

목 차

잣나무 인공림의 간벌목 선정에 관한 연구	지효빈 · 박진우 · 윤성호	1
산림조사에 대한 휴대용 지상 LiDAR의 적용 가능성	이정관 · 이두희 · 양안희 · 나현주 · 김지석 · 김현준	9
국내의 수종에 대한 상대생장 변화 분석 - 수고와 흉고직경과의 관계 -	유재희 · 김문일	19
딥러닝 기법을 활용한 임상 및 수종 분류 정확도 평가	심우담 · 이상진 · 이정수	29
임업의 6차 산업화에 대한 임업인 선호도 및 경제성	박기현 · 배지윤 · 원가영 · 유중원 · 정형식 · 김다영 · 한 희	43

잣나무 인공림의 간벌목 선정에 관한 연구

지호빈 · 박진우* · 윤성호
강원대학교 산림과학부 산림경영학과

A Study on Thinning Tree Selection of *Pinus Koraiensis* Planted Forest

Hyo-Bin Ji · Jin-Woo Park* · Seong-Ho Yoon

Department of Forest Management, Division of Forest Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

요약 : 본 연구는 잣나무 인공림을 대상으로 간벌목 선정 및 작업방법의 정량화를 목적으로 하였다. 간벌목 선정은 거리종속 경쟁 모델을 적용하였으며, 네트워크 분석을 이용하여 작업자의 최적 벌채경로를 제시하였다. 입목정보는 강원대학교 학술림 내 V영급 잣나무림 0.78ha의 586본을 대상으로 측정하였다. 입목 간 정확한 거리 측정을 위해 Trimble R12i GNSS system을 이용하여 조사하였다. 경쟁지수의 경쟁목 선정은 수고 및 근원부의 각도를 이용하여 선정하였으며, 거리종속 경쟁지수는 5가지(Hegyi, Daniels, Lorimer, Braathe, Martin-Ek) 모델을 분석과 비교하였다. 최적 벌채경로는 네트워크 분석기법인 Dijkstra's Algorithm을 이용해 입목 간 거리와 경사를 고려하여 산출하였다. 분석결과, Daniels 모델의 경쟁지수가 0.31~7.28로 가장 낮았으며, 잔존목 간 거리가 3m 이상 떨어진 개체목이 총 161본으로 입목 간 경쟁상태를 가장 잘 표현하였다. 최적 벌채경로 분석결과, Daniels 모델은 이동거리 705.6m, 소요시간 18분 26초로 분석됐다.

ABSTRACT : The purpose of this study was to quantify the selection of thinning trees and work methods for artificial forest of *Pinus Koraiensis* planted forest. For the selection of thinning trees, a distance-dependent competition model was applied, and the optimal logging route for workers was presented using network analysis. Standing information was measured for 586 trees of 0.78ha of stand age class V *Pinus Koraiensis* forest in the research forest of Kangwon National University. In order to accurately measure the distance between trees, it was investigated using Trimble R12i GNSS system. Competitive tree selection was selected using the height and angle of the base, and the distance-dependent competition index was compared and analyzed with 5 models (Hegyi, Daniels, Lorimer, Braathe, Martin-Ek). The optimal logging path was calculated using Dijkstra's Algorithm, a network analysis technique, considering the distance and slope between trees. As a result of the analysis, the competition index of the Daniels model was the lowest at 0.31 to 7.28, and a total of 161 trees with a distance of more than 3m between the remaining trees expressed the competition state best. As a result of the analysis of the optimal path for logging, the Daniels model was analyzed as a travel distance of 705.6m and a required time of 18m26s.

Key words : Thinning selection, *Pinus Koraiensis*, Distance-dependent competition index, Network analysis

I. 서론

강원도 잣나무 조림면적은 64천ha로 강원도 전체 산림 면적의 15%이다(Korea Forest Service; KFS, 2022). 잣나무는 목재 및 종자생산을 목적으로 하는 경제수종으로 대부분 인공림으로 구성되어 있다(Lee et al., 2022). 최근 5

년간 강원도 잣나무의 평균 조림면적은 82ha로 인공림의 효율적인 산림경영이 요구되며, 인공림의 대표적인 무육 방법으로 간벌이 실시되고 있다(KFS, 2022). 특히, 강원도 IV, V 영급 침엽수림은 전체 면적이 66%로 대부분 2차 간벌 대상지이다(KFS, 2022).

간벌은 주벌수확 이전 기간의 입목들의 생육공간에 대한 경쟁을 줄이기 위한 벌채를 의미하며, 생육공간조절, 성장조절, 성장집중, 자연고사에 의한 손실 방지 등을 목적으로 한다(KFS, 2017). 특히, 목재생산림으로 관리되는

Corresponding author : Jin-Woo Park

Tel : 033-250-8333

E-mail : pjw@kangwon.ac.kr

인공림에서는 주로 우량대경재를 목표로 간벌이 실시되고 있으며, 잣나무림의 경우 1차 간벌 이후 시간에 따른 성장량이 감소하고, 임분 밀도가 높은 표준지를 강도간벌한 경우 성장량은 다시 증가하므로 잣나무 성장량의 증대를 위해서는 1차, 2차 간벌이 시행되어야 한다(Lee et al., 2022). 현재 우리나라의 인공림의 경우 정량간벌, 도태간벌, 열식간벌을 적용하며, 천연림의 경우 도태간벌을 적용하고 있다(KFS, 2017). 정량간벌은 간벌량 등의 예측이 가능하고, 벌채가 체계적이지만, 개체목의 형질과 기능이 고려되지 않는다. 현재 정량간벌 시 잔존목에 대한 균일한 공간 배치를 우선하되, 형질 불량목 및 열세목, 피압목을 간벌목으로 선정하여 임목의 형질과 기능을 고려하고 있다(KFS, 2017). 산림청에서는 간벌목 선정 기준을 수관급과 수형급을 기준으로 하였지만, 정성적인 기준으로 작성되어 실질적으로 현장 작업자의 주관적 판단에 의해 결정되고 있다(Lee et al., 2022). 현재 간벌 사업도 최대 40%의 임목을 벌채하도록 제한되어 있지만, 선목자의 판단으로 사업주에게 이익이 되는 임목을 벌채하여 많은 산림이 망가지고 있다(KFS, 2016). 건전한 임업경영을 위해 간벌 사업을 진행할 경우, 정량화된 간벌목 선정 기준이 필요하다. 경쟁목과 생육공간을 중점으로 간벌목을 선정하는 방법에는 거리독립 경쟁지수와 거리종속 경쟁지수에 의한 방법이 사용되고 있다(Shin et al., 2004). 거리종속 경쟁지수는 개체목간 경쟁상태 추정에 용이하고, 이런 경향은 인공림에서 더욱 뚜렷하게 보고되었다(Moore et al., 1973; Martin and Ek, 1984). 기존의 선행연구에서는 최적 경쟁지수 산정, 경쟁지수 활용 성장모델 개발연구, 경쟁지수 산출 프로그램 연구 등이 다양하게 수행되었다. 해외에서는 이미 거리종속인자를 통해 간벌목 선정에 대한 연구가 이루어져 왔지만, 우리나라의 경우 간벌

목 선정단계까지의 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구는 강원도 잣나무 인공림에서 거리종속 경쟁지수를 활용해 경쟁목을 선정한 뒤 간벌 후 잔존본수 기준표(KFS, 2017)를 이용해 간벌목을 선정하는 것을 목적으로 한다. 추가로 벌목작업 시 작업생산성과 편의성의 향상을 위해 거리, 경사, 작업자 보행속도를 인자로 네트워크 분석을 활용해 최적 벌채경로를 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 강원대학교 학술림 내 8임반 1소반 3 보조소반의 잣나무림을 대상지로 설정하였다. 대상지는 잣나무(*Pinus koraiensis*) 동령림으로 잣나무 550본, 활엽수 36본으로 총 586본으로 구성되어 있다. 대상지 면적은 약 0.78ha이며, 평균수고는 19.0m, 평균경급은 26.8cm이다. 대상지의 잣나무는 44년생으로 V영급 지역이며, 시기적으로 2~3차 간벌의 대상지이지만 1차 간벌이 진행된 뒤 2차 간벌은 진행되지 않은 대상지이다. 개체목의 생육상태는 양호하지만, 임분밀도가 751본/ha로 높아 간벌 연구대상지로 선정하였다(Figure 1).

2. 연구방법

본 연구는 정량간벌의 간벌목 선정을 위하여 거리종속 경쟁지수의 적용을 검토하고, 선정된 간벌목의 최적 벌채 경로를 산출하는 것을 목적으로 하였다. 간벌목 선정을 위하여 임황(수고, 흉고직경), 지황(표고, 경사), 임목위치

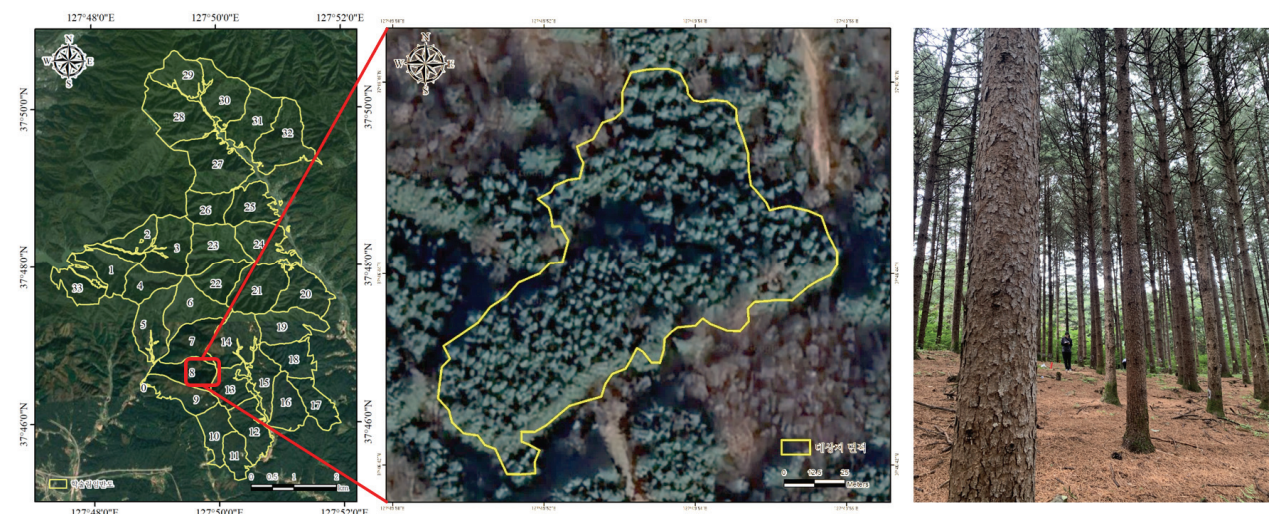


Figure 1. Study area

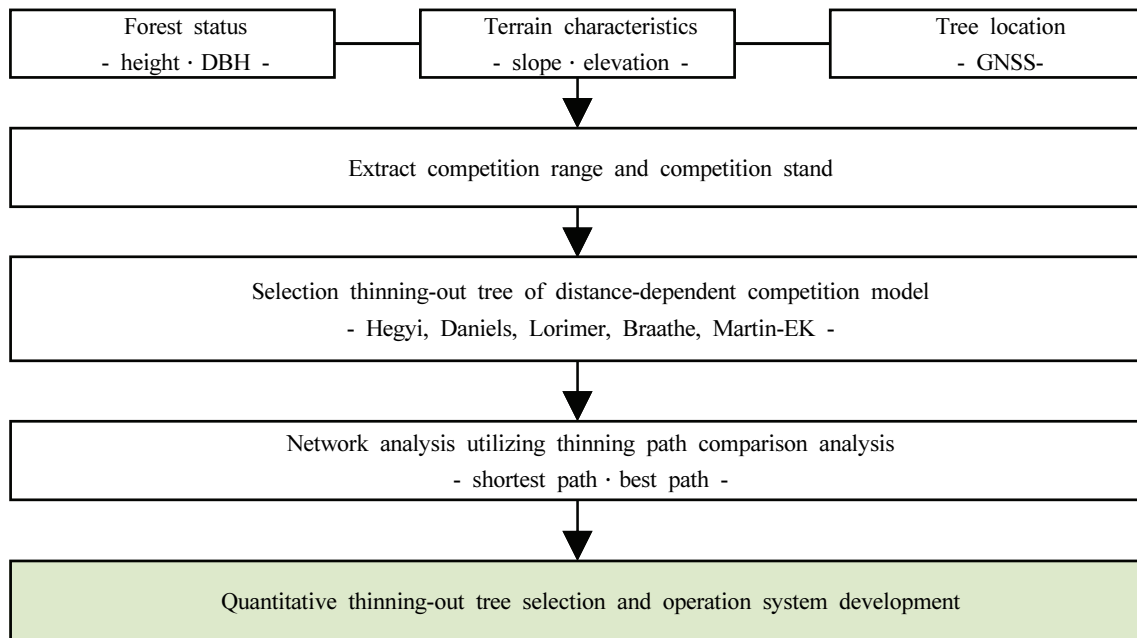


Figure 2. Flow Chart of Research

좌표를 조사하였으며, 입목위치좌표는 개체목간 정확한 거리를 구하기 위하여 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)을 활용한 측량방법을 사용하였다. 취득한 자료를 이용해 대상지의 경쟁범위 설정하고, 거리 종속 경쟁모델(Hegyi, 1974; Daniels, 1976; Lorimer, 1983; Braathe, 1984; Martin-EK, 1984)을 활용하여 경쟁지수가 높은 나무를 대상으로 간벌목을 선정하였다. 각 모델별로 생성된 잔존목을 대상으로 거리와 밀도 분석을 통하여 잔존목의 공간적 적절성을 평가하였으며, 최종적으로 네트워크 분석기법을 활용하여 최적 간벌경로를 선정하였다(Figure 2).

1) 경쟁지수를 이용한 간벌목 선정 및 최적경로 분석

(1) 거리종속 경쟁지수를 이용한 간벌목 선정

간벌목의 선정은 거리종속 경쟁지수를 활용하였으며, 거리종속 경쟁지수는 대상목을 중심으로 주변의 경쟁목과의 관계를 정량적으로 평가하여 지수를 산출하는 방법이다. 경쟁목 선정 시 중심목과 주위 입목간의 거리 등 여러 인자를 활용하여 산출한다. 경쟁지수의 산출 시 표준지 외곽의 입목은 한쪽 면의 경쟁목만 평가할 수 있어 고정면적법(Fixed Area)을 이용하였으며, 개체목별 평균 거리를 산출하여 대상지 외곽 지역의 완충 범위를 6m로 지정하여 분석을 실시하였다(Pukkala and Kolstrom, 1987). 경쟁목의 선정은 연구대상지 내의 경쟁목의 수고와 중심목의 근원부가 이루는 각도를 이용하는 THA(Total

Table 1. Comparison index and Comparison index formula

Comparison index	Comparison index formula
Hegyi (1974)	$\sum_{j=1}^n \left[\frac{d_j}{d_i} \right] \frac{1}{Dist_{ij}}$
Daniels (1976)	$\sum_{j=1}^n \left[\frac{d_j^2}{n} \right] \frac{1}{d_i^2}$
Lorimer (1983)	$\sum_{j=1}^n \left[\frac{d_j}{d_i} \right]$
Braathe (1984)	$\sum_{j=1}^n \left[\frac{h_j}{h_i} \right] \frac{1}{Dist_{ij}}$
Martin-EK (1984)	$\sum_{j=1}^n \left(\frac{d_j}{d_i} \cdot e^{-\left[\frac{16Dist_{ij}}{d_i+d_j} \right]} \right)$

$Dist_{ij}$ = distance of subject tree i to competitor j

d_i = DBH of subject tree i

d_j = DBH of competitor trees $j (j \neq i)$

h_i = height of subject tree i

h_j = height of competitor trees $j (j \neq i)$

n = number of competing trees.

Height Angle) 방법을 이용하여 경쟁목을 선정하였다 (Moore et al., 1973; Martin and Ek, 1984). Lee(2000)는 잣나무 유령임분에서는 Hegyi(1974), Martin-EK(1984) 모델을 활용하는 것이 다른 경쟁지수보다 상대적으로 경쟁지수를 잘 추정한다고 보고하였다. 본 연구는 거리종속 경

쟁지수를 이용하여 간벌목의 선정 가능성을 평가하고자 기존의 두 모델을 포함한 거리종속 경쟁지수를 평가할 수 있는 5가지 모델을 사용하여 지수를 산출하고 비교·평가하였다(Table 1). 간벌량은 정량간벌 방법의 간벌 후 입목본수기준을 적용하여 결정하였으며, 간벌 후 잔존목의 본수는 ‘지속가능한 산림자원관리지침’ 별표 1의 ‘간벌 후 입목본수기준’ 표의 잣나무 기준을 적용하여 잔존 본수를 결정하였다(Introduction of Korean Law Information Center, 2020).

(2) 경쟁지수 모델별 비교·평가

거리종속 경쟁모델을 활용하여 간벌목 선발 후, 산림청의 적정 잔존목 간격기준(Equation 1)을 활용하여 경쟁모델별로 분석과 비교하였다. 모델별로 선정된 잔존목 별로 적정 잔존목 간격길이의 완충구역(Buffer)을 생성하여 완충구역 내의 입목 본수로 밀도를 분석하였다. 완충구역은 적정 잔존목 간격 길이만큼의 육각형 공간평가단위(Hexagon Grid)를 형성하여 격자 내부에 몇 본의 입목이 존재하는지 분석하였다(Figure 3).

$$\text{잔존목의간격}(m) = \sqrt{\frac{10,000m^2}{\text{ha당 간벌 후 잔존본수}}} \quad (1)$$

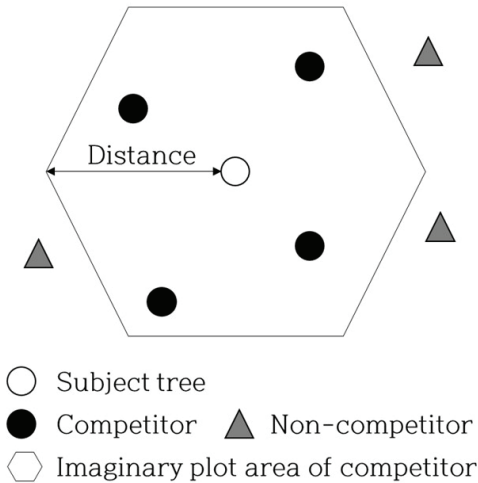


Figure 3. Diagram for searching competitors of a subject tree using hexagon Grid

2) 네트워크 분석 이용 최적 간벌경로 선정

상호 연결된 네트워크에서 객체가 이동하는 노선을 분석하는 것을 경로분석이라고 하며, 이러한 경로분석의 이동시간, 이동거리, 연료 소비량, 탄소배출량과 같은 목적함수에 따라 최적화를 통하여 합리적인 결과를 도출할 수 있다(Kwon and Kim, 2021; Park, et al., 2014). 작업자가 임분 내의 간벌을 위한 효율적인 작업순서를 결정하기 위하여 네트워크 분석을 활용하였다. 간벌 작업자 최적경로 분석을 위해 ArcPro의 Network Analyst 최단경로 분석을 활용하였으며, ArcPro의 Network Analyst 소프트웨어는 Dijkstra’s Algorithm 기반으로 구성되었다(Dijkstra, 1959). Dijkstra(1959)의 알고리즘은 지정된 한 지점으로부터 여러 개의 다른 지점까지의 최단경로인 ‘단일 출발점 최단경로’ 문제 해결을 위한 알고리즘이다. 네트워크에 할당된 가중치(거리, 시간 등)에 따라 Dijkstra’s Algorithm은 크게 달라지므로 본 연구에서는 네트워크 인자로 입목 간 거리와 작업자의 보행속도(환경사지 기준 3km/h)를 고려하여 분석을 실시하였다(Jung, et al., 2005).

III. 결과 및 고찰

1. 대상지 현황

연구대상지 현장조사 결과 전체 본수는 총 586본으로 조사되었으며, 잣나무 550본, 기타 활엽수 36본으로 조사되었다. 평균흉고직경은 26.8cm이며, 평균수고는 19.0m로 분석되었다. 거리종속 경쟁모델 활용을 위해 대상지의 경쟁범위를 지정한 결과, 고정면적 내 입목은 총 363본으로 조사되었으며, 잣나무는 총 346본, 기타 활엽수 17본으로 조사되었다. 고정면적 내 입목의 평균흉고직경은 26.7cm로 0.1cm 감소하였으며, 평균수고는 19.5m로 0.5m 증가하였다(Table 2).

