusa* in South Korea

Su Young Jung¹, Kwang Soo Lee¹, Hyun Soo Kim¹ and Joon Hyung Park^{2*}

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

²Korea Forest Conservation Association, Daejeon 35262, Korea

요약: 본 연구는 편백림의 생산목표 달성을 위한 생육단계별 적정 임분밀도관리 기준을 추정하고, 이로부터 숲아베기 적정 시업체계를 개발하는데 그 목적을 두고 있다. 모집된 편백림 216개 표본점을 대상으로 임내 세장목 점유율과 임분밀도 간의 관계특성을 분석하여 임분밀도 관리기준 지표로서 제시된 상대수확량지수는 Ry 0.75로 나타났다. 이로부터 기존 편백 시업체계의 생산목표별 타당성 검정을 실시한 결과, 임령 증가에 따른 숲아베기 강도의 불균형과 지위에 따른 생산속도가 반영되지 못하는 문제점이 있었다. 본 연구를 통해 작성된 생산목표별 숲아베기 시업체계에서, 대경재는 ha당 353본, 498.1 m³ · ha⁻¹ 수확 가능하였으며, 중경재는 703본 · ha⁻¹, 376.2 m³ · ha⁻¹, 소경재는 1,758본 · ha⁻¹, 249.5 m³ · ha⁻¹으로 나타났다. 이상의 결과로부터 작성된 시업체계는 다양한 경영 목표에 따라 일률적으로 적용할 수는 없으나, 우리나라 편백림의 생장특성을 반영한 임분밀도관리도로부터 획득된 결과로서 실증적 참조 기준을 제시하는데 본 연구의 의의가 있다.

Abstract: The purpose of this study was to estimate the optimal stand density criteria for each growth stage of *Chamaecyparis obtusa* (Siebold & Zucc.) Endl. to achieve the timber production goal for cypress forests and develop an optimal silvicultural system for forest thinning. A relative yield index (Ry) value of 0.75, presented as a stand density management criterion index, was estimated by analyzing the relationship characteristics between the composition ratio and stand density of slender trees from 216 sample plots of the recruited cypress forests. The analysis of the feasibility of achieving each production target in the existing silvicultural system for *C. obtusa* revealed that the growth rate according to the parameters of forest land productivity, such as site index and thinning intensity according to the increase in age, was not properly reflected. In the thinning system for each timber production target analyzed in this study, 353 high-quality large hardwoods from 498.1 m³/ha, 703 high-quality medium hardwoods from 376.2 m³/ha, and 1,758 small-diameter hardwoods from 249.5 m³/ha could be harvested. Although the silvicultural system prepared on the basis of the results of this study cannot be uniformly applied according to various management goals, this study is meaningful in that it presents empirical reference standards based on the stand density management diagram that reflects the growth characteristics of cypress forests in South Korea.

Key words: silviculture system, *Chamaecyparis obtusa*, thinning system, timber production, stand density management



서론

편백은 일제강점기에 도입되어 1970년대부터 우리나라

남부권 및 남부권 및 제주도 지역을 중심으로 조림되었다. 연간 원목생산량은 약 40,000~50,000 m³ 수준으로 목재의 독특한 향으로 인해 주택이나 사무실 등 내장재로 각광 받고 있으며, 그만큼 목재시장의 가격도 소나무보다 높게 거래된다(National Institute of Forest Science, 2012). 이와 더불어 편백 정유 및 숲의 치유 효능에 대해서도 국민적 관심이 높은 상황이 이어지면서 조림수요가 증가하여

* Corresponding author
E-mail: parkjh1004@kfca.re.kr

ORCID

Su Young Jung  <https://orcid.org/0000-0002-4372-0417>
Joon Hyung Park  <https://orcid.org/0000-0003-4510-0956>

2016년 이후 5년간 조림실적이 25,070 ha, 연간 약 5,000 ha 이상 식재되고 있어서 우리나라 주요 조림수종 중 조림실적이 가장 높다(Korea Forest Service, 2021).

우리나라 산림 관리기술의 기본서인 「지속가능한 산림 자원 관리 표준매뉴얼」에 제시된 편백림 시업체계는 대경재(목표 가슴높이지름 40 cm)와 중경재(목표 가슴높이지름 25 cm), 일반소경재(목표 가슴높이지름 16 cm)로 구분하고 있는데(National Institute of Forest Science, 2005), 이때 시업체계의 기준이 되는 조림본수는 ha당 5,000본으로 제시하고 있다. 이는 임업통계연보(Korea Forest Service, 2021)에 기재된 5년간 조림본수와 조림면적을 나누어 구한 ha당 편백 조림본수는 약 2,312본으로 나타나는 것보다 다소 거리가 있다. 인공림의 조림본수는 식재목 간 경쟁 시작시점과 경쟁정도에 영향을 주어 가지치기 및 솎아베기 등 숲가꾸기 적용 시기, 강도 및 회수를 결정하는 주된 시업 요인 중 하나이다. 우리나라 산지 입지 양부의 개선, 관련 임업기술 향상 등의 영향으로 ha당 조림본수는 과거 5,000본에서 최근 3,000본으로 변화되고 있다. 편백 조림 현장의 실제 조림본수와 매뉴얼에서 제시한 시업체계의 조림본수(5,000본/ha) 기준이 다르다는 것은 숲 관리 가이드라인의 개선이 필요함을 의미하며, 신규로 조성되고 있는 해당 임분의 솎아베기 시행에 앞서 새로운 시업체계 작성이 시급한 이유이다. 시업체계의 개선을 위해서는 임분 생장예측모델을 통해 경영목표를 달성 여부 등 현행 시업체계의 적절성에 대한 검토가 필요하다.

이를 위해 주로 활용되는 모델은 지위지수별로 예측되는 우세목 수고 생장모델과 임분밀도관리도(Stand density management diagram)를 연계하는 형태로 활용된다. Ando (1962, 1968)가 최초 연구한 임분밀도관리도는 임분밀도와 개체목 혹은 임분 성장량의 유기적인 관계를 나타내는 모델로 시간 개념이 부재하여 지위지수별 우세목 수고 생장모델과 결합하여 임분밀도 관리를 위한 일정계획에 주로 활용되고 있다. 이러한 기법은 최근까지도 활용되어 루브라참나무(*Quercus robur* L.)의 솎아베기 시업체계 개발 연구를 수행한 바 있고(AnTa and Gonzalez, 2005), 티크(*Tectona grandis* L.f) 조림지에서 솎아베기 시업체계 개발 사례(Kumar et al., 1995; Minoche et al., 2017), 인공림 내 경쟁정도에 따른 임분 안정성 변화를 고려한 라디에타 소나무(*Pinus radiata* D.Don) 솎아베기 시업체계 연구(Castedo-dorado et al., 2009) 등 다양한 연구사례를 확인할 수 있다. 삼나무, 편백림의 임분밀도 관리에 주로 활용되어 오던 Ando(1962, 1968)의 임분밀도관리도 이외에도 국제적으로 널리 활용되고 있는 Reineke의 SDI 방식에 의한 임분밀도와 직경, 재적생장 간의 관계특성에 관한

