

## 임분밀도관리도를 이용한 편백림의 고사량 및 수확량 예측

박준형<sup>1</sup> · 유병오<sup>1</sup> · 이광수<sup>1</sup> · 박용배<sup>1</sup> · 김형호<sup>2</sup> · 정수영<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 산림바이오소재연구소, <sup>2</sup>경상대학교 산림환경자원학과

### Prediction of Mortality and Yield for *Chamaecyparis obtusa* Using Stand Density Management Diagram

Joon Hyung Park<sup>1</sup>, Byung Oh Yoo<sup>1</sup>, Kwang Soo Lee<sup>1</sup>, Yong Bae Park<sup>1</sup>,  
Hyung-Ho Kim<sup>2</sup> and Su Young Jung<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Forest Biomaterials Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea

<sup>2</sup>Department of Forest Environmental Resources Sciences, Gyeongsang National University,  
Jinju 52828, Korea

**요약:** 본 연구는 편백 조림 임분을 대상으로 임분관리 체계 수립을 위해 임분밀도관리도를 개발하였다. 조사 표본점 216 plots을 활용하여 수확량-임분밀도 관계를 추정하였으며( $R^2=0.743$ ), 추정된 모수를 바탕으로 임분밀도관리도를 구축 하였다. 생장을 예측한 결과, ha당 3,000 본 조림 후 80년간 숲아베기 시업을 하지 않았을 경우 고사 본수는  $12.0 \sim 18.1 \text{ trees} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ 로 분석되었고, 임분 재적은  $463.1 \sim 695.4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 임분밀도는  $1,555 \sim 2,038 \text{ trees} \cdot \text{ha}^{-1}$ 로 나타났다. 향후 임분밀도관리도는 시업 기준과 수확목표 설정 등 산림 경영 계획 수립에 있어서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**Abstract:** This study aims to make the stand density management diagram which is useful for establishing stand density management system in *Chamaecyparis obtusa* forest. By using 216 sample plots to estimate Yield-Density relationship ( $R^2=0.743$ ), the stand density management diagram was modeled by the estimated parameters. As a result of this diagram, after planting 3,000 trees per hectare the mortality rate of this unthinned *C. obtusa* stands over 80 years was estimated to be equal to  $12.0 \sim 18.1 \text{ trees} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ , and stand volume was  $463.1 \sim 695.4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , and stand density was  $1,555 \sim 2,038 \text{ trees} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Developed stand density management diagram for *C. obtusa* is effective to establish the management criteria and production objective. Therefore, this study allowed us to make the optimal forest working plan.

**Key words:** stand density management, growth, thinning, full density curve, management criteria, production objective

## 서론

임분밀도관리도(Stand Density Management Diagram: SDMD)는 1960년대 초반부터 다양한 분석 접근법을 적용하여 상업적 가치가 높은 수종을 대상으로 주로 개발되었다(Newton, 1997). 초기에는 개체목 재적과 임분밀도 간의 관계를 의미하는 경쟁-밀도 효과(Competition-Density effect: C-D effect), 임분 재적과 임분밀도 간의 관계를 규

정한 수확량-밀도 효과(Yield-Density effect: Y-D effect)와 자연간벌의 법칙(Self-thinning rule)에 관한 연구가 이루어졌다(Kira et al., 1953; Koyama and Kira, 1956; Shinozaki and Kira, 1956; Yoda et al., 1963). 이러한 연구 결과들을 바탕으로 Ando(1962)가 C-D효과와 Y-D효과의 상호작용을 나타내는 함수에 자연간벌의 법칙을 개념적 기반으로 하여 일본 중부지역에 분포한 소나무를 대상으로 임분밀도관리도를 개발하였다. 평방평균 흉고직경과 평균 우세목 수고를 등치선 형태로 임분밀도관리도 상에 표기하여 주어진 벌기령에서 지정된 평방평균흉고직경을 달성하는데 필요한 숲아베기 일정을 결정하고자 하였다(Ando, 1962). 이후 개체목 및 임목 수확량에 대한 다양한

\* Corresponding author  
E-mail: suyong.jung@korea.kr

ORCID

Su Young Jung  https://orcid.org/0000-0002-4372-0417

슈아베기 처리별 결과가 도출되고 관리의 효과에 대한 평가가 임분밀도관리도에 의해 이루어졌으며, C-D 효과의 실증적인 검증을 하였다(Ando, 1968).

이후 Drew와 Flewelling(1977)은 동일한 평균 간재적을 가진 임분에서 얻을 수 있는 최대 임분밀도와 현재의 임분밀도 비율을 상대밀도지수(Relative density index; Pr)로 정의하고 임분밀도관리도에 도입하였다. 그리고 이 지수를 이용하여 수관경쟁이 전혀 없는 영역( $Pr > 0.15$ ), 수관경쟁이 일어나는 영역( $0.15 < Pr < 0.40$ ), 자연고사 발생이 임박한 영역수준( $0.40 < Pr < 0.55$ ), 자연고사가 발생하는 영역( $Pr > 0.55$ )을 예측하고 임분밀도관리도 상에 표기하였으며, Pr 0.40~0.55 사이에서 관리되는 임분은 단위면적당 최대 재적을 생산할 수 있는 것으로 평가하였다.

McCater와 Long(1986)은 Drew와 Flewelling(1979)의 상대밀도지수가 아닌 Reineke(1933)의 임분밀도지수(Stand density index; SDI)를 사용하여 임분밀도관리도의 경쟁적으로 활용하였다. 이를 통해 수관폐쇄와 자연고사 영역에 대한 SDI값이 확인되었고 특정 관리목표를 위한 임분밀도관리 수준을 설정하고 밀도관리 체계를 평가하는데 임분밀도관리도를 응용하였다. 또한 목표로 하는 생산재적과 목재의 크기를 달성하기 위해 임분밀도관리 체계를 유도하여 임분밀도관리도의 유용성을 입증하였다.

