

상대공간지수와 우세목 형상비를 연계한 일본잎갈나무 임분밀도관리도 개발

박준형¹ · 김태운¹ · 길민경¹ · 김영희¹ · 이 한¹ · 임상섭¹ · 허태철¹ ·
임채영¹ · 이용규² · 이상태¹ ^{2*}

¹한국산지보전협회, ²국립산림과학원 산림기술경영연구소

Development of a Stand Density Management Diagram for *Larix kaempferi* by Integrating Relative Spacing Index and the Dominant-Tree Slenderness

Joon Hyung Park¹, Tae-Woon Kim¹, Min-Kyung Gil¹, Yeong-Hoe Kim¹, Han Lee¹,
Sangseop Lim¹, Taechul Hur¹, Chaeyoung Lim¹, Yongkyu Lee² and Sang Tae Lee¹ ^{2*}

¹Korea Forest Conservation Association, Daejeon 35262 Korea

²Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pochon 11186, Korea

요약: 본 연구는 임분의 성장과 안정성을 동시에 고려한 체계적인 임분밀도 관리를 위해 5~7차 국가산림자원조사 표본지 576개 자료를 이용하여 일본잎갈나무 인공림의 임분밀도관리도(SDMD)를 최신 자료로 재추정하고, 상대수확량지수 대신 상대공간지수(RSI)를 밀도 지표로 도입하였다. 또한 임분 평균 형상비를 흉고직경 백분위 기반 4개 크기구간 형상비로 환산하는 회귀식을 구축하고, 우세목 크기구간의 형상비 80(HD80)을 안정성 임계선으로 SDMD에 중첩하였다. 두 기준을 비교한 결과, 우세목 수고 2~14 m에서는 RSI가 상대적으로 높은 밀도를 제시하여 안정성 위험을 과소평가할 가능성이 확인되었으며, 16 m 이상에서는 두 기준이 역전되는 양상이 나타났다. 이에 초기 단계(≤ 14 m)에는 HD80 기준을 우선 적용하고, 성숙 단계(≥ 16 m)에는 RSI 적정범위(18~22%)를 병행하는 속아베기 적용선을 제안하였으며, 시뮬레이션 예시를 통해 적용 절차를 제시하였다. 이는 일본잎갈나무림 숲가꾸기 사업에서 간벌 시기와 강도를 결정하는 실용적 기준이 될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: This study aims to support systematic forestry stand density management by simultaneously considering the stand growth and stability. The stand density management diagram (SDMD) for Japanese larch (*Larix kaempferi*) plantations was re-estimated using updated data from 576 sample plots in the 5th-7th National Forest Inventory of Korea. The relative spacing index (RSI) replaced the relative yield index as the density indicator. Regression equations were developed to convert the stand mean H/D ratio of the overall stand into separate ratios for four tree-size classes (defined by diameter at breast height percentiles). The dominant-tree H/D ratio of 80 (HD80) was overlaid on the SDMD as a stability threshold line. RSI suggested relatively higher stand densities for dominant height classes of 2-14 m, indicating a potential underestimation of the stability risk, whereas the pattern was reversed at heights ≥ 16 m. Accordingly, a thinning implementation line was proposed that prioritizes the HD80 criterion in the early growth stage, while jointly applying the RSI target range (18%-22%) in the mature stage. The application procedure was demonstrated using an exemplar thinning simulation. The results provide a practical reference to determine thinning timing and intensity in *Larix kaempferi* plantations, which is expected to contribute to improved thinning practices in forest management.

Key words: *Larix kaempferi*, stand density management diagram, relative spacing index, H/D ratio, stand stability, thinning

* Corresponding author
E-mail: lst9953@korea.kr

ORCID
Sang Tae Lee  https://orcid.org/0000-0002-8704-0907

서론

지속가능한 산림경영을 실현하기 위해서는 임분의 구조와 성장 특성을 과학적으로 규명하고, 이를 토대로 솎아베기 등 산림사업의 적용이 필요하다. 산림 조성 초기에 적합한 솎아베기 시점을 놓쳐 과밀한 상태로 관리될 경우 성장 둔화 및 형상비 증가, 고사목 발생 등의 관리상의 문제가 지속적으로 발생할 수 있다(Jin et al., 2024; Park et al., 2019). 또한 태풍, 설해, 병해충과 같은 자연재해의 피해가 빈번히 발생하고 있어서 임분 안정성 확보를 위한 체계적인 임분밀도 관리가 요구된다.

임분밀도는 산림 생태계의 구조적·기능적 특성을 결정짓는 핵심 인자 중 하나로, 임분밀도는 임목 성장, 임분 재적, 수확량, 생태적 다양성 등 임분의 구조적·기능적 특성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수이다. 밀도가 지나치게 높은 경우 개체 간 경쟁이 심화되어 직경 생장이 억제되며, 반대로 밀도가 너무 낮으면 공간의 비효율적 이용으로 인해 임분 전체 생산성 저하가 발생한다(Pretzsch and Schütze, 2021; Zeide, 2004). 이에 따라 적정 임분밀도를 유지하는 것은 단기적 생산성뿐 아니라 장기적 산림경영 안정성과 목표 달성을 위해서도 필수적이다.

이러한 배경에서 임분밀도관리도(Stand Density Management Diagram, SDMD)는 솎아베기 시기, 적정 분수, 수확 전략 등을 도출하는 실용적 도구로 활용되어 왔다. 일본을 비롯한 해외에서는 소나무류, 유칼립투스, 라디에타 소나무 등 다양한 수종에 대해 SDMD가 개발되어 임분밀도관리의 표준 도구로 자리 잡았다(Ando, 1968; Stankova and Shibuya, 2007; Valbuena et al., 2008; Marangon et al., 2017). 국내에서도 일본잎갈나무 등 주요 조림수종을 대상으로 SDMD가 개발되었으나, 대부분 상대수확량지수(Relative yield index: Ry)에 기반하여 현장 실무에서 직관적 활용성이 제한적이었다. Ry는 이론적 정합성은 높지만, 최대밀도에 도달한 임분 자료가 부족할 경우 추정에 한계가 있으며, 실제하기 어려운 최대밀도를 추정하여 이를 기준으로 한 밀도비를 지수화 하였기 때문에 실무자가 이를 충분히 이해하고 현장에서 직접 활용하기 어렵다는 단점이 있다(Nishizono et al., 2013). 이에 따라 절대값 산출이 가능한 상대공간지수(Relative Spacing Index: RSI)를 적용한 관리 모델이 대안으로 주목 받고 있고(Stankova and Shibuya, 2007), 국내에서도 이를 기반으로 한 임분밀도 진단카드가 정책적으로 보급되었다(NIFoS, 2024).

