

## 소나무 임분밀도관리도 작성 및 실용성 검증

박준형 · 이광수 · 유병오 · 박용배 · 정수영\*

국립산림과학원 남부산림자원연구소

### Development and Validation of the Stand Density Management Diagram for *Pinus densiflora* Forests in Korea

Joon Hyung Park, Kwang Soo Lee, Byung Oh Yoo, Yong Bae Park, and Su Young Jung\*

Southern Forest Resources Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea

**요약:** 본 연구는 우리나라 소나무림의 체계적인 경영계획 수립 및 관리목표 달성을 위해 지침이 될 수 있는 임분 밀도관리도를 개발하는데 그 목적이 있다. 임분밀도관리도를 구성하는 5개의 모형을 추정하기 위하여 분석에 이용된 총 조사 표본점 수는 1,886plot이었으며, 각 표준지는 소나무의 흉고단면적이 75%이상 점유하는 임분에서 추출되었다. 유의수준 5%에서  $X^2_{(0.05)}$  적합도를 검증하였으며, 허용오차율은 20% 수준으로 나타났다. 모형의 표준편차는  $34.59 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 이었으며, 허용오차율의 최소치는 16.59%, 변동계수는 22.11%로 나타났다. 본 연구에서 제작된 소나무 임분밀도관리도는 밀도관리의 경로별 수확량과 슈아베기 과정을 예측할 수가 있어 산림경영에서 목적하는 생산재의 양과 형질에 따른 경영계획 수립이 가능할 것으로 기대하고 있다.

**Abstract:** This study aims to make the stand density management diagram which is very useful for establishing systematic management plan and obtaining management goal in *Pinus densiflora* forest. To estimate 5 models mainly composed of stand density management diagram, we used total of 1,886 sample plots having more than 75% of the total basal area of the pine trees in each stand. To test the goodness of fit,  $X^2$  was computed with a significance level of 5%, and the acceptable error range as 20%. Also standard deviation of the model was  $34.59 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , minimum acceptable error range was 16.59% and coefficient of variation was 22.11%. If we use the stand density management diagram, it would be useful to establish the timber yield and thinning plan understanding the pathway of stand density management.

**Key words:** stand density management, growth, thinning, full density curve, red pine

## 서론

소나무는 지리적으로 한반도를 비롯하여 중국의 산둥반도, 압록강연안 지역 및 일본의 북해도 이남지역에 분포하고 있으며(National Institute of Forest Science, 2012), 우리나라 산림 면적의 1/4을 차지하는 1,507천ha로 단일수종으로서 그 비중은 매우 크다(Lee et al., 2009). 이러한 소나무림은 입지조건과 임분유형, 밀도 및 형질 등 다양한 시업법을 적용하기가 어려우며, 적절한 관리체계가 도입되고 있지 않기 때문에 임내에 고사목이 다량으로 발생하거나, 자연재해, 불량소나무의 생산 등의 문제로 인해 임분관리가 필요한 실정임으로(Lee et al., 2010) 임분밀도 관리도에 의한 체계적인 관리의 필요성은 증대되고 있다.

임분밀도관리도는 일반적으로 인공림에 대해 적용되는 것으로 알려져 있으나, 단층으로 구성된 천연림에 대해서도 활용이 가능하며, 실제 이를 활용하고 있는 사례도 존재하고 있다(Newton, 1997; Shaw and Long, 2007). 임분 밀도관리도의 핵심은 최대밀도곡선에 있으며, 여기에서 최대밀도는 임분이 보유할 수 있는 최대의 밀도, 단위면적에서 가지는 엽량의 최대량은 일정하다는 것이 그 이론의 핵심이다. 이러한 이론은 Reineke(1933)가 임분밀도와 흉고직경의 관계를 통해 최초로 고안하였다. 이후 임분밀도관리도는 임분밀도와 재적의 역수식 관계를 설명한 C-D효과(Competition-Density effect)에 대한 구명을 기반으로(Kira, 1953) 소나무 천연림(Ando, 1962)과 삼나무 인공림(Ando et al., 1968)에 대해 임분밀도관리도가 개발되었다. 이때 임분관리의 기준이 될 수 있는 수관밀도(Crown closure)를 평가하는 기준은 수량비수선(Relative yield

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

index curve)을 활용하였으며, 임분밀도와 임분재적의 관계로 임분밀도관리도를 작성하여 임분 단위의 수확예측에 보다 활용성이 높았다.

북미지역에서 Drew and Flewelling(1979)은 Douglas fir를 대상으로 임분밀도관리도를 작성하고, 추정되는 임분의 성장과 수관의 폐합, 고사율, 임목이 성장 가능한 최대 재적을 속아베기 시험지 모니터링 결과와 비교하였다. 이 때, 수관밀도(Crown closure)의 척도를 상대밀도지수(Relative density index)를 이용하였으며, 임분 평균 임목재적과 임분밀도의 관계를 적용하여 Ando(1968)와 차별화된 방법을 제시하였다. 이후 임분밀도지수(Stand density index)를 수관밀도의 척도로 적용하여 임분밀도관리도가 개발하였으며(Smith and Long, 1987; Long et al., 1988) 임분의 유형과 목적에 따라 다양한 형태로 개발되었다.

현재까지도 많은 연구자들에 의해 전 세계적으로 임분밀도관리도가 만들어지고 있다. 아시아에서는 Ando(1962, 1968)가 최초로 작성한 것을 시작으로 Tadaki(1963), Kumer et al.(1995) 등이 다양한 수종에 대해 임분밀도관리도를 작성하였으며, 북아메리카에서는 Drew and Flewelling(1979), McCarter and Long(1986), Williams(1994), Spathelf and Schneider(2000), Long and Shaw(2005), Sharma and Zhang(2007), Shaw and Long(2007), 중남아메리카 Marquez-Linares and Alvarez-Zagoya(1995), Chauchard et al.(2001), 아프리카 Onyekwelu et al.(2003), Biber et al.(2004), 유럽 Sales Luis and Fonseca (2005), Anta and Gonzalez(2005) 등 세계 각국에서 지속적인 연구가 수행되고 있으며, 임분밀도관리도를 작성하여 산림경영에 활용하고 있다.

