



국가산림자원조사를 이용한 혼효림의 입지환경 탐색 및 임분수확량 추정

정성엽¹ · 임종수² · 이선정² · 송정은¹ · 박효근¹ · 이정빈¹ · 염규진¹ · 손영모¹^{*}

¹한국산지보전협회, ²국립산림과학원 산림ICT연구센터

Detection of Site Environment and Estimation of Stand Yield in Mixed Forests Using National Forest Inventory

Seongyeop Jeong¹, Jongsu Yim², Sunjung Lee², Jungeun Song¹, Hyekeun Park¹,
JungBin Lee¹, Kyujin Yeom¹ and Yeongmo Son¹^{*}

¹Korea Forest Conservation Association, Daejeon 35262, Korea


²Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 본 연구는 국가산림자원조사 자료를 활용하여 우리나라 혼효림에 대한 산림 입지조건을 탐색하고 임분의 생장 및 수확량을 추정하기 위하여 수행되었다. 혼효림의 생장은 흉고직경, 수고, 흉고단면적을 변수로 하는 Chapman-Richards 모델을 적용하여 식을 도출하였으며, 수확량은 흉고단면적, 지위지수, 임령, 입목밀도 등의 인자를 단계적회귀분석 적용으로 회귀식을 도출하였다. 국내 혼효림은 다양한 입지에 생육하고 있었는데, 기후대별로는 온대중부권역에 과반수 이상이 분포하고 있었으며, 해발고별로는 101~400 m 지역에 약 62%가 분포하는 것으로 나타났다. 임령을 설명변수로 하는 혼효림 생장모형의 적합도(FI)는 흉고직경 0.32, 수고 0.22, 흉고단면적 0.18로 도출되어, 다소 낮은 적합도 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 추정식의 실측치와 추정치 간의 관계 그래프 및 잔차 등을 고려할 때, 임령을 설명변수로 이용하는 추정모형의 사용은 특별한 문제가 없을 것으로 판단되었다. 혼효림의 수확모형은 여러 생장인자 중 흉고단면적(BA), 지위지수(SI), 임령(Age)이 단계적으로 투입되는 회귀식 $Stand\ volume = -162.6859 + 6.3434 \cdot BA + 9.9214 \cdot SI + 0.7271 \cdot Age$ 이 도출되었으며, 식의 설명력 (R^2)은 약 96% 였다. 앞서 도출된 최적의 생장 및 수확모형을 이용하여 임시 임분수확표가 만들어 졌다. 또한 임시 임분수확표 자료를 활용하여 혼효림의 재적수확최대별기령을 도출하였다.

Abstract: This study was established to investigate the site environment of mixed forests in Korea and to estimate the growth and yield of stands using national forest resources inventory data. The growth of mixed forests was derived by applying the Chapman-Richards model with diameter at breast height (DBH), height, and cross-sectional area at breast height (BA), and the yield of mixed forests was derived by applying stepwise regression analysis with factors such as cross-sectional area at breast height, site index (SI), age, and standing tree density per ha. Mixed forests were found to be growing in various locations. By climate zone, more than half of them were distributed in the temperate central region. By altitude, about 62% were distributed at 101-400 m. The fitness indexes (FI) for the growth model of mixed forests, which is the independent variable of stand age, were 0.32 for the DBH estimation, 0.22 for the height estimation, and 0.18 for the basal area at breast height estimation, which were somewhat low. However, considering the graph and residual between the estimated and measured values of the estimation equation, the use of this estimation model is not expected to cause any particular problems. The yield prediction model of mixed forests was derived as follows: $Stand\ volume = -162.6859 + 6.3434 \cdot BA + 9.9214 \cdot SI + 0.7271 \cdot Age$, which is a step-by-step input of basal area at breast height (BA), site index (SI), and age among several growth factors, and the determination coefficient (R^2) of the equation was about 96%. Using our optimal growth and yield prediction model, a makeshift stand yield table was created. This table of mixed forests was also used to derive the rotation of the highest production in volume.

Key words: mixed forests, national forest inventory, regression equation, rotation of the highest production in volume, stand growth and yield model

* Corresponding author
E-mail: pine21c@kfca.re.kr

ORCID
Yeongmo Son  <https://orcid.org/0000-0002-9346-4351>

서론

산림 내 수종, 임령, 수관 및 생육환경 등의 다양성과 복잡성으로 인하여, 임분의 성장상태, 임분구조 현황 및 미래 변화 예측이 어려우나, 이들을 몇 가지 가정을 전제로 시뮬레이션 모델(model)화 하는 등 가능성에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다(Breder, 1960; Bruce, 1969; West, 1981).

우리가 알 수 있는 가장 정확한 성장·수확모델은 단순한 숲 생태계 즉, 단순 동령림(even-aged pure forests)에 존재하며, 혼효림(mixed forests)은 일반적으로 다양한 수종 및 임령으로 구성된 이령(uneven-aged)림의 구조를 나타내고 있어 20세기 이전까지 신뢰할 수 있는 자료의 획득과 임분구조 해석 기술의 부족으로 모델 개발에 어려움이 있었다(Vanclay, 1994). 따라서 주로 단일 수종으로 구성된 (대부분 인공림) 단순림에 대한 성장 및 수확모델에 대한 연구가 오래 전부터 시작되어 많은 발전이 있었으며, 국가별 수종별로 수확표의 형태로 제시하고 있다(Cota, 1821; Bartelink, 2000, Liang et al, 2005).