한편 Smith와 Long(1987)은 McCater와 Long(1986)의 Lodgepole pine 임분밀도관리도를 응용하여 야생동물 서식지의 적정 밀도를 설정하고 서식지 확대에 도움을 줄 수 있는 임분밀도관리 체계를 구축하였다. Smith(1989)는 임분밀도 관리 외에 식생 관리에 임분밀도관리도의 활용 가능성에 대해 연구하여 식생발달을 제어할 초기 조림밀도를 설정하였다. 또한 Puettmann(1992)은 활엽수혼효림의 임분밀도관리도를 유도하여 활엽수 임분에 대한 적용성도 검토하였다.

1990년대 이후 컴퓨터의 발달로 임분밀도관리도는 비약적인 발전이 이루어졌다(Newton, 1993; Newton and Weetman, 1994; Newton, 1997). 관리된 천연림을 대상으로 임분밀도관리도를 개발하였으며, 수관경쟁이 일어나는 영역과 자연고사 발생이 임박한 영역, 자연고사가 발생하는 영역을 표기하였다. 또한 이용재적의 개념을 도입하여 다양한 임분밀도관리 체계에 따라 간재적 및 이용재적 추정치에 용이하도록 하였으며, 컴퓨터를 이용한 알고리즘을 개발하여 사용자의 보간 오차를 줄이고 정확도를 향상시키는 성과를 보였다.

2000년대에 들어서 산림분야에서는 스웨덴, 북아메리카 등의 기업림을 중심으로 재적수확량보다 수확 목재 가치에 중점을 둔 임분 관리 체계 구축에 힘을 실었다(Newton et al., 2004). 이에 따라 임분밀도 관리도는 Weibull 흉고

직경 분포 모델과 연계하여 구조적 임분밀도 관리 모델(Structure stand density management model: SSDMM)로 발전하였다(Newton et al., 2004). 구조적 임분밀도 관리 모델은 임분관리 체계의 수립과 수확목표 지점에서 예측되는 흉고직경급별 재적과 이용재적 등을 산출하여 임목의 가치평가가 가능하도록 하였다. 이와 더불어 최근에는 한층 더 발전한 형태로 구조적 임분밀도 관리 모델을 기반으로 한 임분 성장 예측 기술과 임목 가치 평가 기술이 결합된 임분 관리 의사결정 지원 시스템(Decision-support system for forest density management)으로 발전하였다(Newton, 2009; Newton, 2012). 임분관리 체계의 결정을 임분의 재적생산량만 고려하는 것이 아니라 수간재적, 이용재적, 원목 용도별 재적, 바이오매스 및 탄소량, 가지발달 및 옹이발생 예측 등 다각적인 가치평가를 통해 임분관리를 위한 체계 구축을 위해 노력하고 있다.

한편, 국내에서도 관련 연구가 진행된 사례가 있다. Ando(1968)의 방법을 적용하여 수관폐쇄 영역, 수량비수 등평균 우세목수고곡선 등이 임분밀도관리도에 포함되었고 이 방법을 이용하여 잣나무(Sim et al., 1985), 일본잎갈나무(Sim et al., 1986), 리기다소나무(Sim et al., 1987)의 임분밀도관리도가 작성된 바가 있다. 또한 소나무 유령림에 대해 유사한 방법으로 경쟁-밀도효과(Competition-Density Effect)의 상호작용 함수를 추정하여 임분밀도관리도를 작성한 사례가 있다(Kim et al., 1987). 하지만 이러한 연구는 산림자원의 관리체계 수립에 있어서 필수적인 판단 기준임에도 불구하고 산림경영계획 수립 및 산림현장에 충분히 반영되지 못하고 있으며, 현실임분의 특성을 고려한 생산목표 예측 및 생산목표별 임분 관리 체계 수립을 위해서는 최근 다양한 형태로 발전된 임분밀도관리도 중에서 적용성이 높은 모형을 적용할 필요가 있다. 한편 국내 임분밀도관리도 연구는 과거 중장령 임분이 부족한 상태에서 주로 작성되어졌으나, 임지생산력과 임목생장이 개선된 현실임분에 대한 적용성이 낮은 문제점이 있다. 이외에도 다양한 생산목표를 달성하기 위하여 발전한 최근 임분밀도관리도의 원리와 형태에 접근하기에는 과거 조사자료는 부족하다.

이에 따라 우리나라 편백림에 대한 현실성 있는 임분 관리 체계를 마련하기 위해서는 최근까지 조사된 결과 및 분석자료를 취합하여 임분밀도관리도의 작성이 필요하다. 또한 작성된 결과에 대한 충분한 검증을 위해서 고정 시험지의 지속적인 모니터링을 통해 최대밀도의 접근여부와 최대밀도의 변화추이를 실측치와 비교하는 것이 필요하다. 또한 우리나라 식생대와 유사한 일본의 편백 임분밀도관리도 작성 체계 및 그 결과를 고찰함으로써 분석된 결과에 대한 검증 및 해당 오류를 최소화 하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 일본에서 사용중인 임분밀도관리도 개발 방법을 도입하여 우리나라 편백(*Chamaecyparis obtusa*) 현실림을 대상으로 임분밀도관리도를 개발함으로써 생장예측 및 고사예측에 의한 정량적 임분밀도 관리평가 체계를 구축하고자 하였다.