한편 국내에서의 임분밀도관리에 관한 연구는 Kim(1963), Ma(1979) 등이 최대밀도곡선을 기준으로 한 임분밀도관리에 대해 연구를 수행한 바 있으며, 이후 잣나무(Shim et al., 1985), 소나무(Kim et al., 1987) 임분을 대상으로 한 임분밀도관리도가 각각 개발되었다. Ando(1968)의 방법을 적용하여 작성되어 임분 단위의 수확량 예측 및 관리 기법 수립에 효율성이 높았다. 그러나 제작 당시 국내 산림의 영급구조와 현재의 영급구조는 큰 차이를 보이고 있어 현실림에 대한 적용에는 어려움이 따르고 있으며, 이후 임분밀도관리 관련 연구의 부족으로 현재 논리적이고 합리적인 임분관리를 위해 임분밀도관리도의 필요성은 증대되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 우리나라 전역에 걸쳐 분포해 있는 소나무 현실림을 대상으로 최대임분밀도곡선 추정을 통해 소나무 임분밀도관리도를 개발함으로써 적정 임분밀도관리 기준을 마련하여 건강하고 지속가능한 산림자원관리의 가이드라인을 제시하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 자료의 구성 및 정리

임분밀도관리도 개발에 활용된 자료는 단일수종으로 구성된 동령림이나 단순 일제림이며, 간벌을 실시하지 않은 상태에서 최대밀도에 도달한 임분을 대상으로 할 때, 그 정확도가 높아진다(Newton, 1997; Shaw and Long, 2007; Giorgio et al., 2008). 따라서 본 연구에서는 임분 흉고단면적 기준으로 75% 이상 소나무가 점유하는 임분을 대상으로 상대밀도 65% 이상의 자료를 추출하였다. 상대밀도

Table 1. The number of investigation sample plots classified by upper tree height and stand density.

No. of trees per ha	Height											Total
	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m	12 m	14 m	16 m	18 m	20 m	22 m	
~400					1	3	4			2	2	12
401~600					5	17	18	14	6	4	1	65
601~800				6	18	37	21	12	5	6	1	106
801~1,000			3	5	48	86	39	16	4		1	202
1,001~1,200			1	17	81	92	57	20	11			279
1,201~1,400			4	29	104	61	37	15	2			252
1,401~1,600			5	37	89	54	12	3	1	3		204
1,601~1,800			7	43	65	33	15	3				166
1,801~2,000			6	54	59	21	5	1				146
2,001~2,200			4	31	40	14	5					94
2,201~2,400		1	7	30	23	7	3					71
2,401~2,600			2	28	18	4						52
2,601~2,800			9	25	14	5						53
2,801~3,000			7	26	13	2						48
3000~	21	7	22	56	25	4	1					136
Total	21	8	77	387	603	440	217	84	29	15	5	1,886

65%를 기준으로 분석 자료를 추출한 이유는 현실적으로 최대 임분밀도의 자료를 수집하기 어려운 상황에서 최대 밀도의 기준을 제시할 수 있는 방안으로서 임분밀도에 대한 상대적인 개념을 적용하는 것이 활용 가능하다(Baek et al., 2010). 이 때, 상대밀도 60~65% 수준에서 임목의 생장이 크게 감소하므로 임내 경쟁이 충분히 작용하는 수준으로 판단하여 상대밀도 65% 이상의 자료를 대상으로 분석하였다(An et al., 2007). 이러한 검토과정을 거쳐 소나무 임분에 대해 총 1,886개소의 조사 자료를 획득할 수 있었으며, 해당자료는 국립산림과학원에서 지난 10년간 조사했던 표준지 520개소와 국가산림자원조사(NFI; National Forest Inventory)에서 조사된 표준지 1,366개소의 자료를 활용하였다(Table 1).

임분밀도관리도 분석 및 작성에 사용된 변수는 임분의 평균흉고직경(Mean of DBH)과 평균수고(Mean of tree height), 상층수고(Mean of upper tree height), 임분 흉고 단면적(Stand basal area), 임분재적(Stand volume), 임분밀도(Stand density)를 이용하였으며(Table 2), 그 기술통계량은 Table 3과 같다. 이 때, 각 표준지의 상위 30% 수고범위에 있는 임목을 추출하여 그 평균수고를 상층수고로 정의하였다. 또한 형상고(Form height)는 평균수고에 흉고형수를 곱하여 산출하였으며, 임분밀도, 평균 단목재적, 임분 흉고단면적 및 임분 재적 등을 분석에 활용하였다.

임분밀도관리도를 작성함에 있어서 임분밀도와 생장인자들 사이의 관계 특성에 대한 검토가 필요하며, 이를 위해 이상자료(Outlier)를 기각하는 과정을 수행하였다. 모집된 자료의 각 요인별 분포 특성 및 경향을 파악하여 이

상자료를 기각하고자 아래의 식을 이용하여 비선형 회귀계수를 추정하였다. 식 1의 형상고(HF)는 수고와 흉고형수의 곱으로 산출하였으며, HT는 상층수고, N은 임분밀도이다. 임분 평균흉고직경(D)과 평방평균흉고직경(Dg), 임분밀도(N)의 관계는 식 2로 표현이 되며, 식 3은 임분 평균수고(H)와 상층수고(HT), 임분밀도(N)의 관계를 의미하고, 식 4는 평균 간재적(v)과 상층수고(HT), 임분밀도(N)의 관계를 나타내며, a~c는 각 수식의 추정 계수이다. 이러한 관계식에서 추정된 각 인자에 의해 추정치와 실측치의 차를 잔차의 표준편차로 나눈 값이 t분포표 상에서 1% 값을 초과하는 표준지에 대해서는 2점을 부여하고, 1~5%의 범위의 값에 대해서는 1점을 부여하여, 전체 4개 추정식의 점수 합계가 4점 이상인 자료에 대해 이상자료로 간주하고 기각하였다(Nagahama, 2003).