혼효림에 대한 모델 개발은 20세기 전반기에 시작되었으며, 당시 자료의 부족과 임분의 다양한 동적변화 등에도 불구하고 Wiedemann(1949)에 의해 동령(even-aged)의 가문비나무-너도밤나무 혼효림에서 전통적이고 경험적인 수확표를 만들었던 기반 하에서 수확표를 만든 것이 이 연구의 시초로 보고 있다(Mohren, 1987; Porté et al., 2002). 그 이후 혼효림에 대한 성장자료의 축적과 임분 다양성에 대한 해석능력 발전 등으로 임분 수준에서 개체목 수준의 기계론적 모델로 발전하기에 이르렀다(Alimi et al., 1977; Mäkelä et al., 1986; Kramer, 1995). 구체적으로 보면, Bartelink(2000)는 전나무-너도밤나무 혼효림에 대한 성장과 수확, 관리 효과를 시뮬레이션하는 기계적인 모델을 제시하였다. 그리고 Tham(1988)은 Norway 가문비나무-자작나무 혼효림에서 유령림일 때 자작나무가 있으면 가문비나무의 생장이 높아짐을 보고하였다. 또한 West(1991)는 전나무-낙엽송 혼효림에서 연간 재적성장량은 각각의 개별 단순림일 때보다 높았음을 밝힌 바 있다.

한편, 현재 개발된 단순림의 성장모델은 '현재의 환경에서 성장상태가 미래까지도 시간만 흐를 뿐, 성장패턴은 유사하게 유지될 것이다'라는 큰 가정 하에서 만들어진 것이다. 그러나 30~40여년 전부터 크게 이슈화되고 있는 기후변화라는 명제 하에서, 온실가스 농도 변화, 기온 상승 등에 따라 향후 식물생장은 점차 다르게 나타날 것이 예상되고 있다(Wigley, 1993). 또한 Phillips et al.(1994)은 강력한 산성비, 질소 퇴적물, 그리고 기타 다른 형태의 오염물질이 육상 생태계에 큰 영향을 줄 것이라고 보고한 바 있다.

따라서 기존의 단순림의 성장 및 천이 모델의 재구축 뿐만 아니라 변화예측이 더 어려워질 것이 예상되는 혼효림에 대한 모델 개발이 필요한 시점이다.

2020년 기준 우리나라 산림면적(6,298천ha) 중 임상별로 침엽수 36.9%, 활엽수 31.8%, 혼효림 26.5%, 기타 4.8%로 구성되어 있으며, 이중 침엽수는 소나무 등 8개 수종, 활엽수는 상수리나무 등 6개 수종에 대해 성장모델이 구축되어 있다(National Institute of Forest Science, 2021a, 2021b). 그러나 국내 혼효림에 대해서는 바이오매스, 탄소저장량, 물질생산량 및 국소지역의 직경성장모델 등 극히 일부만 연구되었으며, 전 지역 차원에서의 혼효림 성장 및 수확모델 개발 연구는 전무하다(Park et al., 1999; Seo et al., 2005; Son et al., 2014).

본 연구에서는 국가산림자원조사 자료를 이용하여 국내 혼효림의 입지환경이 어떻게 구성되어 있는지를 탐색해 보고, 임목성장 현황 및 미래 수확량 예측을 위해 성장모델을 도출하고자 하였다. 그리고 성장모델을 이용하여 재적의 연평균성장량 및 연간성장량 계산으로 재적수확최대별 기령이 어느 시기가 적합한지를 알아 봄으로써, 생리·생태적으로 복잡다양한 혼효림에서의 향후 성장 및 수확량 예측과 산림경영을 지원할 수 있는 방향성을 제시해 보고자 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료

우리나라는 산림의 효율적 자원관리 및 산림정책 수립을 위해 1972년부터 주기적인 국가산림자원조사(National forest inventory, NFI)를 수행하여 왔으며, '90년대 이후 지구온난화문제가 대두되면서 산림의 다양한 가치의 변화와 산림경영 패러다임이 바뀌면서 국가산림조사 체계(5차 조사 이후)가 바뀌게 되었다. 바뀐 체계에서는 산림 내 환경생태자원 및 탄소저장량 모니터링이 가능하도록 표본설계 되었고, 또한 여기에는 조사항목이 추가되게 되었다(National Institute of Forest Science, 2021).

본 연구에서 사용한 자료는 5년 주기의 국가산림자원조사 표본점 중 5,6,7차기(2006~2020년)에 조사한 자료를 이용하되, 성장모델 개발을 위해서는 5,6,7차 혼효림의 표본점 자료 중 임령(성장추로서 표본목 core 추출로 임분단위 임령 계산) 등 성장인자의 미기재, 흉고단면적과 재적 등의 이상 계산치, 정상 임분에서 나타날 수 없는 임목본수 값 등이 있는 표본점을 제외한 자료(n=10,022개 plots)를 활용하였다. 표본점은 부표본점을 모두 하나의 표본점으로 간주하였으며, 5,6,7차 조사에 따른 표본점

Table 1. General characteristic of sample plots in mixed forests.

Forest type	Growth factors	No. of plots	Stand age	DBH (cm)	Height (m)	Trees number/ha (No.)
Mixed forest		4,262	$\frac{41}{7-102}$	$\frac{24.1}{6.6-39.3}$	$\frac{13.4}{3.8-24.8}$	$\frac{1,159}{38-4,300}$

을 이용함은, 표본점이 동일한 것이 존재하나, 혼효림 성장모델 개발은 모니터링이 아니므로, 표본점 하나하나를 모두 임시표본점으로 간주하여 활용하였다. 그리고 혼효림의 입지 개황을 파악하기 위해서는 각 차기별로 조사되는 표본점이 동일하기 때문에 7차기(2016~2020년) 표본점의 자료(4,262개 plots)만을 활용하였다. Table 1에 제시된 정보는 본 분석에 활용된 7차기 표본점에 대한 자료 개황을 나타낸 것이다.