한편, 임분 안정성을 고려한 밀도 관리에는 형상비(H/D ratio 또는 Slenderness ratio)가 중요한 지표로 활용된다. 형상비는 임목의 도복 및 수간 부러짐 등 임목 피해 위험성을 가늠하는 지표로, 임분의 구조적 안정성을 평가하는 국제적

기준으로도 널리 적용되고 있다(Mitchell, 2000; Wonn and O'Hara, 2001; Hinze and Wessels, 2002). 일반적으로 형상비가 80을 초과하면 풍해와 설해 위험이 크게 증가하는 것으로 알려져 있으며, 유럽과 일본에서는 이 기준을 임분 안정성 평가 및 간벌 강도 설정에 활용하고 있다(Becquey and Riou-Nivert, 1987; Castedo-Dorado et al., 2009).

기존 연구는 주로 우세목의 형상비를 기준으로 임분 안정성을 평가 해왔으나, 솎아베기 후 임분 구조 변화와 안정성 확보를 위해서는 수관급별 형상비 차이를 고려할 필요가 있다. Zhu et al.(2006)은 우세목이 풍해·설해에 직접 노출되는 반면, 하층목은 상층에 의해 보호받는다 보고하였다. 또한 Masaka et al.(2007)은 상층 솎아베기 이후 중간목과 피압목의 세장도가 임분구조 안정성을 좌우 하는 핵심 요인이 될 수 있음을 지적하였다. 따라서 수관급별 형상비를 분석하는 것은 솎아베기 후 임분 안정성 확보 및 후계림 구조 형성에 필수적이다.

이에 본 연구의 목적은 일본잎갈나무 인공림을 대상으로 RSI 기반 임분밀도관리도를 구축하고, 수관급별 형상비 변화를 분석하여 임분 안정성을 평가하며, 이를 종합하여 숲가꾸기에 활용 가능한 실용적 기준을 제시하는 것이다.

재료 및 방법

1. 공시 재료

연구에 사용된 일본잎갈나무 임분 자료는 5~7차 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)의 표본점을 활용하였다. 임분밀도관리도의 개발은 동령림이나 단순 일제림의 자료를 활용할 때 예측 정확도가 높은 것으로 알려져 있다(Newton, 1997; Shaw and Long, 2007). 따라서 「제8차 국가산림자원조사 및 산림의 건강·활력도 현지조사 지침서」(KFS and KFPI, 2022)에 제시된 임상구분 기준인 흉고단면적 75% 이상 점유 기준을 참고하여 표준지 내 일본잎갈나무의 흉고단면적(Basal area: BA)이 전체 흉고단면적 대비 75% 이상을 차지하는 임분을 일본잎갈나무 순림으로 정의하고 이 기준에 해당하는 자료를 추출하여 총 576 plots의 자료를 분석에 사용하였다.

본 연구는 선행연구(Park et al., 2000)에서 사용한 자료 이후 축적된 조사구 자료를 포함하여 DB를 구성하였으며, 이를 이용하여 모형 모수를 재추정하였다. 분석에 사용된 표본점의 임령은 최소 20년에서 최대 77년까지 나타났으며, 임분의 평균흉고직경은 26.6 cm, 우세목의 평균수고는 21.9 m, 평균 임분밀도는 613 trees · ha⁻¹이며, 그 외 분석에 활용된 변수의 기초통계량은 Table 1과 같다.

Table 1. Descriptive statistics of variables used in the analysis.

(N=576 plots)

Variable	Code	Unit	Mean	S.D.	Max.	Min.
DBH	D	cm	26.6	7.3	46.5	7.7
Height	H	m	18.1	4.8	28.2	5.5
Dominant tree height	Hd	m	21.9	4.9	33.6	5.5
Basal area	BA	m ² · ha ⁻¹	30.4	12.4	66.1	2.1
Stand volume	V	m ³ · ha ⁻¹	310.8	154.5	862.1	6.1
Stand age	Age	years	37.0	10.0	77.0	12.0
Stand density	N	trees · ha ⁻¹	613.0	325.3	2940.0	175.0
Site index	SI	m	20.0	2.9	26.8	8.1
H/D ratio	HD	-	70.1	15.1	116.4	30.4
Relative yield index	Ry	-	0.8	0.1	1.0	0.1
Relative spacing index	Rs	%	22.7	8.2	97.7	11.8
Stand density index	SDI	trees · ha ⁻¹	601.2	220.6	1318.9	65.4

2. 분석 방법

1) SDMD 구성 모델 추정

임분밀도관리도는 등평균수고곡선, 등평균직경곡선, 최대 밀도곡선, 상대수확량지수곡선, 자연고사곡선으로 이루어져 있는데(Ando, 1968; Jung et al., 2024), 각각의 곡선이 유기적으로 연계된 함수의 형태로 구성되어 있다. 또한 임분 밀도관리도를 구성하는 5가지 곡선의 모델식을 추정하되, 상대수확량지수곡선을 상대공간지수곡선으로 대체하여 적용하였다.