### 재료 및 방법

#### 1. 연구 자료 수집 및 분석

본 연구에서는 우리나라에 조성된 편백 인공림을 대상으로 수치임상도와 항공영상 등의 산림 공간정보 자료를 이용하여 조사 대상지를 추출하였다(Figure 1). 그 중 임목의 크기와 분수, 임령 등을 고려하여 현지 표본점을 선정 후 현지 조사를 수행하였다. 표본점은 200~400 m<sup>2</sup>의 방형구이며, 조사된 자료는 편백 순림 (흉고단면적 점유율 75% 이상)으로 분류된 총 216개소의 표본점 조사 자료를 분석에 활용하였다. 임분밀도관리도 구성 모델 분석에 사용된 변수는 평균 흉고직경(Mean of DBH)과 평균 수고(Mean of tree height), 우세목 수고(Mean of dominant tree height), 형상고(Form height), 임분 흉고단면적(Stand basal area), 재적(Stand volume), 임분밀도(Stand density)를 이용하였다(Table 1). 우세목 수고는 각 표본점에서 조사된 수고 값의 상위 30%의 임목을 대상으로 평균수고를 산출하여 우세목 수고로 정의하였다. 그리고 형상고는 평균 수고와 흉고형수의 곱으로 값을 구하여 분석에 활용하였다. 또한 분석자료의 주요 성장인자들 간의 관계식 1~4에 의해 이상치를 제거하였고, 이상치 제거 후 다시 재추정하여 임분밀도관리도 구성 모델 간 연결성을 높이기 위해 4가지 함수식을 활용하였다.

$$HF = a + bHT + c \frac{\sqrt{NHT}}{100} \quad (1)$$

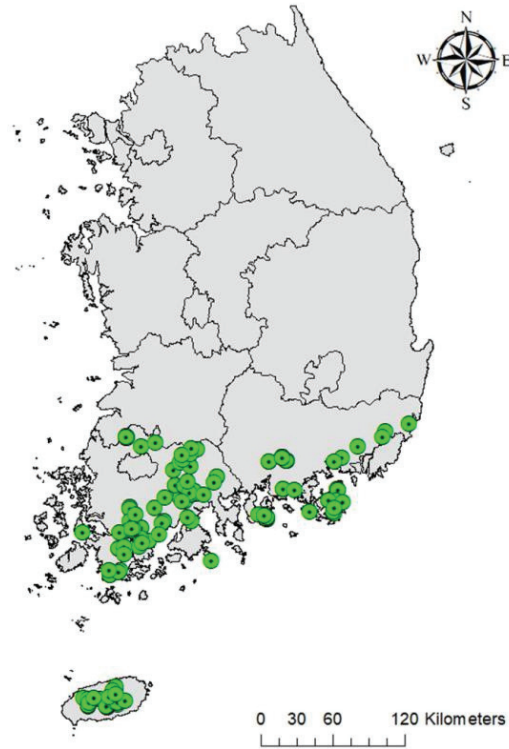


Figure 1. Field sample plots of *Chamaecyparis obtusa* in study area

$$D = a + bDg + c \frac{\sqrt{NHT}}{100} \quad (2)$$

$$H = a + bHT + c \frac{\sqrt{NHT}}{100} \quad (3)$$

$$\log(v) = a + b\log(HT) + c\log(N) \quad (4)$$

Where, HF= Form factor, HT= Upper tree height, N= Number of trees, D= Mean of DBH, Dg= Quadratic mean diameter at breast height, H= Mean of tree height, v= Tree volume, and a~c= Parameters

Table 1. Descriptive statistics of used variables in the sample plots.

Variable	Symbol	Unit	N	Mean	S.D.
Mean dbh	D	cm	193	19.07	4.90
Mean of tree height	H	m	193	14.34	3.61
Mean of dominant tree height	HT	m	193	15.68	3.79
Form height	HF	m	193	6.65	1.60
Stand density	N	trees · ha <sup>-1</sup>	193	1522.59	570.08
Mean individual tree volume	v	m <sup>3</sup>	193	0.23	0.18
Stand basal area	G	m <sup>2</sup> /ha	193	42.39	17.40
Stand volume	V	m <sup>3</sup> /ha	193	303.25	192.77

## 2. 모형의 추정

본 연구의 임분밀도관리도는 Ando(1968)의 방법을 적용하였으며, 등평균수고곡선(Equivalent height curve), 등평균흉고직경곡선(Equivalent diameter curve), 최대밀도곡선(Full density curve), 수량비수선(Relative yield index curve), 자연고사선(Natural mortality curve) 등 5개의 곡선으로 구성되어 있다. 모형 추정과정은 Park et al.(2016)의 방법과 동일하게 C-D 효과를 나타내는 함수식을 추정 한 후 등평균 우세목수고곡선, 최대밀도곡선, 자연고사선, 수량비수선, 등평균 흉고직경곡선의 함수식을 각각 산출하였다.