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

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

$$H = a + bHT + c \frac{\sqrt{NHT}}{100} \tag{3}$$

$$\log(v) = a + b\log(HT) + c\log(N) \tag{4}$$

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

2. 모형의 추정

1) 등평균 수고곡선

본 연구에서 개발된 임분밀도관리도는 Ando(1968)가 개발한 방법에 의해 작성하였으며, 작성된 임분밀도관리도는 등평균수고곡선(Equivalent height curve), 등평균흉고 직경곡선(Equivalent diameter curve), 최대밀도곡선(Full density curve), 수량비수선(Relative yield index curve), 자연고사선(Natural mortality curve) 등 크게 5개의 곡선으로 구성되어 있다. 이상으로부터의 모형은 이상자료를 기각한 후 임분재적과 임분밀도의 관계를 의미하는 역수식(식 5)의 계수를 추정함으로써 도출되었으며, 추정된 계수에 의해 각 모형식을 산술적으로 산출하였다.

$$\frac{1}{v} = AN + B, \frac{1}{V} = A + \frac{B}{N} \tag{5}$$

$$A = \frac{\sum V \sum v^2 - \sum v \sum vV}{\sum V^2 \sum v^2 - (\sum v \sum V)^2} \tag{6}$$

$$B = \frac{\sum V^2 \sum v - \sum V \sum vV}{\sum V^2 \sum v^2 - (\sum v \sum V)^2} \tag{7}$$

Table 2. The used variables for estimating models.

Variable	Symbol	Unit
Mean dbh	D	cm
Mean of tree height	H	m
Mean of upper tree height	HT	m
Form height	HF	-
Stand density	N	trees/ha
Mean individual tree volume	v	m <sup>3</sup>
Stand basal area	G	m <sup>2</sup> /ha
Stand volume	V	m <sup>3</sup> /ha

Table 3. Descriptive statistics of used variables in the sample plots.

Item	N	Mean	S.D.
DBH (cm)	1886	17.8	5.6
Height (m)	1886	10.8	2.7
Upper height (m)	1886	12.7	3.3
Stand basal area (m <sup>2</sup> /ha)	1886	41.3	14.1
Stand volume (m <sup>3</sup> /ha)	1886	247.9	129.9
Stand density (trees/ha)	1886	1700.8	1880.6

where,  $v$  = Tree volume,  $V$  = Stand volume, and  $A$  and  $B$  = Parameters

여기에서  $A$ 와  $B$ 는 계수이며, 식 6과 7로 전체 표준지를 상층 수고급별로 계산하고, 이 값을 식 8과 9의 종속변수로 활용하여  $a$ - $d$  계수를 추정하였다. 이 때,  $V$ 는 임분 평균재적,  $v$ 는 단목 평균재적이며,  $HT$ 는 우세목 수고로 정의된다.

$$A = aHT^{-b} \tag{8}$$

$$B = cHT^{-d} \tag{9}$$

추정된  $a$ - $d$ 의 계수는 개별 표준지에서 추정된 결과가 아닌 수고급별 평균치로 추정한 결과이므로, 전체 표준지 조사자료에 의한 계수 추정치라고 보기 어렵다(Nagahama, 2003). 따라서 오차를 줄이기 위해 추정된  $a$ - $d$ 의 계수를 초기 값으로 하여 재추정 하였다.

### 2) 경쟁비수와 한계경쟁비수

경쟁비수(Relative Competition index; RC)는 명명된 의미 그대로 임내 경쟁을 비교할 수 있는 지수이므로(Shim et al., 1985), 최대밀도에 있어서 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 먼저 임분밀도와 간재적은  $1/v = AN+B$ 의 관계가 있으며, 이 식을 간재적( $v$ ) 식으로 변환하면  $v = 1/(AN+B)$ 가 된다.  $N$ 이 0이 될 때, 해당 임분은 무경쟁상태를 의미하며, 무경쟁상태의 개체목 재적, 즉 최대로 성장 가능한 재적은  $v = 1/B$ 로 표현이 가능하다. 무경쟁상태에서 최대로 성장 가능한 재적을 1로 보았을 때, 현재 임분경쟁에 의해 성장한 재적을 비율로써 그 경쟁 정도를 의미하는 경쟁비수(RC)를 구할 수 있다(Ando, 1968; Shim et al., 1985; Nagahama, 2003).

$$RC = \frac{v_{RC}}{1/B} = v_{RC}B \tag{10}$$

여기에서  $v_{RC}$ 는 어느 특정한 경쟁비수(RC) 상태에서의 개체목 재적( $v$ )을 의미한다. 식 10을 재 표현하면 경쟁비수(RC) = (특정경쟁상태의 재적)/(무경쟁상태의 재적)이라고 표현 가능하므로 식 11로 풀이할 수 있다. 각 표준지의 경쟁비수를 산출하여 그 중 가장 낮은 값을 한계경쟁비수(Rf)로 지정하여 최대밀도곡선을 추정하는데 활용하였다.

$$RC = \frac{v_{RC}}{1/B} = v_{RC}cHT^{-d} = \frac{V}{N}cHT^{-d} \tag{11}$$

### 3) 최대밀도곡선과 수량비수선

현실임분의 밀도는 그 생육단계에 따라 밀도의 상한선이 존재하며, 임분밀도의 상한선에 도달한 임분은 임분밀도와 평균재적(개체목의 크기)이 일정하게 된다(Ando,