재적 예측식은 우세목 수고와 임분밀도를 매개변수로 활용하는 비선형함수식으로 구성되어 있으며, 등평균수고곡선에 해당한다. 이는 수확량-밀도 효과(Yield-Density effect: Y-D effect)라고 하며, 종속변수인 임분 재적에 본수를 나누어 평균 단목재적으로 환산할 경우 경쟁-밀도 효과(Competition-Density effect: C-D effect)라고 지칭한다. 경쟁밀도 효과는 조림본수의 산정, 수확본수 산정 등 임분밀도 관리의 토대가 되는 모델이며, 식 1~2와 같이 표현된다. 모델의 a_i 는 비선형회귀분석(Non linear regression analysis)을 통해 추정하였다.

$$V = (a_1 H_D^{a_2} + a_3 H_D^{a_4} N^{-1})^{-1} \quad (1)$$

$$V/N = v = (a_1 H_D^{a_2} + a_3 H_D^{a_4} N^{-1})^{-1} \times N^{-1} \\ = (a_1 H_D^{a_2} N + a_3 H_D^{a_4})^{-1} \quad (2)$$

(Where is, V =Stand volume, v = mean volume, H_D := Mean height of dominant trees, N = Stand density, a_i =Parameters)

상대공간지수는 우세목 수고에 대한 입목간 평균거리의 백분율을 의미하는데, 수중에 관계없이 절대값을 산출할 수 있다는 장점을 지닌다. Ando(1968)의 방법으로 개발된 기존 임분밀도관리도는 최대밀도에 대한 상대적 밀도를 지수화 한 상대수확량지수를 밀도 지표로 활용하는데, 최대밀도에 도달한 임분의 데이터가 부재할 경우 최대밀도가 추정되지 않는 오류를 범할 수 있다. 이러한 점을 개선하기 위해 우세목 수고(H_D)와 임분밀도(N)를 변수로 한 상대공간지수를 밀도 지표로 활용하고자 임분밀도관리도에 도입하였고, 산출식은 식 3과 같다.

$$RSI = \frac{\sqrt{(10000 \div N)}}{H_D} \times 100 \quad (3)$$

(Where is, RSI =Relative spacing index, H_D := Mean height of dominant trees, N = Stand density)

등평균흉고직경곡선은 식 1의 추정치를 평방평균흉고직경으로 환산하여 각 직경급별 곡선을 작성하는 방식으로 만들어진다. 이 과정에서 재적을 흉고직경으로 변환하기 위해서는 흉고형수와 수고의 곱으로 산출되는 형상고(HF)를 추정하는 함수식이 필요하며, 이 수식은 식 4와 같다.

$$HF = b_1 + b_2 H_D + b_3 \sqrt{N} H_D \div 100 \quad (4)$$

(Where is, HF =Form height, H_D := Mean height of dominant trees, N = Stand density, b_i =Parameters)

추정된 형상고 예측모델을 활용하여 재적을 흉고단면적으로, 흉고단면적을 다시 평방평균흉고직경으로 환산하는 과정을 거친다.

$$Dq = 200 \sqrt{G \div (\pi N)} \quad (5)$$

$$G = \frac{V}{HF}$$

(Where is, Dq =Quadratic mean diameter at breast height, G =: Basal area, N = Stand density)

초기식재밀도(N_0)로 조립한 임분은 임목이 성장함에 따라 개체 간 경쟁이 심화되고 이에 따른 고사 발생으로 임분밀도의 감소가 나타나는데, 임분밀도관리도에서 우세목 수고와 임분밀도, 재적의 관계는 기본적으로 경쟁-밀도 효과의 규칙을 기본으로 하고 있다. 따라서 해당 모델식의 변형으로 자연 고사량을 식 6과 같이 도출할 수 있으며, 여기에서 모수 추정 은 경쟁-밀도 효과 모델의 모수추정치를 기반으로 식 7과 식 8에 의해 산출된다.

$$N^{-1} = N_0^{-1} - \frac{v}{c_2 N_0^{c_1+1}} \quad (6)$$

$$c_1 = \frac{a_4}{a_2 - a_4}, \quad c_2 = \frac{c_1 Rf}{a_3} \left(\frac{Rf}{1 - Rf} \frac{a_1}{a_3} \right)^{c_1} \left(\frac{b_2}{b_4} \right)^{c_1+1} \quad (7)$$

$$Rc_i = \frac{V}{N} a_3 H_D^{-a_4}, \quad Rf = \max_{i=1, \dots, N} (Rc_i) \quad (8)$$

(Where is, N =Stand density, N_0 = Initial Stand density, V =Stand volume, v = mean volume, H_D =: Mean height of dominant trees, Rf =the maximum competition ratio(Rc_i) corresponding to the full density condition, a_i =Parameters)

2) 추정모델에 대한 통계 검정

상기 방법으로 추정된 각 모델의 통계적 적합성을 판단하기 위해 적합도 지수(Fitness Index, FI)를 도출하였고, 추정치와 실측치간 잔차에 대한 왜곡 및 표준오차를 파악하고자 편의(Bias)와 오차의 표준오차(Standard error of estimation, SEE)와 같은 검정통계량도 함께 분석하였다. 통계 검정 대상은 모수 추정이 필요한 식 1과 식 4가 해당된다. 또한 잔차 분포도를 도식화하여 재적 추정치에 대한 실측치와 추정치간의 변이 정도를 파악하여 추정 모델의 활용성 정도를 파악하였다.

3) 우세목 형상비 임계선 추정

임분 안정성을 고려한 임분밀도 관리의 적정 범위분석은 형상비(Height/DBH ratio: H/D)를 활용하여 분석하였다. 형상비는 흉고직경에 대한 수고의 비를 나타내며, 일각에서는 세장비(Slenderness ratio)로 표현하기도 한다(Castedo-Dorado et

al., 2009). 이 지표는 임분의 안정성에 대한 정보를 지니고 있는 것으로 알려져 있으며, 바람에 의해 발생하는 풍도현상, 설해 등의 피해와 유의미한 관계를 보이는 것을 여러 연구를 통해 밝혀진 바 있다(Mitchell, 2000, Wonn and O'Hara, 2001, Hinze and Wessels, 2002).

일반적으로 임분 내 우세목을 기준으로 형상비를 평가하고 이를 기준으로 임분밀도를 관리하고 있는데, 우세목은 수확 단계에서 경영 수익을 보전할 수 있는 중요한 임목인 동시에 중간목 또는 피압목을 통해, 설해 등의 피해에서 보호해주는 역할을 하고 있어서 상대적으로 임분 내에서 환경적 피해에 관여 정도가 크다(Zhu et al. 2006). 경우에 따라서 하층 숲아베기가 아닌 상층 숲아베기 시행 시 잔존한 중간목, 피압목 등이 새로운 공간을 확보하면서 숲아베기 후의 임분구조와 생산성을 결정하는 중요한 요인이 되기도 하기 때문에 수관급에 따른 형상비의 변화양상을 검토하는 것이 필요하다(Masaka et al., 2007).