연구도 활발히 진행되고 있다(Reineke, 1933; Zeide, 2002; Newton, 2021). 국내에서도 Ando(1962, 1968)의 임분밀도 관리도 추정절차를 활용하여 일본잎갈나무 밀도관리(Ma, 1977) 등 주요 조림 수종에 대한 밀도관리도를 개발하여 이를 보고되었으나, 대부분 국내 성숙림에 대한 관측치가 부족한 상황에서 이루어진 바 있다. 비교적 최근에 이르러 이와 관련하여 소나무(*Pinus densiflora* L.)의 지역별 생장 특성을 고려한 시업체계 구축 연구를 진행한 바 있다(Park, 2016). 이러한 연구를 통해 각 수종별 생장특성을 고려하고 임분 내 개체 간 경쟁의 변화에 따라 적합한 형태의 솎아베기 일정계획을 수립하고 있다. 최근 조림면적이 가장 많은 경제수종인 편백의 경우 역시 현실여건을 고려하여 보다 체계적인 시업체계의 개선에 관한 요구도가 높아지는 추세이다. 최근 국내 편백림의 영급이 증대됨에 따라 정 등(Jung et al., 2020)은 III, IV 영급 이상을 포함하는 현실림의 임목 생장특성을 반영하여 임지생산력을 평가할 수 있는 지위지수를 추정하고, 임지생산력을 고려한 임분수확표를 개발한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 향상된 임지생산력 및 임분 생장 특성을 반영하여 편백림의 조림본수의 개선에 따른 현행 솎아베기 시업체계의 문제점을 도출하고, 임분의 안정성을 고려한 경영목표 달성 맞춤형 편백 솎아베기 시업체계 개발을 목표로 수행하였다.

재료 및 방법

1. 임분 안정성을 고려한 적정 임분밀도 관리기준 지표 설정

임목의 형상비(H/D ratio)는 수관율(Crown ratio)과 함께 임분의 안정성과 관련된 대표적인 지표로(Karamer, 1996), 형상비 80 이상일 경우 풍해 및 설해로 인한 피해목과 미 피해목 발생 위험이 높은 것으로 알려져 있다(Wonn and O'Hara, 2001). 이러한 연구의 결과를 근거로 국내에서도 Moktan et al.(2015)은 대관령 지역에 분포한 일본잎갈나무(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière), 잣나무(*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc), 전나무(*Abies holophylla* Maxim.)의 내풍 안정성 분석에서 형상비 임계치 80으로 두어 진행한 바 있다. 임목의 형상비 산출 시 주된 영향요인으로서의 흉고 직경은 임분밀도의 영향을 받으며, 이에 따라 형상비 또한 개체목 간 경쟁정도에 따라 변화하는 특성을 지닌다(Jung et al., 2015). 이러한 점으로 인해 적정 임분밀도 관리기준 값의 범위는 형상비(수고÷흉고직경)나 수관길이비(수관길이÷수고)를 기준으로 설정하는 것이 보편적인 방법으로 인식되고 있다.

따라서 본 연구에서도 임분 내 형상비 80 이상의 개체목

점유 비율과 임분밀도관리도의 상대수확량지수(Relative Yield Index; Ry) 간 관계를 통해 임분 안정성을 고려한 적정 임분밀도 관리기준을 분석하였다. 이를 위해 상대수확량지수에 따른 각 표준지 내 형상비 80 이상의 세장목 점유율 간 관계식을 추정하고 해당 곡선의 변곡점을 임분밀도 관리기준 지표(Ry)로 설정하여 숲아베기 시나리오에 반영하였다. 상대수확량지수는 임분의 최대밀도를 1이라고 가정할 때 대상으로 하는 임분의 밀도를 최대밀도에 대한 비율로 표현한 지수로 임목의 크기에 따른 상대적인 임분밀도를 나타내는 기준 값으로 활용된다(Park et al., 2017). 상대수확량지수의 산출은 Park et al.(2018)이 제시한 편백 임분밀도관리도의 모수 추정 결과를 기반으로 수식 1과 수식 2를 활용하였다. 이때 분석에 활용된 표본점은 제 6차 국가산림자원조사 편백림을 중 편백 순림에 가까운 전국 표본점 대상으로 한 표본점 216개소를 추출하였고, 그 기준은 「제7차 국가산림자원조사 및 산림의 건강·활력도 현지조사지침서」(Korea Forestry Promotion Institute, 2017)를 참고하여 흉고단면적 75% 이상 우점하는 임분을 순림으로 간주하였다. 추출된 표본점자료에 대한 기초통계량은 Table 1과 같다.

$$Ry = (1 - Rc) \div (1 - 0.110041141) \quad (1)$$

$$Rc = (8600.426HT^{-3.191}) \times [(0.089HT^{-1.300}) \times N + (8600.426HT^{-3.191})]^{-1} \quad (2)$$

2. 임분 성장예측

임분 성장예측을 위해 임분밀도관리도와 지위지수 분류곡선을 활용하였다. 임분밀도관리도는 등평균수고곡선과 등평균흉고직경곡선, 상대수확량지수 곡선, 자연고사선으로 구성되어 있으며, 시간의 개념이 포함되어 있지 않아

서 지위지수분류곡선과 연계하여 시간의 흐름에 따른 성장변화를 예측한다. 본 연구에서 Park et al.(2018)이 제시한 편백 임분밀도관리도와 임목재적·바이오매스 및 임분수확표(National Institute of Forest Science, 2020)에서 제시한 편백 지위지수 분류곡선을 활용하여 적정 임분밀도 관리기준 탐색 및 적용, 수확목표별 임분 성장예측 절차를 거쳐 최종 편백 임분생장 특성 및 생산목표 맞춤형 적정 기업체계를 구축하였고 활용된 수식은 Table 2와 같다.

생장 시뮬레이션은 기존 기업체계를 그대로 적용하는 것과 기업체계를 개선하기 위한 숲아베기 시나리오를 적용한 것으로 나누어 진행하였고, 두 가지 모두 ha당 3,000본 조림을 실시하는 것으로 가정하였다. 각 시뮬레이션을 통해 임령변화에 따른 흉고직경, 우세목수고, 임분밀도, 임분재적 등 임분 성장인자의 변화 양상을 예측치로 제시하여 비교하였다.

임분밀도관리도를 활용한 생장 시뮬레이션은 컴퓨터가 발달하기 이전부터 임분밀도관리도 도표상에서 가늠하던 성장예측방법이 컴퓨터가 발달함에 따라 실제 컴퓨터상에서 수치적으로 예측하는 방법으로 국외에서 과거부터 꾸준히 소개된 바가 있다(Ando, 1968; Newton, 2021). 방법은 지위지수별 우세목수고의 임령에 따른 예측 값을 각 시나리오의 벌기령까지 1년단위로 예측하고, 해당 수고 값과 함께 조림본수를 임분밀도관리도의 각 곡선식에 대입하여 변화량을 예측하였고, 숲아베기 시나리오에 따라 해당 시점의 임령 도래 시 숲아베기 강도에 따라 ha당 본수 감소량을 적용하여 흉고직경과 수고, ha당 본수 및 재적의 변화량을 도출하였다.

