

산림관리 의사결정지원도구 마련을 위한 상수리나무 거리독립 생장식 개발

조원희¹ · 박신영² · 황병목² · 김혜민² · 김아름^{3*} · 고동욱^{4,5*}

¹국립공주대학교 산림과학과, ²국민대학교 산림자원학과, ³국립산림과학원 산림생태연구과,

⁴국민대학교 산림환경시스템학과, ⁵국민대학교 탄소흡수원 특성화 대학원

Developing Distance-Independent Forest Growth Model for *Quercus acutissima* to Establish Decision Support System

Wonhee Cho¹, Sinyoung Park², Byungmook Hwang², Hyemin Kim²,
A-Reum Kim^{3*} and Dongwook W. Ko^{4,5*}

¹Department of Forest Science, Kongju National University, Yesan 32439 Korea

²Department of Forest Resources, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

³Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

⁴Department of Forestry, Environment, and Systems, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

⁵Forest Carbon Graduate School, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

요약: 우리나라의 산림은 최근 급증하는 산림재난으로 인해 막대한 피해를 받았으며, 산림 노령화 문제도 직면하고 있다. 본 연구는 우리나라 산림의 과학적인 산림관리 및 구조개선 방안 마련을 위한 의사결정 지원도구 개발의 일환으로 국가산림자원조사(NFI)를 활용하여 상수리나무(*Quercus acutissima*)에 대한 국가 수준의 거리독립모델 기반 상대생장식 개발을 시도하였다. 제5차부터 제7차까지의 NFI를 기반으로 상수리나무가 우점하는 표본점을 확보하고, 문헌조사 자료와 함께 활용하여 상대생장식을 개발하였다. 개발된 상대생장식은 우수한 성능을 보였다(R^2 : 0.99, $RMSE$: 0.86). 특히, 상대생장식을 통해 예측한 재적은 관측 재적과 $3\text{m}^3/\text{ha}$ 에 불과하여 높은 신뢰성을 지니는 것으로 판단된다. 임분밀도와 개체목 크기에 따른 생장패턴 또한 준수한 것으로 나타났으며, 향후 산림생태계 동태에 대한 모의가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구는 국가 수준에서 활용가능한 상수리나무 상대생장식을 개발하였으며, 산림재난의 예방과 수종 갱신을 위한 미래 산림관리 전략 수립의 기반을 제공함으로써 우리나라 산림관리 전략을 고도화하는데 기여할 것으로 기대된다.

Abstract: Korean forests are increasingly threatened by frequent forest hazards and the progressive aging of stands. To establish a scientific basis for sustainable forest management and structural improvement, this study aimed to develop a national-scale, distance-independent relative growth model for *Quercus acutissima*. The model was designed for integration into a Decision Support System to support evidence-based forest management. Data from the fifth to seventh cycles of the national forest inventory were used, with the analysis focused on plots dominated by *Q. acutissima*. The developed model demonstrated strong predictive performance (R^2 : 0.99) and a root mean square error of 0.86. Predicted stand volumes differed from the observed values by less than $3\text{ m}^3/\text{ha}$. Simulated growth trends across stand density levels and diameter at breast height classes were consistent with empirical patterns, validating the model's robustness for simulating future forest dynamics. Overall, the proposed model offers a practical and scalable tool for advancing forest management in Korea, particularly in supporting strategies for disaster mitigation and species transition within aging forest ecosystems.

Key words: distance-independent model, forest growth, decision support system, forest management, forest hazards, forest dynamics

* Corresponding author

E-mail: dwko@kookmin.ac.kr; bgvib@korea.kr

ORCID

Dongwook W. Ko  <https://orcid.org/0000-0002-6944-0261>

A-Reum Kim  <https://orcid.org/0000-0001-8637-3251>

서론

우리나라는 최근 유례없는 산불과 산사태 등 급증하는 산림재난에 대한 막대한 피해를 받고 있으며, 이에 대한 예방 방안 마련에 대한 요구가 지속되고 있다. 이와 함께 우리나라 산림의 노령화로 인해 구조개선 및 수종갱신이 시급한 실정이다(KFS, 2025; GRI, 2020). 특히, 산불 예방차원에서 내화성이 강한 수종의 도입과 이를 지속적으로 관리할 수 있는 복합적인 산림관리 방안 체계 마련이 필요한 시점이다.