1968). Reineke(1933)는 평방평균흉고직경과 임분밀도의 관계 대해 가장 먼저 제시하였는데, 이러한 이론은 단위면적 내 엽량의 최대치는 동일하다는 가정 하에 식 12와 같은 관계가 있음을 나타낸다.

$$W = KN^a \tag{12}$$

여기에서 계수  $a$ 의 경우, 1.5에 가까운 값을 나타내며, 과거에는 이를  $1.5 = 3/2$ 로 정의 가능하므로 3/2승 법칙 혹은 자연고사선이라고 하였으며, 현재는 최대밀도곡선이라고 명명하고 있다. 식 13에서 엽량은 흉고직경이나 재적과 양의 상관성이 존재하므로 단위면적 내 엽량( $W$ )를 대신하여 단목재적  $v$ 를 취할 수 있으며, 이에 따라 식 13과 14로 정의 가능하였다.

$$v = KN^a \tag{13}$$

$$V = v \times N = KN^{(a+1)} \tag{14}$$

이 식에 경쟁비수 개념을 대입하여 특정 경쟁비수일 때의 최대밀도곡선은 임분밀도와 흉고직경 혹은 재적의 관계로 추정하며, 최종 추정 수식을 정리하면 식 15, 16과 같다. 이때, 식 15와 16은 경쟁비수(RC)대신 한계경쟁비수(Rf)를 대입하여 최대밀도곡선 추정식을 나타내었다.

$$V_{RC} = v_{RC}N_{RC} = K_2N_{RC}^{K_1+1} \tag{15}$$

where,  $K_1 = \left(\frac{d}{b-d}\right)$ ,  $K_2 = \left(\frac{RC}{(1-RC)c}\right)^{\left(\frac{d}{b-d}\right)}$

$$N_{RC} = K_4HT^{K_3} \tag{16}$$

where.  $K_3 = (d-b)$ ,  $K_4 = \frac{(1-RC)c}{RC a}$

현실임분이 최대밀도곡선에 근접하게 되면 설해나 병해가 발생하기 쉬우므로 최대밀도곡선보다 훨씬 낮은 밀도에서 관리되는 것이 바람직하다(Ando, 1968). 이러한 상황에서 관리되는 임분밀도의 수준을 수치화하기 위해 동일한 등평균수고곡선에서 최대밀도에 대한 비율을 수량비수(Relative Yield index: Ry), 즉 최대밀도에 대한 상대 밀도를 사용하였다(식 17).

$$Ry = \frac{V_{RC}}{V_{Rf}} = \frac{1-RC}{1-Rf} \tag{17}$$

$$RC = 1 - (1-Rf)Ry \tag{18}$$

다시 정리하면 최대밀도곡선을 1이라고 할 때, 그 이하 밀도를 비율에 의해 수량비수곡선을 산출하였다. 식 18과 같은 경쟁비수와 한계경쟁비수, 수량비수의 관계에 따라 식 15에 적용하여 수량비수일 때의 관계로 다시 풀이하면 식 19와 같은 임분재적에 대한 수량비수선 추정식을 나타

낼 수 있었다.

$$V_{Ry} = v_{Ry} N_{Ry} = K_2 N_{Ry}^{K_1+1}$$

$$\therefore \log V_{Ry} = \log K_2 + (K_1+1) \log N_{Ry} \quad (19)$$

where,  $K_1+1 = \frac{d}{b-d} + 1 = \frac{b}{b-d}$ ,

$$K_2 = \frac{(1-Rf)Ry}{a} \left( \frac{1-(1-Rf)Ry}{(1-Rf)Ry} \frac{a}{c} \right)^{\frac{b}{b-d}}$$

또한  $N_{Ry}$ 와  $HT$ 의 관계식 16에 대해 동일하게 대입하여 식 20과 같은 임분밀도에 대한 수량비수선 추정식을 유도하였으며, 식 19와 20의 계수인  $K_1+1$ ,  $\log K_2$ ,  $K_3$ ,  $\log K_4$ 를 각 수량비수별로 산출하여 수량비수곡선을 추정하였다.

$$N_{Ry} = K_4 HT^{K_3}$$

$$\therefore \log N_{Ry} = \log K_4 + K_3 \log HT \quad (20)$$

where,  $K_3 = d-b$ ,  $K_4 = \frac{(1-Rf)Ry}{1-(1-Rf)Ry} \frac{b_3}{b_1}$

4) 등평균 흉고직경곡선

등평균흉고직경곡선은 앞선 식 1에서 추정되는 재적과 ( $v$ 와  $V$ ) 임분밀도( $N$ )를 평방평균흉고직경( $Dg$ )으로 환산해서 구하였으며 사용된 식은 21, 22와 같다.

$$G = \frac{V}{HF} \quad (21)$$

$$Dg = 200 \sqrt{\frac{G}{(\pi N)}} \quad (22)$$

앞서 이상자료의 기각 후 재 추정된 식 1을 이용하여 추정된 형상고( $HF$ )를 임분 흉고단면적 계산식 식 21에 적용하여 산출하고 이를 다시 평방평균흉고직경( $Dg$ )으로 환산하기 위해 식 22를 적용하였다. 그리고 평방평균흉고직경은 임분의 평균흉고직경( $D$ )으로 보기 어려우므로 이를 줄이기 위해 앞서 이상자료의 기각 후 재 추정된 식 2를 적용하여 등평균흉고직경곡선을 작성하였다(Nagahama, 2003).