2. 거리종속 경쟁지수 활용 간벌목 선정

1) 거리종속 경쟁지수 모델별 경쟁지수 비교

거리종속 경쟁지수를 이용하여 경쟁지수를 산출한 결과, Hegyi 모델은 1.03~5.81, Daniels 모델은 0.31~7.28,

Table 2. Status of observed trees in study area

Location	Area	Count	Average of trees height (m)	Average of DBH (cm)
Study area	0.78ha	586	19.0	26.8
Fixed area	0.45ha	363	19.5	26.7

Table 3. Table of competition Index analysis results

	Hegy	Daniels	Lorimer	Braathe	Martin-EK
Maximum	7.94	7.28	41.45	6.44	5.81
Minimum	0.68	0.31	3.81	1.09	1.03
Average	3.22	1.40	14.05	3.05	3.46
standard deviation	1.18	0.94	5.14	0.82	0.88

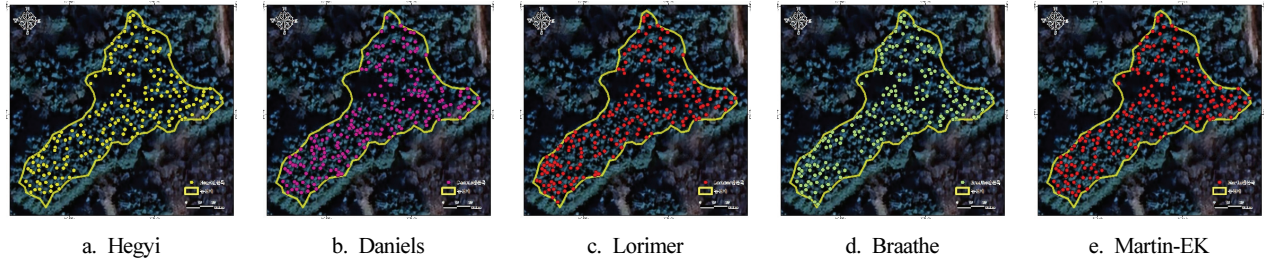


Figure 4. Map of remaining trees by competition index model

Table 4. Minimum distance average of remaining trees by Comparison index

Comparison index	Minimum distance average (m)	Ratio to static distance
Hegy	2.98	62.5%
Daniels	2.89	60.7%
Lorimer	2.81	59.0%
Braathe	2.86	60.0%
Martin-EK	2.97	62.3%

Lorimer 모델은 3.81~41.45, Braathe 모델은 1.09~6.44, Martin-EK 모델은 0.68~7.94로 분석됐다(Table 3). Lorimer 식을 제외한 모든 경쟁지수가 최댓값과 최솟값이 0.3~7.9 사이로 분포하며 모델별 경쟁지수 차이는 크지 않았다. 동일한 대상지에서 지수별 차이가 발생하는 것은 경쟁입목의 선정과 모델별로 사용된 변수 차이 때문으로 판단된다. 특히, Lorimer 모델은 단순 대상 입목의 흉고직경의 비로만 산출하기 때문에 입목간의 거리 및 본수를 고려한 다른 모델과 값의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 산림청의 간벌 후 잔존본수 정보 기준(440 본/ha) 및 고정면적법에 의하여 실제 경쟁지수 산출에 사용된 면적(0.45ha)를 기준으로 대상지 내 잔존본수가 198 본이 되도록 경쟁지수가 높은 입목을 대상으로 간벌목을 선정하였다. 간벌목은 거리종속 경쟁지수 모델별 148본과 표준지 내부의 활엽수 17본으로 총 165본을 선정하였다(Figure 4).

한편, 간벌 후 잔존목의 공간적 배치를 평가하기 위하여 Pukkala et al.(1998)의 연구에서 수행한 간벌 후 잔존목간 최소거리를 인자로 활용하여 분석을 실시하였다. 본 연구대상지의 적정 잔존목의 간격은 4.78m로 분석되었으

며, 모델별 최소 거리 평균을 산출하여 비교·평가하였다. 모델별 최소 거리 평균을 보면, Hegyi 방법을 이용한 최소 거리 평균이 약 2.98m로 적정 간격대비 약 62.5%로 경쟁지수 산출을 위한 5가지 방법 중 잔존목의 간격이 가장 넓었으며, Lorimer 모델을 이용한 최소 거리 평균이 약 2.81m로 가장 짧았다. Hegyi 모델을 이용하여 간벌목을 선정한 방법은 잔존목의 간격 기준보다 과소치로 분석되었으나, 다른 모델과 비교하여 잔존목의 배치 간격이 적절한 것으로 판단된다(Table 4).

2) 경쟁지수 모델별 밀도분석

경쟁지수를 이용한 간벌목의 공간적 분포를 비교·평가하기 위하여 버퍼존을 이용한 공간적 밀도를 분석하였다. 간벌 후 잔존목으로 판단되는 입목에 적정 공간 거리인 4.78m의 원형 버퍼를 생성하여 버퍼존 내의 입목 분포를 분석하였다. Hegyi 모델은 3본 이하 입목이 분포하는 버퍼존이 전체 대비 약 52.3%로 다른 모델보다 높았으며, Braathe 모델은 약 44.9%로 가장 낮았다. Hegyi 모델을 버퍼존 내 2본~4본이 존재하는 버퍼의 수가 가장 많았으며, 5본 이상이 존재하는 버퍼존은 모든 모델 중

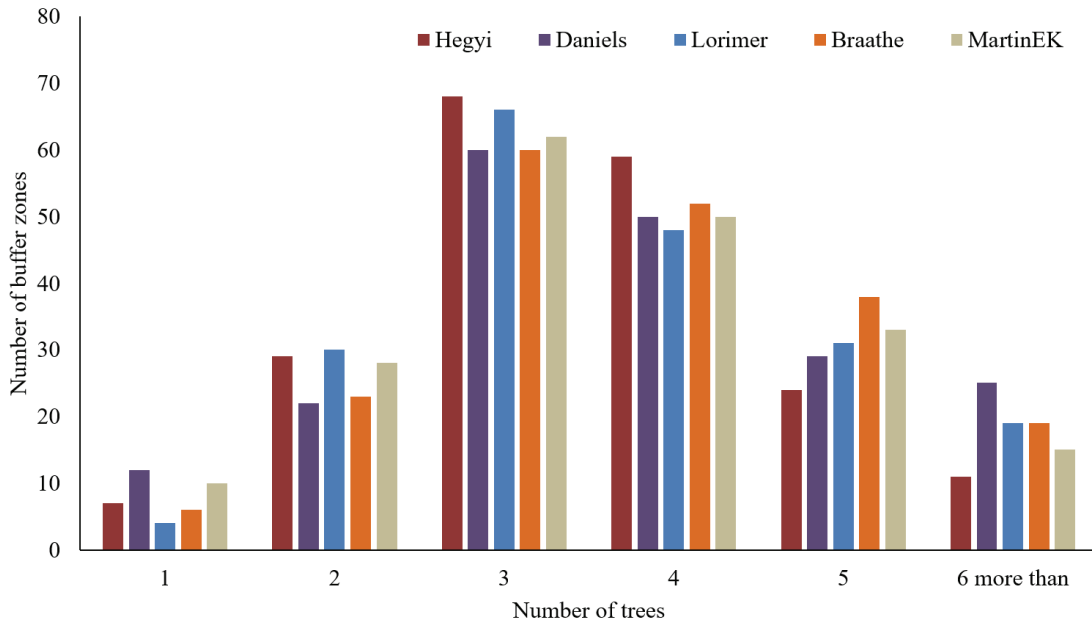


Figure 5. Number of buffer zones according to the remaining trees by competition index model

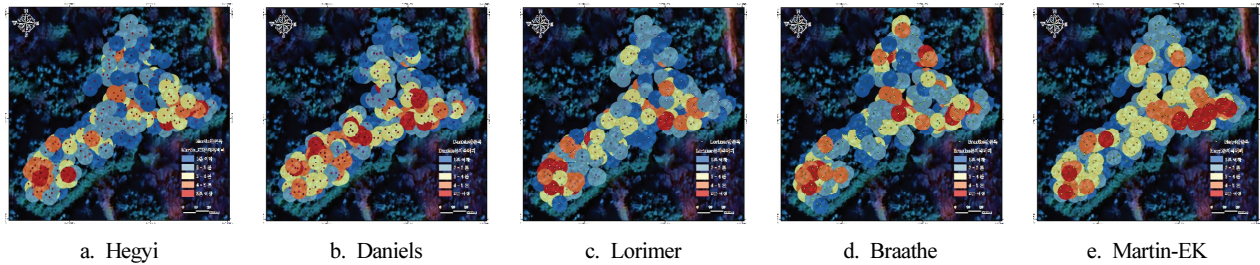


Figure 6. Map of buffer zones according to the number of remaining trees by competition index model

가장 낮았다. 반면, Daniels 모델은 버퍼존 내 1본이 존재하는 버퍼의 수가 12개로 가장 많았으나, 6본 이상 분포하는 버퍼본이 25개로 가장 높았다(Figure 5). 버퍼존을 이용하여 잔존목 간 공간적 밀도를 분석한 결과, Hegyi 모델을 이용한 방법이 다른 모델과 비교하여 잔존임분의 공간적 분포가 고르게 배치되었으며, Daniels 모델과 Martin-EK 모델은 임분 내 부분적으로 고밀도 지역이 분포하는 것으로 분석되었다(Figure 6).

3. 간벌목 벌채경로 분석

ArcPro의 Network Analysis 분석방법을 사용하여 간벌목 선정에 따른 작업자의 경로를 분석하였으며, 이동거리와 경사를 고려하여 분석하였다. 분석한 결과, Daniels 모델이 총 이동거리가 약 705.6m로 가장 길었으며, Hegyi 모델 683.8m, Lorimer 모델 673.8m, Martin-EK 모델은 633.3m,

Braathe 모델 605.9m의 순으로 분석되었다. 최적경로의 이동시간은 모델별로 15분 48초~18분 25초가 소요되는 것으로 분석되었다(Table 5). Daniels 모델은 잔존목의 밀도분석에서 버퍼존별 편차가 발생하여 간벌경로가 일부지역에서 집중된 형태를 보였으며, 이것은 경로 노드가 길어져 이동거리와 시간이 증가한 것으로 판단된다. 박보영(2014)의 연구에 따르면, 경로 노드가 길어질수록 이동거리와 이동시간이 증가하여 본 연구의 결과와 유사한 것으로 판단된다. 한편, Hegyi 모델은 잔존목의 분포가 공간적으로 고르게 분포한 만큼 간벌목도 고르게 분포하여 잔존목의 밀도가 낮음에도 이동거리 및 시간이 가장 높지 않은 것으로 분석되었다. 간벌목의 선정에 있어 Hegyi 모델을 이용한 경쟁지수의 산출과 간벌목의 선정은 임분의 잔존목의 공간적 배치와 작업자의 효율적인 벌채작업에 적합한 것으로 판단된다(Figure 7).

Table 5. Distance and time of travel by competition index model

competition index	Distance (m)	Time
Hegy	683.67	17' 50"
Daniels	705.56	18' 26"
Lorimer	673.76	17' 35"
Braathe	605.91	15' 48"
Martin-EK	633.36	16' 31"

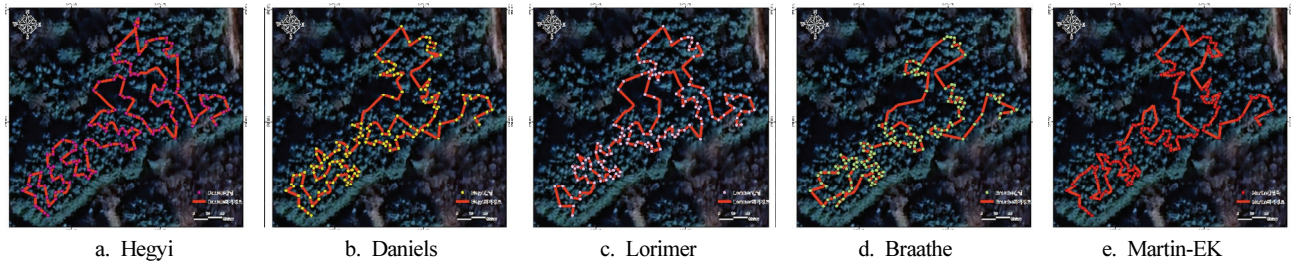


Figure 7. Map of thinning travel by competition index model

IV. 결 론

본 연구는 경쟁지수 모델을 활용하여 간벌목을 선정하고 작업자의 효율적인 간벌작업을 위한 최적의 경로를 선정하는 것을 목적으로 하였다. 경쟁지수 모델은 5가지 모델(Hegy, Daniels, Lorimer, Braathe, Martin-EK)을 활용하여 잔존목의 공간적 분포와 간벌목의 경로거리 및 시간을 이용하여 분석과 비교를 실시하였다.

분석결과, Hegyi 모델은 잔존목의 적정 거리 보다 최소 거리 평균이 낮게 분석되었으나, 다른 모델보다 간벌목 간의 거리가 가장 크게 분석되었다. 특히, 버퍼존을 통하여 잔존목의 공간적 범위를 분석한 결과, 버퍼존 내 4분 이하의 입목이 존재하는 버퍼존이 가장 낮게 분석되어 공간적 배치가 고르게 분포하는 것으로 판단되었다. 간벌목의 선정 후 이동거리에 따른 경사와 시간을 고려한 최적경로 분석결과, Hegyi 모델은 이동거리와 시간이 두 번째로 오래 걸렸으나, 대상지 내 간벌목의 분포가 공간적으로 고르게 분포하여 이동거리 및 시간이 다른 모델보다 높은 것으로 판단된다.

본 연구는 간벌목 선정 및 평가를 위한 정량적 기준과 가능성을 제시하였다. 현재 간벌목의 선정은 정성적인 부분이 강조되어 작업자의 숙련도에 의존하고 있으나 본 연구방법을 통하여 작업자의 숙련도와 관계없이 간벌목의 평가가 가능하였다. 본 연구의 방법은 거리중속 경쟁지수를 이용하기 때문에 입목의 정확한 위치정보가 필요하다. 현재 산림자원조사를 수행함에 있어 LiDAR 및 GNSS를 활용한 정밀 위치정보 취득에 대한 방법론이 제

시되고 있으며, 이러한 방법론이 현장에 적용된다면 본 연구방법을 이용한 정량적인 간벌목 선정 방법이 활용될 수 있을 것이라 기대한다. 본 연구방법은 간벌작업에 있어 의사결정을 위한 보조자료로 활용이 가능하며, 작업 전 대상지에 대한 평가와 효율적인 작업을 위한 사전 시뮬레이션이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2021359D10-2323-BD01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

Braathe, P. 1984. Development of regeneration with different mixtures of conifers and broadleaves. Proceedings of IUFRO Working party S 1.05-03 on b. pp. 268-277.

Daniels, R.F. 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. Forest Science 22(4): 454-456.

Dijkstra, S.J. 1959. On megaspores, Charophyta fruits and some other small fossils from the Cretaceous. Journal

- of Palaeosciences 8(1-2): 8-18.
- Hegyi, F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. In: Fries, J. (Ed.). Growth Models for Tree and Stand Simulation, Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden, pp. 74-90.
- Jung, D.H., Cha, D.S., Park, C.M., Lee, J.W., Ji, B.Y., Chun, K.S., and Kim, J. Y. 2005. Computations of forest road density considering for forest terrain and characteristics. Journal of Korean Society of Forest Science 94(3): 168-177.
- Korea Forest Service(KFS). 2016. Forestry management status survey 2015, <https://kfss.forest.go.kr/stat/ptl/article/articleDtl.do>. (2016.9.)
- Korea Forest Service(KFS). 2017. Standard Textbook for Afforestation 2017, https://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=3104628&bbsId=BBSMSTR_1008&pageUnit=10&pageIndex=1&searchtitle=title&searchcont=&searchkey=&searchwriter=&searchWrd=%ed%91%9c%ec%a4%80&ctgryLrcls=&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&mn=NKFS_02_15_01. (2017.3.28.)
- Korea Forest Service(KFS). 2022. Statistical Yearbook of Forestry 2022, <https://kfss.forest.go.kr/stat/ptl/fyb/frstyYrBookList.do?curMenu=9854>. (2022.9.)
- Korean Law Information Center . 2020. Guidelines for sustainable forest resource management. <https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99%EC%A7%80%EC%86%8D%EA%B0%80%EB%8A%A5%ED%95%9C%EC%82%B0%EB%A6%BC%EC%9E%90%EC%9B%90%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%A7%80%EC%B9%A8>. (2020.6.15.)
- Kwon, J.W. and Kim, K.H. 2021. Social Network Analysis on the Movement Patterns of Foreign Tourists Visiting Ulsan. Journal of Tourism and Leisure Research 33(9): 47-65.
- Lee, D.S. Jung, S.H. and Choi, J.K. 2022. Analysis of tree growth characteristics by first and second thinning in Korean white pine plantations. Journal of Korean Society of Forest Science 111(1): 150-164.
- Lee, T.H. 2000. Growth Prediction of Korean White Pine(Pinus Koraiensis Sieb. et Zuce) in Juvenile Stage by the Investigation of Competition Status. (Master thesis). Seoul. Kookmin University.
- Lee, Y.K., Lee, J.S., and Park, J.W. 2022. A study on classification of crown classes and selection of thinned trees for major conifers using machine learning techniques. Journal of Korean Society of Forest Science 111(2): 302-310.
- Lorimer, C.G. 1983. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. Forest Ecology and Management 6(4): 343-360.
- MacDonald, B., Morris, D.M. and Marshall, P.L. 1990. Assessing components of competition indices for young boreal plantations. Canadian Journal of Forest Research 20(7): 1060-1068.
- Martin, G.L., and Ek, A.R. 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. Forest Science 30(3): 731-743.
- Moore, J.A., Budelsky, C.A., and Schlesinger, R.C. 1973. A new index representing individual tree competitive status. Canadian Journal of Forest Research 3(4): 495-500.
- Park, B.Y., Choi, Y.S., and Park, H.S. 2014. Optimal routes analysis of vehicles for auxiliary operations in open-pit mines using a heuristic algorithm for the traveling salesman problem. Tunnel and Underground Space 24(1): 11-20.
- Pukkala, T., and Kolström, T. 1987. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. Silva Fennica 21(1): 55-67.
- Pukkala, T., Miina, J., Kurttila, M., & Kolström, T. 1998. A spatial yield model for optimizing the thinning regime of mixed stands of Pinus sylvestris and Picea abies. Scandinavian Journal of Forest Research 13(1-4): 31-42.
- Shin, M.Y. and Han, S.H. 2004. Development of Program for Estimate Distance-dependent Competition Index. Journal of Korean Society of Forest Science Proceedings of Regular Academic Conferences: 258-260.
- Shin, M.Y., Chung, D.J., and Kim, J.H. 2002. A study on the selection of the optimal competition index for young stands of Korean white pine (Pinus koraiensis Sieb. et Zucc). Journal-Korean Forestry Society 91(1): 59-70.

-
- Received 13 May 2024
 - Finally Revised 10 June 2024
 - Accepted 17 June 2024

산림조사에 대한 휴대용 지상 LiDAR의 적용 가능성

이정관 · 이두희 · 양안희 · 나현주 · 김지석 · 김현준*

전남대학교 산림자원학과

Applicability of Hand-held LiDAR to Forest Surveys

Jeong-Gwan Lee · Du-Hee Lee · An-Hee Yang · Hyeon-Ju Na · Jiseok Kim · Hyun-Jun Kim*

Department of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

요약 : 본 연구는 적은 시간과 노동력으로 산림의 정밀한 3차원적 정보를 획득할 수 있는 휴대용 LiDAR(Hand-held Laser Scanning:HLS)를 산림조사에 적용이 가능한지를 파악하기 위해 수행되었다. HLS의 측정시간에 따른 흉고직경과 수고 추정값의 변화를 분석하였고, 측정 방법에 따른 흉고직경과 수고의 정확도를 분석하였다. 그 결과, 흉고직경은 측정시간에 따른 차이가 없었지만($P > 0.05$), 수고는 10분, 15분의 측정시간 대비 5분의 측정시간에서 유의한 차이가 발생했다($P < 0.05$). 따라서, 최소 10분 이상의 측정시간을 가져야 정밀한 추정값을 얻을 수 있다. 또한, HLS는 현장조사 대비 흉고직경($R^2=0.9947\sim0.9987$, Bias=-2.99~-3.33 cm)은 높은 정확도로 추정하였지만, 수고($R^2=0.6258\sim0.892$, Bias=-3.59~1.93 m)를 더 낮게 추정하였다. 측정 방법에 따른 임분 단위 추정값은 흉고직경과 수고 모두 유의한 차이가 없었다($P > 0.05$). 따라서 HLS를 산림조사에 적용한다면 기존 현장 조사보다 효율적이고 효과적으로 대체할 수 있다는 것을 보여준다. 또한, 본 연구는 산림에서 HLS의 적용 가능성에 대한 기초자료로 활용될 수 있으며, 임분밀도, 경사, 수종 등 다양한 환경 및 변수에 따른 HLS 추정값의 변화에 관한 연구가 추가로 수행되어야 할 것이다.

ABSTRACT : This study was conducted to propose the possibility of applying Handheld Laser Scanning(HLS) for forest surveys, allowing for precise 3D information of forests to be acquired with less time and labor. We analyzed the changes in estimated value of DBH and height according to the measurement time of HLS, and analyzed the accuracy of DBH and height according to the measurement method. As a result, there was no difference in DBH depending on the measurement time($P > 0.05$). but there was a significant difference in height estimates between 5 minutes and 10 or 15 minutes of measurement time($P < 0.05$). thus, a minimum measurement time of 10 minutes is necessary to obtain accurate estimates. Furthermore, HLS estimated DBH($R^2= 0.9947\sim0.9987$, Bias= -2.99~-3.33 cm) with high accuracy compared to field surveys, but underestimated height($R^2= 0.6258\sim0.892$, Bias= -3.59~1.93 m). There was no significant difference in the estimated stand values according to the measurement method for DBH and height($P > 0.05$). Therefore, the application of HLS in forest surveys demonstrates its potential to efficiently and effectively replace conventional field surveys. Furthermore, this study can be used as basic data on the applicability of HLS in forests, and additional research should be performed on changes in HLS estimates based on various environments and variables such as stand density, slope and tree species.