따라서 본 연구에서는 임분의 평균 흉고직경과 평균 수고를 기준으로 형상비를 평가함과 동시에 다양한 수관급에 따른 형상비를 고려하기 위해 Castedo-dorado et al.(2009)이 수행한 연구방법을 참고하여 흉고직경 백분위수(피압목= 0~25%, 중간목= 25~50%, 준우세목= 50~75%, 우세목= 75~100%) 4구간으로 구분하였다. 이는 수관급(임목 크기)에 따른 형상비 차이를 체계적으로 파악하기 위함이다. 그 후 구분한 0~25%(HD1), 25~50%(HD2), 50~75%(HD3), 75~100%(HD4)의 구간별 형상비를 구할 수 있는 회귀식을 추정하여 임분밀도 관리의 안정성을 결정하는데 활용하였다.

임분 안정성을 고려한 임분밀도 관리를 위한 임계선은 우세목 형상비가 80을 넘지 않도록 설정하였다. 이는 Castedo-Dorado et al.(2009)이 라디에타 소나무에서 제시한 기준(H/D ≤ 100 안정 구간)보다 엄격한 설정으로, 일본잎갈나무의 풍해·설해 민감성을 반영한 결과이다. 안정성 지표는 피해 가능성을 과소평가하는 것보다 과대평가하는 것이 관리적으로 더 안전하므로, 엄격한 기준의 채택은 합리적이라 할 수 있다. 우세목 형상비는 75~100%(HD4) 구간의 형상비로 정의하고 이를 기준으로 각 흉고직경 백분위수 구간별 변화를 확인할 수 있는 참조표를 제시하여 임분밀도관리도 활용 시 숲아베기 시 임분 안정성 변화양상을 가늠할 수 있도록 하였다.

분석된 우세목 형상비 기준 임계선과 NIFoS(2024)에서 제시한 RSI의 적정 임분밀도 범위인 18~22%의 우세목 수고별 임분밀도(ha당 본수)를 비교하고, 두가지 기준을 중첩하여 숲아베기 기준이 되는 곡선과 임분밀도표를 작성하여 숲아베기 시 적용하는 방법을 제시하였다.

결과 및 고찰

1. 모델 추정 결과

본 연구에서 추정한 일본잎갈나무 임분의 Y-D 효과식(eq.1), 형상고 추정식(eq.4), 자연고사 예측식(eq.6)의 모수값과 적합도는 Table 2와 같다. Y-D 효과식(FI=71.0%)의 모수 추정치는 $a_1 = 0.264$, $a_2 = -1.563$, $a_3 = 14188.395$, $a_4 = -3.276$ 으로 Park et al.(2020)의 $a_1 = 0.074$, $a_2 = -1.159$, $a_3 = 5,368.323$, $a_4 = 2.955$ 와 다소 차이를 보였으며, 특히 a_3 값의 차이가 비교적 큰 것으로 확인된다. a_1 과 a_2 는 우세목 수고에 따른 임분 재적 상한 규모와 형태를 결정하고, a_3 와 a_4 는 임분밀도 변화가 재적에 미치는 영향의 규모와 수고 단계에 대한 민감도를 의미한다. 추정된 계수를 종합적으로 고려하면 예측치의 최대밀도 상한이 증가하고 그 기울기도 증가한 것을 알 수 있다. 이와 같은 차이는 선행연구에 비해 본 연구에 활용된 데이터의 양적 증가(259 plots → 576 plots로 증가)와 함께 임목이 큰 임분(최대 DBH가 36.7 cm → 46.5 cm로 확대) 데이터가 포함되면서 밀도 곡선의 기울기와 상한선이 달리 추정된 결과로 풀이된다. 즉, 기존 모델에 비해 자료의 양과 범위가 확대되면서 실측 자료 누락으로 인해 발생할 수 있었던 외삽 영역(Extrapolation)의 추정 불확실성이 성숙림 단계의 실측 데이터를 통해 보완되어 이를 반영하는 모수치가 도출된 것으로 판단된다.

한편, 일본의 국유림 및 민유림 일본잎갈나무 임분을 대상으로 수행된 선행연구(Nishizono et al., 2013)에서 일본 내 Y-D 효과식의 모수가 일정 범위내에서 보고된 바가 있으며, 본 연구에서 추정된 모수는 해당 범위에서 극단적으로 이탈하지 않는 것으로 나타났다.

형상고 추정식(eq.4)은 모수 $b_1 \sim b_3$ 는 $b_1 = 0.697$, $b_2 = 0.417$, $b_3 = 0.002$ 로 나타났다. 모델의 적합도지수(FI: Fitness index)는 97.7%로 높은 수준으로 나타났고, Bias는 0.193, SEE는 0.259로 0에 가깝게 도출되어 치우침이 적고 오차의 크기가 양호한 수준에서 추정된 것으로 판단된다. 형상고 추정식은 수고와 흉고형수의 곱인 형상고를 도출하며 예측된 임분 재적을 평방평균흉고직경으로 변환할 때 활용하였다.

자연고사 예측식 eq.6의 모수는 eq.7의 산출식을 활용하여

구하므로 검정통계량은 없으며, 모수 c_1 은 -1.912, c_2 는 -1,215,445.945로 산출되었다. 초기 발생본수(또는 조림본수)에 따라 경쟁-밀도 이론에 의해 성장함에 따라 본수의 감소가 일어나는 자연간벌현상을 반영하고 있으며, 최대밀도에 가까워질수록 고사목의 양은 증가하는 경향을 보인다. 따라서 임분 성장 예측 시 자연적으로 발생하는 고사목의 양을 반영하는 용도로 활용하였다.