5) 자연고사선

자연고사선은 자연상태에서 발생한 치수의 수가 생육 경쟁에 의해 자연적으로 감소하는 선을 의미하고 있다. 과거 자연간벌선이라하면 최대밀도곡선을 칭하였으나, 실질적으로 현실임분에서 고사목 발생은 최대밀도선에 도달하였을 때 발생하는 것이 아니라, 최대밀도선에 가까워질수록 자연고사량은 증가하게 된다. 이에 대해 Ando(1962)는 실질적으로 경쟁시작선과 자연고사 시작선을 이용하여 현실임분의 자연고사를 예측하고자 하였다. 따라서 과거 자연고사선으로 불리던 최대밀도곡선은 위와 같은 이유로 용어에 오해가 발생할 가능성이 존재하므로 최대밀도곡선으로 명명하여 사용하고 있다(Tadaki and Shidei,

**Table 4. The used equations for fitting test.**

Test statistics	Equation
Chi-square( $\chi^2$ )	$\chi^2 = \frac{1}{E^2} \sum \left( \frac{\hat{y}}{y-1} \right)^2$
Standard deviation	$\left( \frac{\sum (\hat{y}-y)^2}{(N-1)} \right)^{\frac{1}{2}}$
The minimum value of a permissible error	$\left( \frac{\sum (\hat{y}-y)^2}{(\chi_{(0.05)}^2)} \right)^{\frac{1}{2}}$
The minimum value of the rate of a permissible error	$\left( \frac{\sum (\hat{y}/y-1)^2}{(\chi_{(0.05)}^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot 100$
Coefficient of variation	$\left( \frac{\sum (\hat{y}-y)^2}{(N-1)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{N}{\sum y}$

Note)  $\hat{y}$  = Estimated value,  $y$  = Measured value,  $N$  = No. of plots,  $E$  = Rate of permissible error

1963). 그 후 Ando(1968)는 현재 자연고사선의 개념에 대한 재정립을 실시하였으며, 식 23과 같은 관계가 있음을 밝혔다. 이러한 자연고사선은 임분재적과 임분밀도의 관계로써  $a \sim d$ 는 식 8과 9의 추정계수를 활용하였다.

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} - \frac{v}{K_5 N_0^{(K_1+1)}} \quad (23)$$

where,  $K_1 = \left( \frac{d}{b-d} \right)$ ,  $K_5 = \frac{K_1 Rf}{c} \left( \frac{Rf}{1-Rf} \frac{a}{c} \right)^{K_1} \left( \frac{b}{d} \right)^{K_1+1}$

3) 적합도 검정

임분밀도관리도에서 추정되는 임분재적과 평균흉고직경에 대해 적합도 검정을 실시하였다. 적합도를 검정하기 위해  $\chi^2$  분석을 실시하였고, 추정되는 임분재적과 평균흉고직경에 대해 표준편차, 허용오차의 최소치, 허용오차율의 최소치, 변동오차를 산출하여 모형의 정확도를 검정하였다(Table 4).

**연구결과 및 고찰**

1. 분석 자료의 검토 및 분류

1,886개소의 표준지 조사자료를 활용하여 자료의 일반적인 경향을 살피기 위해 식 1~4를 활용하여 추정식을 산출하였으며, 이상자료 기각

방법에 의해 최종 분석에 활용할 자료를 추출하였다. 이상자료는 전체 1,886개소의 표준지 중 259개소가 기각대

**Table 5. The estimation of interaction equations for rejecting data.**

Equations		Parameters			R <sup>2</sup>
		a	b	c	
Before rejecting data	(1): HF	0.912	0.310	0.070	0.879
	(2): D	2.128	0.806	-0.215	0.910
	(3): H	0.841	0.791	-0.023	0.898
	(4): log v	-2.547	2.418	-0.300	0.854
After rejecting data	(1): HF	0.673	0.306	0.136	0.913
	(2): D	2.057	0.814	-0.204	0.935
	(3): H	0.780	0.798	-0.006	0.928
	(4): log v	-0.211	1.718	-0.789	0.918

상 자료로 분류되어 최종 분석에 활용한 표준지는 1,624 개소이며, 이상자료를 기각한 후 다시 동일한 수식에 대해 재추정하여 Table 5와 같은 추정치를 구하였다.

**2. 등평균수고곡선과 자연고사선의 추정**

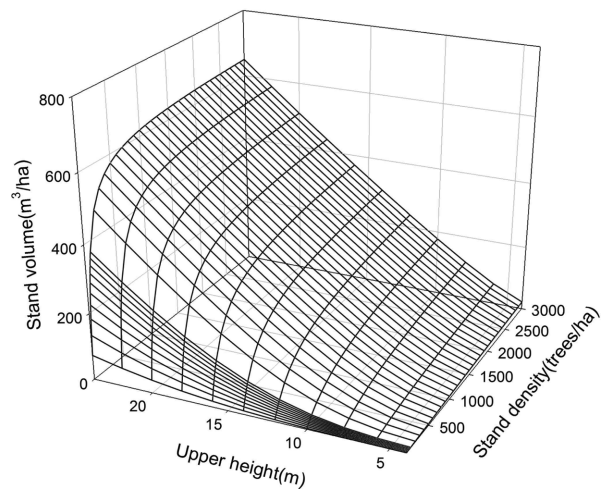
최종적으로 추정된 소나무의 등평균수고곡선식은 수식 (24)이며, 추정계수는 a(0.090), b(-1.289), c(14836.698), d(-3.686)으로 나타났다. 일본 규슈지방의 소나무의 추정계수 a(0.072), b(-1.229), c(14292.300), d(-3.415)와 동해(일본해)연안 소나무의 추정계수 a(0.088), b(-1.297), c(13053.000), d(-3.606) 등 일본에서 현재 사용하고 있는 추정계수들과 비교해 볼 때, 계수는 적정범위에서 추정된 것으로 판단된다(Forestry and Forest Products Research Institute, 2012).