Key words : DBH, Forest survey, Hand-held laser scanning, Height, LiDAR

Corresponding author : Hyun-Jun Kim

Tel : +82-62-530-2082

E-mail : hjkim0837@jnu.ac.kr

I. 서 론

산림은 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)에서 인정하는 이산화탄소를 흡수·저장하는 온실가스 감축 수단이다(UNFCCC, 2016). 따라서, 최근 산림자원정보에 대한 필요성이 꾸준히 증가하고 있고, 복잡한 산림생태계를 관리하기 위한 객관적인 데이터의 필요성이 대두되고 있다(Wendland & Bawa, 1996; Gollob *et al.* 2020). 그중 흉고 직경과 수고는 산림조사에서 가장 중요한 매개변수이다(Chen *et al.* 2019). 임목의 흉고직경과 수고는 산림 바이오매스, 탄소 축적량, 임분 생산성의 정량적 평가에 활용된다(Bijak and Sarzyński, 2015; Wu *et al.*, 2019; Fan *et al.*, 2019). 따라서, 임목의 흉고직경과 수고를 객관적으로 측정하는 것은 중요하다.

기존의 조사 방법에서 흉고직경은 윤척과 직경테이프 로, 수고는 측고기 등을 포함한 단순한 측정장비를 사용하며, 조사 결과를 야장에 기입한 후 내업을 수행하는 이원적인 환경을 가진다(Cho *et al.* 2017; Kim *et al.* 2021). 이는 노동 집약적이고 시간이 많이 소요되며, 다양한 측정 오차가 발생하기 쉽다(Liang *et al.* 2016; Ritter *et al.* 2017). 특히, 수고는 흉고직경과 달리 간접측정 방법이기 때문에, 조사자에 따른 편차가 심하다(Ko *et al.* 2021). 조사자의 신체조건이나 숙련도, 피로도에 따라 다양한 측정 오차가 발생하기 때문이다(Choi *et al.* 2022). 선행연구에서는 임목의 수고 측정시 발생하는 오차의 주된 원인은 조사자와 지형이라고 보고하였다(Stereńczak *et al.* 2019). 이처럼 기존 산림조사 방법은 정확도가 낮으며, 정확도를 향상시키기 위한 새로운 조사 방법이 필요하다.

최근 Light Detection and Ranging(LiDAR) 기술이 임업을 비롯한 여러 분야에서 활용되고 있다. LiDAR 기술은 임목의 생물물리학적 구조를 3D 포인트 클라우드를 통해 높은 정확도로 측정할 수 있고, 임지의 구조적인 특성이 담긴 데이터를 취득할 수 있다(Hyyppä, 1999; Oveland *et al.*, 2018; Akay *et al.*, 2009). LiDAR를 이용해 산림을 조사할 경우, 산림의 정확한 3차원적 구조 정보를 적은 시간과 노동력으로 획득할 수 있다(Liang *et al.* 2016; Hyyppä *et al.* 2020). LiDAR는 레이저를 주사하는 위치에 따라 장비가 구분되는데, 지상 LiDAR와 항공 LiDAR로 구분된다. 또한, 지상 LiDAR는 고정식 지상 LiDAR와 이동식 지상 LiDAR로 세분된다. 본 연구에서 사용된 Handheld Laser Scanning(HLS)는 이동식 지상 LiDAR 장비로, 고정식 지상 LiDAR보다 가볍고 이동성이 뛰어나며, 여러 고정점에서 취득한 데이터를 정합하는 과정이 필요하지 않아서 더 정확한 데이터를 획득할 수 있다

(Bauwens *et al.* 2016). 국내에서 HLS와 관련된 연구로는 산림지역 수목의 기하학적 구조 측정을 위한 HLS의 활용성 평가, 임분 바이오매스 조사를 위한 백팩형 LiDAR(Backpack Laser Scanning, BLS)와 드론 LiDAR의 적용성 평가, HLS와 고정식 지상 LiDAR를 활용한 침엽수림의 수고 및 흉고직경 측정 등이 이뤄지고 있지만, 여전히 LiDAR를 활용한 산림조사 방법에 대해 많은 의문이 제기되고 있다(Choi *et al.* 2022; Lee *et al.* 2023; Ko *et al.* 2022).

따라서 본 연구는 현장에 적용할 수 있는 HLS의 적정 측정시간을 구명하고, 측정 방법에 따른 흉고직경 및 수고의 정확성을 검증하여 효율적인 산림조사를 위한 HLS의 적용 가능 여부를 파악하기 위해 수행되었다. 본 연구의 가설은 다음과 같다. (1) HLS의 정확도는 측정시간이 길수록 증가할 것이다. (2) 개체목 단위에서 HLS 장비의 정확도는 높을 것이다. (3) 임분단위의 산림조사 시 HLS의 정확도는 전통적인 방법과 비교하여 허용 가능한 수준일 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 광주광역시 북구에 위치한 전남대학교 수목원 내에 있는 메타세콰이어(*Metasequoia glyptostroboides*) 조림지에서 수행하였다(35°10'19"N, 126°53'53"E). 영급은 4영급이고, 대경급으로 이루어져 있다. 경사는 5° 미만의 완경사지이며, 하층식생은 제거된 상태이다. 조사구는 일반적으로 우리나라 산림자원조사에 적용되는 20 × 20 m(0.04 ha) 크기의 조사구를 3개 설치하였다(Table 1). HLS로 촬영한 3개의 조사구는 Fig 1과 같다.

2. 데이터 수집 및 처리

1) 현장 조사와 HLS를 이용한 데이터 수집

HLS의 적용 가능성을 확인하기 위해 평지에 위치한 조림지에서 현장조사와 HLS 데이터를 수집하였다. 현장조사 및 HLS 데이터 수집은 2024년 4월 9일부터 4월 12일에 걸쳐 진행하였다. HLS(ZEB Horizon, FARO Technologies Inc., USA)를 이용하여 적정 조사 시간을 분석하기 위해 1번 조사구에서 시간을 5분(M5), 10분(M10), 15분(M15)로 구분하여 각각 3반복 촬영하였다.

HLS를 이용한 조사 방법과 기존 조사 방법 간의 개체목 및 임분단위 흉고직경과 수고의 차이를 분석하기 위

Table 1. Characteristics of survey plots

Plot	N	DBH(cm)			H(m)		
		Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
1	23	25.2	69.9	47.17±2.68	16.8	35.6	30.51±1.30
2	25	27.1	62.1	44.62±2.05	15.8	33.8	30.88±0.89
3	21	27.6	78.6	48.90±3.37	17.8	34.7	31.83±1.18

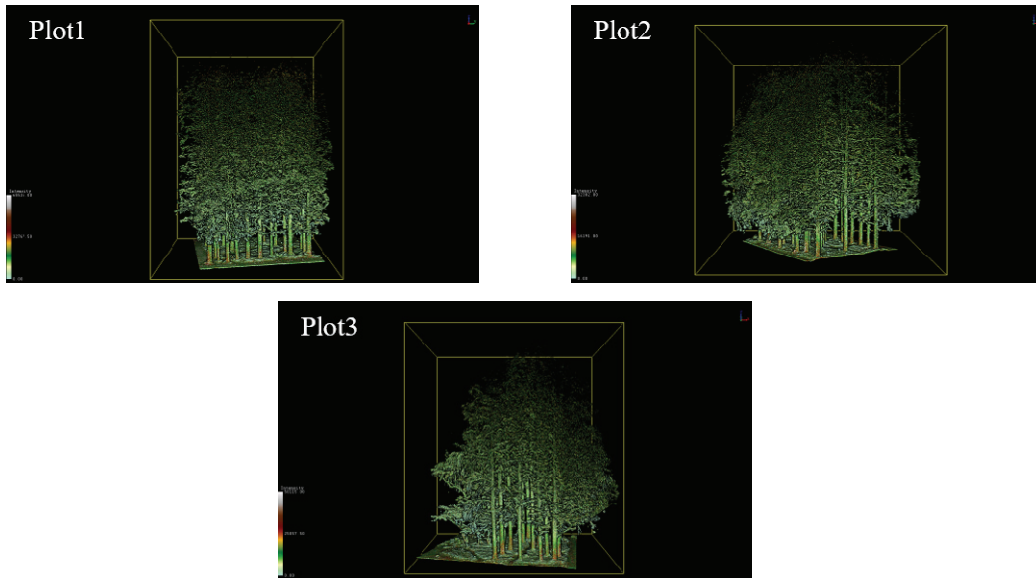


Figure 1. Three plots of *M. glyptostroboides* forests scanned with HLS

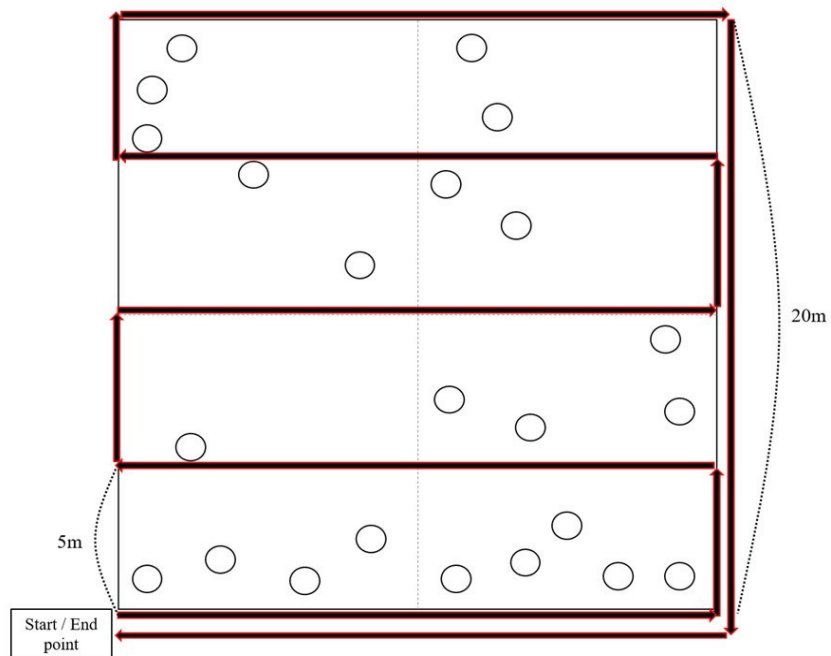



Figure 2. Survey path of HLS scanning

Table 2. Technical specification of HLS

Product name	ZEB Horizon
Product image	
Maximum Range	100 m
Scanner points per second	300,000 point/ sec
Laser class	Class 1
Field of view	360° × 270°
Weight (total)	2.8kg
Typical duration	3.5 hours
Datalogger carrier	Backpack or shoulder strap
Raw data file size	25 - 50 MB/ min

해 1, 2, 3번 총 3개의 조사구를 1번씩 측정하였다. HLS를 이용한 조사방법에서는 앞서 분석한 적정 조사 시간을 적용하였으며, 데이터 손실을 최소화하기 위해 5 m 간격으로 조사구를 이동하며 촬영하였다(Fig 2). 조사구 당 이동 거리는 약 160 m 내외이며, 모든 조사구를 동일한 방식으로 이동하였다. 기존 조사 방법으로 흉고직경은 직경테이프(Diameter Tape, Shinill Science, Republic of Korea)를 이용하여 측정하였고, 수고는 Vertex(Haglof, Sweden)를 이용하여 측정하였다. 본 조사에서 사용한 HLS의 세부 사양은 다음과 같다(Table 2).

2) HLS 데이터 취득

GreenValley International 사의 LiDAR 360 소프트웨어를 이용해 HLS로 취득한 점군 데이터를 처리하였다. 먼저 사용자가 분석하고자 하는 조사구를 공간적으로 분리하였다. 데이터 품질을 향상시키기 위해 Remove Outliers 및 Smooth points 기능을 통해 데이터 노이즈와 특이값을 제거하였다. 다음 단계로 Classify ground points 기능을 사용해 지면과 객체(수목)를 분류하였다. 분류된 지면을 기준으로 입목을 정렬하고, 같은 지표면 높이에서 흉고직경과 수고를 측정하기 위해 Normalize by Ground Points 기능을 사용하여 지면을 평면화하였다.

TLS Forest의 Fit DBH 기능을 사용해 조사구 내의 입

목의 흉고직경 점군 데이터를 선택하였다. 다음 단계로 Point Cloud Segmentation Based on Seed Points 기능을 사용해 개체목의 점군 데이터를 추출하였다(Fig 3a). 흉고직경은 Fit DBH 기능을 이용해 지표면에서부터 1.15 m에서 1.25 m 사이의 점을 추출하여 원형으로 직경을 측정하였다. 수고는 지표면에서 개체목의 가장 높은 점까지의 높이 값을 추출하였다(Fig 3b). 포인트 클라우드 개수와 용량은 다음과 같다(Table 3).

3) 통계 분석

본 연구의 모든 통계 분석에는 SAS ver 9.4 software package(SAS Institute Inc., USA)를 사용하였다. 일원배치 분산분석(A one-way ANOVA)을 실시하여 HLS 측정시간에 따른 DBH와 H 추정값의 차이를 비교하였다. 각 처리 간 차이가 인정될 경우 유의수준 0.05에서 Duncan 's multiple range test를 수행하여 각 처리간의 평균을 비교하였다($P < 0.05$). 측정 방법에 따른 임분 단위 추정값을 비교하기 위해 T-Test를 실시하였다. 또한, 측정 방법에 따른 개체목 흉고직경과 수고 측정값을 비교하기 위해 결정계수(R^2), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error:RMSE), 그리고 편향(Bias) 값을 계산하여 HLS 추정값의 정확도를 분석하였다(Equation (1)-(3)). R^2 은 모델의 설명력을 평가하는 지표이며, 0에서 1 사이의 값을 가지

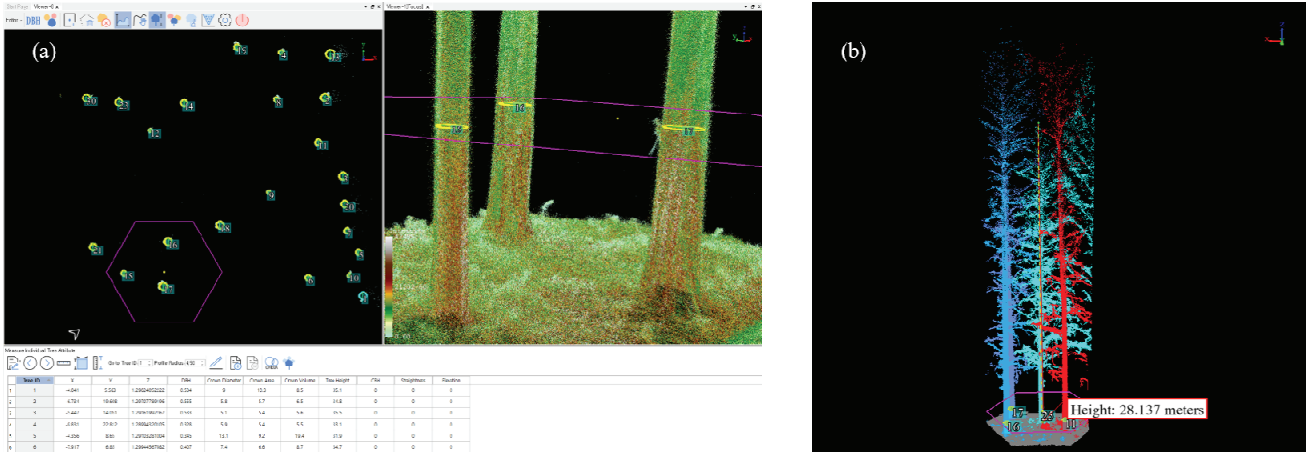


Figure 3. Measurement of tree DBH(a) and H(b) using LiDAR360

Table 3. The amount of data and point clouds according to the three kinds of HLS measurement time

	M5	M10	M15
Data (mb)	777.64±11.90	1386.13±25.33	2068.25±217.82
Total point cloud (n)	31,810,103±486,813	56,726,640±1,036,705	78,205,183±2,467,168

며, 1에 가까울수록 설명력이 높다고 판단한다. RMSE는 측정값과 추정값 간의 편차를 확인하여 정밀도를 확인하는 값이며, Bias는 측정값 대비 추정값의 과대 혹은 과소 정도를 판단하는 값이다. 이는 측정값과 추정값의 차이를 수치적으로 나타내는 지표로, 0에 가까울수록 품질이 높다고 판단한다. 본 연구에서는 직경테이프와 Vertex를 이용하여 취득한 측정값 대비 HLS를 이용하여 취득한 측정값의 차이를 분석하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (3)$$

여기서 x_i 는 i 번째 대상을 HLS를 통해 추정된 값, y_i 는 i 번째 대상을 현장 조사에서 직접 측정된 값, n 은 조사구 내 입목의 본 수를 의미한다.

III. 결과 및 고찰

1. HLS 조사 방법에 대한 적정 조사 시간 분석

흉고직경 측정값은 조사 시간별 유의한 차이가 없었다 ($P > 0.05$; Table 4). 데이터의 정확도를 나타내는 잔차 역시 조사 시간에 따른 유의한 차이를 보이지 않았다. 따라서, 흉고직경의 측정은 조사 시간의 영향을 받지 않는다.

수고는 M5 조사 시간에 비해 M10과 M15 조사 시간에서 유의한 수준으로 높았다($P < 0.05$; Table 4). HLS는 조사 시간이 길어질수록 정확도가 증가하는 경향이 있다 (Ko *et al.* 2022). 이는 측정 시간에 비례하여 포인트 클라우드가 증가하여 초두부 측정이 용이해지기 때문이다. 또한, 실측값에 동일하게 잔차 역시 M5 조사 시간에 비해 M10과 M15 조사 시간에서 유의하게 감소하였다. 조사 시간의 증가는 데이터의 정도 역시 향상시키는 효과가 있다. 즉, M5 조사 시간은 정확도와 정도가 가장 낮은 것으로 분석되어 최소 10분 이상되어야 정확도와 정도의 데이터를 취득할 수 있다.

한편, M10과 M15 간 흉고직경과 수고는 모든 개체목에서 유의한 차이가 발생하지 않았다. 게다가 잔차 역시 두 조사 시간 간에 유의한 차이를 보이지 않았다. 즉, 조사 시간이 10분을 초과하게 되면 데이터의 정확도와 정도는 더 이상 향상되지 않는 것으로 판단된다. 오히려 조사 시간이 길어지면 취득한 포인트 클라우드가 증가하여

Table 4. Comparison of DBH and H according to the three kinds of HLS measurement time. Values with different letters indicate significant differences among the three measurement time ($P < 0.05$), and parentheses indicate standard error

Individuals		DBH (cm)			H (m)		
		M5	M10	M15	M5	M10	M15
Measured data	1	54.17±0.18	54.50±0.21	54.37±0.13	31.73±1.80	33.90±0.25	33.40±0.23
	2	25.00±0.21	25.23±0.29	24.93±0.19	23.87±0.64	24.93±0.17	24.17±0.47
	3	36.90±0.25	37.17±0.24	36.90±0.15	28.10±0.91	27.47±0.67	28.90±0.10
	4	39.27±0.24	39.43±0.18	39.37±0.22	32.07±1.43	32.97±0.09	32.70±0.21
	5	50.73±0.33	50.63±0.48	50.77±0.38	29.23±2.77	34.27±0.39	33.73±0.23
	6	55.70±0.26	56.00±0.15	55.90±0.20	31.00±1.24	32.50±0.32	31.50±0.38
	7	48.97±0.37	49.27±0.17	49.33±0.19	33.63±0.15	34.17±0.20	33.87±0.32
	8	57.50±0.57	57.80±0.20	57.97±0.35	32.27±2.65	35.20±0.00	35.33±0.07
	9	65.47±0.18	65.70±0.76	64.70±0.25	28.87±1.79 ^b	32.57±0.38 ^a	33.07±0.34 ^a
	10	33.23±0.17	33.87±0.15	33.67±0.07	32.53±0.47	32.70±0.38	33.47±0.26
	11	38.13±0.32	38.27±0.39	38.53±0.15	30.63±3.25	33.17±0.45	33.63±0.18
	12	25.03±0.58	25.60±0.23	25.43±0.09	23.60±0.15	23.87±0.17	23.67±0.13
	13	42.40±0.21	41.53±0.42	42.27±0.15	32.67±0.38 ^b	34.03±0.44 ^a	33.53±0.19 ^{ab}
	14	51.00±0.25	50.50±0.67	50.83±0.34	34.67±1.43	34.20±0.42	34.77±0.52
	15	37.90±0.32	38.53±0.23	38.27±0.09	33.10±0.50	34.07±0.22	33.90±0.00
	16	45.60±0.23	45.80±0.06	45.80±0.26	33.20±0.50	33.80±0.40	33.53±0.29
	17	23.37±0.15	23.33±0.26	23.03±0.22	13.27±0.13	13.90±0.29	13.90±0.29
	18	53.90±0.06	53.80±0.30	53.63±0.07	35.60±1.54	35.70±0.50	35.13±0.50
	19	55.20±0.15	54.83±0.37	54.43±0.24	34.60±1.59	35.20±0.10	35.67±0.52
	20	33.73±0.19	33.73±0.20	33.47±0.07	29.50±1.17	28.57±0.37	28.37±0.07
	21	50.17±0.23	50.20±0.40	50.13±0.12	34.27±0.07 ^b	35.10±0.06 ^a	34.87±0.12 ^a
	22	51.30±1.63	53.50±0.17	52.73±0.33	36.27±0.62 ^a	35.77±0.34 ^{ab}	34.43±0.19 ^b
	23	48.43±0.33	48.23±0.33	48.13±0.12	35.73±0.43 ^b	37.00±0.15 ^a	37.00±0.31 ^a
Residual	Mean	-0.23	0.24	0.24	-0.71	0.13	0.16
	Std. Err	0.16	0.10	0.13	0.25	0.28	0.18