추정된 모델을 종합하여 등평균수고곡선, 등평균흉고직경곡선, 자연고사곡선, 상대공간지수곡선으로 구성된 임분밀도관리도를 도식화하였다(Figure 1). 여기서, 선행연구의 상대수확량지수곡선 및 최대밀도곡선을 대신하여 상대공간지수곡선을 반영하여 현장 담당자가 직관적으로 임분밀도의 수준을 가늠할 수 있도록 하였다. 작성된 임분밀도관리도는 현장에서 조사된 우세목 수고, 평균 흉고직경, ha당 본수, 임분

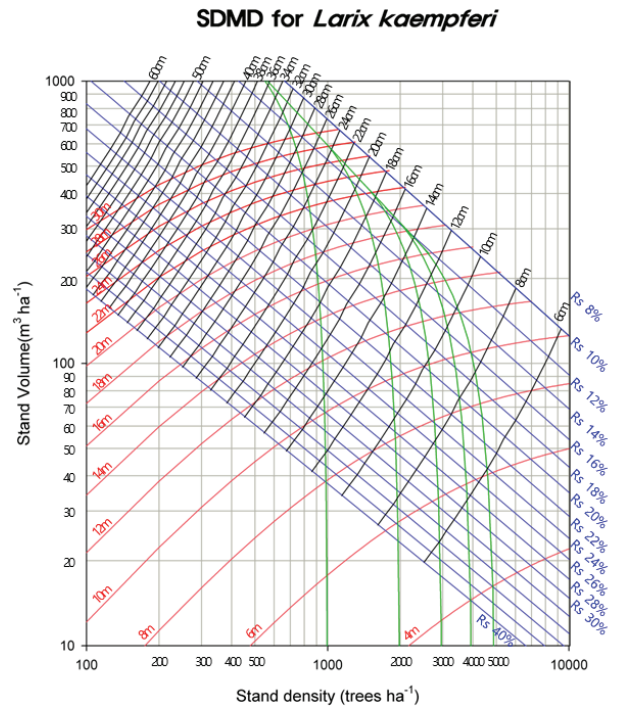


Figure 1. Stand density management diagram (SDMD) for *Larix kaempferi*. Red lines= dominant tree height isolines, Blue lines= relative spacing index isolines, Black lines= mean DBH isolines, Green lines= Self-thinning lines.

Table 2. Results of parameter estimation for constructing the stand density management diagram for *Larix kaempferi*.

Equation number	Parameters	Bias	SSE	FI
eq.1	$a_1=0.264$, $a_2=-1.563$, $a_3=14188.395$, $a_4=-3.227$	0.198	72.495	0.710
eq.4	$b_1=0.697$, $b_2=0.417$, $b_3=0.002$	0.193	0.259	0.977
eq.6	$c_1=-1.912$, $c_2=-1215445.945$	-	-	-

재적 등의 데이터를 활용하여 현재의 임분밀도 수준을 평가하고 앞으로의 숲아베기 일정계획 수립 등 임분밀도 관리 계획수립에 활용할 수 있다.

2. 임목 크기 구간별 형상비 해석을 위한 회귀식 추정

임분을 구성하는 임목을 흉고직경 백분위수에 따라 4개 크기구간(0~25%, 25~50%, 50~75%, 75~100%)으로 분할하여 각 크기구간별 평균 형상비를 임분 평균 형상비와의 관계로 회귀분석을 통해 추정한 결과는 Table 3과 같다. Table 3의 관계식은 임분밀도관리도에서 산출할 수 있는 임분 평균 형상비($\overline{HD}$)를 크기구간별 형상비로 환산하기 위한 변환식으로, 동일 임분 내에서 크기구간별 형상비 수준을 함께 해석하기 위한 기초자료로 활용하였다.

구간별 회귀식의 설명력(R^2)은 0.788~0.928 범위로 나타났다. $HD2$ 와 $HD3$ 에서 상대적으로 높게 확인되었다. 표준추정오차(SEE)는 12.361~95.206 범위로 나타났고, 특히 $HD1$ 에서 오차가 크게 나타나 임내의 열세한 임목 구간의

형상비 변동성이 큰 것으로 판단되었다. Bias는 -0.125~0.036 범위로 절대값이 전반적으로 크지 않아, 본 관계식은 구간별 평균 형상비를 체계적으로 과대 또는 과소 추정하는 경향이 크지 않은 것으로 확인되었다. 또한 선행연구에서도 임분 평균 형상비로 직경 분위별 형상비를 추정하여 임분 안정성 평가에 활용한 바 있으며, 대경목 구간에서 형상비 분산이 상대적으로 작게 나타나는 경향이 보고되었다(Castedo-Dorado et al., 2009).

Table 4는 관리대상이 되는 우세목 크기 구간($HD4$)의 형상비를 기준값(예: 60~120)으로 설정한 후, 각 기준 값에 대응하는 임분 평균 형상비($\overline{HD}$)를 역산하고, 이를 Table 3의 관계식에 대입하여 $HD1 \sim HD3$ 의 예측치를 산출한 결과이다. 즉 Table 4는 임분밀도관리도 상에서 $HD4$ 등치선(60, 80, 100, 120 등)을 해석할 때, 같은 조건에서 다른 크기구간($HD1 \sim HD3$)의 형상비가 어느 수준으로 동반되는지를 함께 제시하기 위한 참조표로 정리하였다. $HD4=80$ (우세목 안정성 기준)에 해당하는 시점에서 $HD3$ 구간(50~75%)은 92.2,

Table 3. Results of regression analysis relating stand mean H/D ratio to mean H/D ratio by tree size class.

Regression equations	Bias	SEE	R^2
$HD1(0 \sim 25\%) = 1.321\overline{HD} - 4.914$	-0.023	95.206	0.788
$HD2(25 \sim 50\%) = 1.030\overline{HD} + 0.482$	0.032	22.327	0.907
$HD3(50 \sim 75\%) = 0.891\overline{HD} + 2.706$	0.036	12.361	0.928
$HD4(75 \sim 100\%) = 0.721\overline{HD} + 7.604$	-0.125	17.961	0.852

Table 4. Estimated mean H/D ratios of each tree size class derived from stand mean H/D ratio.