추정된 식 24를 도식화하여 임분재적, 임분밀도, 상층수고의 관계를 분석한 결과에서, 우세목의 수고와 임분밀도가 커질수록 임분재적의 변화폭이 커지는 경향이 나타났다(Figure 1). 상층 평균수고가 약 20 m일 때, 생산 가능한 임분재적은 약 536 m<sup>3</sup>/ha가 한계인 것으로 나타났으며, 일본 규슈지방의 소나무는 502 m<sup>3</sup>/ha임을 감안 할 때, 규슈지방보다 ha당 생산가능한 재적의 한계선이 높으며, 동해(일본해)연안 소나무의 548 m<sup>3</sup>/ha 보다는 다소 낮은 것으로 나타났다(Forestry and Forest Products Research Institute, 2012).

$$\therefore V = \left( 0.090HT^{-1.289} + \frac{14836.698HT^{-3.686}}{N} \right) - 1 \quad (24)$$

자연고사선은 등평균수고곡선식을 임분밀도 1/N에 대한 식으로 변형을 통해 최초발생분수를 나타내어 산출하는 식이며, 본 연구에서 최종적으로 산출된 소나무의 자연고사선은 최종적으로 추정된 식은 식 25와 같다.

$$\therefore \frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} - \frac{v}{-77936.231N_0^{0.538}} \quad (25)$$



**Figure 1. Estimated pattern of equivalent height curve.**

**3. 최대밀도곡선 및 수량비수선의 추정**

각 표준지의 경쟁비수를 산출하고 그 중 최소값을 한계 경쟁비수라 할 때, 한계경쟁비수일 때의 재적과 임분밀도를 산출하고 곡선식이 이를 지나게 하여 최대밀도곡선을 유도하였다(Ando, 1968; Shim et al., 1985; Nagahama, 2003). 즉, 본 분석자료에서 소나무의 Rf는 표준지 288번의 0.061657이 지정되었으며, 수량비수는 최대밀도의 재적에 대한 재적비율을 의미하므로(Ando, 1968; Shim et al., 1985; Nagahama, 2003), 최대밀도곡선을 구성하는 두 수식의 K<sub>1</sub>+1, log K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, log K<sub>4</sub>에 대한 모수를 수량비수에 따라 산출한 결과는 Table 6과 같다.

현재 일본에서 사용되고 있는 4개 지역의 소나무 임분밀도관리도의 최대밀도곡선과 본 연구 결과와 비교해본 결과(Table 7), 상층수고 6 m급 최대임분밀도는 34,217본/ha로 일본규슈지역의 33,693본/ha보다 많은 것으로 나타

**Table 6. The calculated result of K<sub>1</sub>-K<sub>4</sub> parameters by relative yield index.**

Ry	K <sub>1</sub> +1	log K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	log K <sub>4</sub>
1.0 (full density curve)	-0.538	4.459	-2.397	6.399
0.95	-0.538	4.293	-2.397	6.131
0.90	-0.538	4.173	-2.397	5.952
0.85	-0.538	4.073	-2.397	5.813
0.80	-0.538	3.984	-2.397	5.696
0.75	-0.538	3.901	-2.397	5.593
0.70	-0.538	3.820	-2.397	5.499
0.65	-0.538	3.741	-2.397	5.411
0.60	-0.538	3.661	-2.397	5.327
0.55	-0.538	3.579	-2.397	5.245
0.50	-0.538	3.494	-2.397	5.163
0.45	-0.538	3.404	-2.397	5.081
0.40	-0.538	3.307	-2.397	4.996

**Table 7. Comparison of maximum stem number between Japan and Korea.**

Upper height (m)	Korea (trees/ha)	Japan*			
		Japan sea (East sea) (trees/ha)	Kyushu (trees/ha)	Tohoku (trees/ha)	Kantou (trees/ha)
6	34,217	28,462	33,693	27,491	31,572
8	17,170	14,650	17,284	14,656	17,069
10	10,057	8,752	10,298	8,998	10,594
12	6,496	5,745	6,746	6,040	7,174
14	4,490	4,025	4,717	4,311	5,160
16	3,260	2,957	3,460	3,220	3,879
18	2,458	2,253	2,633	2,489	3,015
20	1,909	1,767	2,062	1,977	2,407
22	1,519	1,418	1,653	1,605	1,964
24	1,233	1,160	1,351	1,327	1,630
26	1,018	964	1,122	1,114	1,374
28	852	812	944	947	1,173
30	722	693	805	815	1,012

Note)\*Forestry and Forest Products Research Institute, 2012

났으며, 상층 수고 20 m급에서는 1,909본/ha로 규슈와 간토지역보다는 적고 도호쿠와 일본해(동해) 연안지역 보다는 높은 수준으로 나타났다. 전체적인 최대임분밀도의 추정 결과는 일본 규슈지역과 가장 유사한 것으로 나타났다.

**4. 등평균흉고직경곡선의 추정**

등평균흉고직경곡선을 추정하는데 사용되는 소나무의 식 1을 이용하여 평방평균흉고직경을 산출하고 이 값에 대해 식 2를 적용하여 등평균수고곡선을 완성하였다 등평균흉고직경곡선상에서 나타나는 평균흉고직경, 임분밀도, 임분재적, 수량비수의 관계는 Figure 2에 나타나 있다. 최대밀도선을 의미하는  $R_y$  1.0선에서 평균 흉고직경 6 cm 일 때의 임분밀도는 ha당 약 9,541본이 최대본수이며, 이 때의 임분재적은 약 208 m<sup>3</sup>/ha로 나타났다. 평균 흉고직경이 약 30 cm일 때의 최대본수는 ha당 733본으로 감소

되며, 최대 임분재적은 약 829 m<sup>3</sup>/ha로 증가하였다. 즉, 흉고직경이 증가할수록 임분밀도는 감소한 반면, 임분재적은 증가하는 경향으로 나타났다. 또한 동일한 흉고직경일 때, 수량비수가 증가함에 따라 임분밀도와 재적이 증가하여 임분의 총생산량은 증가하지만(Figure 2), 임분 내 입목간 경쟁에 의한 생육환경이 불리하여 형상비가 불량한 입목 수가 증가하고 이로부터 해당 임분은 설해, 풍해 등 자연재해에 약해질 수 있으므로(Oda, 1992), 적정시업선에 준한 임분관리가 필요하다.