전체 조사 자료 중 혼효림에 대한 성장 구명을 위하여, ‘국가산림자원조사 및 산림의 건강·활력도 현지조사지침서’ 상 혼효림으로 판정된 표본점 자료가 활용되었는데, 지침서에 의하면 혼효림은 임상 중 침엽수와 활엽수의 흉고단면적 비율이 각각 25% 초과, 75% 미만인 임분으로 규정하고 있다(Korea Forestry promotion Institute, 2017). Table 1에서 102년인 혼효림의 임상이 균락을 이루고 있음이 독특한데 자료 검색 결과, 표본점의 소재지는 경상북도에 위치하고 있었으며, 소유구분은 국유림이고, 임상은 소나무 외 기타 수종으로 구성된 ha당 축적이 약 450 m³에 달하는 혼효림인 것으로 밝혀졌다.

2. 분석 방법

1) 혼효림 분포현황 분석

혼효림의 각 표본점 상 입지환경인자 중 해발고, 경사도 등의 기본적인 정보는 국가산림자원조사에서 조사하고 있으나, 모암, 기후대, 토심, 토성 등은 조사되지 않는 인자이므로 이는 1/5,000의 산림입지토양도의 자료를 활용하였다(Korea Forest Service, 2022). 자료의 병합은 국가산림자원조사 표본점 조사지(Korea Forest Service, 2021)의 공간좌표와 최근에 발표된 1/5,000 대축적 산림입지토양도 상 좌표 위치가 일치하는 곳을 찾아, 입지환경인자를 추가시킨 것이다. 입지토양도 상에서 도출된 인자는 모암(대, 중분류), 기후대, 국소지형, 경사형태(상승, 하강사면 등), 토심, 토성 등의 자료였다.

상기 두 가지 자료를 활용하여 우리나라 혼효림의 임분 성장인자인 영급 및 임분밀도의 현황과 입지환경인자인 기후대, 해발고, 국소지형, 모암, 토성 등에 대한 현황을 도출하였다.

2) 성장 및 수확모델 도출 방법

성장과 수확(growth and yield)은 유사한 의미로 사용되지만, 성장은 주어진 시간의 주기에 따른 임분 내 개체목 또는 균락에 대한 크기의 증가(예로, 재적 성장, m³/ha/yr)를 의미하며, 수확은 특정 시점의 마지막에 측정되는 크기(예로, 총 재적, m³/ha)를 의미하는, 엄밀하게 말해서 차이점이 있다고 볼 수 있다. 이렇림에서 수확은 주어진 시점의 전체 생산량인 반면에, 성장은 생산량에 대한 비율이라 볼 수 있으며, 만약 수확을 y 라 하면, 성장은 dy/dt 로 표현할 수가 있을 것이다(Vanclay, 1994).

따라서 본 연구에서 혼효림의 성장모델은 임분의 평균 흉고직경, 평균수고 및 흉고단면적(반응변수 만을 임령으로 표현하였으며(식 1), 반면 수확모델은 임분재적(반응변수)을 대상으로 성장인자인 임령, 흉고단면적, 임분밀도, 지위지수 등 다변량을 적용시켜, 이 중 적정 변수로 선택이 되는 것만을 이용하는 최적 식을 도출하고자 하였다(식 2). 순림(pure forests)이 아닌 혼효림의 수확모델 도출에 설명변수인 지위지수를 도입하는 것은 다소 무리가 있을 수 있다. 그러나 혼효림에 대해 처음 시도되는 수확량 예측을 위하여, 혼효림 내 각종 혼재된 수목들을 하나의 균락으로 보고, 그 중 수고생장이 우세한 수목들의 수고와 평균 임령으로 지위지수를 도출하여 변수로 사용하는 방법을 적용시켰다. 지위지수는 입지의 생산력을 가장 잘 표현하므로 혼효림의 성장·수확모델을 도출함에 있어 필수적인 영향인자이므로 이를 계산하여 독립변수로 사용하게 되었다. 지위지수 도출을 위해서 사용된 모형은 Schumacher 모델을 적용시켰다.

임령을 설명변수로 하는 성장모델은 선형(linear)을 이루는 것이 아니라, 비선형곡선(non-linear curve)을 가지므로 비선형식을 적용시켰다. 그리고 수확모델은 설명변수들이 선형의 형태를 갖는 다중회귀분석을 적용시켰다(Clutter et al., 1983; Vanclay, 1994).

각 인자별 성장모델의 형태는 다음과 같으며, 최적식은 적합도(fitness index, FI)와 오차의 표준오차(SEE) 등으로 판정하여 도출하였다. 수식의 각 파라미터는 SAS 프로그램을 이용하여 도출하였다(Kim, 2000; Kim et al., 2014).

$$Y(DBH, HT, BA) = a(1 - e^{(-b \cdot age)})^c \quad (1)$$

$$Y(V) = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 \dots \quad (2)$$

$$FI = 1 - \left[\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \right]$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n-p)}}$$

(여기에서, *DBH* = Diameter at breast height, *HT* = Height, *BA* = Basal area per ha, *V* = Stand volume, *age* = Stand age, *a, b, c, d* = Parameters, *x_i* = Independent variables, *Y_i, \hat{Y}_i, \bar{Y}* = Measurement, estimate and mean of growth, respectively, *n* = Number of sample, and *p* = Number of model parameters)

결과 및 고찰

1. 혼효림의 영급, 밀도 및 입지환경 분포

1) 영급 및 입목밀도 분포현황

국내 산림 중 혼효림은 4영급이 43.1%, 5영급이 39.5%로, 이 2개 영급이 전체 산림 중 약 83%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그 외 6영급 6.6%, 3영급 6.0% 순이었으며, 이들 자료로 혼효림의 평균 임령을 계산하면 약 40년 정도인 것으로 나타났다.

혼효림의 ha당 입목본수는 500~1,000본 사이에 있는 군락이 36.9%, 1,000~1,500본 군락이 30.9%로, ha당 500~1,500본 사이의 입목본수를 가진 군락이 약 68% 정도를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 1,500~2,000본을 가지는 군락도 15.2% 정도 나타났으며, 500본 이하의 본수를 갖는 군락도 일부(8.8%) 존재하는 것으로 나타났다.