### 1) 등평균 우세목수고곡선

등평균우세목수고 곡선은 우세목 수고와 임분밀도, 재적 간의 관계식이며, 단목재적을 종속변수로 할 경우 C-D effect(식 5), 임분재적을 종속변수로 할 경우 Y-D effect(식 6)라 지칭한다. 식 5의 단목재적  $v$ 에 임분밀도  $N$ 을 곱하면 (6)이 되므로, 식 6을 각 표본점별로 정리된 종속변수와 독립변수를 대입하여 비선형 회귀분석법으로 모형을 추정하였다.

$$\frac{1}{v} = z_1 HT^{z_2} N + z_3 HT^{z_4} \quad (5)$$

$$\frac{1}{V} = z_1 HT^{z_2} + \frac{z_3 HT^{z_4}}{N} \quad (6)$$

Where,  $v$ =Tree volume,  $V$ =Stand volume,  
 HT=Dominant tree height,  $N$ =Stand density,  
 $z_i$ =parameters

### 2) 임분 경쟁 지표

임분밀도관리도에서는 임내 개체목간의 경쟁지표로 상대경쟁지수(Relative Competition index: RC)를 사용한다. 상대경쟁지수는 임내 개체목간 경쟁을 나타내는 지수이며(Shim et al., 1985), 경쟁상태이 없는 상태의 개체목 재적에 대해 특정경쟁상태 임분의 개체목 재적의 비율로 나타낸다. 개체목의 재적은 등평균수고곡선식에서  $N$ 을 0으로 하였을 때, 나타나는 값이며,  $v=1/B$ 로 표현된다. 경쟁이 없는 상태에서 성장 가능한 개체목 재적의 최대값을 1이라고 할 때, 현재 임분 경쟁에 의해 생장한 재적을 비율로써 경쟁 정도를 의미하는 상대경쟁지수(RC)를 구하였다(Nagahama, 2003; Park et al., 2016). 또한 경쟁지수 산출식(식 7)을 적용한 후 각 표본점의 경쟁비수 중 가장 낮은 값을 한계경쟁지수(Rf)로 지정하여 최대밀도곡선이 지나도록 유도하였다.

$$Rc = \frac{v_{Rc}}{1} = v_{Rc} z_3 HT^{-z_4} = \frac{V_{Rc}}{N} z_3 HT^{-z_4} \quad (7)$$

$$Ry = \frac{V_{Rc}}{V_{Rf}} = \frac{1 - Rc}{1 - Rf} \quad (8)$$

Where, Rc=Relative competition index,  
 Rf=Relative competition index at full density,  
 $v_{Rc}$ =tree volume,  $V_{Rc}$ =Stand volume,  
 HT=Dominant tree height,  $N_{Rc}$ =Stand density,  
 $z_i$ =parameters

### 3) 최대밀도곡선과 수량비수선

최대 밀도곡선은 임분밀도 추정식 (8)과 재적 추정식 (9) 두 가지 함수로 구성되어 있다. 식 9는 임분밀도를 독립변수로 하여 임분 재적을 예측하여 임분밀도관리도 상에서 최대밀도곡선을 나타내는 식이며, 식 10은 식 9의 임분밀도를 수고급별로 예측하는 식이다. 식 10은 시간의 개념이 존재하지 않는 임분밀도관리도에서 우세목수고를 독립변수로 하는 함수식을 도입함으로써 지위지수 예측 함수와 연계하여 시간개념의 도입이 가능하도록 중요한 역할을 하는 함수이다.

$$V_{Rc} = K_2 N_{Rc}^{K_1 + 1} \quad (9)$$

$$N_{Rc} = K_4 HT^{K_3} \quad (10)$$

이 때,  $V_{Rc}$ 는 경쟁비수  $Rc$ 일 때의 임분재적을 의미하며,  $N_{Rc}$ 는 경쟁비수  $Rc$ 일 때의 임분밀도를 의미하고,  $HT$ 는 우세목 수고이다. 여기에서  $K_1 \sim K_4$ 는 식 9와 10의 모수이며, 이 모수들은 앞선 경쟁-밀도효과 이론의 함수식에서 추정된 계수를 이용하여 산출하였다.

$$K_1 = \left( \frac{z_4}{z_2 - z_4} \right) \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{(1 - Rf) Ry}{z_1} \left( \frac{1 - (1 - Rf) Ry}{(1 - Rf) Ry} \frac{z_1}{z_3} \right)^{\frac{z_2}{z_2 - z_4}} \quad (12)$$

$$K_3 = (z_4 - z_2) \quad (13)$$

$$K_4 = \frac{(1 - Rf) Ry}{1 - (1 - Rf) Ry} \frac{z_3}{z_1} \quad (14)$$

Where, Ry=Relative yield index,  
 Rf=Relative competition index at full density,  
 $z_i$ =Parameters for equivalent height curve,  
 $K_i$ =Parameters for full density curve

식 11~14의  $K_1 \sim K_4$ 는 수량비수곡선의 모수이며, 수량비수( $R_y$ )가 1.0이 최대밀도이며, 이를 기준으로 수량비수를 0.5 간격으로(1.00, 0.95, 0.90, 0.85...) 값을 적용하여 수량비수 곡선의 모수를 산출하였다. 이 때, 수량비수 곡선의 경우 최대밀도곡선을 기준으로 비율에 따라 동일한 간격의 곡선이 도식화되어야 하므로 동일한 기물기에서 상수만 달리하기 위해 모형 기물기에 영향을 미치는 모수  $K_1$ 과  $K_3$ 는 고정하고,  $K_2$ 와  $K_4$ 등의 값을 수량비수별로 산출하였다. 각 수량비수별로 산출된 모수  $K_2$ 와  $K_4$ 를 식 9와 10에 대입하여  $R_y$  1.0부터 0.3까지 임분밀도관리도에 도식화하였다.

4) 자연고사선

자연고사선은 조림분수  $N_0$ 상태에서 조성된 임분은 숲아베기 등의 인위적인 밀도조절 시업이 적용되지 않으면 성장 과정에 따른 분수 감소를 보이면서 최대밀도곡선에 접근하며, 최대밀도 곡선과 가까워짐에 따라 변곡을 하여 최종적으로는 최대밀도곡선과 일치하게 된다. 이러한 자연고사 법칙(Self-thinning rule)은 식 15와 같이 표현되며, 이 함수식의 모수  $K_1$ 과  $K_5$ 의 추정은 Y-D effect 함수의 모수를 이용하여 산출하였다.