3. 숲아베기 개선을 위한 시나리오 작성

기존 「지속가능한 산림자원 관리 매뉴얼」에 제시된 편백 수확목표별 기업체계는 대경제 수확목표(Prescription A), 중경제 수확목표(Prescription B) 및 소경제 수확목표(Prescription C) 3가지를 제시하고 있다(National Institute

Table 1. Descriptive statistics on for *Chamaecyparis obtusa* stand data to derive stand density management standards

Variable	Unit	Mean	S.D.
No. plots	plots		216
Stand density	trees · ha ⁻¹	1401.7	640.0
Mean DBH	cm	18.7	5.2
Mean height	m	14.0	3.6
Mean DBH of dominant trees	cm	22.2	6.3
Mean height of dominant trees	m	15.6	3.8
Mean HD ratio of dominant trees	%	72.6	17.9
Basal area	m ² · ha ⁻¹	37.5	18.7
Stand volume	m ³ · ha ⁻¹	268.1	188.0

Table 2. Main growth model estimation results for developing stand density management diagram for *C. obtusa*.

Model name	Equation	Reference
Equivalent height curve	$V^{-1} = [0.089HT^{-1.300} + (8600.426HT^{-3.191}) \div N]$	
Equivalent diameter curve	$D = 0.097 + 0.950Dq + 0.023HT\sqrt{N} \div 100$	
Form height curve	$HF = 0.145 + 0.406HT + 0.022HT\sqrt{N} \div 100$	Park et al., 2018
Relative yield index curve (=full density curve)	$N_{Ry} = 113487.953HT^{-0.688}$ $V_{Ry} = 784534.125N_{Ry}^{-1.891}$	
Self-thinning curve	$N^{-1} = 1 \div N_0 - v \div (-355095.091N_0^{-0.688})$	
Height of dominant trees curve	$HT = SI[(1 - e^{-0.015306 \times Age}) \div (1 - e^{-0.015306 \times 30})]^{0.67415}$	National Institute of Forest Science, 2020

where, V = Stand volume, N = Stand density, HT = Mean height of dominant trees, HF = Form height, V_{Ry} = Stand volume at Ry, N_{Ry} = Stand density at Ry, N_0 = No. planting trees, v = Mean volume of individual trees, SI = Site Index, Age = Stand age

of Forest Science, 2005). 본 연구에서는 기존 매뉴얼에 제시된 시업체제에서의 임령 증가에 따른 숲아베기 강도의 불균형과 지위에 따른 성장속도와 연계한 밀도조정 시업 시기가 상대적으로 반영되지 못하는 문제점 등을 해결하고자 각각의 수확목표별 시업체제의 개선을 목표로 기본적인 시업 기준값은 기존 매뉴얼에 제시된 기준을 적용하였다(Table 3). 일반적으로 지위가 높은 대경재 생산임지에 대해서는 동일식재밀도 대상지에 대해서는 지위가 낮은 중소경재 생산임지에 비해 울폐가 조기에 도달하므로 1차 숲아베기 시기는 상대적으로 조기에 시행되어야 바람직하다. 따라서 수확목표별 시업체제 개선을 위한 성장예측 시나리오 적용 기준은 대경재 수확 시업체제의 경우 지위지수 적용은 지위 “상”에 해당되는 지위지수 16, 벌기령 및 숲아베기 횟수는 80년에 4회 이하로 하였다. 중경재 목표 시업체제는 적용 지위지수 14, 벌기령 60년, 숲아베기 횟수 3회 이하, 소경재 수확 시업체제는 적용 지위지수 14, 벌기령 40년 및 숲아베기 횟수 2회 이하로 하였다. 각 시나리오별 숲아베기 시점은 임분밀도관리도의 상대수확량지수 Ry 를 이용하여 적정 임분밀도 관리 기준선에 도달하는 시점으로 하였고, 숲아베기 강도는 본 수 기준 숲아베

기울 50% 이하로 제한하고, 시물레이션 과정에서 숲아베기 이후 회복 양상을 고려하여 강도를 결정하였다.

결과 및 고찰

1. 적정 임분밀도 관리기준

임분의 안정성을 고려한 임분밀도 관리기준 설정은 임분 경쟁지표 중 하나인 상대수확량지수 Ry 와 임분 내 세장목(형상비 80이상) 본수 비율의 관계를 통해 분석하였다(Figure 1). 상대수확량지수와 개체목의 형상비의 관계는 정의 상관관계를 보이는 것으로 보고된 바 있다(Park et al., 2017). 조립 이후 개체목 간 경쟁이 증가하면서 일정 수준에 이르면 임내 형상비 80 이상의 개체목 비율이 급증하는 경향이 나타나며, 또한 숲아베기강도 수준에 의한 밀도 감소는 형상비에 유의적인 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다(Jung et al., 2015; Park et al., 2020). 따라서 일정 수준의 밀도에 도달하면 급격히 증가하는 형상비 추세선의 변곡점을 찾아서 임분밀도 관리의 적정 기준지표로 지정하고자 하였다.

Figure 1의 추세곡선 $y = 100.0x^{8.01}$ 에서 평균변화율을

Table 3. Criteria for applying thinning scenarios of cypress forests to achieve a predictable yield.

Thinning prescriptions	Production goal of timber crops	Applied site index	Number of thinnings	Expected age of harvest
A	Big size logs	SI 16 (high)	≤ 4 times	80 years
B	Medium size logs	SI 14 (medium)	≤ 3 times	60 years
C	Small size logs	SI 12 (low)	≤ 2 times	40 years

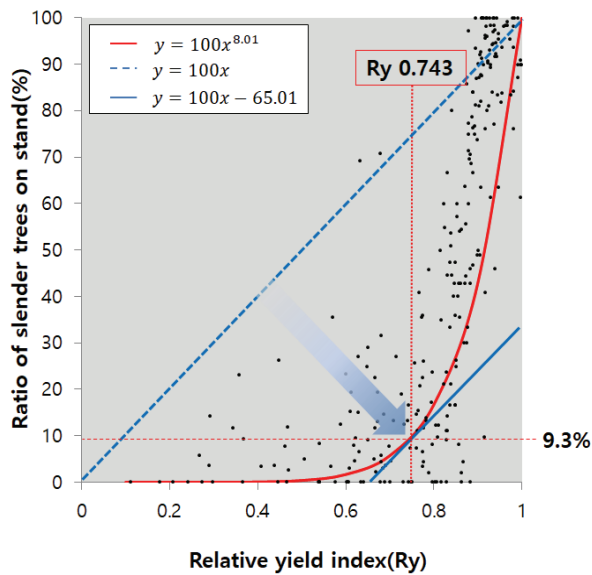


Figure 1. The relation between relative yield index(Ry) and ratio of slender tree(H/D ≥ 80) on *Chamaecyparis obtusa* stands.