2) 입지환경인자 현황

현재 혼효림에 분포하고 있는 산림의 입지환경인자 개황을 파악하기 위하여 표본점(7차기)을 대상으로 분포도

를 그려본 바, 기후대로 보았을 때 온대중부권역에 과반수 이상(51.3%)이 분포하고 있었으며, 그 외 온대남부권역, 난대권역, 온대북부권역의 순이었다. 혼효림의 해발고별 분포는 101~400 m 지역이 61.7%로 가장 많았으며, 401~700 m 19.9%, 100 m 이하에 11.9% 분포하는 것으로 나타났다. 혼효림이 위치한 국소지형(topography)은 산록(foot of mountain) 68.9%, 산복(hillside) 26.2%로 이 2개 지역에 대부분(95.1%) 분포하고 있었으며, 혼효림이 위치한 곳의 모암은 화성암(igneous rock) 39.7%, 변성암(metamorphic rock) 30.3%, 퇴적암(sedimentary rock) 30.1% 인 것으로 나타났다. 그리고 토양깊이는 30~60 cm 47.9%, 29 cm이하 41.2%였으며, 토양의 성질은 사양토(sandy loamy) 40.5%, 양토(loam) 35.9%, 미사질양토(silt loam) 19.5%로 혼효림은 대부분 이 3가지 토양군에 분포하고 있음을 알 수 있었다. 혼효림의 경사형태는 상승사면(uphill slope), 평행사면(flat slope), 하강사면(downhill slope) 순이었으며, 경사 기울기는 21~30°가 41.3%로 가장 많았으며, 그 다음으로 11~20° 26.6%, 31~40° 22.2% 순으로 나타났다.

산림토양과 관련한 다른 보고에 의하면, 우리나라 산림은 제주도 제외한 다른 지역에서는 주로 양토로 구성되고 있으며, 토양의 깊이(A+B층)는 약 50 cm 이하라고 하였고, 한반도 전체의 모암은 화강암 및 화강편마암이 전국토면적의 55%를 차지한다고 밝혀(Jin et al., 2006), 상기 혼효림 분포지의 입지조건과 상대적인 비교가 가능할 것이다.

2. 혼효림 성장 및 수확모형 도출

1) 성장인자별 최적 성장모형

혼효림에서의 흉고직경, 수고 및 흉고단면적 성장모형을 도출하기 위하여 임령을 적용시키는 비선형 추정식의 파라미터를 도출하였으며 이들 식에 대한 통계량을 검정하였다(Table 2). 본 연구에 사용된 Chapman-Richards 모델은 Richards(1959)와 Chapman(1961)이 Bertalanffy모델

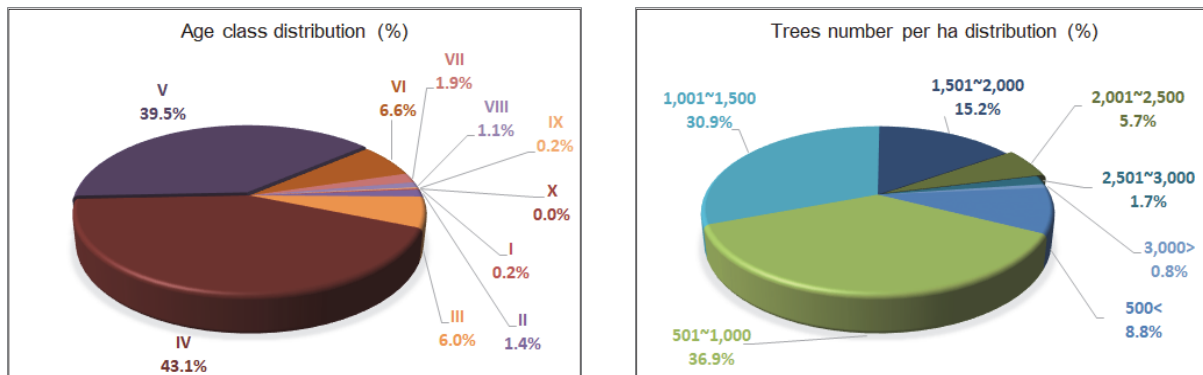


Figure 1. Age class and tree number/ha distribution in mixed forests.