데이터 처리 시간이 증가하는 단점이 발생하였다(Ko *et al.* 2021). 이처럼 조사 시간의 증가는 분석 시간을 증가시켜 HLS 활용의 효율성을 감소시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서 HLS를 활용한 산림조사 시 최적의 조사 시간은 10분인 것으로 확인되었다. 그러나 수고 측정은 일반적으로 임분의 구조, 지형, 밀도 등의 영향을 받는다(Balenović *et al.* 2021, Ryding *et al.* 2015, Gianneti *et al.* 2018, Oveland *et al.* 2018). 해당 조사 지역은 평지에서 진행되었기에 지형이 수고 측정에 미치는 효과를 정확하게 판단하기에는 어려움이 있다. 그러므로 대부분이 경사지인 산림에서의 HLS 적용 가능성을 더 정확하게 분석하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

2. 조사 장비에 따른 개체목 단위 흉고직경과 H의 측정값 비교

HLS와 직경테이프를 이용하여 흉고직경을 비교하여 분석한 결과, R^2 은 0.9947~0.9987, RMSE가 3.15~3.56 cm, Bias는 -2.99~-3.33 cm로 나타났다(Fig 4). 모든 조사구에서 R^2 이 높아 두 조사 장비 간 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다. 그러나 HLS는 직경테이프에 비해 흉고직경을 낮게 측정하는 경향을 보였다. 여러 선행연구들에서도 본 연구와 동일하게 HLS는 흉고직경이 낮게 측정되었다(Chudá *et al.* 2020). 이는 수피의 불규칙한 상태로 인해 발생하는 점군 데이터의 노이즈 때문이다(Ryding *et al.* 2015; Brolly and Kiraly. 2009). 고정식 지상 LiDAR (Terrestrial Laser Scanning, TLS), HLS, 사진측량법(Close

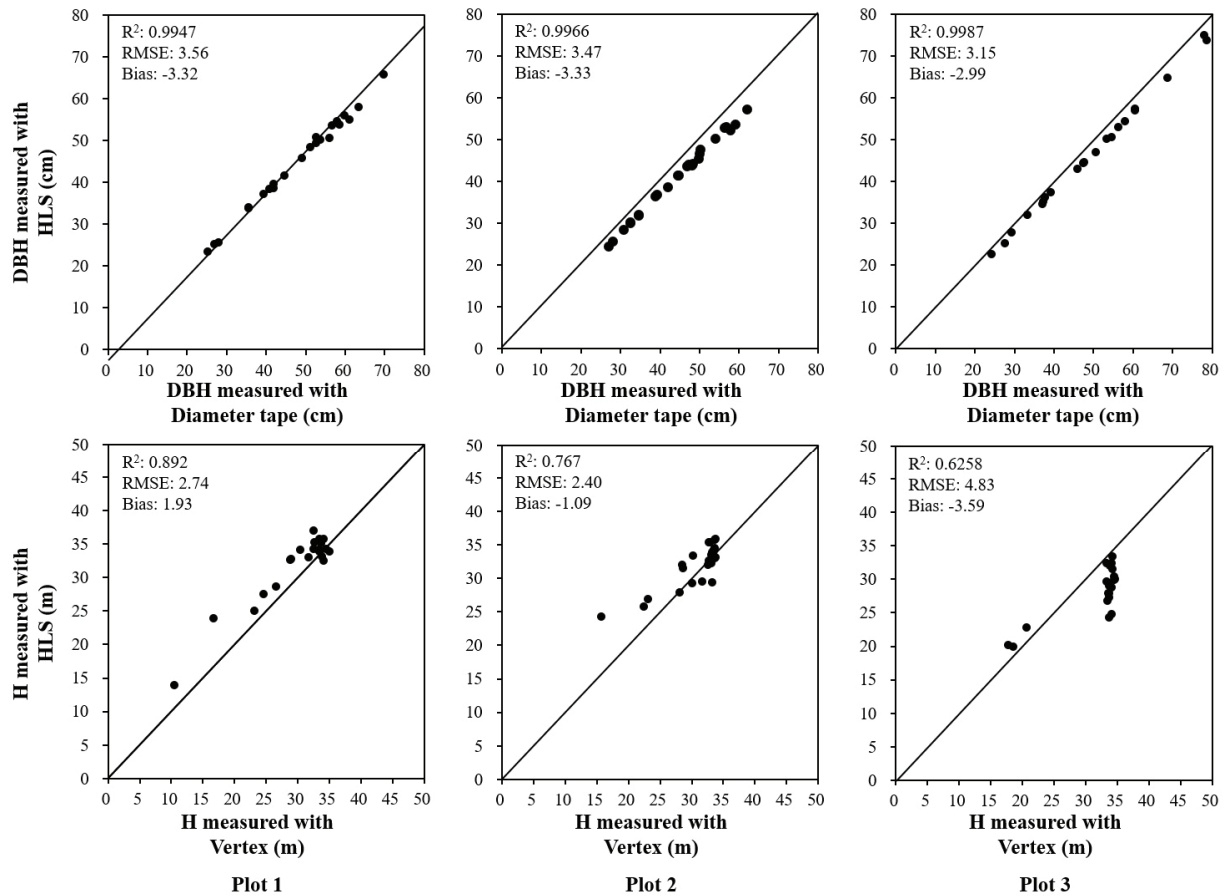


Figure 4. Results of simple linear regression analysis of DBH (cm) and H (m) according to measurement instruments. Black lines in each graph indicate $y=x$

Range Photogrammetry, CRP)을 이용해 흉고직경을 추정 한 연구에서도 2 cm 팔약으로 측정되는 산림조사에서 HLS는 TLS 및 CRP 방법과 비교가능하다고 보고하였다 (Hunčaga *et al.* 2020).

두 조사 장비에 따른 조사구별 수고는 R²이 0.6258~0.892, RMSE가 2.40~4.83 m, Bias는 -3.59~1.93 m로 나타났다(Fig 4). 수고의 측정값은 흉고직경에 비해 두 조사 장비 간 차이가 높게 나타났다. 수고는 간접적으로 측정하기 때문에 흉고직경에 비해 정확도가 낮은 경향을 경향을 보인다(Yim *et al.* 2023). 특히 Vertex는 이런 요인들의 영향으로 HLS보다 높은 오차율을 보인다(Tupinambá-Simões *et al.* 2023). 이로 인해 3개의 조사구 중 2개소에서는 HLS의 측정값이 Vertex의 측정값보다 높게 측정되었으며, 1개소에서는 낮게 측정된 것으로 판단된다. HLS로 독일가문비 나무의 수고를 추정 한 연구에서는 수고가 25 m보다 큰 수목은 낮게 측정되는 경향도 있었다(Hunčaga *et al.* 2020). 이는 장비의 사양으로 인해 스캔 범위가 제한되어 임목의 초두부로 도달하는 포인트가 감소하고, 높은 수고의 추정이 불안정한 것으로 판단된다.

이와 같이 수고 측정은 임분 구조, 수종, 수관형, 지형, 경사, 측정 거리, 인적 오류뿐만 아니라 측정 장비 종류의 영향을 받아 오차가 발생한다(Balenović *et al.* 2021, Stereńczak *et al.* 2019).

3. 조사 장비에 따른 임분 단위 흉고직경과 수고의 측정값

메타세콰이어 조림지의 흉고직경과 수고는 조사 장비 간 유의한 차이가 없었다($P > 0.05$, Fig 5). 일반적으로 직경테이프와 Vertex를 이용하는 기존의 산림조사 방법은 상대적으로 많은 비용과 시간, 그리고 인력을 필요로 한다(Ko *et al.* 2021). 또한, 조사자에 따른 오차와 내업에서 발생하는 오차를 무시할 수 없다. 따라서 기존의 산림조사 방법은 효율이 낮은 문제가 있다(Hyypä *et al.* 2020). 그러나 HLS를 이용한 산림조사 방법은 장비 구매에 따른 초기비용이 많이 들지만, 조사 시간과 인력을 절약할 수 있어 비용대비 효율이 높은 장점이 있다. 또한, 산림 분야에 특화된 전문 분석 프로그램을 사용하기 때문에 조사자에 따른 오차나 내업 과정에서 발생할 수 있는 오

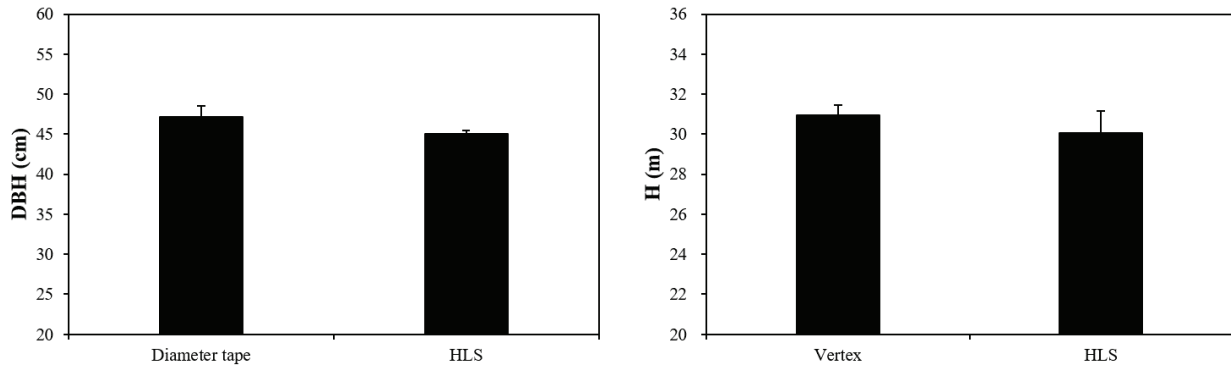


Figure 5. Difference between DBH (cm) and H (m) according to measurement instruments. Vertical lines indicate the standard error

차를 최소화 할 수 있다. 게다가 한 번의 조사로 흉고직경과 수고 뿐만 아니라 수관폭, 수관고, 지하고, 부위별 직경, 수간형 등의 다양한 정보를 추가로 얻을 수 있어 활용가치가 높다(Ryding *et al.* 2015).

IV. 결 론

기존의 산림조사 방법은 노동 집약적이고, 많은 시간이 소요되며, 다양한 변수로 인한 측정 오차가 발생한다. 반면에, LiDAR는 현장에서 짧은 시간 내에 임목의 다양한 정보를 객관적으로 취득할 수 있다. LiDAR의 한 종류인 HLS은 조사 시간이 짧으면 정확도와 정도가 감소하고, 조사 시간이 증가하면 데이터의 품질은 향상되지 않지만 데이터 처리 시간이 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 HLS의 적정 조사 시간은 10분인 것으로 나타났다. 한편, 개체목 단위의 흉고직경과 수고는 조사 장비 간에 통계적으로 유의한 차이가 없었다($P > 0.05$). 그러나 HLS는 한 번의 측정으로 흉고직경과 수고를 동시에 조사할 수 있어 흉고직경과 수고를 각각 측정하는 기존 방법보다 효율이 높아 산림조사 시 대체가 가능하다고 판단된다. 끝으로 본 연구는 평지에서 수행되어 지형의 영향을 고려하지 않았기에 보다 정확하게 산림조사에 대한 HLS의 적용 가능성을 분석하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산림청 연구과제(2022464B10-2224-0201)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Akay, A. E., Oğuz, H., Karas, I. R., and Aruga, K. 2009. Using LiDAR technology in forestry activities. *Environmental monitoring and assessment*, 151, 117-125.
- Balenović, I., Liang, X., Jurjević, L., Hyypä, J., Seletković, A. and Kukko, A. 2021. Hand-held personal laser scanning—current status and perspectives for forest inventory application. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 42(1), 165-183.
- Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K. and Lejeune, P. 2016. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests*, 7(6), 127.
- Bijak, S. and Sarzyński, J. 2015. Accuracy of smartphone applications in the field measurements of tree height. *Journal of Folia Forestalia Polonica, Series A*. 57(4), 240-244.
- Brolly, G. and Király, G. 2009. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 5, 119-130.
- Chen, S., Liu, H., Feng, Z., Shen, C. and Chen, P. 2019. Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. *PLoS One*, 14(2), e0211392.
- Cho, H. G., Kim, J. C., Chung, I. B., Lee, G. R., Shin, J. Y. and Lim, J. S. 2017. (7th) Guidebook for national forest inventory and forest health monitoring. Korea Forestry Promotion Institute, Seoul, South Korea, 36-53.
- Choi, S.-W., Kim, T.-G., Kim, J.-P. and Kim, S.-J. 2022. Assessment on the Applicability of a Handheld LiDAR for Measuring the Geometric Structures of Forest Trees.

- Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 25(2), 48–58. <https://doi.org/10.11108/KAGIS.2022.25.2.048>
- Chudá, J., Hunčaga, M., Tuček, J. and Mokroš, M. 2020. The handheld mobile laser scanners as a tool for accurate positioning under forest canopy. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 211-218.
- Fan, G., Chen, F., Li, Y., Liu, B. and Fan, X. 2019. Development and testing of a new ground measurement tool to assist in forest GIS surveys. *Forests*, 10(8), 643.
- Giannetti, F., Puletti, N., Quatrini, V., Travaglini, D., Bottalico, F., Corona, P. and Chirici, G. 2018. Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single-tree attributes in Mediterranean forest stands. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 795–807. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482733>
- Gollob, C., Ritter, T., and Nothdurft, A. 2020. Forest inventory with long range and high-speed personal laser scanning (PLS) and simultaneous localization and mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing*, 12(9), 1509.
- Hunčaga, M., Chudá, J., Tomašík, J., Slámová, M., Koreň, M. and Chudý, F. 2020. The comparison of stem curve accuracy determined from point clouds acquired by different terrestrial remote sensing methods. *Remote Sensing*, 12(17), 2739.
- Hyypä, J. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogramm. J. Finland*, 16, 27-42.
- Hyypä, E., Yu, X., Kaartinen, H., Hakala, T., Kukko, A., Vastaranta, M. and Hyypä, J. 2020. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests. *Remote Sensing*, 12(20), 3327.
- Kim, D.-H., Kim, S.-J., Sung, E.-J. and Kim, D.-G. 2021. Development of a Smartphone Application for the Measurement of Tree Height and Diameter at Breast Height. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 110(1), 72–81. <https://doi.org/10.14578/JKFS.2021.110.1.72>
- Ko, B.-J., Park, S.-I., Park, H.-J. and Lee, S.-H. 2022. Measurement of Tree Height and Diameter Using Terrestrial Laser Scanner in Coniferous Forests. *Journal of Environmental Science International*, 31(6), 479-490.
- Ko, C.-U., Yim, J.-S., Kim, D.-G. and Kang, J.-T. 2021. Analysis of Optimal Pathways for Terrestrial LiDAR Scanning for the Establishment of Digital Inventory of Forest Resources. *Korean Journal of Remote Sensing*, 37(2), 245–256. <https://doi.org/10.7780/KJRS.2021.37.2.6>
- Lee, H., Kim, S. and Choe, H. 2023. Backpack- and UAV-based Laser Scanning Application for Estimating Overstory and Understory Biomass of Forest Stands. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 112(3), 363–373. <https://doi.org/10.14578/JKFS.2023.112.3.363>
- Liang, X. et al. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63-77.
- Oveland, I., Hauglin, M., Giannetti, F., Schipper Kjørsvik, N. and Gobakken, T. 2018. Comparing three different ground based laser scanning methods for tree stem detection. *Remote Sensing*, 10(4), 538.
- Ritter, T., Schwarz, M., Tockner, A., Leisch, F. and Nothdurft, A. 2017. Automatic mapping of forest stands based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning. *Forests*, 8(8), 265.
- Ryding, J., Williams, E., Smith, M. J. and Eichhorn, M. P. 2015. Assessing handheld mobile laser scanners for forest surveys. *Remote sensing*, 7(1), 1095-1111.
- Stereńczak, K., Mielcarek, M., Wertz, B., Bronisz, K., Zajczkowski, G., Jagodziński, A.M., Ochał, W. and Skorupski, M., 2019. Factors influencing the accuracy of ground-based tree-height measurements for major European tree species. *J. Environ. Manage.* 231: 1284-1292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.100>
- Tupinambá-Simões, F., Pascual, A., Guerra-Hernández, J., Ordóñez, C., de Conto, T. and Bravo, F. 2023. Assessing the Performance of a Handheld Laser Scanning System for Individual Tree Mapping—A Mixed Forests Showcase in Spain. *Remote Sensing*, 15(5).
- United Nations Framework Convention of Climate Change (UNFCCC). 2016. Decision 1/CP.21: Adoption of the Paris Agreement. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>.
- Wendland, A. and Bawa, K. S. 1996. Tropical forestry: the Costa Rican experience in management of forest resources. *Journal of Sustainable Forestry*, 3(2-3), 91-156.
- Wu, X., Zhou, S., Xu, A. and Chen, B. 2019. Passive measurement method of tree diameter at breast height using a smartphone. *Journal of Computers and*

Electronics in Agriculture 163(8): 104875.

Yim. J.-S., Kim. D.-H., Ko. C.-U., Kim. D.-G. and Cho. H.-J. 2023. Design and Implementation of System for Estimating Diameter at Breast Height and Tree Height using LiDAR point cloud data. Journal of the Korea Society of Computer and Information,28(2),99-110.

-
- Received 7 May 2024
 - Finally Revised 10 June 2024
 - Accepted 17 June 2024

국내외 수종에 대한 상대생장 변화 분석 - 수고와 흉고직경과의 관계 -

유재희¹ · 김문일^{2*}

¹한국환경산업연구원 · ²평택대학교 ICT환경융합과

Analysis of Changes in Tree Height-Diameter Allometry for Major Tree Species in South Korea

Jaehee Yoo¹ · Moonil Kim^{2*}

¹Korea Environmental Industry Research Institute, Suwon 16226, Republic of Korea

²Division of ICT-Integrated Environment, School of ICT-Integrated Studies, Pyeongtaek University,
Pyeongtaek 17869, Republic of Korea

요약 : 최근 전 세계적으로 기후변화에 대한 문제가 심각해지고 있는 상황 속에서, 탄소중립 달성에 중요한 역할을 하는 산림의 탄소저장량을 추정하는 연구들이 많이 수행되고 있다. 임목의 수고와 흉고직경의 성장 경향을 파악하는 것은 산림의 탄소저장량의 평가와 예측의 정확도를 높이는 데 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 수고-흉고직경의 상대생장 관계가 시간의 흐름에 따른 변화 유무를 확인하는 것이다. 우리나라의 잣나무와 편백나무, 스웨덴의 유럽사시나무와 로지폴 소나무를 대상으로 분석을 수행하였으며, 각 국가 국가산림자원조사 자료의 수고와 흉고직경 측정값을 활용하였다. 분석결과 지난 10년 동안, 네 개 수종의 동일 흉고직경(25cm)에 대한 수고의 기댓값이 과거에 비해 평균적으로 1.71m 정도 증가한 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 산림을 구성하는 각 수종의 수고-흉고직경에 대한 상대생장관계가 변화하고 있다는 것을 의미한다. 따라서, 산림 탄소 저장량 평가 및 예측에 이러한 변화를 반영하는 것이 필요하며, 변화의 원인을 밝히기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

ABSTRACT : Amid the increasing global concern about climate change, numerous studies have been conducted to estimate forest carbon storage, which plays a crucial role in achieving carbon neutrality. Understanding the growth trends of tree height and diameter at breast height (DBH) is essential for enhancing the accuracy of forest carbon storage assessment and prediction. The aim of this study is to determine whether the relative growth relationship between height and DBH has changed over time. The analysis was performed on two species each from Korea (*Pinus koraiensis* and *Chamaecyparis obtusa*) and Sweden (*Populus tremula* and *Pinus contorta* var. *latifolia*), using height and DBH measurements from each country's national forest inventory data. The results showed that, over the past decade, the expected height for the same DBH (25 cm) in all four species increased by an average of approximately 1.71 m compared to the past. This indicates that the relative growth relationship between height and DBH of each species in the forest is changing. Therefore, it is necessary to reflect these changes in the evaluation and prediction of forest carbon storage, and additional research is needed to identify the causes of these changes.

Key words : Allometric Equations; Tree height; Diameter at breast height; National Forest Inventory; Sweden

I. 서 론

나무의 수고와 흉고직경은 산림자원의 생산성을 파악하는데 매우 중요한 지표이다. 이 값들은 '최종 생산물의 양과 질, 경제성과도 연관되어 있으며, 산림이 제공하는 생태계서비스와도 밀접한 관계가 있다(Jung et al., 2022; Na et al., 2022). 따라서 이러한 정보는 적절한 산림관리계획 수립을 위해 중요하게 활용되며, 산림 자원의 지속적인 이용 및 보전에도 기여할 수 있다(Kim et al., 2021).