산림관리는 개별 수종의 생장과 고사, 수종 간의 경쟁, 인간에 의한 수확 등이 복합적으로 작용하며, 이는 산림생태계의 동태(dynamic)와 밀접한 관련이 있다(Burton et al., 2003; Bergeron et al., 1999). 이에 따라 고도화된 산림관리 정책 개발을 위해서는 체계적인 산림관리와 함께 산림생태계를 함께 이해할 수 있는 복합적인 의사결정 지원도구(Decision Support System, DSS)가 필요하다. DSS는 산림관리와 이에 따른 생장·경쟁 등을 모의(simulation)할 수 있는 모델을 기반으로 산림관리를 위한 공간분석(e.g. 적지선정), 산림관리 시나리오 개발, 미래예측을 통한 정책수립 지원 등을 수행할 수 있다(Crookston and Dixon, 2005; Twery et al., 2005; Segura et al., 2014).

산림생태계에서 입목의 생장 및 고사, 경쟁, 수확 등에 대한 모의 연구는 모의하고자 하는 시공간적 규모와 연구목적에 따라 경관 규모에서 개체목 단위의 산림생태계 동태를 모의할 수 있는 다양한 모델이 개발 및 활용되어 왔다(Cho et al., 2020; Cho et al., 2023; Hwang et al., 2025a). 이러한 모델은 시공간적 규모에 따라 복잡성(complexity)이 상이하며, 모델의 모의 메커니즘(mechanism)에 따라 과정기반모델(process-based model)과 수리통계모델(statistical model) 등으로 구분할 수 있다(Aber and Federer, 1992; Parton, 1996; Hann and Larsen, 1991; Vallet et al., 2006).

산림생태계의 과정기반모델은 생지화학(biogeochemistry) 특성에 기반한 광합성 및 양분순환 등의 프로세스를 반영하며, 이를 기반으로 시공간적 규모에 따라 개체목 또는 군집(cohorts) 단위의 성장량(net primary production, NPP)을 추정하여 생장 및 고사, 경쟁 등을 모의한다. 수리통계모델은 관측자료를 기반으로 흉고직경, 수고, 재적 등의 변화를 종속 변수로하여 상대생장식(allometric equation)을 개발하고, 이에 따른 생장을 모의한다. 따라서 과정기반모델 개발과 이에 기반한 모의는 수종별 생리·생태 특성 및 환경변수 등을 구축할 수 있는 시계열 자료가 필요하며, 모델의 복잡성이 증가함에 따라 방대한 자료가 필요하다. 반면에 수리통계모델 개발에는 과정기반모델에 비해 요구되는 입력자료가 상대적으로 적으며, 주로 동일한 지역의 대상 개체목에 대한 반복적인

매목조사 자료 등이 필요하다.

우리나라에서는 산림관리에 따른 미래 산림 예측을 위해 과정기반모델 및 수리통계모델 개발이 복합적으로 수행되고 있다(Ryu et al., 2014; Kang et al., 2016). 특히, 수리통계모델은 과정기반모델에 비해 개발이 활발히 진행되고 있으며, 다양한 상대생장식이 개발되었다. 그러나 국소지역에 대한 반복적인 조사자료를 통해 개발되어 왔으며, 국가단위에 적용할 수 있는 범용성이 상대적으로 낮은 한계점이 있다.

국가단위의 산림조사 자료로는 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)가 있으며, 다양한 국가에서 NFI 체계를 마련하고 일정기간에 따라 반복적으로 조사되고 있다(Smith, 2002; Lei et al., 2009; NIFoS, 2015). 우리나라의 NFI는 현재 제8차까지 수행되었으며, 제5차를 기점으로 동일한 표본점 및 조사항목에 대해 반복조사를 실시하고 있다(NIFoS, 2011). 이에 따라 장기간에 걸쳐 반복적으로 조사되고 있는 NFI를 활용하여 국가단위의 DSS 근간이 되는 범용성 높은 수리통계모델 개발이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 산림재난 예방을 위한 산림구조개선과 산림수종갱신에 대한 산림관리 방안 마련의 일환으로 우리나라 활엽수림의 67%를 차지하며 강한 내화성을 지닌 참나무 수종(*Quercus acutissima*)에 대한 수리통계모델 기반 생장식 개발을 실시하였다. 이에 NFI에 대한 자료 확보 및 전처리 과정을 수행하고, 거리독립모델(distance-independent model) 기반의 상대생장식을 개발 및 검증을 실시하였다. 이를 통해 미래 산림관리 전략 마련을 위한 DSS 개발의 기반이 될 수 있는 신뢰성 있는 상수리나무 거리독립모델 상대생장식을 마련하였다.

재료 및 방법

1. 대상수종 및 데이터 전처리

거리독립모델 기반 상대생장식을 추정하기 위해서는 동일한 입목에 대한 시계열에 따른 반복조사가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 국가수준의 생장식 개발을 위해 NFI를 활용하고자 하였다.