나타내는 $y = 100.0x$ 와 동일한 기울기를 가지는 접선 $y = 100.0x - 65.01$ 을 구하였고, 이때 접점을 변곡점으로 하였을 때의 x 축의 Ry는 0.743이며, y 축의 임내 형상비 80 이상의 세장목 차지하는 비율은 9.23%로 도출되었다. 결과적으로 적정 형상비 한계수준의 적정 임분밀도 관리 기준지표는 Ry 0.743으로 설정할 수 있으며, 이때 임내 형상비 80 이상의 세장목이 차지하는 비율은 약 9.3% 수준으로 볼 수 있다. 도출된 적정 임분밀도 관리기준 지표는 숲아베기 시점을 의미하며, 조림 후 생장이 진행되면서 경쟁지표인 상대수확량지수가 Ry 0.743에 도달할 때 숲아베기를 시행하면 풍해 및 설해 등의 피해를 저감 할 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 안정적인 수준의 숲 관리를 위한 적정 임분 경쟁지표 범위는 Ry 0.6~0.8 사이로 알려져 있으며(National Institute of Forest Science, 2015), 기존 연구결과를 통해 소나무는 Ry 0.75(Park et al., 2017), 낙엽송은 Ry 0.63(Park et al., 2020)으로 보고된 바 있으며 본 연구 결과를 통해 편백 Ry 0.743의 경우 낙엽송보다는 높고 소나무와 유사한 범위에서 임분밀도 관리를 요구하는 것으로 분석되었다. 관리기준이 되는 상대수확량지수는 일반적으로 0.05단위로 설정하는 것이 관리 효율성 측면에서 용이하므로, 이 연구에서는 근사 값인 Ry 0.75를 임분밀도 관리기준 지표로 설정하였다.

2. ha당 3000본 편백 시업체계의 적절성 검토

임분밀도관리도와 우세목 수고 성장모델 간의 연계를 통해 성장예측 시물레이션을 실시하여 「지속가능한 산림

자원 관리메뉴얼」에 반영된 편백 숲아베기 시업체계를 ha당 3000본 조림지에 적용 가능성 및 적절성 검토를 실시하였다(National Institute of Forest Science, 2005).

먼저 기 시업체계(Korea Forest Service, 2020)는 지위를 고려하지 못한 숲아베기 방법이 적용되고 있는 것으로 분석되었다. 기존 대경재 수확목표 시업체계(Prescription A)의 1차 숲아베기 시점은 조림 후 25년, 중경재(Prescription B)는 23년, 소경재(Prescription C)는 20년으로 제시되어 있다(Table 2). 일반적으로 지위지수가 높으면 임내 수관이 빠르게 형성되고 개체목간 경쟁이 심화되어 1차 숲아베기 시점은 빨라질 수밖에 없고(Jung et al., 2020; Park et al., 2018), 지위가 상대적으로 낮을수록 그 시점은 점차 늦게 도래한다. 기존 시업체계에서 대경재 수확목표의 경우 지위 “상”의 임지에 해당하고, 중경재는 지위지수 “중”, 소경재는 지위 “하”에 해당한다는 점을 고려해보면 낮은 지위의 조림지 임목은 높은 지위에 비해 성장 및 수관올폐가 더뎠다 숲아베기 시기가 더 늦게 실시되어야 하지만 이와는 상반된 시업체계가 제시되고 있다. 즉 지위가 높을수록 성장 및 올폐가 조기에 도달하는데 기존 시업체계는 지위 차이에 따른 성장속도 반영이 역으로 적용되어 있어 이에 대한 개선이 필요하다. 이러한 지위 특성과 숲아베기 시기 간의 관계특성은 편백 숲아베기 시업체계(National Institute of Forest Science, 2019)에서도 본 연구에서 제시한 결과와 유사한 경향을 나타내고 있는 반면, 기존의 현행 시업 「지속가능한 산림자원 관리메뉴얼」(National Institute of Forest Science, 2005)과는 상반된 경향을 보이고 있다. 임분 성장에 따른 임목 간 경쟁정도를 나타내는 상대수확량지수 변화를 살펴보면(Figure 2) 상기 언급한 이론과 다소 차이가 있는 현행 시업체계로 인하여 수확목표별 시업체계의 1차 숲아베기 시점에 도달할 때의 상대수확량지수는 적정 관리기준 값인 Ry 0.75를 넘어 모든 시업체계에서 Ry 0.8~0.9의 수준으로 매우 높은 경쟁상태에 처하게 된다. 임분밀도가 높을 경우 형상비가 높아져 임분 안정성이 낮아지는 동시에 지하고가 높아지면서 수관크기가 감소하며, 이는 광합성을 요하는 엽량의 감소로 이어져 생장이 저해되는 결과로 이어진다(Gifu Prefectural Forest Department, 2010, National Institute of Forest Science, 2019; Park et al., 2019; Son et al., 2020). 이와 같이 적정 시기 이후에 숲아베기를 실시한 경우 고사지의 다수 발생으로 원 상태의 엽량을 회복하기까지 많은 시간이 소요되며, 개체목의 무게 중심이 임목 상부 초두 쪽에 위치하여 세장목의 풍도목 및 절단목 형태의 피해가 다수 발생하므로(Gifu Prefectural Forest Department, 2010) 이에 대한 개선이 필요하다(Figure 5).

그 외 문제점으로 확인되는 점은 숲아베기 강도의 불균

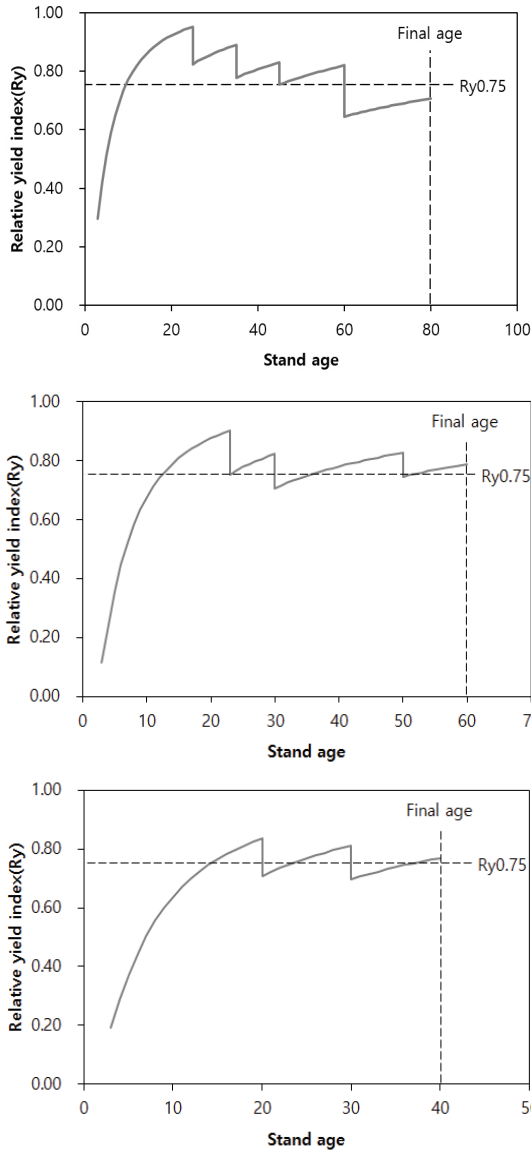


Figure 2. Prediction of relative yield index change by applying current thinning criteria for plantation of 3,000 cypress trees per hectare.