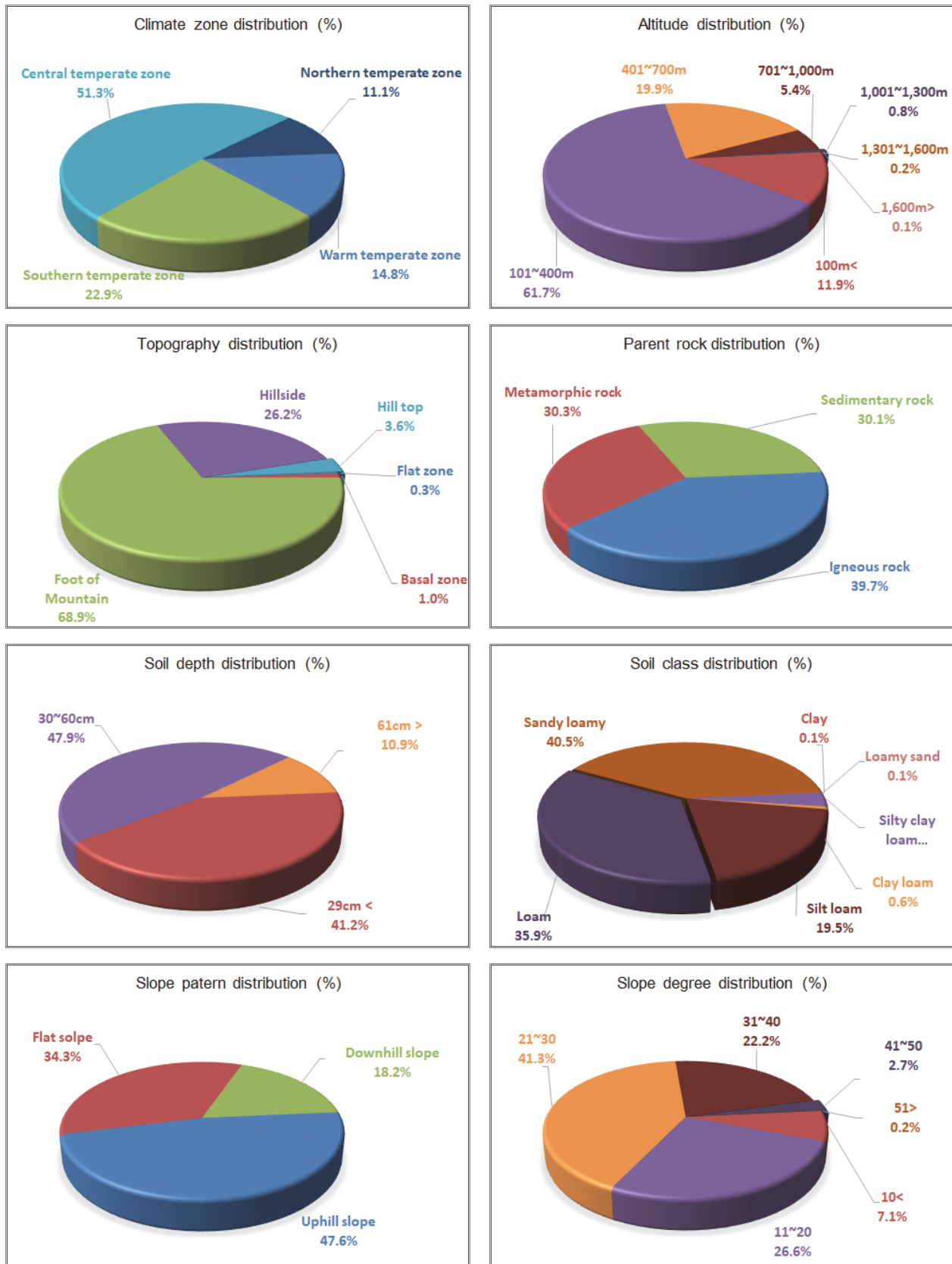


Figure 2. Site environmental factors distribution in mixed forests.

Table 2. Parameters and statistic of growth model by factors in mixed forests.

Equations	Parameters			Fitness index	SEE
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
$DBH = a(1 - e^{(-b \cdot age)^c})$	28.1950	0.0696	3.0971	0.3194	0.1450
$HT = a(1 - e^{(-b \cdot age)^c})$	14.4292	0.0878	3.1023	0.2217	0.3344
$BA = a(1 - e^{(-b \cdot age)^c})$	48.2736	0.0342	1.5948	0.1836	0.7721

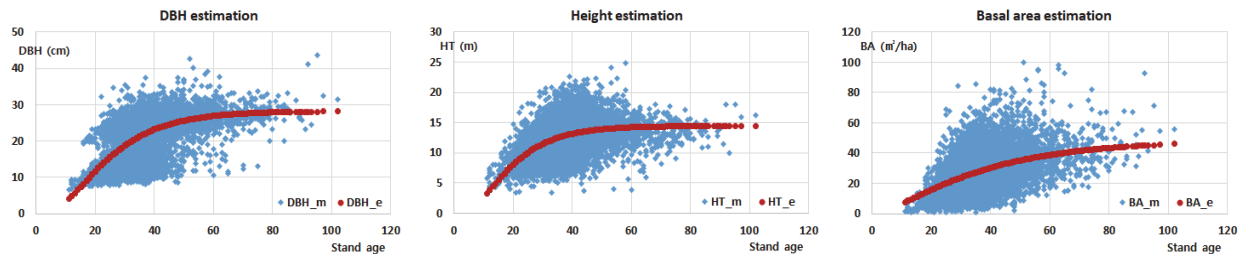


Figure 3. Estimated growth curve of dbh, height and basal area in mixed forests.

을 좀 더 융통성있는 생장곡선으로 변형하면서 시작되었고, Pienaar et al.(1973)이 독일가문비나무 동령림의 생장을 설명하기 위해서 이 모형을 확장시켜 적용한 후, 임업 부문에 일반화되면서 폭 넓게 이용된 것이다.

Table 2에서 혼효림 내 임분의 흉고직경, 수고 및 흉고 단면적을 반응변수로, 임령을 독립변수로 한 비선형회귀 결과는 적합도지수(fitness index)가 다소 낮는데, 이는 생장인자를 임령이라는 하나의 변수로 표현하였으며, 또한 생장인자들의 다양한 분포를 하나의 생장곡선이 지나는 최적선을 찾았기 때문이기에 적합도가 낮게 도출되는 것이다. 그러나 Figure 3에서 보듯이 임령에 따라 넓게 분포한 각 인자의 생장형태를 본 연구에서 도출된 모형의 곡선이 중앙 부분을 통과함을 볼 수 있는데, 이는 결국 추정식에 대한 잔차가 임령 “0”을 중심으로 고르게 분포하고 있음을 나타내 준 것이라 볼 수 있는 것이다. 따라서 본 연구로 도출된 생장모형을 국내 혼효림에 적용하더라도 생장형태 및 변화를 충분히 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 혼효림의 최적 수확모형

혼효림에 대한 수확모형은 생장모형에서 중요 시 되는 임령보다는 오히려 임분밀도, 입지환경, 흉고단면적 등의 인자가 더 많은 영향을 미친다고 볼 수 있다. 본 연구에서도 국가산림조사의 표본점 자료에서 계산된 흉고단면적, 임분밀도, 지위지수와 시기별 생장에 관여하는 임령을 무시할 수는 없기에 이를 포함한 4가지 인자를 임분재적에 적합시켰으며, 단계적회귀분석(stepwise regression)에 따른 재적에 가장 큰 영향을 주는 인자부터 선택하는 방법을 따랐다. 분석 결과는 Table 3과 같다.