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} - \frac{v}{K_5 N_0^{(K_1+1)}} \tag{15}$$

where,

$$K_1 = \left( \frac{z_4}{z_2 - z_4} \right),$$

$$K_5 = \frac{K_1 Rf}{z_3} \left( \frac{Rf}{1 - Rf} \frac{z_1}{z_3} \right)^{K_1} \left( \frac{z_2}{z_4} \right)^{K_1 + 1}$$

5) 등평균 흉고직경곡선

등평균흉고직경곡선은 식 6에서 추정된 재적을 흉고단면적, 흉고직경으로 환산하는 과정을 거쳐 등평균수고곡선을 통해 등평균 우세목 수고곡선에서 추정되는 재적을 평방평균흉고직경( $Dg$ )으로 환산해서 구하였으며 사용된 식은 (1), (2), (16) 및 (17)과 같다.

$$HF = a + bHT + c \frac{\sqrt{N}HT}{100} \tag{1}$$

$$D = a + bDg + c \frac{\sqrt{N}HT}{100} \tag{2}$$

$$G = \frac{V}{HF} \tag{16}$$

$$Dg = 200 \sqrt{\frac{G}{(\pi N)}} \tag{17}$$

Where,  $HF$ =Form height,  $HT$ =Dominant height,  
 $N$ =Stand density,  $D$ =Diameter at breast height,  
 $Dg$ =Quadratic mean diameter at breast height,  
 $G$ =Basal area and  $a \sim c$ =Parameters

추정된 식 1을 이용하여 형상고( $HF$ )를 추정하고 그 값을 식 16에 적용하여 임분 흉고단면적( $G$ )을 산출하였다. 그리고 평방평균흉고직경( $Dg$ )을 구하기 위해 식 17를 적용하였다. 산출된 평방평균흉고직경은 식 2를 통해 평균흉고직경을 추정하였고, 등평균우세목수고곡선과 수량비수곡선 사이의 교차점에 해당하는 흉고직경 값을 연결하여 등평균흉고직경곡선을 작성하였다(Nagahama, 2003).

3. 성장 및 고사율 예측

완성된 임분밀도관리도는 시간의 개념이 내삽 되어있지 않기 때문에 별도의 성장모델과 연계하여 활용할 수 있다. 따라서 임분밀도관리도와 지위지수 추정 모델을 연계하여 임분 성장 및 고사 예측을 하였다. 예측을 위해 사용된 지위별 우세목 성장량 예측 모델은 임목 재적 및 바이오매스 및 임분수확표에 첨부되어 있는 편백 지위지수 분류곡선을 이용하였다(Forest Service and National Institute of Forest Science, 2012). 예측 시나리오는 고사율 추이를 살피기 위해 지위지수 12~16의 임지에 ha당 3,000본 조림 후 시업을 하지 않은 상태에서 80년 후 예측되는 수확재적과 수확분수, 고사량을 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 분석 자료의 검토 및 분류

임분밀도관리도 개발에 활용되는 주요 변수들의 상호관계에 있어서 기각되는 자료를 찾기 위해 식 1~4에 대해 관계를 분석하였으며, 이상자료 기각 방법에 의해 최종적인 분석용 자료를 구축하였다. 이상자료는 전체 216개소의 표준지 중 23개소가 기각대상 자료로 분류되었고, 최종 분석에 활용된 조사자료는 편백 193개소이다. 이상 자료를 기각한 후 다시 동일한 식에 대해 재추정하여 Table 2와 같은 모수 추정결과를 구하였다. 추정된 모형 식 1~4는 임분밀도관리도의 5가지 주요 모형 추정에 활용하였다.

**Table 2. The estimation of interaction equations for rejecting data by species.**

Equations	Parameters			R <sup>2</sup>
	a	b	c	
(1) HF	0.145	0.406	0.022	0.962
(2) D	0.097	0.950	0.023	0.990
(3) H	-0.178	0.967	-0.108	0.964
(4) log v	-0.104	1.754	-0.857	0.807

**2. 임분밀도관리도 구성 모형 추정**

1) 등평균수고곡선

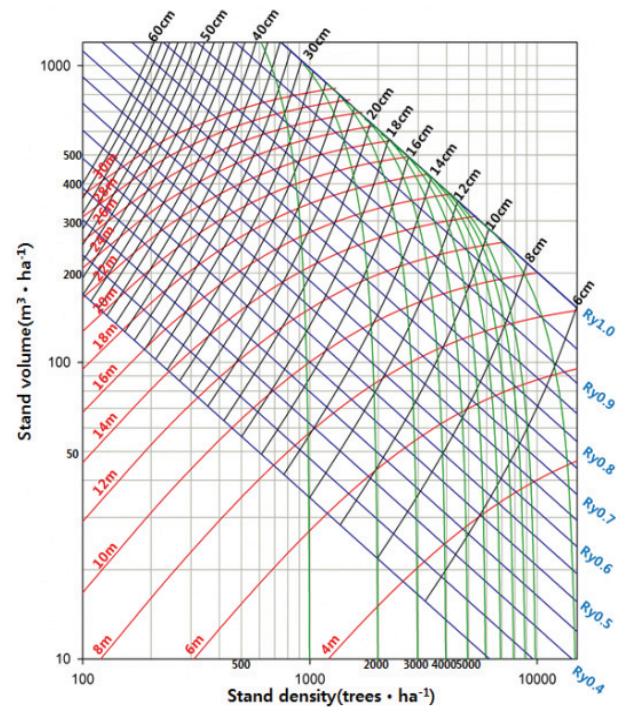
편백의 등평균수고곡선 함수식 모수 추정 결과(Table 3), 모형 설명력(R<sup>2</sup>)은 편백이 0.743이며, 추정된 모수 z<sub>1</sub>~z<sub>4</sub>는 z<sub>1</sub>=0.089, z<sub>2</sub>=-1.300, z<sub>3</sub>=8,600.426, z<sub>4</sub>=-3.191로 나타났다. 규슈지역 편백 국유림은 z<sub>1</sub>가 0.030, z<sub>2</sub>=-1.124, z<sub>3</sub>=6,421.8, z<sub>4</sub>=-3.039로 보고되었으며, 시코쿠 지역은 z<sub>1</sub>=0.042, z<sub>2</sub>=-1.196, z<sub>3</sub>=9,832.6, z<sub>4</sub>=-3.234로 보고되었다(Forestry and Forest Products Research Institute, 2012). 현재 일본에서 사용되는 국유림 임분밀도관리도의 모수 추정치와 비교해 볼 때, 추정된 모수는 유사한 수준에서 추정된 것으로 판단된다.