형인데, Table 2에서 대경재 시업체계(Prescription A)의 시뮬레이션을 통해 도출된 솎아베기 강도는 1차 26.0%, 2차 40.7%, 3차 27.5%, 4차 48.5%로 나타나 각 차기마다 적용되는 솎아베기 비율의 차이가 확인되었고, 중경재 시업체계(Prescription B)도 유사한 상황이 나타났으며, 소경재 시업체계(Prescription C)는 1차(8.4%)에 비해 2차 솎아베기(36.7%)의 강도가 높았다. 일반적으로 산림의 성장곡선은 sigmoid curve 형태를 보이는데 성장절정기에 도달한 이후 점차 성장량이 감소하는 추이를 보인다(Yun et al., 2021). 이때, 솎아베기의 강도는 이러한 성장 추이를 고려하여 초기에 강도간벌을 적용하여 빠른 성장을 위한

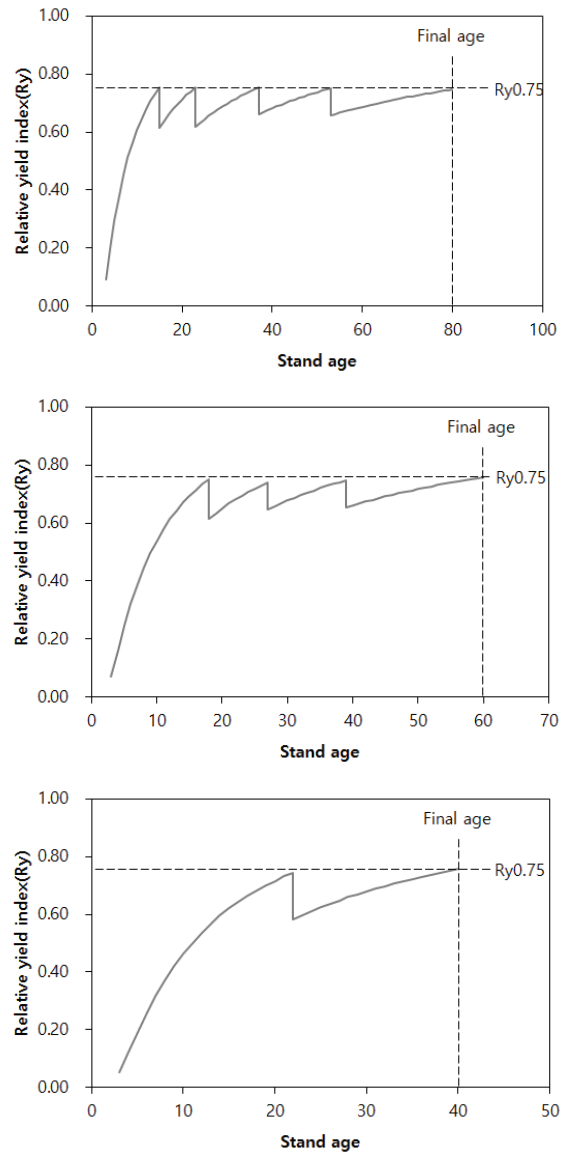


Figure 3. Prediction of the optimal thinning operation for each timber production goal based on Ry 0.75 for cypress plantations of 3,000 trees per 1 ha in Gochang, Jeong-up Prefecture, Korea.

생육공간 확보 및 회복을 도모하고, 상대적으로 생장이 저하되는 시점으로 진행될수록 점차 강도가 약하게 적용되어야 하지만, 기존 편백 수확목표별 시업체계의 경우 이러한 부분에 대한 충분한 고려가 이루어지지 못한 것으로 보인다. 이러한 결과로 성장 절정기에 요구되는 생육공간 확보의 어려움을 겪으며, 임령이 증가하여 회복이 더딘 시점에서 오히려 강도의 솎아베기를 적용하여 사실상 산림의 생산력을 저하시키고 있다. 이러한 점은 대경재 시업체계 뿐만 아니라 중·소경재 생산 시업체계에서도 정도의 차이는 있지만 솎아베기 후 상대수확량지수의 회복이 이루어지지 못하고(Figure 2), 결과적으로 임분 단위

Table 4. Prediction of stand growth change after applying the current thinning standard in *Chamaecyparis obtusa* plantations with 3,000 trees per ha.

Thinning prescriptions	Thinning methods			DBH (cm)	Height (m)	Stand density (trees · ha ⁻¹)	Volume (m ³ · ha ⁻¹)	Thinning intensity (%)
	Order	Age	Before /After					
A	1st	25	Before	15.1	14.0	2,431	273.8	26.0
			After	16.8	14.0	1,800	256.7	
	2nd	35	Before	18.6	17.2	1,686	357.8	40.7
			After	22.6	17.2	1,000	314.4	
	3rd	45	Before	24.3	19.8	966	401.7	27.5
			After	27.2	19.8	700	366.2	
	4th	60	Before	29.0	22.9	678	467.4	48.5
			After	36.4	22.9	350	379.1	
B	1st	23	Before	13.6	11.3	2,602	191.5	22.7
			After	14.8	11.3	2,011	178.9	
	2nd	30	Before	16.1	13.5	1,932	241.1	37.7
			After	18.9	13.5	1,205	208.8	
	3rd	50	Before	22.1	18.1	1,128	357.1	28.9
			After	25.0	18.1	802	323.6	
C	1st	20	Before	12.1	9.1	2,730	129.7	8.4
			After	12.3	9.1	2,500	126.1	
	2nd	30	Before	14.1	11.8	2,370	200.0	36.7
			After	16.5	11.8	1,500	172.8	

Table 5. A newly established production system adjusted to the harvest target reflecting the growth characteristics of *Chamaecyparis obtusa* plantations

Thinning prescriptions	Thinning methods			DBH (cm)	Height (m)	Stand density (trees · ha ⁻¹)	Volume (m ³ · ha ⁻¹)	Thinning intensity (%)
	no.	age	before /after					
A	1st	15	before	12.4	9.6	2,704	142.2	40
			after	14.4	9.6	1,622	117.2	
	2nd	23	before	17.1	13.0	1,546	210.5	40
			after	20.0	13.0	927	173.1	
	3rd	37	before	23.7	17.5	884	310.9	30
			after	26.6	17.5	619	273.0	
	4th	53	before	29.7	21.3	598	401.8	30
			after	33.2	21.3	419	352.9	
B	1st	18	before	12.4	9.6	2,706	141.7	40
			after	14.4	9.6	1,623	116.6	
	2nd	27	before	16.8	12.6	1,556	199.5	30
			after	18.8	12.6	1,088	174.4	
	3rd	39	before	21.4	15.8	1,048	269.9	30
			after	23.9	15.8	733	236.3	
C	1st	22	before	12.3	9.4	2,714	137.6	45
			after	14.6	9.4	1,493	108.1	