상대성장식(Allometric equation)은 나무의 성장과 크기에 대한 평가 및 예측에 유용하게 활용되는 도구로, 식물의 상대성장관계를 통해 단순한 인자들로부터 다양하고 복잡한 값들을 추정하는데 폭넓게 사용되고 있다(Lee et al., 2010; Henry et al., 2011; Vorster et al., 2020). 산림의 경우, 수고와 흉고직경(Diameter at breast height, DBH)의 발달 관계를 파악하기 위한 연구와, 흉고직경과 수고를 통해 임목 축적과 탄소량 등을 추정하는 상대성장식의 개발이 활발하게 이루어져왔다(Vargas-Larreta et al., 2017; Son et al., 2011). 국립 산림과학원에서는 우리나라 주요 수종에 대한 상대성장식을 개발하였으며(Son et al., 2014), 이는 산림의 임목 축적과 바이오매스 정량화, 탄소량 추정, 생태계서비스 평가 등에 활용되었다(Kim et al., 2014; Kim et al., 2019; Kim et al., 2021)

최근 임목의 상대성장관계가 변화되고 있다는 연구결과들이 보고되고 있다(Chen et al., 2020; Kim et al., 2023; Xu et al., 2022). Xu et al.(2022)은 중국 북부대규모 산림지에서 수고-흉고직경 상대생장의 변화를 파악하였으며, 이러한 변화를 일으킨 주된 원인이 기후변화라고 설명하였다. 국외뿐만 아니라 국내 주요 수종인 소나무, 잣나무, 굴참 및 신갈나무에서도 유사한 현상이 나타나는 것으로 확인되었다(Kim et al., 2023). 그러나 아직 국내 수종과 국외 수종에 대한 상대생장의 변화를 같은 기준으로 분석한 연구가 없어, 이러한 변화의 특성을 파악하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 우리나라와 스웨덴의 국가산림자원조사

자료(National Forest Inventory, NFI)를 통해 각 국가에서 두 가지 수종을 선정하고, 이에 대한 수고-흉고직경 간의 상대성장관계를 분석하여 과거와 현재의 변화 유무와 국가별 변화 정도의 차이를 파악하고자 수행되었다. 이를 통해 산림 자원과 탄소량 평가 시스템의 보완 필요성을 파악하고, 합리적인 산림관리계획 수립에 기여하고자 한다.

II. 연구재료 및 방법

1. 연구재료

본 연구는 우리나라와 스웨덴의 주요 수종 중, 각각 두 개 수종을 선정하여 분석을 수행하였다. 각 국가의 NFI 자료 중, 개체목의 직경과 수고를 직접 측정하여 구축한 자료를 활용하였으며, 우리나라는 잣나무(*Pinus koraiensis*; PK)와 편백나무(*Chamaecyparis obtusa*; CH)를, 스웨덴은 유럽 사시나무(*Populus tremula*; PT)와 로지폴 소나무(*Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia* Engelm; PC)를 분석대상 수종으로 선정하였다(Table 1, 2). 본 연구는 각 수종의 수고-직경 상대생장의 자연적인 변화를 분석하는 것이 목적이기 때문에, NFI 고정 조사구 중 자연적(산불, 산사태, 병충해 발생 등), 인위적(간벌, 숲가꾸기 시업 등) 교란이 관측된 지점의 임목들은 분석에 포함하지 않았다(Table 1, 2). 우리나라 NFI 자료는 5차(2006-2010년), 6차(2011-2015년), 7차(2016-2020년) 조사에서 획득한 자료를 활용하였으며, 스웨덴의 경우 우리나라 NFI와 조사 기간이 일치하지 않아, 각 차수와 겹치는 시기의 자료를 A(2003-2007년), B(2008-2012년), C(2013-2017년)로 구분하여 DB를 구축하여 분석을 실시하였다. 최종적으로 36,083(PK: 10,623, CH: 2,735, PT: 7,089, PC: 15,636)개의 개체목 측정자료를 활용하여 수종별 수고-직경의 상대성장(Allometric growth)을 분석하였으며, 각 NFI 차수별 자료를 따로 분석하여 시기별 변화 경향을 도출하였다.

Table 1. Statistical summary of measured trees at the permanent plots of the 5-7th national forest inventory in South Korea

NFI	Species	No. of Trees	DBH (cm)				Height (m)			
			Mean	Min.	Max.	SD	Mean	Min.	Max.	SD
5th	PK	3660	17.00	6.00	80.00	9.20	10.70	2.50	29.70	4.11
	CH	761	13.00	6.00	43.00	6.71	8.90	2.60	28.50	3.54
6th	PK	3479	20.00	6.00	82.00	9.43	12.90	2.40	28.70	4.02
	CH	953	15.00	6.00	41.00	7.12	10.60	3.00	22.50	3.66
7th	PK	3484	21.00	6.00	107.00	9.86	14.30	3.60	39.20	4.26
	CH	1021	17.00	6.00	46.00	7.45	11.90	3.00	22.20	3.85

Table 2. Statistical summary of measured trees at the permanent plots of the A-C national forest inventory in Sweden

NFI	Species	No. of Trees	DBH (cm)				Height (m)			
			Mean	Min.	Max.	SD	Mean	Min.	Max.	SD
A	PT	2395	16.40	4.00	70.00	9.62	15.40	2.30	36.00	5.60
	PC	4182	12.20	4.00	44.20	3.74	8.90	1.40	24.00	2.75
B	PT	2460	16.60	4.00	72.30	10.30	16.00	2.00	41.30	5.93
	PC	5534	12.80	4.00	40.80	3.70	10.10	1.40	19.90	2.93
C	PT	2234	17.80	1.00	79.90	11.29	17.90	1.90	38.20	6.31
	PC	5920	13.50	1.00	31.90	3.84	11.40	1.40	21.80	3.00

Table 3. List of equations examined in this study

Equation No.	Form	References
1	$H = 1.2 + a(1 - e^{-b \cdot DBH})^c$	Richards 1959; Chapman 1961
2	$H = 1.2 + a(1 - e^{-b \cdot DBH^c})$	Yang et al. 1978
3	$H = 1.3 + e^{(a + \frac{b}{DBH})}$	Yuancai and Parresol, 2001
4	$H = 1.2 + a \cdot e^{(-b \cdot DBH^{-c})}$	Stage 1963; Zeide 1989
5	$H = \left(1.2^b + (c^b - 1.2^b) \cdot \frac{1 - e^{-a(DBH - DBH_0)}}{1 - e^{-a(DBH_{100} - DBH_0)}} \right)^{\frac{1}{b}}$	Schnute 1981
6	$H = 1.2 + a \cdot e^{\left(\frac{b}{DBH + c} \right)}$	Ratkowsky 1990
7	$H = 1.2 + \frac{a}{(1 + b^{-1} \cdot DBH^{-c})}$	Ratkowsky and Reedy 1986; Huang et al. 1992

2. 분석 모형 및 검증방법

수종별 수고-흉고직경 간의 상대성장 관계를 설명하기 위해 과거에 개발된 7개의 상대성장식(Allometric equation)을 활용하였다(Table 3)(Lumbres et al., 2011; Arcangeli et al., 2013). 모든 상대성장식은 수고(H)를 설명하기 위한 독립변수로 흉고직경(DBH)만을 활용하는 비선형 함수 형태로 되어 있다.

먼저 모든 상대성장식으로 분석을 실시한 뒤, 결정계수(R²), 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE), 평균잔차(residual Mean Difference, MD), 절대평균잔차(Absolute MD, AMD) 결과를 산출하여 통계적인 적합성을 평가하였다. 이후, 결정계수 값이 크고, 평균잔차가 0에 가까운 함수를 수종별 최적 상대성장식으로 선정하여 수고-흉고직경 발달 회귀곡선을 산출하였다. 각 상대성장식에 대한 수종별 계수 추정과 관련 통계량은 오픈소스 소프트웨어인 R version 4.2.1(R Project for Statistical Computing, Vienna, Austria)을 활용하여 도출하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

1) 수종별 최적 수고-흉고직경 모형

본 연구에서는 우리나라의 두 수종과 스웨덴의 두 수종에 대하여 7개의 상대성장식을 적용하여 각 계수와 관련 통계량을 산출하고, 이를 기반으로 각 수종에 맞는 최적 상대성장식을 선정하였다. 5차 NFI 자료를 기반으로 분석을 수행한 결과를 살펴보면, PK의 경우 1, 2, 6, 7번 성장식의 R² 값이 0.624로 가장 높았다. 이후 위 네 가지 식의 평균잔차 값을 비교한 결과 5차 NFI에서 PK의 적정 상대성장식은 1번식과 6번식임을 알 수 있었다. 여기서 하나의 식을 바로 선정하지 않고 2개의 식으로 범위를 좁힌 이유는 6차와 7차 NFI 자료에서도 동일한 과정을 통해 성장식을 선별하고, 최종적으로 하나의 식을 선정하기 위함이다. 동일한 방법으로 CH도 적정 상대성장식을 구했을 때, 1번식과 5번식이 5차 NFI에서 적정 상대성장식으로 확인되었다. 동일하게 6차 NFI 각 수종별 적정 상대성장식은 구하면 PK에서는 6번과 7번식이, CH는 1, 2, 6, 7번식이 선정되었다. 마지막으로 7차 NFI에서는 PK의 경우 4번과 6번 식이, CH는 2번 식이 적정 상대

Table 4. Parameter estimates for equations in Table 1 by species using Korean national forest inventory. All estimated parameters were significantly different from zero ($p < 0.005$)

NFI	Species	Parameters				Performance Criteria			
		Model No.	a	b	c	R ²	RMSE	MD	AMD
5th	PK	1	18.119	0.056	1.230	0.624	2.521	0.000	1.933
		2	17.808	0.032	1.143	0.624	2.521	-0.001	1.934
		3	3.020	-11.964	-	0.618	2.541	0.024	1.947
		4	29.752	6.663	0.639	0.623	2.524	0.002	1.932
		5	0.059	0.692	19.104	0.623	2.521	-0.001	1.934
		6	24.010	-18.317	3.875	0.624	2.522	0.000	1.932
		7	21.589	0.019	1.345	0.624	2.522	0.002	1.932
	CH	1	15.473	0.072	1.290	0.565	2.339	0.000	1.706
		2	15.072	0.037	1.184	0.565	2.339	0.001	1.706
		3	2.880	-9.955	-	0.561	2.351	0.013	1.706
		4	25.957	6.055	0.647	0.564	2.342	0.000	1.708
		5	0.078	0.597	16.447	0.565	2.339	0.000	1.706
		6	20.966	-15.133	3.094	0.564	2.341	0.001	1.707
		7	18.594	0.023	1.372	0.564	2.340	0.001	1.707
6th	PK	1	20.724	0.046	1.081	0.668	2.317	-0.004	1.840
		2	20.793	0.038	1.040	0.668	2.318	-0.005	1.841
		3	3.121	-12.361	-	0.664	2.331	0.017	1.843
		4	34.291	6.307	0.600	0.670	2.311	-0.001	1.832
		5	0.046	0.906	21.775	0.668	2.318	-0.005	1.841
		6	26.304	-18.894	4.288	0.669	2.313	-0.001	1.834
		7	25.027	0.022	1.243	0.669	2.314	-0.004	1.836
	CH	1	16.914	0.073	1.420	0.658	2.140	0.000	1.704
		2	16.368	0.029	1.253	0.658	2.140	0.000	1.704
		3	27.221	7.189	-	0.655	2.149	0.011	1.714
		4	27.221	7.189	0.710	0.658	2.142	0.000	1.704
		5	0.08	0.476	17.822	0.658	2.140	-0.001	1.704
		6	23.132	-15.662	2.605	0.658	2.141	0.000	1.704
		7	20.045	0.017	1.465	0.658	2.141	0.000	1.704
7th	PK	1	22.230	0.045	1.096	0.660	2.472	-0.002	1.938
		2	22.172	0.036	1.541	0.660	2.472	-0.003	1.939
		3	3.207	-13.173	-	0.656	2.488	0.016	1.950
		4	36.539	6.615	0.611	0.661	2.470	0.000	1.935
		5	0.045	0.881	23.170	0.660	2.472	-0.003	1.939
		6	28.632	-20.217	4.699	0.661	2.470	0.000	1.936
		7	26.847	0.021	1.255	0.661	2.470	-0.001	1.936
	CH	1	17.943	0.076	1.601	0.680	2.176	0.000	1.742
		2	17.237	0.021	1.347	0.681	2.174	0.001	1.743
		3	3.122	-12.768	-	0.678	0.500	0.010	1.744
		4	27.368	8.860	0.792	0.679	2.181	0.002	1.742
		5	0.086	0.319	18.763	0.680	0.498	0.000	1.743
		6	24.799	-15.998	2.000	0.679	2.180	0.000	1.742
		7	20.831	0.012	1.589	0.680	2.178	0.001	1.742

국내의 수종에 대한 상대성장 변화 분석

Table 5. Parameter estimates for equations in Table 1 by species using Swedish national forest inventory. All estimated parameters were significantly different from zero ($p < 0.005$)

NFI	Species	Parameters				Performance Criteria			
		Model No.	a	b	c	R ²	RMSE	MD	AMD
A	PT	1	27.151	0.042	0.918	0.595	3.567	-0.002	2.725
		2	27.518	0.053	0.918	0.595	3.567	-0.003	2.726
		3	3.316	-10.440	-	0.581	3.630	0.065	2.797
		4	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-
		6	34.033	-19.470	5.901	0.596	3.566	0.000	2.725
		7	34.598	0.035	1.075	0.596	3.566	0.000	2.726
	PC	1	32.696	0.026	1.098	0.612	1.715	-0.003	1.368
		2	32.306	0.019	1.074	0.612	1.715	-0.004	1.368
		3	3.006	-11.586	-	0.594	1.755	0.030	1.396
		4	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-
		6	36.244	-30.517	7.518	0.612	1.716	-0.002	1.369
		7	47.067	0.011	1.119	0.612	1.715	-0.003	1.368
B	PT	1	28.216	0.041	0.901	0.605	3.085	-0.003	1.942
		2	28.640	0.054	0.927	0.605	1.371	-0.001	0.384
		3	3.359	-10.377	-	0.591	3.138	0.042	1.995
		4	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-
		6	34.937	-18.875	5.708	0.605	3.085	-0.001	1.943
		7	35.745	0.036	1.067	0.605	3.084	-0.002	1.942
	PC	1	22.035	0.051	1.233	0.527	2.016	0.001	1.618
		2	20.605	0.028	1.180	0.527	2.016	0.001	1.618
		3	3.075	-11.323	-	0.516	2.039	0.021	1.645
		4	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-
		6	32.249	-24.309	6.056	0.527	2.016	0.000	1.619
		7	29.990	0.018	1.238	0.527	2.016	0.009	1.619
C	PT	1	28.646	0.045	0.892	0.655	3.705	-0.002	2.887
		2	28.947	0.060	0.926	0.655	3.705	-0.001	2.887
		3	3.403	-9.944	-	0.644	3.768	0.082	2.956
		4	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-
		6	35.058	-16.661	4.887	0.655	3.707	-0.001	2.880
		7	35.427	0.040	1.084	0.655	3.707	0.004	2.890
	PC	1	21.445	0.050	1.049	0.452	2.221	-0.001	1.749
		2	21.487	0.044	1.028	0.452	2.221	-0.002	1.749
		3	3.056	-9.888	-	0.446	2.232	0.010	1.760
		4	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-
		6	27.614	-18.257	4.790	0.452	2.221	-0.001	1.749
		7	28.926	0.029	1.127	0.452	2.220	-0.002	1.748

생장식으로 선정되었다. 각 수종의 NFI 차수별 적정 상대생장식을 기반으로, 수종별 최적 상대생장식을 결정할 결과는 Table 4와 같다. CH의 경우 5차 NFI 2번 식이 적정 상대생장식으로 선정되지는 않았지만, 결정계수의 값을 비교했을 때 1, 5번 식과 차이가 없기에 2번 식으로 결정하였다.

스웨덴 수종(PT, PC)에 대해서도 동일한 방법을 적용하여 분석을 진행 하였다. 스웨덴 수종의 경우 4번과 5번 식에 오류가 발생하여 이 두 개의 식은 제외하고 분석을 진행하였다. 먼저 우리나라 5차 NFI와 대응되는 A 기간에 대한 결과를 보면, PT는 6번과 7번 식이 R^2 값이 0.596으로 가장 높고 MD 값도 우수하여 적정 상대생장식으로 선정되었고, PC는 6번 식이 적정 상대생장식으로 나타났다. B와 C 구간에 대한 분석 결과도 동일했으며, 최종적으로 PT와 PC 수종 모두 6번 식이 최적 상대생장식으로 선정되었다.

분석결과를 종합 했을 때, 모형의 적합도(R^2)는 0.45~0.68 수준으로 확인되어 과거 연구들과 마찬가지로 DBH와 수고의 발달은 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다(Lumbres et al., 2011; Kim et al., 2012). 모형의 신뢰도를 평가하는 통계값(R^2 , RMSE, MD, AMD, AIC)들을 종합적으로 검토한 결과 잔차에 대한 가정들도 만족하는 것으로 확인되었다.

2) 수고-DBH 상대생장 분석

각 수종별로 선정된 상대생장식을 기반으로 수고-직경의 성장관계를 분석했을 때 대부분의 수종에서 시간이 흐름에 따라 동일 흉고직경에 대한 수고의 기댓값이 더 커진 것을 확인할 수 있었다. PK의 경우 6번 식을 이용하여 흉고직경 25cm에서 계산되는 수고값이 5차 NFI에서 13.93m, 6차 NFI에서 15.00m, 7차 NFI에서 15.69m로, 총 1.76m의 증가가 나타났다. CH의 경우 1번 식을 이용하여 흉고직경 25cm에서 계산되는 수고값이 5차 NFI에서 13.49m, 6차 NFI에서 14.39m, 7차 NFI에서 15.03m로 총 1.54m의 수고 기댓값에 대한 증가가 확인되었다. 스웨덴 NFI 자료 분석 결과에서도 유사한 결과가 도출되었다. PT의 경우 6번 식을 이용하여 흉고직경 25 cm에서 계산되는 수고값이 A 구간에서 19.32m, B 구간에서 20.10 m, C 구간에서 21.28 m로 총 1.96m의 증가가 확인되었다. PC도 6번 식을 이용하여 흉고직경 25cm에서 추정되는 수고 값이 A 구간에서 14.01m, B 구간에서 15.07m, C 구간에서 15.60 m로 총 1.59 m의 수고 기댓값에 대한 증가가 확인되었다. 그러나 대부분의 수종에서 시간이 지날수록 수고생장의 차이가 눈에 띄게 보이는 반면, PC의 경우 흉고직경 60cm 이후부터 C 구간과 B

구간의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다(Figure 1).

최근 몇몇 연구에서는 대규모 산림지에서 관측된 상대생장 및 생장량의 변화를 보고하고 있다(Chen et al., 2020; Kim et al., 2021; Xu et al., 2021). 중국 북부 및 북동부 지역에서 2000-2010년 동안 NFI 조사구에서 수집된 잎갈나무속(*Larix*) 535개 조사구 자료를 분석한 결과, 수고와 DBH의 발달 관계가 변하고 있으며, 이러한 변화는 온도, 강수량, 습도 등의 기후 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다(Xu et al., 2021). 또한, 캐나다 온타리오 지역의 북방림(Boreal forest) 고정 조사 표본점을 30년간 조사한 결과, 평균 기온과 건조도 등의 요인에 따라 임령-수고-DBH 관계가 변한 것으로 확인되었다(Chen et al., 2020). 한편, 미국 노스캐롤라이나주 듀크 포레스트(Duke Forest)에서 인위적으로 CO_2 농도를 조절한 임분과 그렇지 않은 임분을 비교 분석한 결과, 우세 수종인 로블롤리 소나무(*Pinus taeda* L.)의 실험군이 대조군에 비해 지상부 바이오매스 증가량이 20% 이상 높았고, 직경 생장보다 수고 생장이 더 활발해 상대생장식을 수정할 필요가 있다고 제안되었다(Kim et al., 2021).

아시아 지역에서는 한국과 일본에서 수행된 연구들이 주목할 만하다. 한국의 소나무(*Pinus densiflora*)와 일본의 삼나무(*Cryptomeria japonica*) 등 주요 수종을 대상으로 한 연구에서, 기후 변화가 수고와 DBH 발달 관계에 미치는 영향이 명확히 나타났으며, 특히 온도 상승과 강수량 변화가 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Lee et al., 2022; Nakamura et al., 2023). 유럽 지역에서는 독일의 가문비나무(*Picea abies*)와 스웨덴의 소나무(*Pinus sylvestris*)를 대상으로 한 연구에서, 기후 요인과 토양 조건이 수고와 DBH의 상대생장에 미치는 영향을 분석한 결과, 온도와 강수량 변화가 이들 수종의 생장 패턴에 중요한 역할을 한다는 결과가 도출되었다(Müller et al., 2023; Johansson et al., 2023). 실제로 지난 20년(2001~2020)간 스웨덴과 우리나라의 연평균기온 증가량은 $0.055^\circ C/년$ 과 $0.377^\circ C/년$ 으로 확인되었으며(Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2022; Korea Meteorological Administration, 2022), 이러한 기후변화가 수종별 수고-흉고직경의 상대생장 변화에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

산림 생장 및 탄소 분야에서 모형 기반의 미래 예측 연구는 경험적 자료를 통해 초기값을 설정하는 것이 매우 중요하다. 이러한 모형에서 각 수종의 수고-DBH 상대생장은 산림의 바이오매스 및 탄소량 추정에 중요한 요소로, 상대생장의 변화는 최종 결과에 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 산림자원 평가 및 미래 예측에 대한 불확실성을 낮추기 위해, 수종별 국가 고유 계수와 탄소 추정식 등에 상대생장의 변화를 즉각적으로 반영할 필요가 있다고 판단된다.