NFI는 우리나라의 산림을 체계적으로 조사하여 산림관련 기본통계를 구축할 수 있는 기초조사 자료를 제공하고 있다(NIFoS, 2015). 1972년 제1차 전국산림실태조사를 시작으로, 2006년부터 2010년까지 수행된 제5차 조사를 기점으로 고정표본점 설치 및 5년 주기의 조사 체계를 정립하고 있다. 특히, 전국단위에 분포한 매 4 km 간격의 표본점에서 수종, 흉고직경, 수고, 수관급 등에 대하여 조사하고 있으며, 이 밖에 고사목 및 벌근조사, 식생조사, 토양조사 등을 수행하고

있다. 이에 따라 제5차 이후 방대한 시계열 조사자료가 확보되어 있으며, 이를 기반으로 국가단위의 거리독립모델 상대성장식을 개발하고자 하였다.

본 연구에서는 방대한 NFI를 효과적으로 전처리하기 위해 'knfi' R package (Park, 2022; <https://syoung9836.github.io/knfi/>)를 활용하였다. 제5차부터 제7차까지의 NFI를 바탕으로 상수리나무가 우점하는 표본점을 선정하고자 하였다(Table 1). 이를 위해 상수리나무의 흉고단면적이 75% 이상을 점유하는 표본점을 선정하였으며, 이를 기반으로 상수리나무에 대한 거리독립모델 기반 상대성장식을 개발하고자 하였다(Figure 1).

NFI는 국가전역에 걸친 표본점별로 시계열에 따른 흉고직경, 수고 등의 정보를 제공하고 있다. 그러나 개체목을 식별할 수 있는 정보의 제한으로 인해 개체목별 성장을 추정하는데 한계가 있다. 이에 따라 NFI는 개체목 수준의 성장을 모의하는 거리독립모델을 개발하는데 활용성이 제한된다. 이에 본 연구에서는 국가수준의 거리독립모델 상대성장식 개발을

위해 Ryu(2022) 등이 제시한 증가한계치를 기반으로 상수리나무가 우점하는 NFI 표본점에 대해 개체목 일치화를 시도하였다. 이를 통해 개체목 일치가 완료된 43개의 상수리나무 NFI 표본점을 선별하였다.

2. 거리독립모델

거리독립모델은 시계열에 따른 개체목의 성장과 고사 등을 모의하는데 있어 임분 수준의 잠재적인 성장량을 추정된 후 이를 개체목들의 성장 수준에 따라 할당하는 방식으로 산림생태계의 동태(dynamics)를 모의한다(Figure 2). 거리독립모델에서 개체목 성장은 평균흉고직경, 흉고단면적 등 임분밀도에 따라 모의된다. 이를 토대로 개체목의 현재 성장 수준이 정의되며, 개체목간의 경쟁관계를 모의할 수 있다(Holdaway, 1984).

이는 임분 내에 분포하는 개체목간의 거리에 따른 경쟁관계를 임분의 평균흉고직경 대비 개체목의 흉고직경, 수고 등

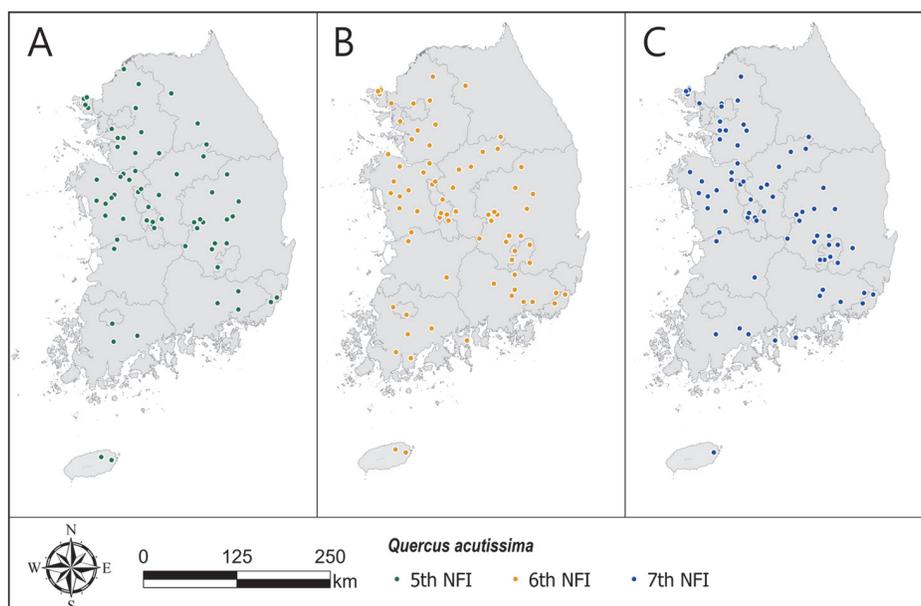


Figure 1. The location of dominance plots for *Quercus acutissima* in South Korea's National Forest Inventory.