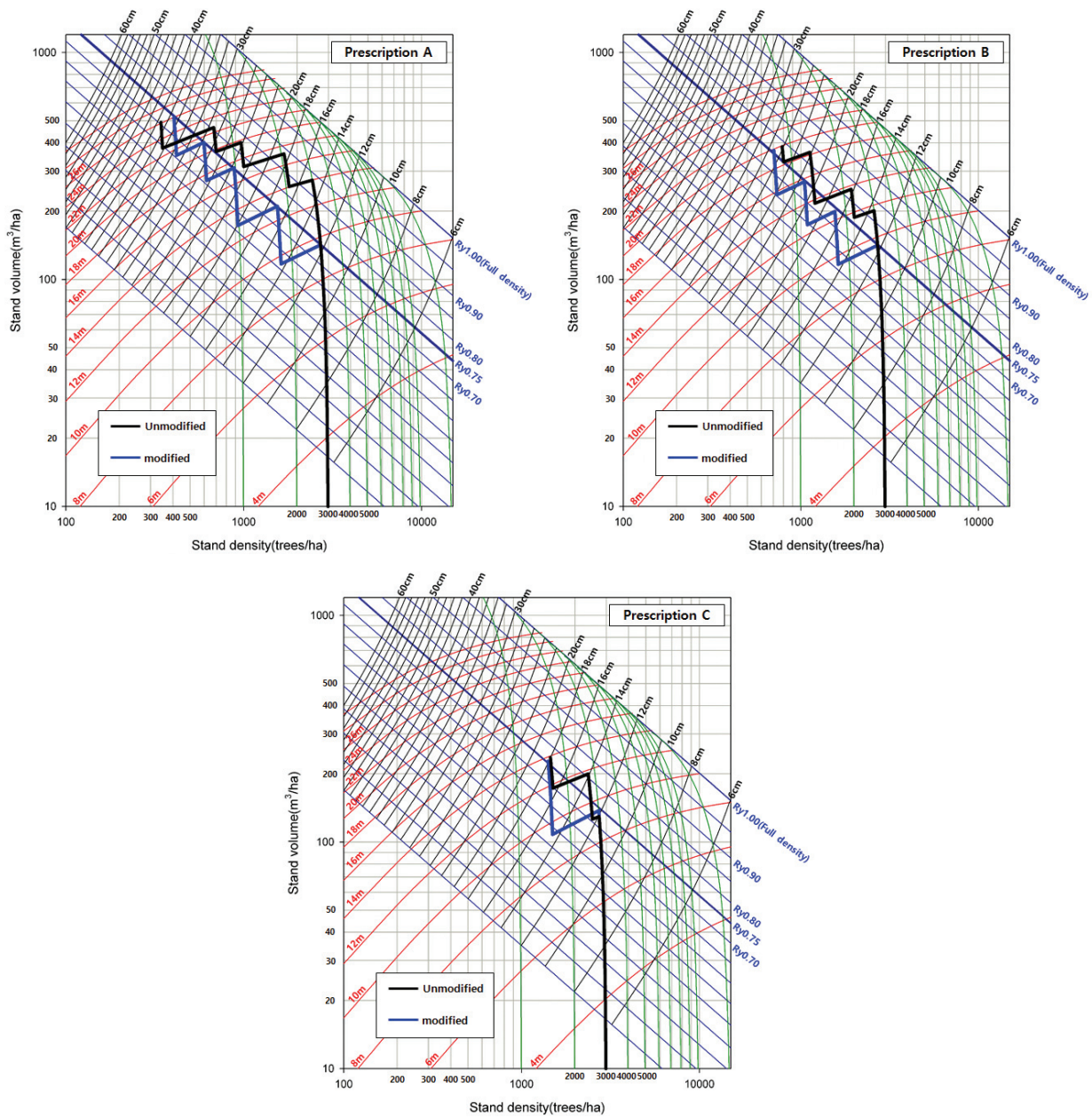


Figure 4. Comparison of the thinning procedures between current and recommended silvicultural system for the scenarios of three harvest goals; Prescriptions A, B, and C(a ‘one-off’ thinning operation) for larger, middle, and small timber harvest, respectively.

수확량 손실로 이어지게 된다. 따라서 시업림의 생산목표 달성 및 건전한 임분구조의 숲을 유도하기 위해서는 생육 단계별 임목 성장특성을 반영한 숲아베기 적정 강도 및 적정 시기를 구명하여 실증적인 편백 맞춤형 시업체계를 개발해야 한다.

3. 임분성장 시뮬레이션을 통한 편백림 성장특성 맞춤형 시업체계 개발

편백림 시업체계를 ha당 3,000본 조림으로 가정하고 적

정 시업체계를 개발하고자 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 적용된 시점은 적정 임분밀도 관리지표인 Ry 0.75 도달 시점으로 하였고, 강도는 숲아베기 차수가 증가할수록 전차기의 숲아베기 강도를 넘지 않도록 하였다. 또한 숲아베기 강도는 임분밀도 기준 간벌율을 5% 단위로 증감시키면서 차기에 도달하는 시점에 회복 가능 여부를 체크하였으며, 최대 50%를 넘지 않도록 하였다. 숲아베기 횟수는 기 시업체계와 동일하게 대경재는 4회, 중경재는 3회, 소경재는 1~2회로 제한하였다(Table 5).

Table 6. Comparison of yield estimated by current and recommended thinning prescriptions for cypress stands.

Type	Thinning prescription	Estimated yield					
		Stand age	Mean DBH (cm)	Mean height of dominant trees (m)	Mean tree volume (m ³)	Stand density (trees · ha ⁻¹)	Stand volume (m ³ · ha ⁻¹)
Unmodified (Current)	A	80	39.3	26.1	1.436	343	492.2
	B	60	26.2	20.0	0.482	785	384.8
	C	40	18.0	13.9	0.162	1,453	236.0
Modified (Recommended)	A	80	37.1	26.1	1.278	405	517.1
	B	60	27.2	20.0	0.526	704	370.5
	C	40	18.1	13.7	0.161	1,410	227.5



Figure 5. Tree damages of non treated plots in a long term thinning experiment on Cypress (*Chamaecyparis obtusa*) in Gochang prefecture, Mt. Moonsoo.

적정 임분밀도 관리지표인 Ry 0.75를 기준으로 생산목표별 숲아베기 회수 및 강도를 분석한 결과(Figure 3, Table 3), 대경재 수확목표 시업체계(Prescription A)에 적용된 숲아베기 횟수는 총 4회이며, 1차 숲아베기가 15년에 숲아베기 강도 40%, 2차 23년에 숲아베기 강도 40%, 3차 37년, 4차 53년에 각각 적용되었다. 중경재 수확목표 시업체계(Prescription B)는 총 3회의 숲아베기가 적용되었고, 1차 숲아베기가 18년에 숲아베기 강도 40%, 2차 27년에 숲아베기 강도 30%, 3차 39년에 숲아베기 강도 30%, 4차 53년에 각각 적용되었다. 소경재 수확목표 시업체계(Prescription C)는 총 1회의 숲아베기가 임령 22년에 45%의 숲아베기를 적용하는 것이 타당한 것으로 나타났다. 임분밀도의 측면에서 경쟁지표인 상대수확량지수는 Ry 0.75 시점에서 숲아베기를 하고 이후회복을 원칙으로 시물레이션하여 일관적인

임분밀도를 유지하는 것을 확인할 수 있다(Figure 4).