2) 최대밀도곡선 및 수량비수곡선, 자연고사선

최대밀도곡선과 자연고사곡선 함수식의 모수 K<sub>1</sub>~K<sub>5</sub>를 추정하기 위해서는 임분 경쟁 지표가 필요하며, 이를 위해 각 표준지 자료에 대해 상대경쟁지수를 산출하여 최소값을 한계경쟁지수로 지정하였다. 지정된 한계경쟁지수는 표본점 번호 177번의 0.110041141으로 지정되었고, 이를 이용하여 최대밀도곡선을 비롯한 구성 함수식의 모수를 유도하였다. K<sub>1</sub>~K<sub>5</sub>는 등평균 우세목 수고곡선의 모수 z<sub>1</sub>~z<sub>4</sub>를 활용하여 산출하였다(Table 4).

수량비수는 최대밀도 상태일 때의 임분 재적에 대한 특정 밀도일 때, 해당하는 재적의 비를 의미하므로(Ando, 1968; Shim et al., 1985; Nagahama, 2003), 최대밀도곡선을 기준으로 수량비수를 1.0부터 0.4까지 0.05 단위로 곡

선을 만들었다. 이에 따라 최대밀도곡선을 구성하는 두 식 9와 10의 K<sub>1</sub>+1, logK<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, logK<sub>4</sub>에 대한 모수를 수량비수 수준별로 산출한 결과는 Table 5와 같고, 추정된 모든 구성 모형을 이용해 임분밀도관리도를 도식화 하였다(Figure 2).



**Figure 2. Stand density management diagram for *Chamaecyparis obtusa*.**

**Table 3. The estimated parameters for yield-density relationship.**

Parameters				SSE	F	R2
a1	a2	a3	a4			
0.089	-1.300	8,600.426	-3.191	2,518,938.348	46.000	0.743

**Table 4. The estimated parameters for full density model and self-thinning model.**

Species	Parameters				
	K1	K2	K3	K4	K5
C. obtusa	-1.688	113,487.953	-1.891	784,534.125	-355,095.091

Table 5. The calculated result of K1~K4 parameters by relative yield index.

Ry	C. obtusa			
	K <sub>1+1</sub>	log K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	log K <sub>4</sub>
1.0 (full density curve)	-0.688	5.055	-1.891	5.895
0.95	-0.688	4.916	-1.891	5.725
0.90	-0.688	4.801	-1.891	5.591
0.85	-0.688	4.699	-1.891	5.479
0.80	-0.688	4.604	-1.891	5.380
0.75	-0.688	4.514	-1.891	5.289
0.70	-0.688	4.426	-1.891	5.205
0.65	-0.688	4.338	-1.891	5.124
0.60	-0.688	4.250	-1.891	5.046
0.55	-0.688	4.158	-1.891	4.969
0.50	-0.688	4.064	-1.891	4.891
0.45	-0.688	3.963	-1.891	4.812
0.40	-0.688	3.856	-1.891	4.729
0.35	-0.688	3.738	-1.891	4.642
0.30	-0.688	3.606	-1.891	4.548

### 3. 임분 고사율 및 생장예측

시간의 개념이 포함되어 있지 않은 임분밀도관리도의 시물레이션을 위해 지위지수 분류곡선과 연계하였다. 지위지수 12~16의 임지에 ha당 3,000본을 조립할 경우의 임분 생장을 예측한 결과(Table 6), 지위 12의 임지에 80년간 성장할 때의 연평균 고사 본수는 12.0 trees · ha<sup>-1</sup> · year<sup>-1</sup>로 나타났다. 지위 14는 15.0 trees · ha<sup>-1</sup> · year<sup>-1</sup>, 지위 16은 18.1 trees · ha<sup>-1</sup> · year<sup>-1</sup>로 나타나 지위지수가 높을수록 평균 고사본수는 증가하는 경향이 나타났다. 각 지위지수별로 가장 고사본수가 가장 많이 나타나는 임령은 20년으로 나타났으며, 20년 이후에는 고사율이 점차 감소하는 경향이 나타났다. 80년간 총 고사본수는 지위지수 12에서 962본, 지위지수 14는 1,201본, 지위지수 16은 1,445본이 고사하는 것으로 분석되었다. 이는 높은 지위일수록 성장속도가 빠르고, 단위면적당 재적, 개체목의 크기가 증가하면서 개체목간 경쟁의 심화로 인해 고사본수가 증가하는 결과로 나타나 지위가 높을수록 적은 본수의 임목이 분포하는 것으로 판단된다. 이러한 판단에 대한 근거는 임내 경쟁의 지표라 볼 수 있는 Ry값이 지위지수가 높을수록 빠른 속도로 증가하는 경향이며, 소나무의 관리기준이 되는 Ry 0.75를 참고 해볼 때 지위지수 12 이

상의 임지에서는 1차 솎아베기 시점이 20년생 이전에 시행되어야 할 것으로 사료된다.