Table 1. Summary statistics of *Quercus acutissima* plots in the 5th, 6th, and 7th NFI survey cycles.

Category	<i>Quercus acutissima</i>		
	5th	6th	7th
Number of plots	82	94	91
Age	33.8 ± 8.55	38.0 ± 10.60	42.3 ± 10.70
Height (m)	11.05 ± 2.99	12.88 ± 3.43	13.79 ± 3.05
Diameter at breast height (cm)	15.92 ± 5.58	17.55 ± 6.20	18.70 ± 5.31
Tree density (trees/ha)	741.46 ± 447.93	750.95 ± 481.54	742.42 ± 460.55
Tree growing stocks (m ³ /ha)	93.03 ± 55.50	122.22 ± 64.35	148.22 ± 67.81

의 상대적 크기에 따른 생장을 모의하기 위한 방안으로 거리 종속모델(distance-dependent model) 대비 상대적으로 정확성은 떨어질 수 있으나, 상대생장식 개발에 필요한 현장조사 자료의 복잡성 등이 상대적으로 적고 연산과정을 비교적 단순화할 수 있는 장점을 지니고 있다(Dixon, 2002).

$$DBH_{growth} = PG \times MOD \quad (1)$$

거리독립모델 생장은 개체목별 흉고직경의 생장량을 통해 모의된다. 이는 잠재생장량(potential diameter growth, *PG*)와 수정함수(modifier function, *MOD*)를 통해 추정되며, 이는 Formula 1을 따른다.

*PG*는 주변 개체목들 사이의 경쟁이 없다는 가정 아래 개체목의 연간직경생장량을 의미한다. *PG* 추정에는 임분의 우세목, 준우세목의 흉고직경(diameter at breast height, *DBH*)과 수관율(crown ratio, *CR*), 지위지수(site index, *SI*)가 독립변수로써 활용된다(Table 2). 즉, *PG* 추정에서 *SI*는 임분의 환경특성을 반영하고, 흉고직경과 수관율을 통해 개체목의 속성을 반영할 수 있다.

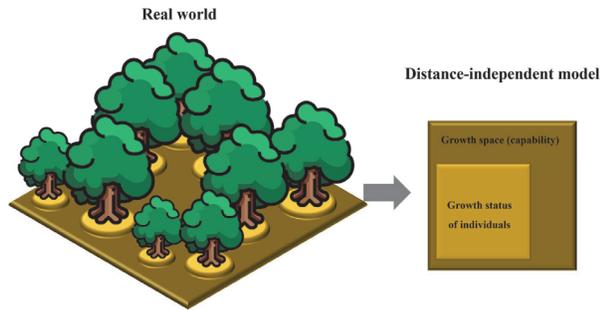


Figure 2. Conceptual diagram of growth process in distance-independent model.

*MOD*는 임분 내 개체목의 *PG*를 토대로 실제 생장량을 추정할 수 있도록 보정하는 역할을 수행하며, 0에서 1사이의 값을 지닌다. *MOD* 추정에는 개체목의 흉고직경, 임분 평균흉고직경(average diameter, *AD*), 최대 흉고단면적(maximum basal area, *BA_{max}*), 임분의 단위면적당 흉고단면적(basal area, *BA*)이 독립변수로 활용된다. 이를 통해 *BA*와 *BA_{max}* 관계를 토대로 임분밀도에 따른 생장을 반영할 수 있으며, *BA*가 *BA_{max}*에 가까울수록 *MOD*는 0에 가까운 값을 지니게 된다. 이에 따라 *MOD*가 0일 경우 개체목의 생장은 멈추게 되며, 1에 가까울수록 *PG* 수준의 생장하게 된다. *PG* 및 *MOD* 추정 과정에서 *b₁ ~ b₁₁*, *d₁ ~ d₆*은 수종별 특이성을 반영한 생장계수이며, 이 연구에서는 상수리나무가 우점하는 NFI 표본점을 활용하여 상대생장식을 개발하고자 하였다.

3. 상수리나무 생장식 개발 및 평가

본 연구에서는 상수리나무가 우점한 NFI 43개 표본점 중 90%를 상수리나무 생장식 개발을 위해 활용하였으며, 10%의 표본점은 검증에 활용하였다(Table 3). 개발된 생장식의 검증에는 검증 표본점에 포함된 개체목들의 평균 *DBH*와 재적을 기반으로 수행되었다.