숲아베기 시업체계는 임령이 증가하여 그 횟수가 거듭될수록 시업 사이의 기간이 길어지고, 강도는 줄어들며, 1차 실시 시점은 적용된 지위지수가 높을수록 적용 임령은 낮아지는 특성을 보인다. 이러한 점은 일정 시점 이후 임분 생장이 감소한다는 점과 동일한 임분밀도일 때, 지위지수가 높을수록 성장속도가 빨라 개체간 경쟁시점이 더욱 조기에 이르게 도달하는 특성 때문으로 볼 수 있다. 또한 개선된 시업체계는 ha당 3000본 조림을 기준으로 하여 임분밀도 관리의 일관성을 보이므로, 어느 정도 균일한 연륜생장을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 수확목표별 시업체계의 예측 수확량 비교

기존 시업체계(NIFoS, 2005)와 개선된 시업체계의 시물

레이션을 통해 도출된 수확량 예측하여 비교하였다. Figure 4에는 편백림에 대한 3가지 수확목표별 기존(흑색 실선) 및 개선(청색 실선)하고자 하는 시업체계를 각각 적용하여 조림부터 수확지점까지의 임분밀도관리도 상에서 임분단위 성장 동태를 비교분석 가능하도록 제시하였다. 여기서 세장목이 다수 발생하기 시작하는 변곡점에 위치한 상대수확량지수 Ry 0.75를 기준으로 제시된 대경재 (Prescription A)와 중경재(Prescription B) 시업체계는 1차 수아베기 시점이 기존 시업체계에 비해 상대적으로 낮은 상대수확량지수에서 실시되는 것으로 나타났으며, 이후 밀도관리기준(Ry 0.75)에 도달할 때마다 수아베기를 순차 적용하여 최종 수확목표지점에 도달하도록 하였다. 소경재 시업체계(Prescription C)는 기존 시업체계가 ha당 5,000본 조림 기준의 임분밀도 관리계획인 까닭으로 ha당 3,000본 조림으로 조림본수 감소에 따라 1차 수아베기(수아베기율 8.4%)가 다소 무의미해진 것을 육안으로 확인할 수 있으며, 이러한 점을 반영하여 1회의 수아베기를 적용하여 최종 수확지점까지 이동하였다.

개선된 수확목표별 시업체계 적용에 따라 최종적으로 도달한 수확지점의 예측된 수확량은 Table 6에서 확인할 수 있는데, 대경재 시업체계(Prescription A)는 기존의 경우 평균 흉고직경 39.3 cm의 임목을 ha당 343본, $492.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 만큼 수확할 것으로 예측되었고, 개선된 시업체계는 평균 흉고직경 37.1 cm의 임목을 ha당 405본, $517.1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 수준으로 나타나 수확목의 평균 크기는 감소하였으나, ha당 수확본수 및 재적은 기존 대비 증가할 것으로 나타났다. 또한 중경재 시업체계(Prescription B)의 경우 기존 시업체계가 평균 흉고직경 26.2 cm, ha당 785본, $384.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, 개선된 시업체계 평균 흉고직경 27.2 cm, ha당 704본, $370.5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 로 나타나 평균 임목의 크기는 약 1.1 cm 가량 커지고 수확본수와 재적은 상대적으로 감소할 것으로 예측되었다. 소경재 시업체계(Prescription C)의 경우 기존 체계에서는 평균 흉고직경 18.0cm, ha당 1,453본, $236.0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, 개선된 시업체계는 평균 흉고직경 18.1 cm, ha당 1,410본, $227.5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 로 나타나 수확본수와 재적이 기존 대비 소폭 감소할 것으로 나타났다. 이러한 결과는 편백림의 성장예측을 통한 개선된 편백 수확목표별 시업체계를 적용한 결과이다. 하지만, 제시된 시업체계는 임지 생산력 등 자연 환경적, 기능적, 경영적 다양한 특성 차이로 인하여 반드시 일률적으로 적용될 수는 없다. 전국 편백림의 성장특성을 반영한 Figure 4의 임분밀도관리도로부터 본 연구에서 작성된 생산목표별 실증적 시업체계는 다양한 임분관리에 있어서 기준이 될 수 있으며, 다양한 임분관리에 참조 체계로서 더욱 활용성이 기대된다.

결론

편백 조림본수 ha당 3,000본 식재 시 적용가능한 시업체계를 도출하기 위해 작성된 편백 임분밀도관리도와 지위지수 분류곡선을 이용하여 편백 성장특성 맞춤형 수아베기 적정 시업체계를 개발하였다. 임분의 안정성을 유지할 수 있는 적절한 수아베기 시점을 도출하기 위해 임분 내 세장목의 비율과 상대수확량지수 관계를 분석하여 변곡점인 상대수확량지수 Ry 0.75를 도출하였고, 이를 편백림 경영 시 적절한 수아베기 시점인 임분밀도 관리기준 지표로 설정하였다. 시업체계 개선을 위한 수확목표별 시나리오 설정은 수확목표별 벌기령 및 지위지수, 목표 흉고직경 등 기존 표준매뉴얼 상 편백 시업체계의 기준을 최대한 수렴하였고, 수아베기 시점은 앞서 도출된 임분밀도 관리기준 지표를 반영하여 임분 성장 시물레이션을 진행하였다. 기존 편백 시업체계를 적용하여 시물레이션을 진행한 결과, 임령이 증가함에 따라 적용되는 수아베기 강도의 불균형과 지위에 따른 성장속도가 반영되지 않은 수아베기 시점이 주요 문제점으로 도출되었고, 이러한 문제를 개선하기 위해 앞서 설정한 시나리오 기준을 적용하여 개선된 편백 수확목표별 시업체계를 도출하였다. 기존 대비 주요 개선사항은 임령이 증가함에 따른 성장속도의 변화에 맞춰 수아베기 강도를 조정하였고, 수아베기 시점을 상대수확량지수 Ry 0.75 도달 시점으로 획일화하여 숲 관리의 일관성을 기하였다. 예상 수확량은 편백 대경재 수확목표 시업체계는 ha당 353본, $498.1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 이 수확 가능한 것으로 나타났고, 중경재는 703본 $\cdot \text{ha}^{-1}$, $376.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, 소경재는 1,758본 $\cdot \text{ha}^{-1}$, $249.5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 으로 나타났다. 이 연구를 통해 도출된 수확목표별 시업체계는 다양한 경영목표 및 이용 및 용도를 고려한 수확목표재에 초점을 두지 못한 한계를 지니고 있으나, 현실임분에 적용할 경우 편백림의 과밀화 현상과 수관율 감소에 따른 생산성 저하, 수아베기 후 풍도목 및 설해피해 저감과 같은 효과가 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 국립산림과학원 일반연구사업의 지원에 의해 수행된 ‘난대 주요 인공림의 맞춤형 임분관리 및 자원화 연구(2021~2024, 과제번호(SC0600-2021-01)) 및 본 산림청(한국임업진흥원) 산림분야 재난·재해의 현안해결형 연구개발 R&D 사업의 수목 생태형태학적 특성인자를 고려한 산림복원지수 개발 과제(2021346A00-2123-CD01)’의 지원을 받아 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다.