Table 3을 보면, 혼효림의 임분재적에 가장 영향을 크게 미치는 인자는 흉고단면적(BA)이었으며, 다음으로 지위지수(SI), 임령의 순임을 알 수 있다. 흉고단면적의 경우 임분재적에 약 86.8%의 기여를 하고 있는 것으로 나타났는데, 이는 임분구조 상 재적이 3차원(m³)의 개념이고, 흉고단면적이 2차원(m²)의 개념이므로 그만큼 큰 영향을 미칠 수 밖에 없는 구조이다. 그리고 임령의 경우는 도출된 회귀모형에 0.6%정도 밖에 기여를 하지 않는 것으로 나타났으며, 여기에 제시되지 않은 투입변수인 임분밀도(ha당

Table 3. Stepwise regression analysis result influencing the stand volume in mixed forest.

Input variable	Parameter estimate	Prob>F	Model R ²	DW	Autocorrelation
Constant	-162.6859	0.0001	-		
BA	6.3434	0.0001	0.8683	1.661	0.169
SI	9.9214	0.0001	0.9511		
Age	0.7271	0.0001	0.9559		

입목본수)는 그 영향력이 0.1%에 불과해 식의 형성에서 기간을 시켰다. 잔차에 대한 정규성을 알 수 있는 더빈 왓슨값(durbin-watson, DW, 일반적으로 2에 근접할 때를 정규성을 띤다)은 1.661로 정규성을 가진다고 볼 수 있었으며, 잔차에 대한 자기상관(autocorrelation)을 나타내는 값은 0.169로 자기상관이 거의 일어나지 않음을 알 수 있었다.

회귀분석에 의해 도출한 성장인자들로써 혼효림의 수확량을 산출할 수 있는 식을 구성해 보면 다음과 같다.

$$\text{Stand volume} = -162.6859 + 6.3434 \cdot BA + 9.9214 \cdot SI + 0.7271 \cdot \text{Age} \quad (3)$$

임분의 수확량 산정을 위해 성장인자를 관계시킨 타 연구로는, Bennett(1970)가 slash 소나무 천연림의 수확량 산정을 위해 본 연구와 동일하게 흉고단면적, 지위지수, 임령을 사용한 바 있으며, Sullivan et al.(1972)도 loblolly 소나무 천연림 수확량 예측을 위하여, 그리고 Perala(1971)도 black spruce 수확량 도출에 우리 연구와 동일한 인자를 사용하여 연구 결과를 도출한 바 있다. 그 외 Borders et al.(1986)은 slash 소나무 수확량 산정에 흉고단면적과 수고만을 사용한 연구도 있었다.

3. 혼효림 간이 임분수확량 및 벌기령 도출

1) 혼효림의 간이 임분수확표

상기에서 도출된 혼효림의 성장 및 수확모델을 이용하여 Table 4와 같이 임분수확표를 작성하였다. 임분수확표

는 지위와 임령 등으로 구분되어 작성되어야 하나, 혼효림에서의 지위지수 도출은 다양한 수종 및 수령의 분포, 수관층 즉, 우세목 수고를 이루는 수종 선정 곤란 등으로, 도출이 아주 어렵다(Vanclay, 1994). 다만, 본 연구에서는 앞서 언급한 바 있듯이 혼효림 내 다양한 수종들을 편의상 하나의 단일 군락으로 보고, 지위지수를 도출하여 수확모델 도출에만 적용시켰다. Table 4에서의 임분수확표는 식 3을 이용하되 혼효림이라는 점을 감안하여, 지위지수가 “중” 수준인 14로 고정시켜 수확표를 작성하였다. 따라서 Table 4는 현재 우리가 사용할 수 있는 혼효림의 평균적 입지에서의 간이 임분수확표라 볼 수 있다. 혼효림의 임령에 따른 수확량을 알 수 있는 기준이 없는 현재로서는 본 간이 임분수확표가 산주나 임업정책자 등이 혼효림을 경영할 시, 다소나마 기준으로 삼을 수 있을 것이라 본다. 임령이 서로 다른 이령림과 수종이 다양한 혼효림 등에서 성장 및 수확에 관한 연구로는 Duerr et al.(1938), Moser et al.(1969), Lynch et al.(1986), Vanclay(1994) 등의 연구 결과가 있다.

Table 4에 의하면, 혼효림 70년생에서 ha당 약 290 m³의 목재 수확량을 보일 것으로 예측되는데, 신갈나무 현실림 임분수확표(National Institute of Forest Science, 2021b) 지위 중(14)에서의 70년일 때 약 280 m³ 목재생산량의 수치와 유사한 결과였다.

2) 연평균성장량 및 연년생장량 곡선 도출

혼효림의 간이 임분수확표를 이용하여 연평균성장량(mean annual increment, MAI)과 연년생장량(current annual

Table 4. Makeshift stand yield table available for mixed forests.