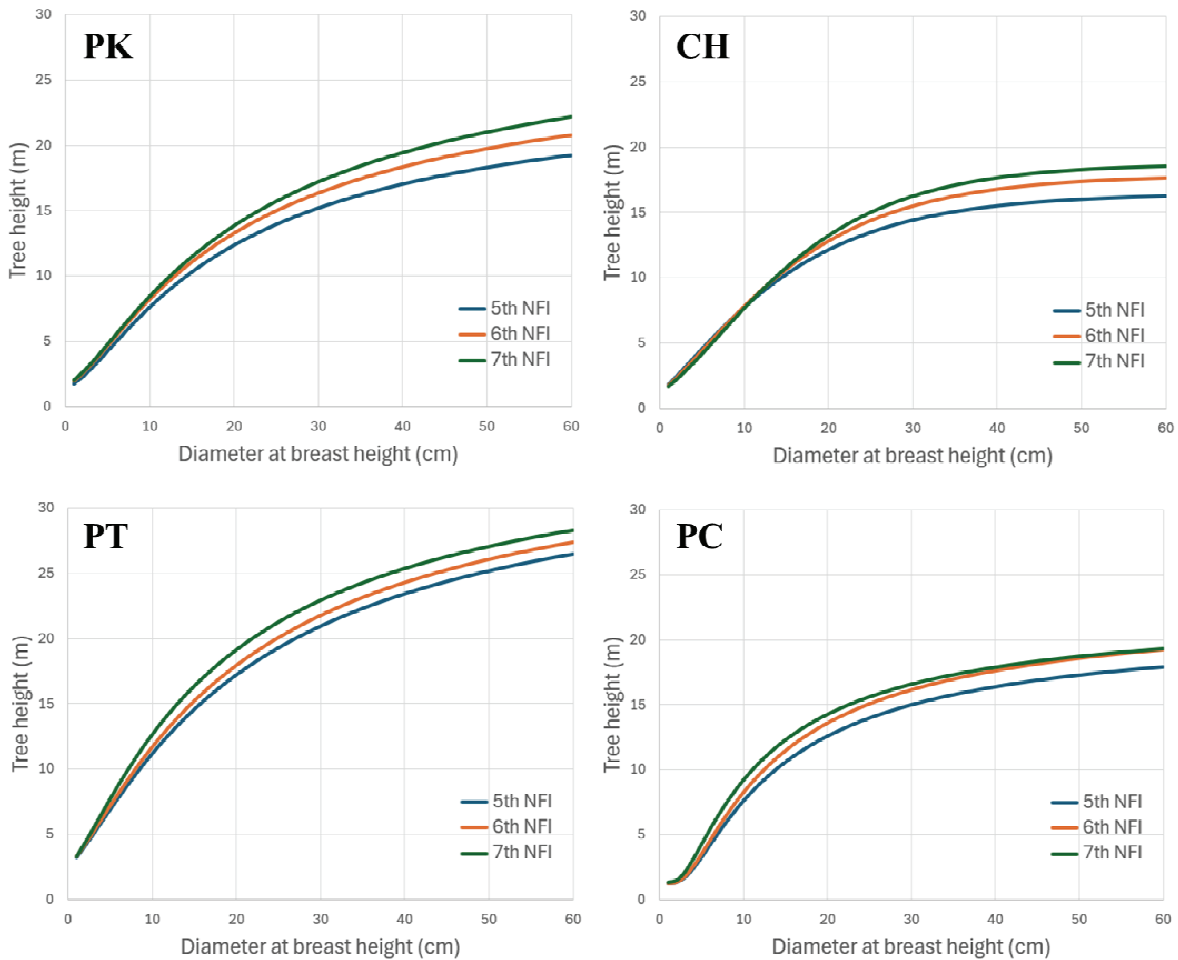


Figure 1. The development of the Height-DBH curves over time for major tree species in South Korea and Sweden. The lines are derived by the optimal developed Height-DBH model for tree species

4. 결 론

본 연구는 우리나라와 스웨덴의 주요 수종을 대상으로 각각 15년 기간의 국가산림자원조사 자료를 활용하여 수고 - 흉고직경 간의 상대성장관계 변화를 분석하고자 하였다. 우리나라 국가산림자원조사 자료에서는 잣나무와 편백나무를, 스웨덴 국가산림자원조사 자료에서는 유럽사시나무와 로지폴 소나무를 선정했으며, 각 수종에 7개의 상대성장식을 적용하고 신뢰도를 평가하여 가장 적합한 상대성장식을 선정하였다. 수종별 최적 상대성장식을 통해 동일 흉고직경(25cm)에 대한 수고 기댓값을 추정한 결과, 7차 국가산림자원조사 자료의 분석 결과는 5차 자료에 비해 1.76 m 더 증가한 것으로 확인되었다. 동일 조건에서 편백나무는 1.54m의 증가가, 스웨덴 수종인 유럽사시나무와 로지폴 소나무는 각각 기대 수고가 1.96,

1.59m가 더 높은 것으로 나타났다. 따라서 국내뿐만 아니라 해외에서도 동일 흉고직경 대비 수고의 생장이 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 이는 우리나라뿐만 아니라 해외의 수종의 경우에도 수고 - 흉고직경 간의 상대생장이 변화되고 있다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 변화를 국가 산림의 탄소계정에 반영하는 것이 필요하며, 주기적인 모니터링을 통한 국가 배출계수 및 탄소량 추정 모형 등에 대한 보완이 이루어져야 할 것이다.

Acknowledgements

본 연구를 위해 스웨덴 NFI 자료를 제공해주신 스웨덴 농업과학대학(Swedish University of Agricultural Sciences)의 임형우 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

References

- Arcangeli, C., Klopf, M., Hale, S.E., Jenkins, T.A.R. and Hasenauer, H. 2014. The uniform height curve method for height-diameter modelling: an application to Sitka spruce in Britain. *Forestry* 87(1): 177-186.
- Chapman D.G. 1961. Statistical problems in dynamics of exploited fisheries populations. In: Neyman J, editor. Proc. 4th Berkeley Symp. on Mathematical Statistics and Probability. Vol. 4. Berkeley, CA. pp. 153-168.
- Chen, J., Yang, H., Man, R., Wang, W., Sharma, M., Peng, C., Parton, J., Zhu, H. and Deng, Z. 2020. Using machine learning to synthesize spatiotemporal data for modelling DBH-height and DBH-height-age relationships in boreal forests. *Forest Ecology and Management* 466: 118104.
- Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R., Valentini, R., Bernoux, M. and Saint-André, L. 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica* 45(3): 477-569.
- Huang, J.G., Bergeron, Y., Denneker, B., Berninger, F. and Tardif, J. 2007. Response of Forest Trees to Increased Atmospheric CO₂. *Critical Reviews in Plant Sciences* 26: 265-283.
- Huang, S., Titus, S.J. and Wiens, D.P. 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1297-1304.
- Jung, S., Seo, Y., Lee, D. and Choi, J. 2022. A Study on the Growth Change by DBH Class in Korean White Pine Plantations. *Journal of Korean Society of Forest Science* 111(1): 125-135.
- Kim, D., Medvigy, D., Maier, C.A., Johnsen, K. and Palmroth, S. 2020. Biomass increases attributed to both faster tree growth and altered allometric relationships under long-term carbon dioxide enrichment at a temperate forest. *Global Change Biology* 26(4): 2519-2533.
- Kim, J.S., Son, Y. and Kim, Z.S. 1995. Allometry and canopy dynamics of *Pinus rigida*, *Larix leptolepis*, and *Quercus serrata* stands in Yangpyeong area. *Journal of Korean Society of Forest Science* 84(2): 186-197.
- Kim, M., Park, T., Ko, Y., Choi, G., Son, S., Kang, Y., Yoo, J., Kim, M., Park, H. and Lee, W.K. 2023. Analysis of Changes in Tree Height-Diameter Allometry for Major Tree Species in South Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 112(1): 71-82.
- Kim, M., Kraxner, F., Forsell, N., Song, C. and Lee, W.K. 2021. Enhancing the provisioning of ecosystem services in South Korea under climate change: The benefits and pitfalls of current forest management strategies. *Regional Environmental Change* 21(1): 1-10.
- Kim, M., Kraxner, F., Son, Y., Jeon, S.W., Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Ham, B.Y., Lim, C.H., Song, C., Hong, M. and Lee, W.K. 2019. Quantifying impacts of national-scale afforestation on carbon budgets in South Korea from 1961 to 2014. *Forests* 10(7): 579.
- Kim, M., Lee, W.K., Park, T., Kwak, H., Byun, J., Nam, K., Lee, K.H., Son, Y.M., Won, H.K. and Lee, S.M. 2012. Developing dynamic DBH growth prediction model by thinning intensity and cycle-based on yield table data. *Journal of Korean Society of Forest Science* 101(2): 266-278.
- Korea Meteorological Administration. 2022. Annual Climatological Report. Korea Meteorological Administration, Daejeon 35208, Republic of Korea.
- Lee, J., Han, S.H., Kim, S., Chang, H., Yi, M.J., Park, G.S., Kim, C.S., Son, Y.M., Kim, R. and Son, Y. 2015. Estimating the Changes in Forest Carbon Dynamics of *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* Forests in South Korea under the RCP 8.5 Climate Change Scenario. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 17(1): 35-44.
- Lumbres, R.I.C., Lee, Y.J., Seo, Y.O., Kim, S.H., Choi, J.K. and Lee, W.K. 2011. Development and validation of nonlinear height-DBH models for major coniferous tree species in Korea. *Forest Science and Technology* 7(3): 117-125.
- Na, Y., Lee, D. and Kim, T. 2022. Application of i-Tree Eco for Ecological Evaluation of Street Trees. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 22(2): 15-25.
- National Institute of Forest Science. 2013. The 5th National Forest Inventory Report; National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- Pang, X., Nordström, E., Böttcher, H., Trubins, R. and Mörtberg, U. 2017. Trade-offs and synergies among ecosystem services under different forest management scenarios-The LEcA tool. *Ecosystem Services* 28: 67-79.
- Ratkowsky D.A. and Reedy T.J. 1986. Choosing near-linear

- parameters in the four-parameter logistic model for radioligand and related assays. *Biometrics* 42: 575–582.
- Ratkowsky, D.A. 1990. *Handbook of Nonlinear Regression*. New York: Marcel Dekker.
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of experimental Botany* 10(2): 290-301.
- Schnute J. 1981. A versatile growth model with statistically stable parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38: 1128–1140.
- Seo, J.H., Lee, W.K., Son, Y. and Ham, B.Y. 2001. Dynamic Growth Model for *Pinus densiflora* Stands in Anmyun-Island. *Journal of Korean Society of Forest Science* 90(6): 725-733.
- Son, Y.M., Lee, K.H. and Pyo, J.K. 2011. Development of biomass allometric equations for *Pinus densiflora* in central region and *Quercus variabilis*. *Journal of Agriculture and Life Science* 45(4): 65-72.
- Son, Y.M., Lee, S.J., Kim, S.W., Hwang, J.S., Kim, R. and Park, H. 2014. Mapping and Assessment of Forest Biomass Resources in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 103(3): 431–438.
- Son, Y.M., Kim, R.H., Lee, K.H., Pyo, J.K., Kim, S.W., Hwang, J.S., Lee, S.J. and Park, H. 2014. Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations by Species in Korea. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- Stage, A.R. 1963. A mathematical approach to polymorphic site index curves for grand fir. *Forest Science*. 9(2): 167-180. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Temperature Increase in Sweden (Accessed June 9, 2024. <https://www.smhi.se>).
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C.A., Corral-Rivas, J.J., López-Martínez, J.O., Aguirre-Calderón, C.G. and Álvarez-González, J.G. 2017. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests* 8(8): 269.
- Vorster, A.G., Evangelista, P.H., Stovall, A.E. and Ex, S. 2020. Variability and uncertainty in forest biomass estimates from the tree to landscape scale: The role of allometric equations. *Carbon Balance and Management* 15(1): 1-20
- Xu, Q., Lei, X., Zang, H. and Zeng, W. 2022. Climate Change Effects on Height-Diameter Allometric Relationship Vary with Tree Species and Size for Larch Plantations in Northern and Northeastern China. *Forests* 13(3): 468.
- Yang, R.C., Kozak, A. and Smith, J.H.G. 1978. The potential of Weibull-type functions as a flexible growth curve. *Canadian Journal of Forest Research* 8: 424–431.
- Yuancai, L. and Parresol, B.R. 2001. Remarks on Height-Diameter Modeling, USDA For. Serv. Research Note SRS-10, Southern Research Station, pp. 5.
- Zeide B. 1989. Accuracy of equations describing diameter growth. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1283–1289.

-
- Received 16 May 2024
 - Finally Revised 10 June 2024
 - Accepted 17 June 2024

딥러닝 기법을 활용한 임상 및 수종 분류 정확도 평가

심우담¹ · 이상진¹ · 이정수^{2*}

¹강원대학교 산림경영학과 · ²강원대학교 산림과학부

Accuracy Assessment of Forest Type and Tree Species Classification Using Deep Learning Techniques

Woo-Dam Sim¹ · Sang-Jin Lee¹ · Jung-Soo Lee^{2*}

¹Department of Forest management, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

²Division of Forest Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

요약 : 본 연구는 위성영상을 기반으로 딥러닝 모델을 활용하여 임상 및 수종 분류를 수행하였다. 딥러닝 모델은 CNN(Convolutional Neural Network) 구조의 DeeplabV3+ 모델과 Transformer 기반의 Swin-Unet을 활용하였으며, 데이터세트는 분광정보와 식생지수의 조합에 따라 Dataset A(4채널, 분광정보), Dataset B(7채널, 분광정보+식생지수)를 활용하여 식생지수가 임상 및 수종 분류 정확도에 미치는 영향력을 평가하였다. 데이터세트 구성에 따른 분류 정확도 평가 결과, 임상분류 과정에서는 표면반사율 정보에 식생지수를 추가로 활용함에 따라 분류정확도가 향상되었으나, 반대로 수종분류 과정에서는 분류 정확도가 소폭 감소하였다. 딥러닝 모델 별 분류정확도 비교결과, 학습시간의 경우, DeeplabV3+ 모델이 적게 소요되었지만 분류 정확도는 Swin-Unet을 이용했을 경우 더 우수하였다. 임상 분류 과정에서는 Dataset B를 활용한 Swin-Unet이 전체정확도(OA; Overall Accuracy)기준 평균 약 75.1%로 가장 높은 정확도를 보였으며, 수종 분류에서는 Dataset A를 활용한 Swin-Unet이 전체정확도 기준 평균 약 45.3%로 가장 높은 정확도를 보였다.

ABSTRACT : This study utilized deep learning models based on satellite imagery to classify forest types and species. The deep learning models used were the CNN-based DeeplabV3+ and the Transformer-based Swin-Unet. The datasets were prepared to Dataset A (4 channels, spectral information) and Dataset B (7 channels, spectral information + vegetation indices) by a combination of spectral information and vegetation indices, and then the impact of vegetation indices on the classification accuracy of forest type and species segmentation were assessed. The result of classification accuracy based on dataset composition showed that the addition of vegetation indices to surface reflectance information could improve the accuracy in forest type classification while the accuracy for tree species segmentation reduced. When comparing the each classification accuracy by used deep learning models, DeeplabV3+ required approximately 10 minutes less for training time, and Swin-Unet showed higher performance in terms of classification accuracy. In forest type classification, Swin-Unet using Dataset B was estimated at the highest overall accuracy 75.1% whereas Swin-Unet using Dataset A was assessed at the highest overall accuracy 45.3% in species segmentation.

Key words : Tree Species, Forest Type, Deep Learning, DeeplabV3+, Swin-Transformer

Corresponding author : Jung-Soo Lee

Tel : 033-250-8334

E-mail : jslee72@kangwon.ac.kr

I. 서 론

산림은 토지에 있어 가장 중요한 생태자원이며, 산림의 경영 및 관리는 생물다양성의 보호와 에너지 순환의 안정성을 유지하는 데 중요한 역할을 한다(Mohd and Abd, 2017; Cifuentes-Croquevielle et al., 2020). 특히, 산림 수종의 정확한 조사는 경영자와 관리자가 산림의 종 구성과 수종 변화, 자원량을 정확히 이해하게 도와주며, 이는 산림정책을 효과적으로 수립하는 데 필수적인 요소이다(Grabska et al., 2019). 과거 산림자원량 및 수종 정보를 구축하기 위해서는 전통적인 산림조사 방법을 수행하였으나, 지형이 복잡하고 접근성이 낮은 지역은 많은 인력과 비용을 소요하기 때문에 원격탐사 기법을 활용한 연구가 활발히 진행되었다(Kükenbrink et al., 2022).

초기 원격탐사 기법을 활용한 수종 분류 연구는 최대 우도법, 최단거리법 등의 감독분류 방법과 Random Forest와 SVM(Support Vector Machine)과 같은 기계학습 분류 기법, 객체분할 분류기법 등의 방법이 활용되었다(Somers and Asner, 2014; Lee et al., 2016; Mishra et al., 2018). 이러한 방법들은 분광특성, 질감정보, 식생지수 산출 등 분류를 위한 연구자의 주관적인 설계가 필요하며, 연구자의 전문성과 함께, 광범위한 전문지식이 요구된다(Moisen et al., 2016; Franklin and Ahmed, 2018). 또한, 기계학습 분류 기법은 고정된 특성을 기반으로 학습되므로, 복잡한 지형이나 다양한 조건에서 나타나는 영상의 다양성과 복잡성을 완전히 반영하기 어렵기 때문에 새로운 데이터에 대한 일반화 능력에 한계점을 가지고 있다(Atkinson and Tatnall, 1997; Mountrakis et al., 2011). 이러한 한계점에 따라 원격탐사 기반의 영상 분류에서는 보다 고도화된 분석기법의 필요성이 제기 되었다. 특히, 2015년 ILSVRC(ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge)에서 인간의 추정 오차율인 5-10%를 크게 넘어서는 성능을 보인 ResNet 모델이 발표되면서, 이후로 딥러닝 기법에 대한 연구가 활발히 진행되었다(He et al., 2016). 합성곱 신경망(CNN; Convolutional Neural Network) 기반의 딥러닝 모델은 공간적 특성을 파악하는 과정에서 뛰어난 성능을 발휘하는 장점이 있다. Long et al.(2015)는 Semantic Segmentation을 위해 CNN구조의 Fully Convolutional Networks (FCNs)을 제안하였으며, 픽셀단위의 레이블을 정밀하게 예측하는 모델을 개발하였으며, 현재까지 딥러닝 모델의 정확도 향상을 위한 기준 모델로 널리 활용되고 있다. Ronneberger et al.(2015)는 U-Net 모델을 개발하여 높은 분류정확도를 보였으며, 특히, 데이터가 제한적인 의료 영상 분석 분야에서 뛰어난 성능을 보여주었다. U-Net에서 제안한 Skip-Connection 구조는 효

율적인 구조로 인해 상세한 Contextual Information과 위치 정보의 학습을 가능하게하여 현재까지도 많은 파생모델이 개발되고 있다. 또한, 최근 다수 연구되고 있는 Transformer 기반의 딥러닝 알고리즘은 주목 메커니즘(Attention Mechanism)을 통해 영상의 다양한 부분을 효과적으로 파악하고, 전체 영상의 맥락을 이해하는 데 유리한 구조를 가지고 있다(Zhang et al., 2016; Geng et al., 2024; Xu et al., 2024). 따라서, 본 연구는 CNN기반의 대표적인 모델인 DeeplabV3+ 모델과 Transformer 기반의 대표적인 모델인 Swin-Transformer를 활용하여 딥러닝 모델 기반의 임상 및 수종 분류 연구를 수행하고, 정확도 평가를 통해 수종분류 과정에서 딥러닝 모델의 활용가능성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

연구대상지는 강원도 춘천시 동산면과 홍천군 북방면(경도 127°47'19.4"~127°51'57.4" 위도37°45'16.5"~37°50'44.2")에 위치한 강원대학교 학술림(약 3,141ha)을 대상으로 하였다. 강원대학교 학술림의 산림현황은 산림청 대축척 수치임상도 기준 활엽수림이 전체면적의 약 66.7%로 가장 넓은 비율을 차지하며, 침엽수림(약 25.6%), 혼효림(약 5.6%)순으로 분포한다. 활엽수림에서는 기타참나무류(약 44.0%), 기타활엽수(약 31.4%), 신갈나무(약 20.9%)가 전체 활엽수림 면적의 약 96.3%로 우점하고 있으며, 침엽수림에서는 잣나무(약 63.8%), 낙엽송(약 21.8%), 소나무(약 13.3%)가 전체 침엽수림 면적의 약 98.9%를 차지하고 있다. 영급 구성으로는 V영급이 연구대상지 전체 면적의 약 37.6%로 가장 넓은 면적을 차지하며, IV영급(약 31.1%), III영급(약 17.3%) 순으로 넓은 분포를 보인다(Figure 1).

2. 연구방법

본 연구에서는 위성영상의 표면반사율(SR; Surface Reflectance) 정보와 식생지수를 기반으로 딥러닝 기법을 통해 임상 및 수종 분류지도를 구축하고 정확도 평가를 수행하였다. 딥러닝 모델은 CNN기반의 대표적인 모델인 DeeplabV3+ 모델과 Transformer 기반의 대표적인 모듈인 Swin-Transformer와 Unet 모델을 결합한 Swin-Unet 모델 두가지 모델을 활용하였다. 또한, 분광정보와 식생지수의 조합에 따라 데이터셋을 구축하여 입력자료의 구성에 따른 분류 정확도를 비교·평가 하였다(Figure 2).