상수리나무 생장식 개발에는 *DBH*, *AD*, *BA_{max}*, *CR*, *SI*에 대한 정보가 필요하다. *DBH*는 NFI에 제시된 *DBH*값들을 활용하였으며, *AD*는 NFI를 통해 추정하였다. *BA_{max}*는 Sterba (1975)에서 제시한 Maximum Stand Number (MSN) 이론을 바탕으로 추정하였으며, 이는 임분밀도가 최대값일 때 *BA*도 최대값에 도달하는 것을 가정한다. 따라서 최대 흉고단면적을 유지하는 임분밀도의 *BA* 값으로 해당 임분의 *BA_{max}* 값을 추정하였으며, 본 연구에서는 44.14 m²/ha로 추정되었다. *CR*은 Kwon(2003)을 참고하여 설정하였다. 이와 함께 *SI*는 국립산림과학원에서 제시하는 지위지수 곡선을 통해 추정하였

Table 2. Sub-formula to *PG* and *MOD*.

	Formula
Potential growth estimation	$PG = b_1 + b_2 \times DBH^{b_3} + b_4 \times SI \times CR \times DBH^{b_5}$ $SI = H_D \times \left(\frac{(1 - \exp(-b_6 \times t_i))}{(1 - \exp(-b_6 \times 30))} \right)^{b_7}$ $CR = b_8 \frac{1}{(1 + b_9 + BA)} + b_{10}(1 - \exp(-b_{11} \times DBH))$
Modifier estimation	$MOD = 1 - \exp(- (f(R) \times g(AD)) \times \left(\frac{(BA_{max} - BA)}{BA} \right)^{0.5})$ $f(R) = d_1 \left(1 - \exp \left(\frac{d_2 \times DBH}{AD} \right) \right)^{d_3} + d_4$ $g(AD) = d_5 (AD + 1)^{d_6}$

Table 3. Summary of DBH class in samples.

DBH class	Train dataset	Valid dataset
Small diameter(<18 cm)	415	113
Middle diameter(<30 cm)	418	30
Large diameter(≥ 30 cm)	142	29
Total	975	172

다(NIFoS, 2023). 이를 기반으로 상수리나무에 대한 성장계수($b_1 \sim b_6$; $d_1 \sim d_6$; Table 2)를 추정하였다.

개발된 성장식은 결정계수(R^2)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, $RMSE$)를 통해 성능을 평가하였다. 개발된 성장식을 통해 추정된 5년 후의 DBH와 NFI를 통해 관측한 DBH를 비교하였다. 이를 위해 제5차 NFI 표본점의 상수리나무를 입력자료로 하여 5년 후의 DBH를 예측하였으며, 제6차 NFI 표본점의 상수리나무 DBH와 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 상수리나무 상대성장식 개발 및 평가

NFI를 기반으로 개발된 국가수준의 거리독립모델 기반 상수리나무 상대성장식의 PG 와 MOD 의 성장계수를 추정하였으며, 이는 Table 4와 같다. 개발된 상대성장식의 예측 수준 평가는 모델 개발에 사용된 표본점을 제외한 10%의 표본점에서 제시된 DBH와 비교하여 수행하였으며, R^2 는 0.99, $RMSE$ 는 0.86 cm로 나타났다(Figure 3). 또한, 관측 및 예측

된 DBH를 NIFoS(2014)에서 제시한 재적 추정식에 적용한 결과 예측 재적은 $109.7 \text{ m}^3/\text{ha}$ 로 추정되었으며, 실제 관측 재적은 $106.7 \text{ m}^3/\text{ha}$ 로 나타나 $3 \text{ m}^3/\text{ha}$ 의 차이가 나타났다. 이에 따라 본 연구에서 개발한 상대성장식이 매우 준수한 성능을 보이는 것으로 판단된다.

상수리나무의 상대성장식에 따른 성장패턴은 Figure 4와 같다. Figure 4는 상수리나무의 상대성장식으로 추정된 PG 와 MOD 를 바탕으로 지위지수(SI) 16, 수관율(CR) 0.5, 평균 흉고직경(AD) 25 cm를 기준으로 BA 와 DBH 에 따른 5년간 직경성장량을 도출하였다. 임분의 흉고단면적이 작을수록 직경성장량은 큰 것으로 나타났으며, DBH 가 큰 임목일수록 직경성장량이 큰 것으로 나타났다.