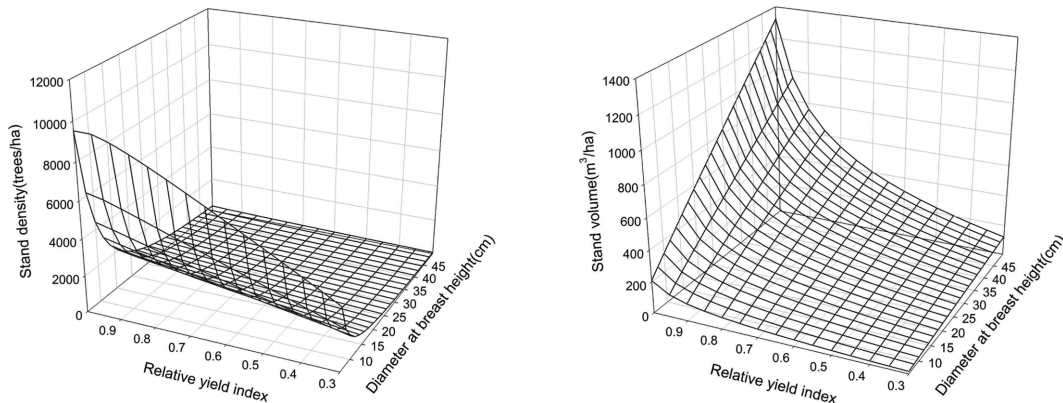
**5. 모형 적합도 검증**

각 조사자료는 등평균 수고곡선에 의해 ha당 재적이 추정된다. 적합도를 검증하기 위해 잔차 분석을 실시하였으며, 추정치와 실측치간 오차율이 허용오차율 내에 있는지 검증하였다. 임분밀도관리도에서 추정되는 임분 재적에 대해 유의확률 5% 수준에서 적합도 검정을 한 결과, 허용오차율(E)은 소나무 20% 수준에서 임계치  $\chi^2_{(0.05)}$ 보다 낮은 값이 나타나 모형이 적합한 것으로 판단하였다(Table 8).

추정되는 임분재적과 흉고직경에 대해 표준편차, 허용오차의 최소치, 허용오차율의 최소치, 변동계수를 산출하였다(Table 9). 임분재적의 표준편차는 29.56 m<sup>3</sup>으로 나타났으며, 평균흉고직경은 1.08 cm로 나타났다. 또한 임분재적의 허용오차율의 최소치는 16.11%로 나타나 우리나라 잣나무 13.64%(Shim et al., 1985), 규슈지방 삼나무 16.5%(Nagahama, 2003)와 비교해 볼 때, 재적 추정의 정확도는 크게 뒤떨어지지 않는 것으로 판단된다. 또한 평균흉고직경은 6.73%로 규슈지방 삼나무의 허용오차율의 최소치가 9.76%에 비해 낮게 나타나(Nagahama, 2003) 상대적으로 우수한 정확도를 보였다.

**Table 8. The result of test for *Pinus densiflora*.**

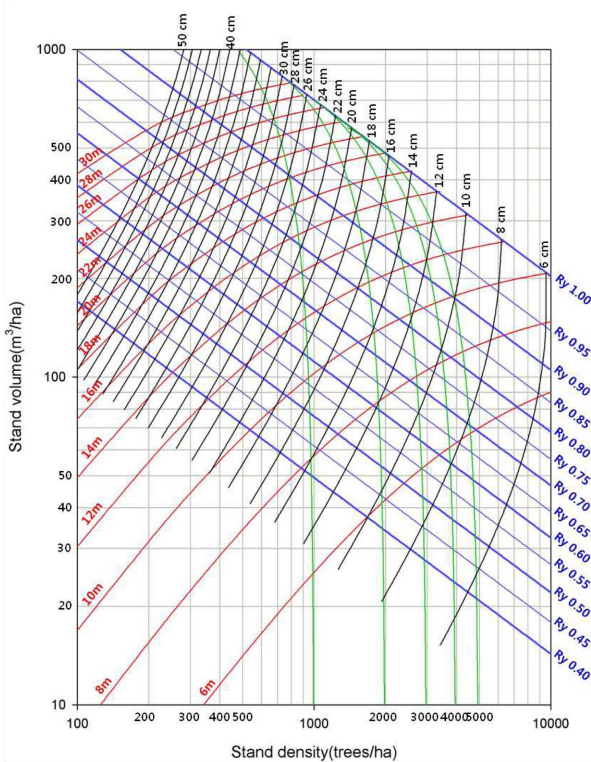
$\chi^2$	$\chi^2_{(0.05)}$	n-1	E
1115.79	1718.62	1623	20%



**Figure 2. Estimated result of the equivalent diameter curve.**

**Table 9. The residual statistics of estimated stand volume and Mean DBH.**

Item	Volume per ha	Mean DBH
Standard deviation	34.59 m <sup>3</sup>	1.08 cm
The minimum value of a permissible error	16.11 m <sup>3</sup>	1.04 cm
The minimum value of the ratio of a permissible error	16.59%	6.73%
Coefficient of variation	22.11%	6.67%



**Figure 3. Stand density management diagram of *Pinus densiflora* in Korea.**

### 결론

우리나라 소나무림의 체계적인 임분관리 지침을 작성하고자 본 연구에서는 소나무 현실임분 1,886개소에 대한 조사자료를 이용하여 임분밀도관리도를 개발하였다. 작성된 임분밀도관리도는 등평균수고곡선(Equivalent height curve), 등평균흉고직경곡선(Equivalent diameter curve), 최대밀도곡선(Full density curve), 수량비수선(Equivalent yield index curve), 자연고사선(Natural mortality curve) 등 5개의 곡선으로 구성되어 있다. 이들 중 임분 내 전체 개체목의 흉고단면적에 대한 소나무의 점유단면적이 75% 이상인 소나무 단순림을 대상으로 하여 최종 선정된 표준지 수는 총 1,624 개소이며, 이로부터 소나무의 현실임분에 대한 적정 임분밀도관리도를 작성하였다. 이때 임분재적 추정치에 대한 적합도를 검토하고자 임분재적 추정에

활용되는 역수식에 대해 유의수준 5%의  $\chi^2$  검정을 실시한 결과, 허용오차율은 20% 수준으로 나타났다. 임분재적 추정에 있어서 허용오차율의 최소치 16.11%, 흉고직경 추정은 6.67%로 나타나 임분재적 추정정확도가 다소 낮게 나타났다.