Estimated H/D ratio by tree size class				
$\overline{HD}$	$HD1(0 \sim 25\%)$	$HD2(25 \sim 50\%)$	$HD3(50 \sim 75\%)$	$HD4(75 \sim 100\%)$
58.8	72.8	61.0	55.1	50.0
65.7	81.9	68.2	61.3	55.0
72.7	91.1	75.3	67.5	60.0
79.6	100.2	82.5	73.6	65.0
86.5	109.4	89.6	79.8	70.0
93.5	118.6	96.8	86.0	75.0
100.4	127.7	103.9	92.2	80.0
107.3	136.9	111.0	98.4	85.0
114.3	146.1	118.2	104.5	90.0
121.2	155.2	125.3	110.7	95.0
128.1	164.4	132.5	116.9	100.0
135.1	173.5	139.6	123.1	105.0
142.0	182.7	146.8	129.2	110.0
149.0	191.9	153.9	135.4	115.0
155.9	201.0	161.0	141.6	120.0

Table 5. Results of regression analysis for mean DBH and mean height equations.

Regression equations	Bias	SEE	R^2
$\overline{D}=0.919D_q+0.145$	-0.009	0.937	0.968
$\overline{H}=0.854H_d+0.390$	-1.132	3.257	0.910

HD2 구간(25~50%)은 103.9로 나타났다. 따라서 우세 크기 구간의 형상비가 80을 초과하지 않도록 관리할 경우, 동일 시점에서 중간 크기구간(*HD2*~*HD3*)의 형상비 수준은 Table 4의 예측값을 기준으로 함께 점검할 수 있으며, 수야베 기를 통해 낮은 임분밀도 구간으로 이동할 때 크기구간별 형상비 변화 양상도 동시에 해석할 수 있다.

임분밀도관리도에 HD_4 구간의 평균 형상비 등치선을 표기하기 위해 평방평균 흉고직경(D_q)과 우세목 수고(H_d)를 독립변수로 한 변환 추정식을 구하였다(Table 5).

$HD4$ 의 평균 형상비에 해당하는 곡선을 표기하기 위해 Table 4의 추정식을 임분밀도관리도의 모형식과 연계하고, 이를 역산하여 Table 4에 제시된 평균 형상비($\overline{HD}$)에 해당하는 평방평균 흉고직경(D_q)과 우세목 수고(H_u), ha당 분수 및 임분 재적을 구하였고, 이를 임분밀도관리도에 표기하였다 (Figure 2). 이때 표기한 곡선은 $HD4$ 의 60부터 120까지 7개 곡선이 해당한다.

3. 임분 안정성을 고려한 숙아베기 시업 기준 적용 방안

우세목 형상비(*HD4*) 기준과 RSI 기준을 비교한 결과 (Table 6), 수고 2~12 m에는 RSI가 상대적으로 높은 밀도를 제시하여 안정성 위험을 과소평가할 가능성이 있다. 반대로 임분 성숙 단계(수고 14 m 이상)에 이르면 두 기준이 수렴하였고, 수고 18 m 이상에서는 RSI가 오히려 낮은 임분밀도를 보였다. 따라서 임분밀도 관리는 임령에 따라 두 기준을 상호 보완적으로 활용할 필요가 있으며, 초기 단계는 형상비 기준을 우선 적용하고, 성숙 단계에서는 RSI 기준을 병행하는 것이 합리적이다.

임분밀도관리도 상에서 속아베기 시점을 결정하는 것은 임분밀도 적정범위의 상한선에 근접하였을 때 넘지 않도록 속아베기를 실행하는 방법이다. 그 의미는 과밀한 상태를 만들지 않아야 한다는 것이며, 1차 속아베기 단계가 포함되는 수고 14 m 이하에서는 임분 안정성을 고려한 적정 임분밀도 상한 기준을 넘지 않도록 하여 속아베기를 한다. 하지만 16 m 이상의 우세목 수고급에서는 두 기준이 수렴되거나 역전되는 양상을 보이기 때문에 임분의 안정성 측면에서 상대공간지수도 충족하므로, 상대공간지수 기준을 채택하거나 형상비 기준을 채택하여 적용하는 것 모두 선택이 가능하다. 이때 유의해야할 점은 동일한 크기의 임목의 본수를 낮게 잔존시킨다는 것은 그만큼 생산성이 떨어질 수도 있다는 점이며, 경영목표와 방향에 따라 적합한 기준을 적용하는 것이 필요하다. 본 연구에서 제시하는 속아베기 시점의 임분밀도 기준은 2~14 m는 형상비 기준 임분밀도 임계선을 적용, 16~30 m는 상대공간지수 기준의 적정 임분밀도 상한선을 적용하여 임분의 안전성을 보장하는 속아베기 실행 임분밀도 기준을 Table 6에 제시하였다.

앞서 언급한 속아베기 실행 방법과 설정한 속아베기 실행 임분밀도 기준의 활용 예시는 Figure 3와 같다. 일본잎갈나무 지위지수 20인 임지에 ha당 3000본을 조림하였다고 가정하고 임분밀도관리도를 활용하여 시물레이션을 실시하면, 1차 속아베기 시점은 A로 조림 후 15년에 도달한다. 이때 1차 속아베기 강도를 50%를 적용하여 B까지 이동한 이후, 임분 생장이 진행된다. 동일한 방식으로 2차 속아베기 시점 C에 속아베기 강도 40%를 적용하여 D까지 이동, 3차 속아베기 E에서 속아베기 강도 30%를 적용하여 F까지 이동한 후 최종 수확시점인 G에 도달하도록 하였다. A~F의 1~3차 속아베기 과정을 통해 안정성 기준과 임분밀도 기준을 함께 고려한