2. 상수리나무 상대성장식 한계점 및 활용성

본 연구에서 추정된 상수리나무 상대성장식은 R^2 가 0.99라는 매우 높은 예측력을 지니는 것으로 나타났다. 이는 과적합(overfitting)의 문제가 있을 수 있으며, 검증에 활용한 샘플 수가 매우 적은 문제와 함께 검증에 활용된 대부분의 상수리

Table 4. Estimation of growth coefficient for *Quercus acutissima*.

Growth parameters	Growth coefficient	<i>Quercus acutissima</i>
PG	b_1	9.0748
	b_2	2.9646
	b_3	0.1680
	b_4	0.6222
	b_5	-4.1330
	b_6	0.0539
	b_7	-1.2390
	b_8	0.3334
	b_9	0.0006
	b_{10}	0.4348
	b_{11}	-0.0521
MOD	d_1	0.0509
	d_2	-3.4172
	d_3	34.7566
	d_4	0.0336
	d_5	7.4481
	d_6	0.0230

나무가 18 cm 미만의 소경목 중심으로 편향되어 있기 때문에 기인한 한계점으로 보인다. 그러나 거리독립모델 개발과 관련된 국내·외 선행연구에서도 0.9 이상의 높은 R^2 값을 보이고 있는 것을 미루어 볼 때 상수리나무에 대한 상대성장식으로 활용이 가능할 것으로 판단된다(Hwang et al., 2025a). 또한, Figure 4와 같이 거리독립 모델의 성장식에서 나타나는 성장 패턴이 선행연구와 비슷한 수준으로 나타났으며(Hwang et al., 2025a; Kwon et al., 2003), 임분의 흉고단면적과 임목의 흉고직경 수준에 따른 성장패턴을 고려할 때 개체목 사이의 경쟁을 모의할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 산림관리 전략 마련을 위한 DSS로의 활용성은 충분할 것으로 판단된다.

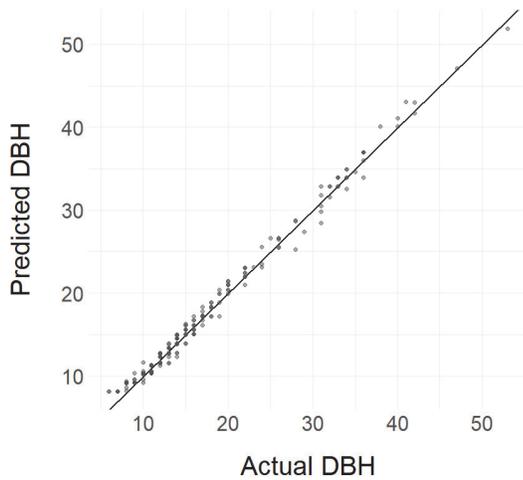


Figure 3. Evaluation of model performance by comparing actual DBH (NFI) and predicted DBH (simulated). R^2 : 0.99, RMSE: 0.86 cm.

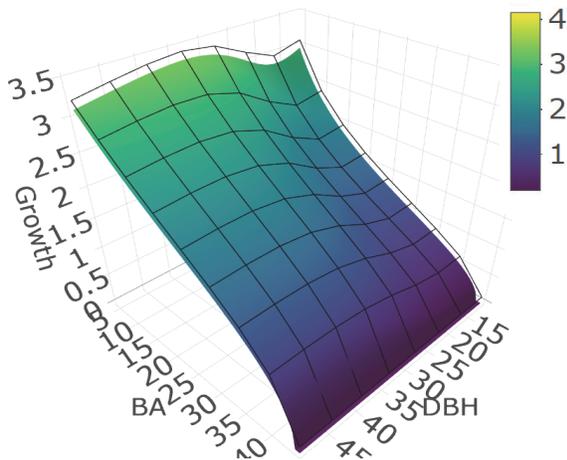


Figure 4. Simulation of DBH growth (cm) by individual DBH (cm) and stand BA (m^2/ha). (in criteria SI=16, CR=0.5, AD=25 cm).

3. NFI 활용성 및 상대성장식 개발의 확장성

NFI는 계통추출법에 의해 우리나라 전역에 4km 이하의 간격의 표본점을 구축하고 있으며, 제5차를 기점으로 약 20년에 걸친 장기간 반복 모니터링 자료를 제공하고 있다(NIFoS, 2015). 이에 따라 다양한 환경과 기후를 포함한 생태역(ecoregion)에 대한 산림자원 조사자료를 제공할 수 있다. 이는 다양한 생태역에서 서식하는 임목의 특성을 반영한 상대성장식을 개발하기에 매우 유용하다. Hwang et al.(2025a)은 기존에 개발한 거리독립모델 기반 상대성장식의 한계를 극복하기 위해 NFI를 활용하여 잣나무, 일본잎갈나무에 대한 국가수준 상대성장식을 개발한 바 있다. 이에 따라 Hwang et al.(2025a) 및 본 연구를 확장한다면 우리나라 주요 수종에 대한 거리독립모델 기반 상대성장식을 확보할 수 있으며, 임분의 중·장기적인 변화 예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 미래 산림관리 전략으로써의 가치