조립 후 80년이 경과한 시점에서 예상되는 수확량은 지위지수 12의 경우 ha당 463.1 m<sup>3</sup>, 수확 본수는 2,038본으로 나타났으며, 평균 흉고직경은 18.2 cm, 평균 수고는 17.9 m로 예측되었다. 지위지수 14는 ha당 578.0 m<sup>3</sup>, 수확 본수는 1,799본, 평균 흉고직경 20.1 cm, 평균 수고 20.1 m로 예측되었고, 지위지수 16은 ha당 695.4 m<sup>3</sup>, 수확 본수는 1,555본, 평균 흉고직경 22.1 cm, 평균 수고 24.1 m로 예측되었다. 지위지수가 높을수록 재적, 흉고직경, 수고는 커지며, 임분밀도는 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 본 연구에서 예측한 시나리오는 임분밀도 관리가 고려되지 않은 결과로, 정상적인 관리를 할 경우 현재 예측된 값보다 재적과 본수는 감소하고 평균 흉고직경은 증가하는 결과가 나타날 것으로 예측된다. 실제로 Ry 값은 80년 후 대부분 최대밀도에 근접한 상태에 도달해 있으며, 임분밀도 관리를 통해 적정 관리기준이 되는 Ry 값의 수준으로 유지하는 것이 필요하다. 향후 관리기준에 대한 분석 결과에 따라 보다 정확한 임분밀도 관리 시물레이션이 가능할 것으로 보인다.

Table 6. Simulated yields for site index.

Site index	Age	Stand density (trees · ha <sup>-1</sup> )	Stand volume (m <sup>3</sup> · ha <sup>-1</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Mean DBH (cm)	Mean height (m)	Mortality (trees · ha <sup>-1</sup> )	Relative yield index (Ry)
12	10	2,883	56.2	0.019	9.3	5.4	11.7	0.536
	20	2,714	137.6	0.051	12.3	8.4	16.9	0.744
	30	2,561	211.4	0.083	14.0	10.8	15.3	0.837
	40	2,426	276.0	0.114	15.2	12.7	13.4	0.887
	50	2,309	332.4	0.144	16.1	14.3	11.7	0.917
	60	2,206	381.8	0.173	16.9	15.7	10.3	0.937
	70	2,117	425.0	0.201	17.6	16.9	9.0	0.951
	80	2,038	463.1	0.227	18.2	17.9	7.9	0.961
14	10	2,837	78.4	0.028	10.3	6.3	16.3	0.614
	20	2,622	181.8	0.069	13.3	9.9	21.5	0.807
	30	2,433	272.9	0.112	15.1	12.6	18.9	0.885
	40	2,269	351.8	0.155	16.4	14.9	16.4	0.926
	50	2,126	420.3	0.198	17.5	16.8	14.2	0.950
	60	2,002	480.0	0.240	18.5	18.4	12.4	0.966
	70	1,894	532.3	0.281	19.3	19.8	10.9	0.976
	80	1,799	578.0	0.321	20.1	21.0	9.5	0.983
16	10	2,786	102.9	0.037	11.2	7.2	21.4	0.679
	20	2,525	228.4	0.090	14.3	11.3	26.1	0.853
	30	2,300	336.9	0.146	16.2	14.5	22.5	0.920
	40	2,106	430.2	0.204	17.7	17.1	19.4	0.954
	50	1,938	510.9	0.264	19.0	19.2	16.8	0.973
	60	1,792	581.0	0.324	20.1	21.1	14.6	0.984
	70	1,665	642.1	0.386	21.2	22.7	12.7	0.991
	80	1,555	695.4	0.447	22.1	24.1	11.1	0.996

## 결론

편백을 대상으로 임분 시업체계 구축에 활용되는 임분 밀도관리도를 개발하고 임분 성장 및 고사량을 예측하였다. 임분밀도관리도의 모형설명력( $R^2$ )은 0.743이며, 한계 경쟁지수는 0.220318로 지정하였다. 조림 후 80년이 경과한 시점에 대해 고사량을 예측한 결과, 지위지수가 높을수록 고사량이 증가하는 경향이 나타났다. 또한 임분 수확량 예측 결과에 따르면 지위지수가 높을수록 임분재적 및 임목크기는 커지며, 임분밀도는 낮아지는 경향이 나타났다. 본 연구에서 적용한 예측 시나리오는 숲아베기를 하지 않은 상황에서 나타나는 고사량 및 수확량이므로, 향후 관리 기준 설정에 관한 연구 결과에 따라 숲아베기 시나리오를 적용한 임분 성장 및 수확량 예측이 가능할 것이다.