Figure 1. Study area

1) 딥러닝 모델의 데이터세트 구축

딥러닝 모델의 데이터세트는 학습자료와 검증자료, 테스트자료로 구성하였다. 학습, 검증, 테스트 자료는 입력 이미지와 라벨 이미지로 구성되며, 입력 이미지는 2023년 9월 8일에 촬영된 PlanetScope 위성영상이며, 기하보정이 적용된 Level2 영상을 활용하였다. PlanetScope 위성영상의 공간해상도는 3m이며, 16bit로 기록된 4개의 표면반

사율 정보(Red, Green, Blue, NIR)를 포함하고 있다. 본 연구에서는 임상 및 수종분류 과정에서 표면반사율 정보 뿐 아니라 식생지수의 추가활용에 따른 분류정확도 개선 여부를 검토하기 위해 표면반사율 정보를 기반으로 3가지 식생지수(NDVI, PVI, SR)를 산출하여 표면반사율 정보와 식생지수 조합에 따라 2가지 데이터세트(Dataset A, Dataset B)를 구성하였다. Dataset A는 위성영상의 4가지

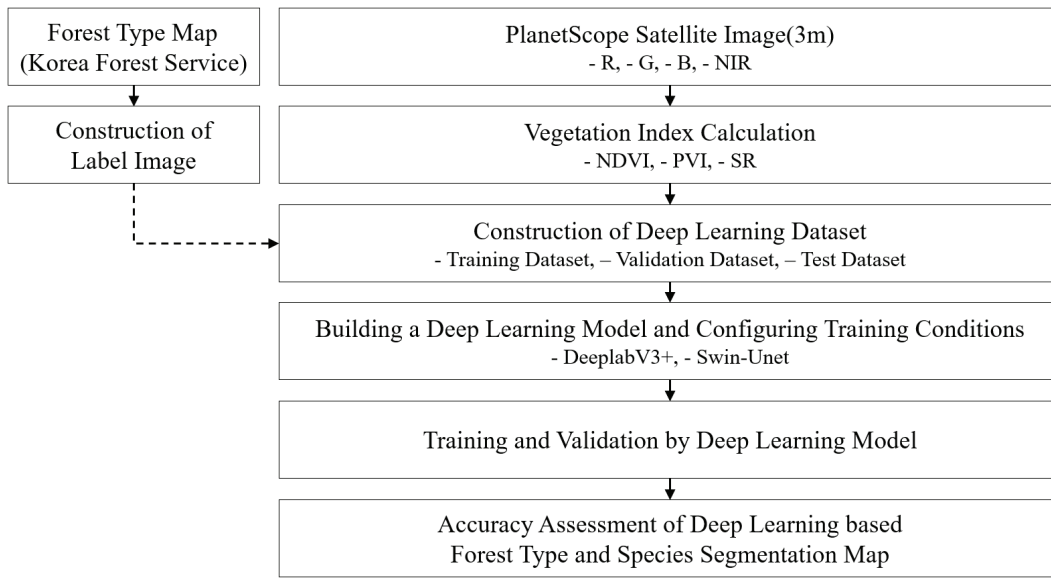


Figure 2. Research method

표면반사율 정보를 그대로 활용한 데이터셋이며, Dataset B는 표면반사율 정보에 3가지 식생지수를 추가하여 7개의 채널 정보를 가진 입력 이미지로 구성되어 있다. 식생지수 중 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)는 식생 피복 탐지, LAI(Leaf Area Index) 추정에 유용하며, 엽록소에 대한 민감도로 인해 가장 널리 활용되는 식생지수이다(Matsushita et al., 2007). 이미지의 Red 정보와 근적외선 정보를 활용하여 계산되며 식 1과 같이 표현된다. PVI(Perpendicular Vegetation Index)는 토양 배경 효과를 최소화하기 위해 식생의 반사율 정보를 토양 반사율 정보에 수직으로 투영하여 계산되는 식생지수이며 바이오매스, 엽록소 함량과 같은 생태적 변수와의 상관관계를 분석할 때 유용하다고 알려져 있다(Panda et al., 2010). PVI는 식 2와 같이 표현되며, a는 토양 선의 기울기, b는 토양 선의 경사도를 의미하며 본 연구에서는 각각 0.3, 0.5를 적용하였다. SR(Simple Ratio Index)는 NIR을 Red 반사율로 나누어 계산되는 단순한 방식이지만 식생 건강 및 활력도에 대한 직관적인 변화량을 나타내기 때문에 널리 사용되고 있다(식 3)(Zeng et al., 2022).

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

$$PVI = \frac{(\rho_{nir} - a \times \rho_{red} - b)}{\sqrt{(1 + a^2)}} \quad (2)$$

$$SR = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}} \quad (3)$$

분류할 이미지의 참값에 해당하는 라벨 이미지는 임상 구분을 위한 이미지와, 수종구분을 위한 이미지 2종류가 있으며, 산림청의 대축척 수치임상도를 기반으로 구축하였다. 먼저 위성영상과 수치임상도를 중첩하여 별채, 숲 가꾸기와 같은 산림경영활동이 수행된 지역, 임도가 개설된 지역은 육안판독을 통해 무렵목지 범주로 속성정보를 변경하였다. 속성정보가 수정된 수치임상도의 임상정보는 Raster 형식의 라벨 이미지로 구축하였다. 수치임상도의 수종정보는 전체 면적의 1% 미만으로 분포하는 수종의 경우, 기타침엽수, 기타활엽수 등의 범주로 통합하여 총 10종류의 수종정보가 기록된 라벨 이미지로 구축하였다 (Table 1).

데이터셋의 이미지 크기는 128×128 Pixel 크기로 설정하였으며, 입력이미지 및 라벨 이미지를 해당 크기로 분할하여 타일형태의 이미지로 구축하였다. 분할한 타일 이미지는 랜덤샘플링 기법을 통해 연구대상지의 약 30% 면적에 해당하는 이미지를 선정하였으며, 7:3의 비율로 각각 학습자료, 검증자료로 활용하였다. 테스트 자료는 이미지 외각 부분의 분류 정확도가 낮아지는 단점을 해결하기 위해 타일 형태의 이미지로 분할하는 과정에서 50%의 중첩률을 적용하였다. 학습자료는 총 45개의 이미지를 구축하였으며, 검증자료는 19개의 이미지, 테스트자료는 2,337개의 이미지를 구축하였다.

2) 임상 및 수종 분류를 위한 딥러닝 모델 구축

임상 및 수종별 면적 추정을 위해 Semantic Segmentation 기반의 딥러닝 모델을 활용하였으며, CNN(Convolutional

Table 1. Forest type and species information for study area for generating label images

Unit : ha

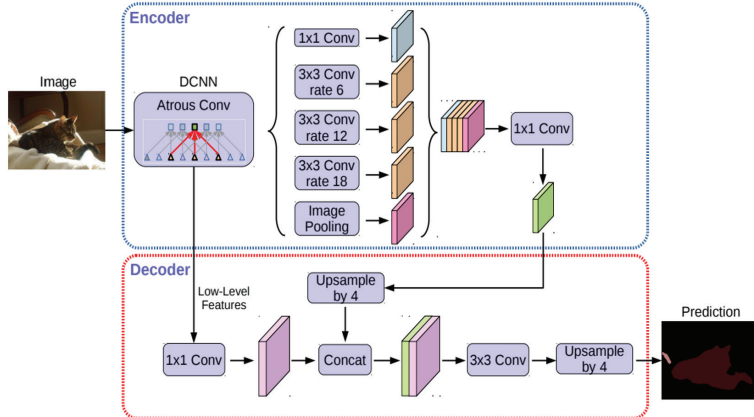
Forest Type	Forest Type Map		Modified Forest Type Map	
	Species	Area	Species	Area
Coniferous Forest	<i>Pinus densiflora</i>	106.8(3.4%)	<i>Pinus densiflora</i>	106.8(3.4%)
	<i>Pinus koraiensis</i>	514.0(16.4%)	<i>Pinus koraiensis</i>	514.0(16.4%)
	<i>Larix kaempferi</i>	175.8(5.6%)	<i>Larix kaempferi</i>	175.8(5.6%)
	Other Coniferous Trees	1.8(0.1%)	Other Coniferous Trees	8.7(0.3%)
	<i>Pinus rigida</i>	3.9(0.1%)		
	<i>Abies holophylla</i>	2.4(0.1%)		
	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.5(0.0%)		
Deciduous Forest	<i>Quercus mongolica</i>	437.9(13.9%)	<i>Quercus mongolica</i>	437.9(13.9%)
	<i>Quercus variabilis</i>	68.5(2.2%)	<i>Quercus variabilis</i>	68.5(2.2%)
	Other Quercus Trees	922.8(29.4%)	Other Quercus Trees	922.8(29.4%)
	<i>Castanea crenata</i>	0.9(0.0%)	Other Deciduous Tree	666.2(21.2%)
	<i>Liriodendron tulipifera</i>	1.1(0.1%)		
	<i>Betula pendula</i>	4.2(0.1%)		
	<i>Populus</i>	2.1(0.1%)		
	<i>Juglans regia</i>	0.6(0.0%)		
	Other Deciduous Tree	657.3(20.9%)		
Mixed Forest	176.1(5.6%)	Mixed Forest	176.1(5.6%)	
Un-stocked Forest	64.2(2.0%)	Un-stocked Forest	64.2(2.0%)	
Total	3,141.1(100.0%)	Total	3,141.1(100.0%)	

Neural Network)구조 기반의 대표적인 딥러닝 모델인 DeeplabV3+ 모델과 Transformer 모듈 기반의 대표적인 모델인 Swin-Transformer를 활용하였다.

DeeplabV3+ 모델은 Chen et al.(2018)이 개발한 딥러닝 모델로 ASPP(Atrous Spatial Pyramid Pooling)를 활용하여 입력 이미지의 다양한 스케일에서 특징정보를 추출하는 특징을 가지고 있으며 기존 선행 연구에 따르면, DeeplabV3+는 침엽수림, 시설재배지 등에서 높은 정확도를 도출할 수 있는 장점이 있다(Lee and Lee, 2020). ASPP는 일반적인 컨볼루션 레이어와 달리, 필터 내부에 Stride를 통해 빈 공간을 두고 연산하여, 동일한 양의 파라미터와 계산량을 유지하면서도 픽셀의 계산영역을 넓히는 것이 특징이다. Figure 3-a와 같이 DeeplabV3+는 Backbone Network에서 추출한 특징맵을 ASPP 연산을 통해 추가적인 특징정보를 구축하며, 디코더에서 Low-Level 특징맵과 ASPP로 연산한 특징맵을 결합하여 활용하는 구조이다. DeeplabV3+의 Backbone Network는 주로 Resnet 계열의 모델과 Xception, Mobilenet 등의 모델이 활용되며, 선행연구를 참조하여 본 연구에서는 Xception 모델을 Backbone Network로 활용하였다.

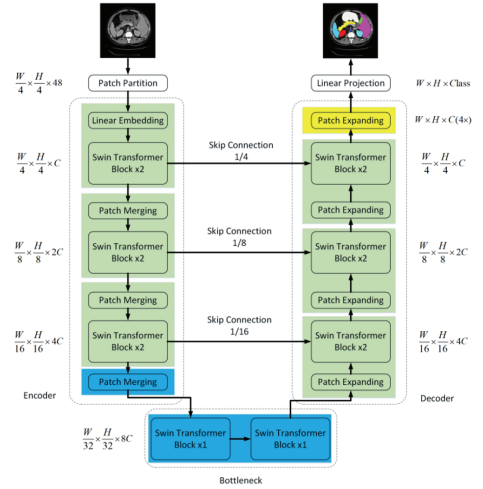
Swin-Transformer는 Liu et al.(2021)에 의해 개발된 딥

러닝 모델로 영상 분류(Image Classification) 분야에서 사용되는 ViT(Vision Transformer)를 위한 모델이다. Swin-Transformer는 Stage1-4까지 계층적 구조를 가지며, 각 레이어를 거치면서 점진적으로 고해상도의 특징에서 저해상도의 특징으로 정보를 집약시키는 구조로 구성된다. Swin-Transformer의 주요 특징 중 하나는 윈도우 기반의 처리방식으로, 모델의 각 단계에서 이동하는 윈도우를 통해 특징맵을 처리하며, Self-Attention 연산을 통해 주변 패치들과의 관계성을 계산하게 된다. 이 과정에서 이웃의 윈도우와 정보교환이 동적으로 발생하게 되며, 이러한 연산방법은 계산량을 상당히 줄이면서도 모델의 성능을 최적화 하는 방식으로 알려져 있다. 한편, Swin-Transformer는 ViT기반의 모듈이기 때문에 이미지 내부의 패치들간의 상관관계나 특징정보를 추출할 수 있지만, 추출한 특징정보를 원본 이미지 크기로 복원 및 확장 하려면 패치들 간의 위치정보를 기록하는 Positional Encoding 과정이 필요하며, CNN 구조의 디코더와 같은 기법을 통해 이미지를 복원하여야 한다. Cao et al.(2022)는 이러한 문제를 해결하기 위해 Swin-Transformer와 같이 계층적 구조를 가진 인코더 및 디코더 구조의 Unet 모델과 Swin-Transformer를 결합한 Swin-Unet 모델을 개발하였다. Swin-Unet은



Encoder-Decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation (Chen et al., 2018).

a. DeeplabV3+



Swin-Unet: Unet-like pure transformer for medical image segmentation (Cao et al., 2022).

b. Swin-Unet

Figure 3. Deep learning model for forest type and species classification

Figure 3-b와 같이 특징정보를 추출하는 합성곱 레이어를 Swin-Transformer가 담당하며, 각 계층의 특징맵을 디코더로 전달하여 복원하는 구조로 구성되어 있다. 본 연구에서는 DeeplabV3+와 Swin-Unet 모델을 통해 수종 및 임상별 분류지도를 구축하고 모델간의 분류 정확도를 비교·평가하였다.

3) 딥러닝 모델의 학습 조건 설정 및 분류 정확도 평가

본 연구에서는 데이터셋의 입력채널 구성(4개 채널, 7개 채널)과 2가지 딥러닝 모델(DeeplabV3+, Swin-Unet), 분류범주(임상, 수종)을 고려하여 딥러닝 모델을 학습하고 학습한 모델을 기반으로 분류지도를 구축하여 라벨 이미지와의 비교를 통해 정확도를 평가하였다. 딥러닝 모델의 학습 조건은 모든 모델에서 동일하게 설정하였으며, 딥러닝 모델의 일반화 성능 평가를 위해 5회 반복 학습하여 학습 및 검증 과정을 진행하였다. 딥러닝 모델의 학습횟수인 Epoch는 1,000회로 설정하였으며, 학습율을 조정하는 Optimizer와 Learning Rate Scheduler는 선행 연구를 참조하여 AdamW Optimizer와 OneCycleLR 기법을 통해 유동적으로 학습율을 조정하도록 설정하였다 (Loshchilov and Hutter, 2018; Smith and Topin 2019). 학습과정에서 손실값을 계산하는 손실함수는 Semantic Segmentation 분야에서 널리 사용되고 있는 Cross Entropy 기법을 활용하였다(Zhang and Sabuncu, 2018). 딥러닝 모델의 분류 정확도는 학습이 완료된 딥러닝 모델을 타일 형태로 분할된 테스트 자료 이미지에 적용하여 모자이크 기법을 통해 1개 Scene 형태의 분류지도를 구축하고, 연

구대상지 전체지역의 라벨 이미지와의 비교를 통해 정확도를 평가하였다. 정확도 평가 과정에서는 라벨 이미지와 딥러닝 기반 분류지도 간의 일치도를 확인하기 위해 혼동행렬(Confusion Matrix)을 작성하고 전체 정확도(Overall Accuracy)와 Kappa 계수를 통해 모델의 분류 성능을 정량적으로 평가하였다(Rouhi et al., 2015; Huang and Rust, 2018)(식 4, 5, 6). 범주별 분류 정확도의 경우, 정밀도(Precision)와 재현율(Recall)을 기반으로 F1-Score를 산출하여 정확도를 평가하였다(식 7, 8, 9).

$$Overall Accuracy(OA) = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (4)$$

$$kappa = \frac{OA - p_e}{1 - p_e} \quad (5)$$

$$p_e = \left(\frac{TP+FN}{TP+FN+FP+TN} \times \frac{TP+FP}{TP+FN+FP+TN} \right) + \left(\frac{FP+TN}{TP+FN+FP+TN} \times \frac{FN+TN}{TP+FN+FP+TN} \right) \quad (6)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (7)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (8)$$

$$F_1 - Score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (9)$$

III. 결과 및 고찰

1. 딥러닝 학습자료의 범주별 분포 특성

딥러닝 학습자료 중 임상 분류를 위한 데이터세트는 활엽수림이 전체 학습자료 면적의 약 65.9%로 가장 많은 면적을 차지하고 있다. 혼효림과 무림목지의 경우 전체 학습자료의 6% 미만의 면적을 차지하고 있으며 범주간 불균형 분포를 이루고 있다(Table 2). 범주별 SR 분포는 침엽수림과 활엽수림, 혼효림의 경우 Red가 57~65 사이의 유사한 분포를 보였으나 NIR의 경우, 침엽수림은 활엽수림 및 혼효림에 비해 평균 약 260 낮은 분포를 보였다. 무림목지의 경우 침엽수림, 활엽수림, 혼효림에 비해 Red가 높고 NIR이 낮은 분포를 보이며 유의한 차이를 나타내었다. 범주별 식생지수의 분포 특성은 NDVI 및 SR의 경우, 무림목지가 타 범주에 비해 낮은 분포를 보였으며 침엽수림과 활엽수림, 혼효림 범주간의 유의한 차이는 발생하지 않았다. PVI의 경우, 무림목지와 침엽수림이 활엽수림과 혼효림에 비해 약 250 낮은 값으로 분포하여 유의한 차이를 보였다.

수종 분류를 위한 데이터세트는 기타참나무류가 약 26.3%로 학습데이터 중 가장 많은 면적을 차지하고 있으며, 기타활엽수(약 19.9%), 신갈나무(약 17.4%)가 많은 면적을 차지하고 있다. 범주별 표면 반사율 분포는 대부분 범주간 분포특성이 유사하였으나 무림목지의 경우, 타 범주보다 Red가 높고 NIR이 낮은 분포를 보였다. 또한, 소

나무와 신갈나무는 타 범주에 비해 NIR이 높은 값으로 분포하였다. 범주별 식생지수의 분포 특성 비교결과, NDVI와 SR은 무림목지를 제외한 범주들은 유사한 분포를 보였으며, 무림목지는 타 범주에 비해 낮은 분포를 보였다. PVI의 경우, 낙엽송은 타 범주에 비해 낮은 분포를 보였으며, 반대로 신갈나무와 소나무는 높은 값으로 분포하였다. 입력 이미지로 활용한 위성영상은 9월에 촬영된 생육시기의 영상이기 때문에 범주간 분광분포 특성에서 유의한 차이가 발생하지 않은 것으로 판단되며, 임상 및 수종구분을 위해서는 다시기 영상의 활용이 필요할 것으로 판단된다.

2. 딥러닝 모델 별 학습 및 검증

딥러닝 모델의 학습 및 검증정확도는 Epoch 1,000 기준, 같은 조건으로 5회 반복 학습한 결과를 측정하였다(Table 3). 임상 분류 과정에서는 모든 모델의 학습정확도가 평균 약 82% 이상의 정확도를 보였으며, 검증 정확도는 학습 정확도에 비해 약 10% 이상 낮은 과적합 현상이 발생하였다. 과적합 현상은 모델이 학습자료에 지나치게 최적화되어 새로운 데이터에 대한 일반화 능력이 저하되는 현상으로, 본 연구에서 활용한 학습자료가 활엽수림에 치중되어 있기때문에 데이터의 불균형으로 인한 과적합이 발생한 것으로 판단된다(Das, 2024; Talukder et al., 2024). 이에 따라 향후, 데이터세트의 범주별 다양성과 균형을 고려하여 모델의 일반화 성능 향상이 필요할 것으로 판단된다. 데이터세트에 따른 분류 정확도 비교결

Table 2. Spectral characteristics and vegetation index distribution of deep learning training data

Categories	Area Distribution	Surface Reflectance		Vegetation Index			
		Red	NIR	NDVI	PVI	SR	
Forest Type	Coniferous Forest	24.8%	62±26	2,650±627	0.90±0.02	2,497±593	19.1±3.0
	Deciduous Forest	65.9%	57±26	2,912±745	0.91±0.02	2,747±705	20.3±3.2
	Mixed Forest	5.9%	65±23	2,915±565	0.90±0.03	2,747±536	19.2±3.4
	Un-stocked Forest	3.5%	98±99	2,623±914	0.85±0.11	2,447±865	15.4±6.4
Species	<i>Pinus densiflora</i>	3.7%	79±24	3,025±606	0.90±0.02	2,848±574	18.1±2.7
	<i>Pinus koraiensis</i>	14.6%	65±24	2,684±581	0.90±0.02	2,530±550	19.4±2.7
	<i>Larix kaempferi</i>	6.2%	46±25	2,352±614	0.90±0.02	2,215±580	18.9±3.6
	Other Coniferous Trees	0.3%	48±26	2,569±380	0.91±0.03	2,423±359	20.5±4.0
	<i>Quercus mongolica</i>	17.4%	63±23	3,093±687	0.91±0.02	2,918±651	20.1±3.0
	<i>Quercus variabilis</i>	2.2%	64±23	2,846±613	0.90±0.02	2,682±580	19.1±2.8
	<i>Quercus</i> spp.	26.3%	57±25	2,985±756	0.91±0.02	2,817±716	20.5±3.1
	Other Deciduous Tree	19.9%	52±28	2,663±726	0.91±0.02	2,512±686	20.2±3.5
	Mixed Forest	5.9%	65±23	2,915±565	0.90±0.03	2,747±536	19.2±3.4
	Un-stocked Forest	3.5%	98±99	2,623±914	0.85±0.11	2,447±865	15.4±6.4

Table 3. Results of training and validation of deep learning model

Categories	Deep Learning Model	Dataset	Training Results		Validation Results		Training Time (Minutes)
			Accuracy(%)	Loss	Accuracy(%)	Loss	
Forest Type Classification	DeeplabV3+	A	85.4±6.7	0.53±0.04	75.8±8.6	0.65±0.06	20.1±0.1
		B	82.7±6.8	0.54±0.03	74.0±12.1	0.61±0.03	20.5±0.1
	Swin-Unet	A	89.3±3.2	0.52±0.02	68.9±1.9	0.63±0.03	34.4±0.3
		B	86.2±1.1	0.54±0.01	71.5±1.3	0.61±0.03	35.4±0.5
Tree Species Classification	DeeplabV3+	A	84.4±3.1	0.60±0.02	37.5±3.1	1.04±0.05	20.1±0.1
		B	79.0±6.1	0.66±0.04	36.2±1.8	1.00±0.05	20.3±0.1
	Swin-Unet	A	91.0±2.3	0.53±0.02	33.8±1.9	1.18±0.05	34.3±0.2
		B	87.4±7.2	0.57±0.06	34.4±4.0	1.16±0.14	35.1±0.2

* The average values of models trained with 5 repetitions at 1,000 epochs.