본 연구에서 개발한 상대성장식은 최근 우리나라 산림이 직면한 산림재난의 피해 및 산림 노령화 문제를 극복하기 위한 산림관리 방안 마련에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 최근 급증하는 산불과 산사태 등의 산림재난으로 인해 우리나라 산림은 위기 속에 놓여 있으며, 이를 극복하기 위해 임분의 연료량 관리 및 수종갱신 등을 포함한 다양한 과학적 산림관리 기법 마련이 요구되고 있다(Cho et al., 2023; Hwang et al., 2025b). 이에 따라 고도화된 산림관리 방안 마련을 위해서는 산림생태계 동태를 반영한 다수의 모델을 활용한 모의 기반의 의사결정이 필요하며, 이에 따라 DSS 구성에 가장 기초적이고 기본이 되는 다양한 수종에 대한 상대성장식 확보는 필수적이다.

최근 산림생태계 모델링은 과학적 연구를 넘어 산림관리에 대한 의사결정을 지원하는 DSS로 발전하고 있다. 특히 FVS-online (Forest Vegetation Simulator online), NED-3 (NorthEast Decision model) 등은 거리독립모델을 기반으로 산림관리에 따른 산림생태계 변화를 분석 및 평가하는 DSS로 활용되고 있다. 이에 본 연구에서 개발한 상수리나무의 상대성장식은 우리나라 산림관리 의사결정을 고도화할 수 있는 기반을 마련하는데 기여할 수 있다. 이를 선행연구에서 개발한 다수의 상대성장식과 함께 산림관리 의사결정 시스템을 개발하는데 활용한다면, 과학적인 산림관리 전략 마련에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구를 확장하여 우리나라 주요 수종 중심의 상대성장식 개발 및 종합 모의 체계를 마련한다면, 미래 산림관리 전략 마련 도구 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

결 론

본 연구는 산림재난 증가 및 산림 노령화 문제에 대한 해결을 위한 과학적 산림관리 기반 마련을 목표로, NFI 자료를 활용하여 거리독립모델에 기반한 국가수준의 상수리나무 상대생장식을 개발하였다. 개발된 상대생장식은 순수한 수준의 예측 성능을 지녔으며, 이를 활용한 재적 예측은 관측값과 $3 \text{ m}^3/\text{ha}$ 차이로 나타났다. 또한, 상대생장식은 임분밀도 및 개체목 크기에 따라 생장 모의 패턴이 상이한 구조를 지니고 있어 향후 산림생태계의 동태 모의에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 검증 샘플의 편향성 등은 본 연구의 한계점으로 보이며, 본 연구에서 개발한 상대생장식에 대한 추가 검증 연구는 필요할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 본 연구 결과는 산불 예방 및 수종 갱신 등 미래 산림관리 전략 수립을 위한 의사결정지원도구 마련의 핵심 기반을 제공할 수 있으며, 산림관리의 과학적 접근법 개선 및 고도화에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원(과제번호: FE0100-2021-01)과 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(RS-2024-00402624)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Aber, J.D. and Federer, C.A. 1992. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia* 92: 463-474.
- Bergeron, Y., Harvey, B., Leduc, A., and Gauthier, S. 1999. Forest management guidelines based on natural disturbance dynamics: stand-and forest-level considerations. *The Forestry Chronicle* 75(1): 49-54.
- Burton, P.J., Messier, C., Smith, D.W. and Adamowicz, W.L. 2003. *Towards sustainable management of the boreal forest*. NRC Research Press.
- Cho, W., Lim, W., Choi, W.I., Yang, H.M., and Ko, D.W. 2023. Modeling the effects of forest management scenarios on aboveground biomass and wood production: A study in Mt. Gariwang, South Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 112(2): 173-187. (in Korean with English abstract)
- Cho, W., Lim, W., Kim, E.S., Lim, J.H. and Ko, D.W. 2020. Parameterization and application of a forest landscape model by using national forest inventory and long term ecological research data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 22(3): 215-231. (in Korean with English abstract)
- Crookston, N.L. and Dixon, G.E. 2005. The forest vegetation simulator: a review of its structure, content, and applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 49(1): 60-80.
- Dixon, G.E. 2002. *Essential FVS: A user's guide to the Forest Vegetation Simulator* (p. 226). Fort Collins, CO, USA: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Management Service Center.
- GRI (Gyeonggi Research Institute). 2020. *The era of forest management. Issue & Diagnosis*. 1-26. Gyeonggi Research Institute. (in Korean)
- Hann, D.W. and Larsen, D.R. 1991. Diameter growth equations for fourteen tree species in southwest Oregon.
- Holdaway, M.R. 1984. Modeling the effect of competition on tree diameter growth as applied in STEMS (Vol. 94). US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
- Hwang, B., Ko, D.W., Lee, K., Kim, A.R. and Cho, W. 2025b. Modeling Dynamics of Korean Pine Plantation Forest by Forest Management using Distance-independent Model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 27(1): 15-30. (in Korean with English abstract)
- Hwang, B., Park, S., Kim, H., Ko, D.W., Lee, K., Kim, A.R. and Cho, W. 2025a. Enhancing Distance-Independent Forest Growth Models Using National-Scale Forest Inventory Data. *Forests* 16(10): 1567.
- Kang, M.S., Jang, K.S., Son, Y.M., Kim, R.H., Park, I.H. and Lee, K.H. 2016. Allometric equations and biomass expansion of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) in southern Korea. *Journal of Korean Forestry Society* 105(4). (in Korean with English abstract)
- KFS (Korea Forest Service). 2025. *Statistical yearbook of forestry*. Korea Forest Service. (in Korean)
- Kwon, S. 2003. *Development of a simulation model for stand-level forest management*. Ph.D. Thesis, Seoul National University Graduate School, Seoul, Republic of Korea. (in Korean with English abstract)
- Kwon, S., Kim, H., Chung, J. and Lee, K. 2003. Development of Individual-Tree / Distance-Independent Growth-and-Mortality Prediction Equation for *Pinus koraiensis* Stands. *Journal of Korean Society of Forest Science* 92(6): 590-597. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.S., Lee, W.K., Yoon, J.H. and Song, C.C. 2006.