본 연구에서 다루고 있는 임분밀도관리도는 임분 시업 체계 구축에 있어 효용성이 높은 것으로 알려져 있다. 특히, 편백림과 같은 인공림의 경우 적용이 용이하며, 성장, 고사 예측의 정확도가 높고, 수치적 관리 기준 수립 및 임분 상태 진단을 통한 시업의사결정 등 유용성이 높다. 지위지수 분류곡선과 결합하여 작성되는 임분 수확표에 비해 밀도변화에 대한 예측이 가능하다는 점에서 높은 효용가치를 보인다. 이에 따라 국외에서 활용도가 높고, 이를 이용한 의사결정 프로그램 개발 단계까지 나아가 있는 상태이다. 본 연구의 결과를 기반으로 구조적 임분밀도관리모델과 임분 관리 의사결정 시스템 개발까지 목표로 하고 있다. 임분밀도 관리의 정량적 평가와 그 기준 수립을 위한 연구가 필요하며, 이와 관련하여 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



## 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 147: 1-77.
- Ando, T. 1968. Ecological studies on the stand density control in even-aged stand. Bulletin Government Forest Experiment Station 210: 1-153.
- Drew, T. J. and Flewelling, J. W. 1977. Some recent Japanese theories of yield-density relationships and their application to Monterey pine plantations. Forest Science 23: 517-534.
- Drew, T.J. and Flewelling, J.W. 1979. Stand density management: and alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. Society of American Foresters 25(3): 518-532.
- Forestry and Forest Products Research Institute. 2012. RYield calculation program. <http://www.ffpri.affrc.go.jp/en/> (2012.11.01.)
- Kim, D.K., Kim, J.W., Park, S.K., Oh, M.Y. and Yoo, J.H. 1987. Growth analysis of natural pure young stand of red pine in Korea and study on the determination of reasonable density. Research Report of Forest Institute Korea 34: 32-40.
- Kira, T., Ogawa, H. and Hozumi, K. (1953) Intraspecific competition among higher plants I: Competition-yield-density interrelationship in regularly dispersed populations. Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University Series D, 4: 1-16.
- Korea forest service and National institute of forest science. 2014. Stand volume · biomass & Stand yield table. pp. 261.
- Koyama, H. and Kira, T. 1956. Intraspecific competition among higher plants. VIII. Frequency distributions of individual plant weight as affected by the interaction between plants. Journal of the Institute of Polytechnics Osaka City University Series D, 7: 73-94.
- McCarter, J.B. and Long, J.N. 1986. A lodgepole pine density management diagram. Western Journal of Applied Forestry 1: 6-11.
- Nagahama, T. 2003. Preparation of the original stand density control diagram for Sugi plantations in Kagoshima. Bulletin of the Kagoshima Prefectural Forest Experiment Station 8: 1-11.
- Newton, P.F. 1992. Base-age invariant polymorphic site index curves for black spruce and balsam fir within central Newfoundland. Northern Journal of Applied Forestry 9: 18-22.
- Newton, P.F. and Weetman, G.F. 1994. Stand density management diagram for managed black spruce stands. The Forestry Chronicle 70(1): 65-74.
- Newton, P.F. 1997. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning. Forest Ecology and Management 98: 251-265.
- Newton, P.F., Lei, Y. and Zhang, S.Y. 2004. A parameter recovery model for estimating black spruce diameter distributions within the context fo a stand density management diagram. The Forestry Chronicle 80(3): 349-358.
- Newton, P.F., Lei, Y. and Zhang, S.Y. 2004. A parameter recovery model for estimating black spruce diameter distributions within the context fo a stand density management diagram. The Forestry Chronicle 80(3): 349-358.
- Newton, P.F. 2009. Development of an integrated decision-support model for density management within jack pine stand-type. Ecological Modelling 220: 3301-3324.
- Newton, P.F. 2012. A decision-support system for forest density management within upland black spruce stand-type. Environmental Modelling & software 35: 171-187.
- Park, J.H., Lee, K.S., Yoo, B.O., Park, Y.B. and Jung, S.Y. 2016. Development and validation of the stand density management diagram for *Pinus densiflora* Forests in Korea. Journal of Korean Forest Society 105(3): 342-350.
- Puettmann, K.J., Hibbs, D.E. and Hann, D.W.1992. The dynamics of mixed stands of *Alnus rubra* and *Pseudotsuga menziesii*: Extension of size-density analysis to species mixture. Journal of Ecology 80: 449-458.
- Reineke, L.H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. Journal of Agriculture Research 46: 627-638.
- Shim, D.S., Park, C.W., Lee, H.K. and Kim, S.I. 1985. A study on stand density management diagram of Korean white pine (*Pinus Koreaiensis*) stnad. Research Report of Forest Institute Korea 32: 38-48.
- Shim, D.S., Park, C.W., Lee, H.K. and Kim, S.I. 1986. A study on stand density management diagram of Japanese larch (*Larix leptolepis*) stnad. Research Report of Forest Institute Korea 33: 1-12.
- Shim, D.S., Park, C.W., Lee, H.K. and Kim, S.I. 1987. A study on stand density management diagram of pitch pine (*Pinus rigida*) stnad. Research Report of Forest Institute Korea 34: 12-21.
- Shinozaki, K. and Kira, T. 1956. Intraspecific competition among higher plants. VII. Logistic theory of the C-D effect. Journal of the Institute of Polytechnics Osaka City University Series D, 12: 69-82.

Smith, F.W. and Long J.N. 1987. Elk hiding and thermal cover guidelines in the context of lodgepole pine stand density. *Western Journal of Applied Forestry* 2: 6-10.

Smith, N.J. 1989. A stand-density control diagram for western red cedar, *Thuja plicata*. *Forest Ecology and Management* 27: 330-334.

Yoda, T. 1963. The pre-estimating of stem yield based on the

competition density effect. *Bulletin Government Forest Experiment Station* 154: 1-19.

---

Manuscript Received : March 22, 2018

First Revision : May 4, 2018

Second Revision : June 4, 2018

Accepted : June 5, 2018