Stand age	Height (m)	DBH (cm)	Basal area (m ² /ha)	trees no./ha	Stand volume (m ³ /ha)	Mean annual increment (m ³ /ha)	Periodic increment (m ³ /ha)
10	2.72	3.32	6.69	4,088	25.91	2.59	-
15	5.48	7.35	11.25	2,310	58.48	3.90	6.51
20	8.01	11.62	15.74	1,737	90.61	4.53	6.43
25	10.00	15.50	19.95	1,464	120.94	4.84	6.06
30	11.45	18.70	23.78	1,306	148.85	4.96	5.58
35	12.45	21.22	27.19	1,204	174.16	4.98	5.06
40	13.13	23.13	30.20	1,132	196.89	4.92	4.55
45	13.58	24.55	32.83	1,080	217.20	4.83	4.06
50	13.88	25.58	35.11	1,039	235.28	4.71	3.62
55	14.07	26.33	37.07	1,007	251.38	4.57	3.22
60	14.20	26.87	38.76	982	265.71	4.43	2.87
65	14.28	27.26	40.20	960	278.50	4.28	2.56
70	14.33	27.53	41.43	942	289.94	4.14	2.29

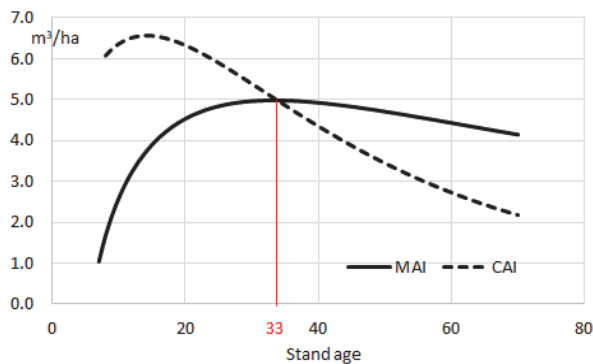


Figure 4. MAI and CAI curve in mixed forests.

increment, CAI)을 도출한 결과 Figure 4와 같다.

Figure 4에서 MAI과 CAI가 만나는 지점은 임령 33년인데, 이 지점이 통상적으로 말하는 ‘재적수확최대별기령’이 된다. Yoon(2021)에 의하면, 우리나라 침엽수 중 별기령은 강원지방소나무 35년, 리기다소나무 31년, 낙엽송 33년, 잣나무 39년이며, 활엽수는 상수리나무 32년, 굴참나무 33년, 신갈나무 29년이라고 밝히고 있어, 침엽수와 활엽수를 합쳐 산술평균하면 개략적으로 임령 33년 주변이 되어, 본 연구에서 도출한 별기령이 기존의 연구범위를 크게 범위를 벗어나지 않음을 알 수 있었다.

결론

혼효림은 복잡 다양한 임상이 혼재하며 생육하므로 생장에 있어 수목들 간 경쟁이 될 수도 있지만, 다른 수종의 생장을 도와 줄 수도 있는 생리생태학적으로 아주 복잡한 메카니즘을 갖는다. 임상을 동일한 목표형으로 관리하지 않으면 대부분이 천연림 형태인 혼효림으로 임분구조가 바뀌어 갈 것이며, 이런 혼효림을 방치형 경영으로 둘 수도 없어 오래전부터 혼효림에 대한 성장 및 수확모델을 확립하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔으나, 뚜렷한 성과를 가져오지는 못한 실정이다.

본 연구에서는 우리나라 산림면적 중 약 1/3에 가까운 혼효림에 대한 가장 기본적인 입지상황을 살펴보았으며, 임령에 따른 성장과 수확량을 구명해봄으로써, 향후 혼효림 관리에 아주 기본적인 정보를 제공하고자 하였다. 국내 산림 중 혼효림의 입지조건은 온대중부권역에 과반수 이상이 분포하고 있었으며, 해발고도별로는 101~400 m 지역이 약 62%로 가장 많았으며, 국소지형은 산록 부위에 약 70%가 분포하고 있는 것으로 나타났다. 혼효림이 위치한 곳의 토양은 사양토와 양토에 약 76% 분포하고 있고, 토심은 대부분 60 cm 이하인 것으로 나타났다.

혼효림의 흉고직경, 수고, 흉고단면적 등의 성장모형을 도출한 결과, 복잡한 혼효림 구조 상 적합도(FI)가 약 18~32% 수준으로 낮게 나타났으나, 식의 잔차 등을 고려했을 때 이들을 충분히 현지에 활용할 수는 있을 것으로 판단되었다. 그리고 임분의 흉고단면적, 지위지수, 임령 등을 변수로 하는 혼효림 수확모형을 도출하였고 이 모형의 정도(R^2)는 95.6%로 나타났다. 이 성장 및 수확모형을 이용하여 혼효림에 적용할 수 있는 간이 임분수확표를 작성하였으며, 수확표 상의 자료를 활용하여 재적수확최대별기령을 계산한 결과 33년인 것으로 나타났다.

본 연구결과를 기반으로 임분 직경, 흉고단면적 및 재적의 성장인자를 산주 등이 무엇을 목표로, 또한 어떠한 목표를 가질 것인가를 확실하게 정하여 관리하고 경영해 간다면, 국가 산림 1/3인 혼효림이 새로운 산림경영대상지가 될 것이라 본다. 그리고 본 연구는 혼효림을 일종의 순림으로 보고 성장 및 수확모델을 적용시킨 시험적인 연구라고 볼 수 있다. 학자에 따라 분석방법이나 생장학적 측면에서 개념상 이해의 수렴이 어려울 수도 있을 수 있을 것이나, 혼효림에 대한 성장과 수확을 처음으로 이해하고자 본 연구가 수행되었음을 밝히며, 향후 혼효림에서의 성장 등급을 매길 수 있도록 동령림에서와 같은 지위지수 개념의 기준이 정립된다면 보다 더 혼효림의 해석이 명료해 질 것이라 본다. 또한 이런 정보가 산림경영 측면에서도 산주에게 충분한 의사결정을 지원할 수 있을 것이라 보며, 이에 대한 연구가 추진되기를 기대한다.