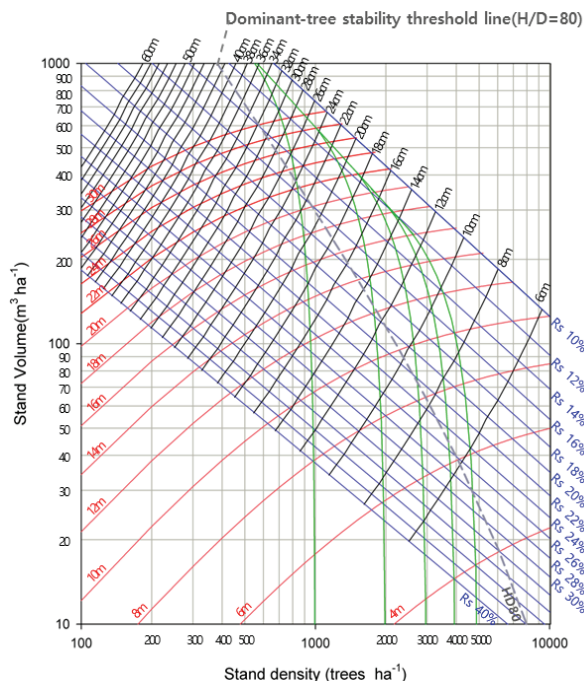


Figure 2. Stand density management diagram with the HD80 stability threshold line. The HD4 = 80 iso-line (HD80) was overlaid on the stand density management diagram (SDMD) to represent the stability threshold of dominant trees (upper size class). This line was used as a reference boundary for interpreting stand density conditions in relation to H/D ratio-based stability.

Table 6. Comparison of stand density ranges determined by H/D ratio and relative spacing index (Unit=trees · ha⁻¹).

Dominant tree height class (m)	①Optimal stocked range based on H/D ratio (This study)	②Optimal stand density range based on RSI (NIFoS, 2024)		Combined criterion (① and ②)
	HD4=80	RSI=22%	RSI=18%	
2	10,552	51,653	77,161	10,552
4	6,097	12,913	19,290	6,097
6	4,059	5,739	8,573	4,059
8	2,956	3,228	4,823	2,956
10	2,282	2,066	3,086	2,282
12	1,834	1,435	2,143	1,834
14	1,518	1,054	1,575	1,518
16	1,286	807	1,206	1,206
18	1,108	638	953	953
20	969	517	772	772
22	858	427	638	638
24	766	359	536	536
26	691	306	457	457
28	627	264	394	394
30	572	230	343	343

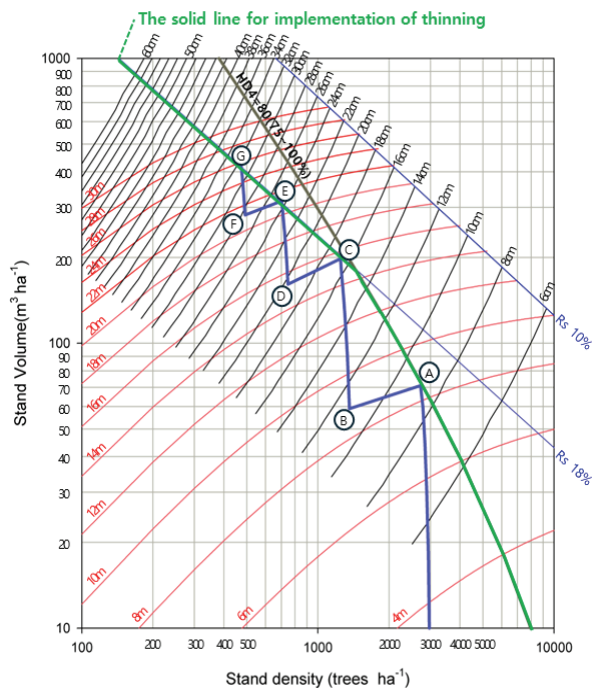


Figure 3. Thinning schedule on the stand density management diagram and an example of thinning simulation. A green solid line indicates the timing for thinning implementation on the stand density management diagram (SDMD). An example thinning simulation (Blue solid line) is presented along the line, and key stages are marked as A–G: A, before the 1st thinning; B, after the 1st thinning; C, before the 2nd thinning; D, after the 2nd thinning; E, before the 3rd thinning; F, after the 3rd thinning; and G, final harvest.

계획 수립을 효율적으로 할 수 있으며, 동일한 방법으로 숲아베기 대상이 되는 임분의 숲아베기 시점 도달 여부 판단도 가능하다.

결론

임분밀도 관리에서 상대공간지수(Relative Spacing Index, RSI)는 우세목 수고와 ha당 본수를 활용하여 간단히 산출할 수 있고 절대값을 제공한다는 점에서 현장 적용성이 높다. 그러나 RSI의 단일 기준만으로는 풍해·설해 등 외부 교란에 대한 임분의 구조적 안정성을 직접적으로 반영하기 어렵고, DBH 크기 구간에 따른 안정성 차이를 동시에 설명하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구는 국가산림자원조사 표본지 자료를 활용하여 일본잎갈나무 임분밀도관리도를 구축하고, 상대수확량지수와 우세목 형상비를 곡선으로 추정하여 SDMD에 연계하였다.

DBH 크기 구간별 형상비 분석 결과, 소경목 구간에서 형상비 변동성이 상대적으로 크게 나타나 안정성 확보가 어려운 경향이 확인되었다(본문 결과 참조). 또한 형상비와 RSI 기준을 비교한 결과, 우세목 수고 14 m까지는 RSI가 상대적으로 높은 밀도를 제시하여 안정성 위험을 과소평가할 가능성이 있는 반면, 형상비 기준은 비교적 낮은 임분밀도를 도출하였다. 반대로 수고 16 m 이상에서는 RSI가 오히려 더 낮은 밀도를 제시하는 양상이 확인되었다. 이러한 결과는 임령(수고급)에 따라 밀도 진단 지표의 민감도가 달라질 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 형상비 임계값으로 우세목(상위 크기 등급)의 $HD4=80$ 을 적용하여 SDMD에 안정성 임계선으로 중첩하였고, 이를 속아베기 시점 판단의 기준 경계선으로 활용하였다. 일반적으로 형상비가 80을 초과하면 풍해와 설해 위험이 증가하는 것으로 보고되어 있으며, 본 연구의 HD80선은 조림 초기 단계에서 과밀 누적과 안정성 저하를 예방하기 위한 보수적 기준으로 기능한다. 또한 우세목 수고 14 m 이상 구간에서는 RSI 기준과의 수렴 또는 역전 특성을 고려하여, 성숙 단계에서는 RSI 기준을 병행 적용할 수 있도록 SDMD 상에 두 기준을 결합한 속아베기 적용선을 제시하고, A~G 단계의 시뮬레이션 예시로 적용 절차를 제시하였다(본문 Figure 3 및 Table 6 참조). 결과적으로 본 연구에서 제시한 SDMD와 우세목 형상비 안정성 임계선, 그리고 RSI 병행 적용 방식은 일본잎갈나무 인공림에서 속아베기 시기와 강도를 결정하는 실무적 기준으로 활용될 수 있다고 판단된다.