References

- Ando, T. 1962. Growth analysis on the natural stands of Japanese red pine (*Pinus densiflora* Sidb Et Zucc). II. Analysis of stand density and growth. Bulletin Government Forest Experiment Station 210: 1-153.
- Ando, T. 1968. Ecological Growth analysis on the natural stands of Japanese red pine (*Pinus densiflora* Sidb Et Zucc). II. Analysis of stand density and growth. Bulletin Government Forest Experiment Station 210: 1-153.
- Barrio anta, M. and Alvarez gonzalez, J.G., 2005. Development of a stand density management diagram for even-aged Pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules. *Forestry* 78(3): 209-216.
- Castedo-dorado, F., Crecente-campo, F., Alvarez-alvarez, P. and Barrio-anta, M. 2009. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry* 82(1): 1-16.
- Gifu Prefectural Forest Department. 2010. Japanese cypress plantations, stand harvest table and stand density management diagram – General area, area maximum snow is less than 1m, Gifu prefectural forest department, Japan, 2nd ed. pp. 27.
- Jung, S.Y., Ju, N.G., Lee, K.S., Yoo, B.O., Park, Y.B., Yoo, S.B. and Park, J.H. 2015. Thinning intensity and growth response in a *Quercus acuta* stand. *Journal of Korean Forest Science Society*. 104(4): 536-542.
- Jung, S.Y., Lee, K.S., Lee, H.S., Bae, E.J., Park, J.H. and Ko, C.U. 2020. Development of Stand Yield Table Based on Current Growth Characteristics of *Chamaecyparis obtusa* Stands. *Journal of Korean Forest Science Society*. 109(4); 477-483.
- Kkumar, B.M., Long, J.N. and Kumar, P. 1995. A density management diagram for teak plantations of Kerala in peninsular India. *Forest Ecology and Management* 74 (1995): 125-131.
- Korea Forest Service. 2020. Guidelines for sustainable forest resource management; Korea Forest Service: Daejeon, Korea.
- Korea Forest Service. 2021. statistical year book of Forestry in Korea. <https://kfss.fo rest.go.kr/stat/ptl/fyb/frstyYrBookList.do?curMenu=9854> (2022. 2. 7).
- Korea Forestry Promotion Institute. 2017. Guidelines for the 7th National Forest Resource Survey and Field Survey on the Health and Vitality of Forests. Korea Forestry Promotion Institute, Information Package No.13. pp. 86.
- Kramer, H. 1996. Waldwachstumslehre. (Translation: Byeon, U.H., Lee, W.H. and Bae, S.W.). Ucheon Media. (Original work published 1988). pp. 399.
- Ma, S.K. 1977. Productivity and Density Control of Stands of Japanese Larch. *Journal of Korean Forest Science Society* 34: 21-30.
- Minoche, D., Risio-Allione, L., Herrero De Aza, C. and Martínez-Zurimendi, P. 2017. Density management diagram for teak plantations in Tabasco, Mexico. *iForest* 10: 909-915.
- Moktan, M.R., Kwon, J.H., Lim, J.H., Shin, M.H., Park, C.W. and Bae, S.W. 2015. Wind Stability of Commercially Important Tree Species and Silvicultural Implications, Daegwallyeong Korea *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 17(1): 58-68.
- National Institute of Forest Science. 2005. Standardized manual of Sustainable forest resources management. NIFoS. Seoul, Korea. pp. 289.
- National Institute of Forest Science. 2012. Economical species ⑤, *Chamaecyparis obtusa* (Siebold & Zucc.) Endl. NIFoS. Seoul, Korea. pp. 155.
- National Institute of Forest Science. 2019. Development of treatment regime for forest management in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands. Program II, Research Report. pp. 301-334.
- National Institute of Forest Science. 2020. Tree volume · biomass and stand yield tables. NIFoS. Seoul, Korea. pp. 361.
- Newton, P.F. 2021. Stand density management diagrams: modelling approaches, variants, and exemplification of their potential utility in crop planning. *Canadian Journal of Forest Research* 51: 236-256.
- Park, J.H. 2016. Development of a stand density control model based on regional growth characteristics of *Pinus densiflora*. (Dissertation). Jinju. Gyeongsang National University.
- Park, J.H., Chung, S.H., Kim, S.H. and Lee, S.T. 2020. Optimum stand density control considering stability in *Larix kaempferi* forests. *Journal of Korean Forest Science Society* 109(2): 202-210.
- Park, J.H., Jung, S.Y., Yoo, B.O., Lee, K.S., Park, Y.B. and Kim, H.H. 2017. The Production objectives and optimal standard of density control using stand density management diagram for *Pinus densiflora* forests in Korea. *Journal of Korean Forest science Society* 106(4): 457-464.
- Park, J.H., Son, Y.M., Lee, K.S., Park, E.J. and Jung, S.Y. 2019. The adequacy assessment and growth effects by methods of 1st thinning in *Chamaecyparis obtusa* forest. *Journal of Korean Forest Science Society* 108(3): 349-356.
- Park, J.H., Yoo, B.O., Lee, K.S., Park Y.B., Kim, H.H. and

- Jung, S.Y. 2018. Prediction of mortality and yield for *Chamaecyparis obtusa* using stand density management diagram. Journal of Korean Forest science Society. 107 (2): 174-183.
- Reineke, L.H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests, Journal of Agricultural Research 46: 627-638.
- Son, Y.M., Yun, J.H., Bae, E.J., Lee, K.S., Jung, S.Y., Park, J.H., Jeon, H.K. 2020. Development of tending system for stand management of cedar cypress stands. Research Report 20-07, National Institute of Forest Sciences pp. 122.
- Wonn, H.T. and O'Hara, K.L. 2001. Height: Diameter Ratios and Stability Relationships for Four Northern Rocky Mountain Tree Species. Western Journal of Applied Forestry 16(2): 87-94.
- Yun, J.H., Bae, E.J. and Son, Y.M. 2021. Growth curve estimation of stand volume by major species and forest type on actual forest in Korea. Journal of Korean Forest Science Society 110(4): 648-657.
- Zeide B. 2002. Density and the Growth of Even-Aged Stands, Forest and Science 48(4): 743-754.
-
- Manuscript Received : September 7, 2023
First Revision : November 14, 2023
Second Revision : December 9, 2023
Third Revision : March 4, 2024
Accepted : March 5, 2024