References

- Alimi, R.J. and Barrett, J. 1977. Computer and tabular growth simulation of mixed conifer-hardwood stands in the North-East. New Hampshire Agricultural Experiment Station. Durham, U.S.A. Research report 61, pp. 56.
- Bartelink, H.H. 2000. A growth model for mixed forest stands. *Forest Ecology and Management* 134(1): 29-43.
- Bennett, F.A. 1970. Variable-density yield tables for managed stands of natural slash pine. Southeastern Forest Experiment Station, U.S. Department of Agriculture, Forest Service Research Note SE-141: 1-7.
- Borders, B.E. and Bailey, R.L. 1986. A compatible system of growth and yield equations for slash pine fitted with restricted three-stage least squares. *Forest Science* 32(1): 185-201.
- Bossel, H. and Krieger, H. 1991. Simulation model of natural tropical forest dynamics. *Ecological Modelling* 59(1): 37-71.
- Breder, E.V. 1960. Growth predictions for natural stands of

- loblolly pine in the lower piedmont. Georgia Forest Research Council, Report No. 6.
- Bruce, D. 1969. Potential production in thinned douglas-fir plantations. USDA Forest Science, Southern Forest Experiment Station, Research Paper SE-111.
- Chapman, D.G. 1961. Statistical problems in population dynamics. In Proceeding of Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. University of California. Berkeley, U.S.A. pp. 153-168.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H. and Bailey, R.L. 1983. Timber management: A quantitative approach. John Wiley & Sons. New Jersey, U.S.A. pp. 333.
- Cotta, H.v. 1821. Hu"lfstafeln fu"r Forstwirte und Forsttaxatoren. Arnoldische Buchhandlung. Dresden, Germany. pp. 80.
- Duerr, W.A. and Gevorkiantz, S.R. 1938. Growth prediction and site determination in uneven-aged timber stands. Journal of Agricultural Research 56: 81-98.
- Jin, H.O., Lee, M.J., Shin, Y.O., Kim, J.J. and Chun, S.G. 2006. Forest Soil. Hwangmunsa. Seoul, Korea. pp. 325.
- Kim, C.R. 2000. SAS, a statistic box. Data Plus. Seoul, Korea. pp. 592.
- Kim, S.W., Son, Y.M., Kang, J.T., Lee, K.H. and Park, H. 2014. Linear and nonlinear models for the fitness of experimental analysis in forest Science. Research Information No. 542. pp. 109.
- Korea Forest Service. 2021. The 7th National forest inventory.
- Korea Forest Service. 2022. Forest Soil Map (<http://fgis.forest.go.kr>).
- Korea Forestry Promotion Institute. 2017. Field survey guidelines for the 7th national forest resources survey and health vitality of Forests. Seoul, Korea. pp. 98.
- Kramer, K. 1995. Modelling comparison to evaluate the importance of phenology for the effects of climate change on growth of temperate-zone deciduous trees. Climate Research 5(2): 119-130.
- Liang, J., Buongiorno, J., and Monserud, R.A. 2005. Estimation and application of a growth and yield model for uneven-aged mixed conifer stands in California. International Forestry Review 7(2): 101-112
- Lynch, T.B. and Moser, J.W. 1986. A growth model for mixed species stands. Forest Science 32(3): 697-706.
- Mäkelä, A. and Hari, P. 1986. Stand growth model based on carbon uptake and allocation in individual trees. Ecological Modelling 33(3): 205-229.
- Mohren, G.M.J. 1987. Simulation of forest growth, applied to douglas-fir stands in the Netherlands. Wageningen. Wageningen Agricultural University.
- Moser, J.W. and Hall, O.F. 1969. Deriving growth and yield functions for uneven-aged forest stands. Forest Science 15(2): 183-188.
- National Institute of Forest Science. 2021a. 2020 Forest inventory of Korea. Seoul, Korea. pp. 135.
- National Institute of Forest Science. 2021b. 2021 Tree volume, biomass and stand yield table. Research report. Seoul, Korea. vol. 979. pp. 373.
- Park, I.H. and Moon, K.S. 1999. Species Competition and Productivity in a Natural Mixed Forest of Pinus densiflora and Quercus variabilis at Mt. Mohu Area. Journal of Korean Forestry Society 88(4): 462-468.
- Phillips, O. and Gentry, A. 1994. Increasing turnover through time in tropical forests. Science 263(5149): 954-958.
- Pienaar, L.V. and Turnbull, K.J. 1973. The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. Forest Science 19(1): 2-22.
- Porté, A. and Bartelink, H.H. 2002. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. Ecological Modelling 150(2): 141-188.
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. Journal of Experimental Botany 10(29): 290-300.
- Seo, J.H., Lee, W.K., Kwon, S.D., Son, Y.M., Lee, K.H. and Albert, M. 2005. Individual tree growth model with topographic data for mixed Oak forest in South Korea. Proceeding of Korean Society of Forest Science pp. 384-388.
- Son, Y.M., Lee, S.J., Kim, S.W., Hwang, J.S., Kim, R.H. and Park, H. 2014. Mapping and Assessment of Forest Biomass Resources in Korea. Journal of Korean Forestry Society 103(3): 431-438.
- Sullivan, A.D. and Clutter, J.L. 1972. A simultaneous growth an yield model for loblolly pine. Forest Science 18(1): 76-86.
- Tham, A.É. 1988. Yield prediction after heavy thinning of birch in mixed stands of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.). Swedish University of Agricultural Science, Department of Forestry Yield Research. Report No. 23, pp. 36.
- Vanclay, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield – applications to mixed tropical forests-. CAB International. Wallingford, UK. pp. 312.
- West, P.W.. 1981. Simulation of diameter growth mortality in regrowth eucalypt forest of Southern Tasmania. Forest Science 27(3): 603-616.

- West, G.G. 1991. Douglas-fir, Japanese and European larch in pure and mixed stands. *New Zealand Journal of Forest Science* 21(1): 3-9.
- Wiedemann, E. 1949. Yield tables for the chief tree species [of Germany] under various grades of thinning and for several types of mixed stand, with graphical illustrations. Report, M & H Schaper, Hannover, pp. 100.
- Wigley, T.M.L. 1993. Climate change and forestry. *The Commonwealth Forestry Review* 72(4): 256-264.
- Yoon, 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 Society of Forest Science* 110(4): 648-657.

Manuscript Received : December 17, 2022

First Revision : February 3, 2023

Accepted : February 23, 2023