본 연구의 한계점으로는 임분 안정성을 고려한 적정 임분밀도의 하한 기준 설정을 하지 못한 점이다. RSI의 하한 기준은 철저하게 생산성의 측면에서 검토된 것이며, 해당 수준보다 낮은 임분밀도로 관리할 경우 실질적인 임분 단위 생산성이 감소하는가에 대한 검토가 부족하였다. 이것은 장기 고정 시험지를 조성하고 반복조사를 통해 성장량 분석을 진행하여 생산성이 감소하는 양적인 임계점을 찾는 방법으로 해결할 수 있는데, 현재로서는 자료의 부족으로 현 수준에 그칠 수밖에 없는 상황이다. 또한 전반적으로 이론 기반의 연구가 이루어졌는데, 이러한 모델 및 기준을 활용하여 현실림에서 실현 시험을 통해 장기적인 검증과정도 필요하기 때문에 추후 시험지 조성 및 연구자료 확보로 명확한 하한 기준을 제시 및 연구결과의 검증을 할 수 있도록 연구를 지속할 필요가 있다.

References

- Ando, T. 1968. Ecological growth analysis on the natural stands of Japanese red pine (*Pinus densiflora*). II. Analysis of stand density and growth. Bulletin of the Government Forest Experiment Station. 210: 1-153.
- Becquey, J. and Riou-Nivert, P. 1987. L'existence de zones de stabilité des peuplements: Conséquences sur la gestion. Revue Forestière Française. 39(4): 323-334.
- Castedo-Dorado, F., Crecente-Campo, F., Álvarez-Álvarez, 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.
- Hinze, W.H.F. and Wessels, N.O. 2002. Stand stability in pines: An important silvicultural criterion for the evaluation of thinnings and the development of thinning regimes. Southern African Forestry Journal. 196: 1-10.
- Jin, H.J., Lee, D.S., Jung, S.H. and Choi, J.K. 2024. Analysis of Adequate Stand Density Management for Major Commercial Species in Korea using Relative Density. Journal of Korean Society of Forest Science 113(3): 372-381.
- Jung, S.Y., Lee, K.S., Kim, H.S. and Park, J.H. 2024. Improvement of the Thinning System by Exploring the Stand Density Management Criteria for *Chamaecyparis obtusa* in South Korea. Journal of Korean Society of Forest Science 113(1): 131-142.
- KFS (Korea Forest Service) and KFPI (Korea Forestry Promotion Institute), 2022, Guidelines for the 8th National Forest Resource Survey and Field Survey on the Health and Vitality of Forests. Korea Forestry Promotion Institute, Information Package pp. 91.
- Marangon, G.P., Schneider, P.R., Zimmermann, A.P., Longhi, R.V. and Cavalli, J.P. 2017. Density management diagrams for stands of *Eucalyptus grandis* in Brazil. Revista Árvore. 41(1): 1-8.
- Masaka, K., Kon, H. and Fukuchi, M. 2007. Thinning effect on height and radial growth of *Pinus thunbergii* with special reference to trunk slenderness in a matured coastal forest in Hokkaido, Japan. Japanese Journal of Forest Planning. 12: 25-33.
- Mitchell, S.J. 2000. Stem growth responses in Douglas-fir following thinning: Implications for assessing wind-firmness. Forest Ecology and Management. 135: 105-114.
- Newton, P.F. 1997. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning. Forest Ecology and Management. 98(3): 251-265.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2024. Relative spacing index-based stand density diagnostic card. Press release (June 21, 2024). National Institute of Forest Science, Seoul, Korea. <https://www.forest.go.kr/>. (Press release list. 2024.06.21.).
- Nishizono, T., Inoue, A. and Hosoda, K., 2013. Relationship between relative yield index and relative spacing index: Theoretical derivation and its characteristics. Japanese Journal of Forest Planning. 47(1): 16-28.
- Park, J.H., Chung, S.H. Kim, S.H. and Lee, S.T. 2020. Optimum stand density control considering stability in forests. Journal of Korean Forest Society. 109(3): 455-466.
- 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 Society of Forest Science 108(3): 349-356.
- Pretzsch, H. and Schütze, G., 2021. Tree species mixing can increase stand productivity, density and growth efficiency and attenuate the trade-off between density and growth throughout the whole rotation. *Annals of Botany*. 128(6): 767-786.
- Shaw, J.D. and Long, J.N., 2007. A density management diagram for longleaf pine stands with application to red-cockaded woodpecker habitat. *Southern Journal of Applied Forestry*. 31(1): 28-38.
- Stankova, T.V. and Shibuya, M. 2007. Stand density control diagrams for Scots pine and Austrian black pine plantations in Bulgaria. *New Forests*. 34(2): 123-141.
- Valbuena, P., Peso, C. and Bravo, F. 2008. Stand density management diagrams for two Mediterranean pine species in eastern Spain. *Sistemas y Recursos Forestales*. 17(2): 97-104.
- 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.
- Zeide, B., 2004. Optimal stand density: a solution. *Canadian Journal of Forest Research* 34(4): 846-854.
- Zhu, J., Li, X., Liu, Z., Gonda, Y. and Matsuzaki, T., 2006. Factors affecting the snow and wind induced damage of a montane secondary forest in northeastern China. *Silva Fennica*. 40(1): 37-51.

Manuscript Received : October 10, 2025

First Revision : January 12, 2026

Second Revision : February 6, 2026

Third Revision : March 6, 2026

Accepted : March 9, 2026