본 연구에서 제작된 임분밀도관리도는 밀도관리 시나리오별 수확량과 숲아베기 과정 및 추이를 예측할 수 있게 하여 산림경영에서 목적하는 생산재의 양과 형질에 따른 적정시업 작성 및 임분 관리계획 수립이 가능할 것으로 기대된다. 이로부터 현실임분의 생육환경 및 입지생산 특성에 따른 숲아베기 시기 및 수준을 판단함으로써 체계화된 중장기 경영계획 수립이 가능할 것으로 기대된다. 그러나 최근 국외의 추세로 볼 때, 임분밀도관리도는 주로 동령림 혹은 단층으로 구성된 단순일제림을 대상으로 대부분 작성·활용되고 있는 실정이므로, 향후 복층림이나 다층 혼효림에 대한 적용성 문제를 더욱 고민할 필요가 있다. 현재 일본에서도 참나무류의 천연림에 대해 임분밀도관리도를 작성한 사례가 있으나 인공림과 유사한 구조를 가진 천연 숲을 대상으로 제한하고 있다. 최근 국외에서 이러한 문제를 해결하기 위한 연구가 활발하게 수행되고 있으며, 우리나라 또한 임분특성을 고려한 관련 응용 연구의 지속적인 수행이 필요할 것으로 사료된다.

### 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.

Biber, P., Onyekwelu, J.C., and Stimm B. 2004. Density management diagram as a tool for thinning recommendations in even-aged *Nauclea diderrichii* plantations in Omo forest reserve. Nigeria Journal of Forestry 33: 59-69.

Chauchard, L., Bronchia, R., Tabino, A., Penalba, M.G., and Maresca, L. 2001. Modelos de crecimiento diamétrico para *Nothofagus dombeyi*. Bosque 22(2): 53-68.

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/\(2012.11.01\)](http://www.ffpri.affrc.go.jp/en/(2012.11.01)).

Kim, D.C. 1963. Stand density and optimum growing stock of Korean red pine forest in Kwangwon district. Journal of Korean Society 3(1): 47-51.

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.
- Kumar, 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: 125-131.
- Lee, K.S., Kim, S.K., Bae, S.W., Lee, J.H., Shin, H.C., Jung, M.H., Moon, H.S., and Bae, E.G. 2009. Vegetation type and stand structure of *Pinus densiflora* forests in Kangwon northern region in Korea. Journal of Agriculture & Life Science 43(6):7-17.
- Lee, K.S., Kim, S.K., Bae, S.W., Lee, J.H., and Jung, M.H. 2010. Vegetation type and stand structure of *Pinus densiflora* forests in Samcheok and Taebaek of Kangwon southern region. Journal of Korean Forest Society 99(6): 855-862.
- Long, J.N. and Shaw, J.D. 2005. A density management diagram for even-aged ponderosa pine stands. Western Journal of Applied Forestry 20: 205-215.
- Ma, S.K. 1977. Productivity and density control of stands of Japanese larch. Journal of Korean Society 34: 21-30.
- Márquez, L.M.A. and Alvarez, Z.R. 1995. Construcción de una guía de densidad para *pinus cooperi* var *onelasi* con base en la clase de copa en Durango. México. Madera y Bosques 1(2): 23-36.
- 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.
- National Institute of Forest Science. 2012. Economic tree, *Pinus densiflora*. pp 250.
- 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.
- Onyekwelu, J.C., Biber, P., and Stimm, B. 2003. Thinning scenarios for *Gmelina arborea* plantations in south-western Nigeria using density management diagrams. Journal of Food Agriculture Environment 1(2): 320-325.
- Reineke, L.H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. Journal of Agriculture Research 46: 627-638.
- Sales Luis, J.F. and Fonseca, T.F. 2004. The allometric model in the stand density management of *pinus pinaster* Ait in Portugal. Annals of Forest Science 61: 807-814.
- Sharma, M. and Zhang, S.Y. 2007. An improved stand density management diagram for jack pine grown in eastern Canada. Northern Journal of Applied Forestry Science 61: 807-814.
- 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.
- Shim, D.S., Park, C.W., Lee, H.K., and Kim, S.I. 1985. A study on stand density management diagram of Korean. Research Report of Forest Institute Korea 32: 38-48.
- Spathelf, P. and Schneider, P.R. 2000. Determination of a density management diagram as a decision tool for growth control of *Pinus elliottii* Engelm stands. Forstwissenschaftliches Centralblatt 119(3): 89-99.
- Tadaki, Y. 1963. The pre-estimating of stem yield based on the competition density effect. Bulletin Government Forest Experiment Station 154: 1-19.
- Vacchiano, G., Motta, R., Long J.N., and Shaw, J.D. 2008. Analysis of intraspecific competition in two subalpine Norwat spruce (*Picea abies*(L.) Karst.) stands in Paneveggio (Torento, Italy). Forest Ecology and Management 225: 2542-2554.
- Williams, R.A. 1994. Stand density management diagram for loblolly pine plantations in North Louisiana. Southern Journal of Applied Forestry 18: 40-45.

---

(Received: May 9, 2016; Accepted: August 16, 2016)