- Distribution pattern of *pinus densiflora* and *quercus* spp. stand in Korea using spatial statistics and GIS. *Journal of Korean Society of Forest Science* 95(6): 663-671. (in Korean with English abstract)
- Lei, X.D., Tang, M.P., Lu, Y.C., Hong, L.X. and Tian, D.L. 2009. Forest inventory in China: status and challenges. *International Forestry Review* 11(1): 52-63.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2011. The 5th National Forest Inventory Report. National Institute of Forest Science.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2014. Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations by Species in Korea. National Institute of Forest Science.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2015. Changes in Korea's National Forest Inventory. National Institute of Forest Science.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2023. Tree Volume, Biomass, and Stand Yield Table (Research Report No. 1092); National Institute of Forest Science.
- Park, S.Y. 2022. Development of an Algorithm for the Analysis of Korean National Forest Inventory Data : Focusing on Biodiversity and Biomass in Gangwon-do. Master Thesis, Kookmin University, Seoul, Republic of Korea. (in Korean with English abstract)
- Park, Y. J. and Lee, H. P. 2011. A Study on Fire Investigations and Identification of Flame Spread Mechanism of the Oaks according to Forest Fire. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 11(6): 139-148. (in Korean with English abstract)
- Parton, W.J. 1996. The CENTURY model. In *Evaluation of soil organic matter models: Using existing long-term datasets* (pp. 283-291). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ryu, D. 2022. Estimation of Growth and Mortality Rate of Major 6 Tree Species Using NFI 5-7th. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea.
- Ryu, D.U., Moon, M.K., Park, J.H., Cho, S.S., Kim, T.K. and Kim, H.S. 2014. Development of allometric equations for V age-class *Pinus koraiensis* in Mt. Taehwa plantation, Gyeonggi-do. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 16(1). (in Korean with English abstract)
- Segura, M., Ray, D. and Maroto, C. 2014. Decision support systems for forest management: A comparative analysis and assessment. *Computers and Electronics in Agriculture* 101: 55-67.
- Smith, W.B. 2002. Forest inventory and analysis: a national inventory and monitoring program. *Environmental Pollution* 116: S233-S242.
- Twery, M.J., et al. 2005. NED-2: a decision support system for integrated forest ecosystem management. *Computers and Electronics in Agriculture* 49(1): 24-43.
- Vallet, P., Dhôte, J.F., Le Moguédec, G., Ravart, M. and Pignard, G. 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management* 229(1-3): 98-110.

Manuscript Received : November 10, 2025

First Revision : December 5, 2025

Second Revision : December 11, 2025

Accepted : December 12, 2025