과, 임상 구분 과정에서 표면반사율과 식생지수를 함께 활용한 Dataset B를 활용하였을 때, 모든 모델에서 분류 정확도가 3-4% 향상됨을 알 수 있었다. 딥러닝 모델간 분류 정확도를 비교해보면, 검증정확도 기준 DeeplabV3+ 모델의 정확도가 3-4% 높은 정확도를 보였으며, 학습 소요시간도 14분 이상 더 적게 소요되어 효율성이 높았다.

수종 분류 과정에서는 학습 정확도가 평균 약 79% 이상의 높은 정확도를 보였으나, 검증정확도는 약 33-37%로 분포하여 절반 이상 낮은 정확도를 보였다. 수종 구분을 위한 데이터셋은 임상 구분 데이터셋과 달리, 특정한 수종이 우점하기보다는 Table 2와 같이 10개 수종 중 4개의 수종이 약 15-26%의 비율로 비교적 균등하게 분포하고 있다. 이에 따라 학습자료의 불균형보다는 범주간 표면반사율 및 식생지수의 분포특성이 유사한 분포를 보이기 때문에 학습 과정에서 낮은 정확도를 보인 것으로 판단된다. 데이터셋에 따른 분류 정확도 비교결과, 임상 구분 과정과는 달리, 반대로 식생지수를 함께 활용할 경우, 분류정확도가 소폭 감소하였다. 이에 따라, 식생지수는 같은 학습 방법을 활용하더라도 분류 범주에 따라 정확도에 영향을 미칠 수 있으므로 사용에 주의가 필요할 것으로 판단된다. 딥러닝 모델 간 분류정확도는 임상 구분 과정과 같이, DeeplabV3+ 모델의 정확도가 2-4% 높은 정확도를 보였으며, 학습소요시간을 고려하였을 때 효율적인 것으로 분석되었다.

3. 딥러닝 모델 별 임상 및 수종 분류 정확도 평가

임상 및 수종 분류 정확도 평가를 위해 학습된 모델을 기반으로 분류지도를 구축하였으며, 연구대상지 전체 라벨 이미지와 비교를 통해 정확도를 평가하였다(Figure 4). 딥러닝 기반 임상 분류 정확도 평가 결과, Dataset B를 활용한 Swin-Unet이 Kappa 기준 평균 약 40.8%로 가장

높은 정확도를 보였다(Table 4). 학습 및 검증 과정에서는 DeeplabV3+ 모델이 검증 정확도 기준 가장 높은 정확도를 보였으나, 검증자료는 연구대상지 내에서 학습자료로 사용되지 않은 19장의 이미지만을 활용하기 때문에 분석 결과에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 임상 분류 과정에서는 학습 및 검증과정과 마찬가지로 표면반사율 정보에 식생지수를 추가로 활용함에 따라 분류정확도가 최대 약 6% 향상되었다. 수종분류 정확도 비교결과, Dataset A를 활용한 Swin-Unet이 Kappa 기준 평균 약 30.5%로 가장 높은 정확도를 보였다. 학습 및 검증 과정과 같이, 수종분류 과정에서는 표면반사율 정보만을 활용하는 것이 더 높은 정확도를 보였으며 DeeplabV3+ 모델보다 Swin-Unet이 더 높은 분류 정확도를 보였다. Wang et al. (2024)는 Transformer가 대규모 학습 데이터셋에서 더 높은 정확도를 보인다고 언급하였으나, 이와 달리 본 연구에서는 64장의 소규모 학습자료를 활용하였음에도 Swin-Unet의 분류 정확도가 가장 높게 분포하였다. Choi et al. (2023)의 연구에서도 CNN 구조의 딥러닝 모델에 비해 Transformer를 활용하였을 때 분류 정확도가 개선되었으며, 이미지 내부의 패치들의 관계성을 특징 정보로 추출하는 Transformer의 추출방법은 임상 및 수종 분류에 효과적인 것으로 판단된다.

범주별 분류정확도 비교결과, 임상 분류에서는 활엽수림이 F1-Score가 최대 약 84.1%로 범주들 중 가장 높은 정확도를 보였으나 반대로 혼효림의 경우, 모든 모델이 약 3% 이하의 낮은 정확도를 보였다(Figure 5). 수치임상도에서 혼효림은 '침엽수림 및 활엽수림이 25%이상 75% 미만인 임분'이라고 정의하고 있으며, 육안판독을 통해 임분 단위로 구획된다. 반면, Semantic Segmentation 기반의 딥러닝은 픽셀 단위의 분류결과를 도출하기 때문에 이러한 분류방법의 차이로 인해 정확도가 낮은 것으로 판단된다. 임상 분류에서 오분류는 침엽수림↔활엽수림의

딥러닝 기법을 활용한 임상 및 수종 분류 정확도 평가

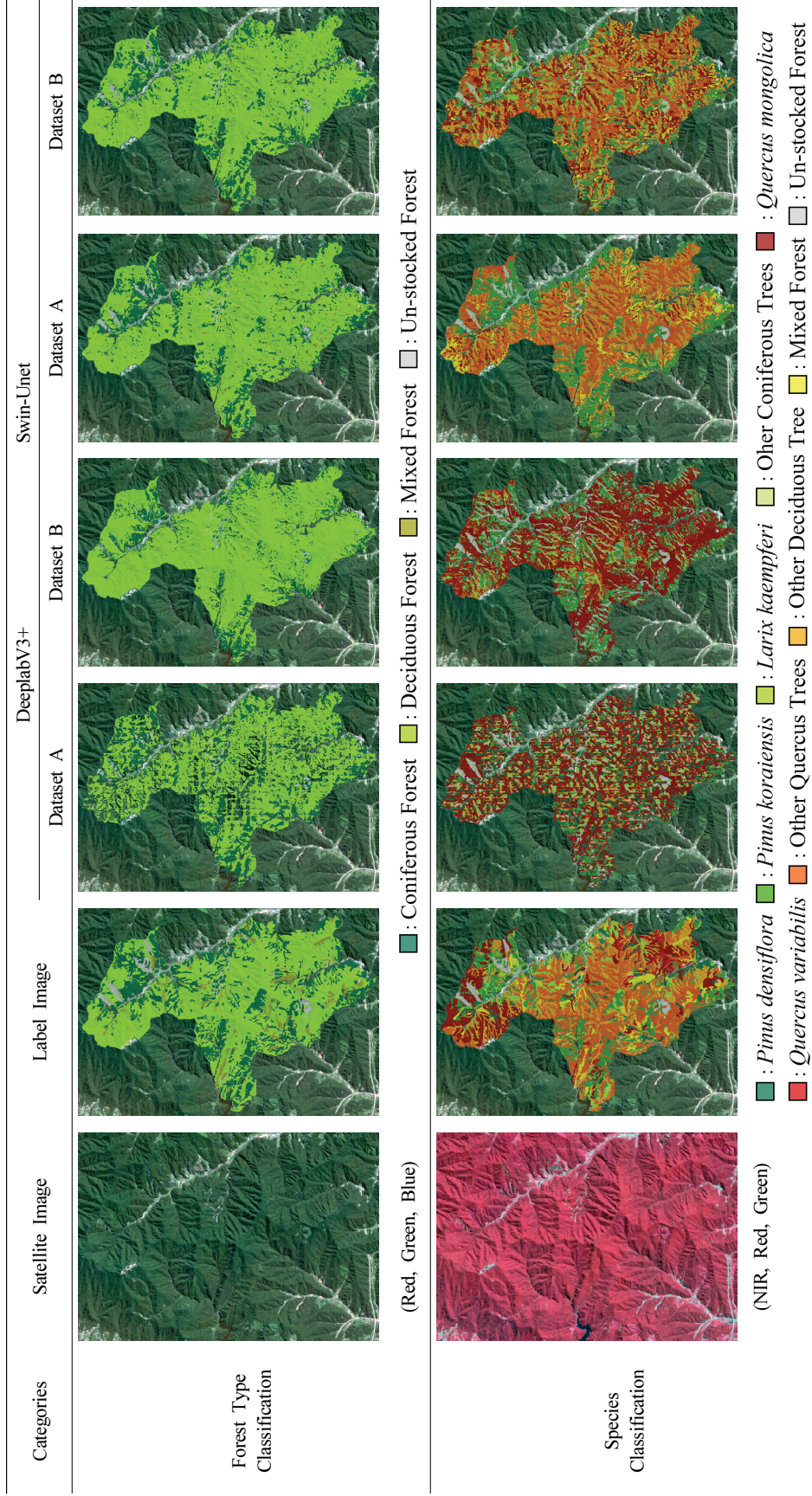


Figure 4. Deep learning model-based forest type and species classification map

Table 4. Evaluation of classification map accuracy according to datasets and deep learning models

Deep Learning Model	Dataset	Forest Type Classification		Tree Species Classification	
		OA	Kappa	OA	Kappa
DeeplabV3+	A	54.8±15.5%	23.2±13.3%	20.9±2.0%	10.3±1.2%
	B	70.6±0.3%	24.6±2.3%	19.9±4.6%	8.9±3.1%
Swin-Unet	A	73.5±1.6%	34.8±7.2%	45.4±1.2%	30.5±1.7%
	B	75.1±1.5%	40.8±4.7%	38.1±2.5%	25.4±2.9%

* The average values of models trained with 5 repetitions at 1,000 epochs.

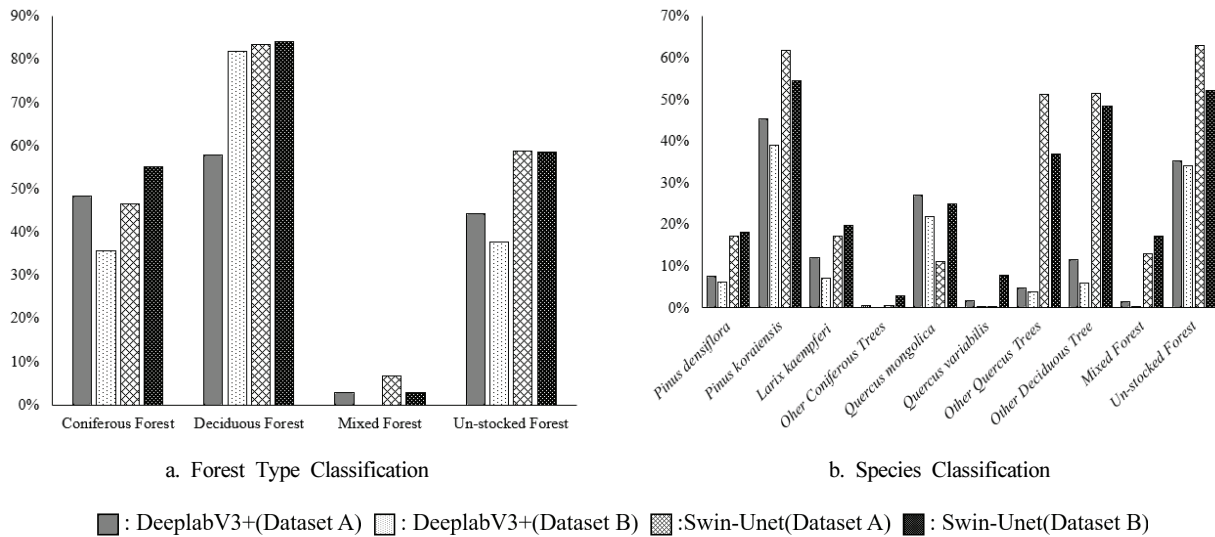


Figure 5. Distribution of F1-Score by deep learning models and datasets

범주간의 혼동 사례가 가장 많이 발생하였다. 오분류가 발생한 지역을 비생육기 항공사진 영상과 비교한 결과, Figure 6-a와 같이 비생육기 시기에는 육안으로도 임상의 구분이 어렵지 않기 때문에 차후 연구에서는 다시기 영상의 활용방안 검토가 필요할 것으로 판단된다. 수종 분류 정확도를 비교한 결과, 무릅목지가 F1-Score 최대 약 63.0%로 범주들 중 가장 높은 정확도를 보였으며, 잣나무(최대 약 61.9%), 기타활엽수(최대 약 51.4%), 기타참나무류(최대 약 51.3%) 순으로 높은 정확도를 보였다. 반면, 그 외 타범주들은 모두 약 18% 미만의 낮은 정확도를 보였다. Cao and Zhang(2020)은 Resnet과 Unet을 결합한 Res-Unet을 통해 수종분류 연구를 진행하였으며, 수종별 분류 정확도는 약 70-89%의 정확도를 보였다. 또한, Lobo Torres et al. (2020)은 Unet과 DeeplabV3+ 등 다양한 딥러닝 모델을 활용하여 수종분류 연구를 진행하였으며, 평균 약 92% 높은 정확도를 보였다. 본 연구는 선행 연구들에 비해 낮은 분류 정확도를 보였으나, 수종분류를 위한 선행 연구사례에서는 대부분 0.5m 이하의 고해상도

영상을 활용하며, 항공 LiDAR(Light Detection And Ranging), 초분광 영상과 같은 추가적인 정보를 활용한 사례가 많았다(Ballanti et al., 2016; Digumarti et al., 2019). 이에 따라 향후 수종분류 정확도를 높이기 위해서는 고해상도 영상 활용 및 초분광, 질감정보와 같은 추가적인 정보 활용이 필요할 것으로 판단된다. 수종 분류에서 오분류가 가장 많이 발생한 범주는 신갈나무↔기타참나무류↔기타활엽수 범주들간 혼동사례가 가장 많이 발생하였으며, 침엽수종에서는 잣나무↔기타참나무류, 잣나무↔기타활엽수, 낙엽송↔기타활엽수 범주에서 혼동사례가 가장 많이 발생하였다(Figure 6-b, Figure 6-c). 임상 및 수종분류의 오분류사례 검토결과, 0.5m급의 해상도인 항공사진에서는 임도와 같은 소규모 객체가 명확하게 구분되지만 3m급의 위성영상에서는 구분이 어려우며, 육안으로도 수종별 특징 구분이 어려운 수종이 다수 분포하였다. 이에 따라, 3m급의 영상에서는 잣나무와 같은 특정 수종을 제외한 타 수종을 구분하기 위해서는 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

딥러닝 기법을 활용한 임상 및 수종 분류 정확도 평가

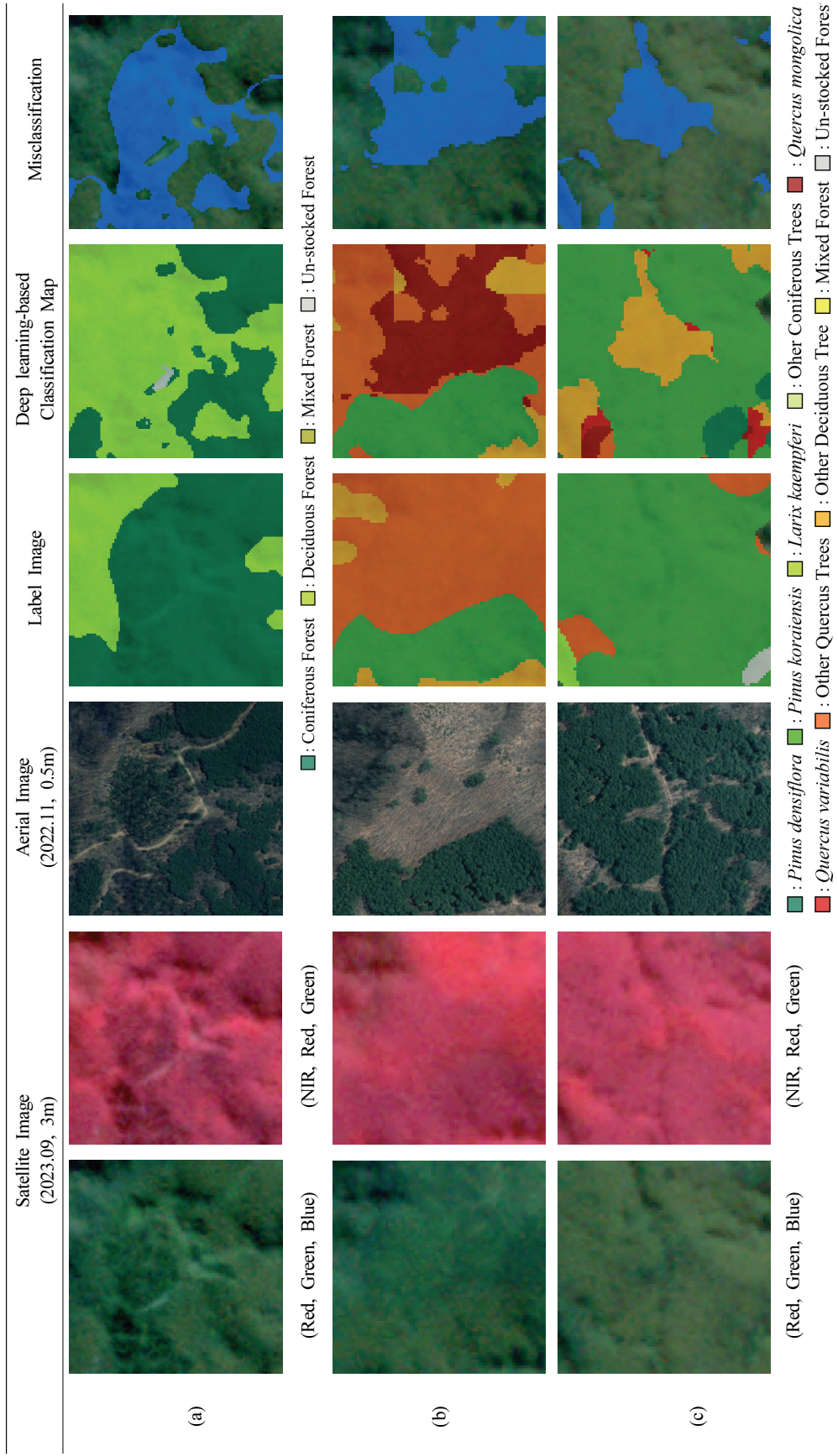


Figure 6. Misclassification cases in forest type and tree species classification based on deep learning

IV. 결 론

본 연구는 3m급 위성영상을 기반으로 딥러닝 기반 임상 및 수종 분류를 수행하였다. 임상분류 과정에서는 표면반사율 정보에 식생지수를 추가로 활용함에 따라 분류 정확도가 향상되었으나, 반대로 수종분류 과정에서는 분류 정확도가 소폭 감소하였다. 동일한 학습방법과 딥러닝 모델을 활용하더라도 분류범주에 따라 정확도에 영향을 미칠 수 있으므로 식생지수 활용에는 검토가 필요할 것으로 판단된다. 임상 및 수종분류를 위해 본 연구에서는 DeeplabV3+와 Swin-Transformer와 Unet을 결합한 Swin-Unet을 활용하였으며, 학습시간의 경우, DeeplabV3+가 약 10분 더 적게 소요되었지만 분류 정확도는 Swin-Transformer가 우수하였다. 이러한 점으로 볼 때, 이미지 내부의 패치들의 관계성을 특징 정보로 추출하는 Transformer의 추출방법은 임상 및 수종 분류에 효과적인 것으로 판단된다. 한편, 임상 분류는 OA가 최대 약 75.0%로 높은 정확도를 보였으나, 수종 분류는 OA 기준 최대 약 45.3%의 낮은 정확도를 보였다. 수종분류의 정확도가 낮은 이유는 데이터셋의 불균형과 범주간 유사한 분광분포 등의 이유로 판단되며, 수종 분류를 위한 선행 연구사례들을 참조하였을 때, 0.5m 이하의 고해상도 영상 활용, LiDAR, 초분광영상, 질감정보 등 다양한 정보 활용이 필요할 것으로 판단된다. 이와 같이, 본 연구에서 활용한 3m급의 영상에서 임상분류는 효과적이었으나, 수종분류에서는 잣나무와 같은 특정 수종을 제외하곤 타 수종의 분류에서 한계점을 보였다. 수종 분류의 정확도 향상을 위해서는 고해상도 영상 및 다양한 추가정보 활용과 함께 데이터 증강기법의 적용, 정규화 기법 연구 등 데이터셋 구축을 위한 다양한 연구방안이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Atkinson, P. M. and Tatnall, A. R. 1997. Introduction neural networks in remote sensing. *International Journal of remote sensing*, 18(4): 699-709.
- Ballanti, L., Blesius, L., Hines, E. and Kruse, B. 2016. Tree species classification using hyperspectral imagery: A comparison of two classifiers. *Remote Sensing*, 8(6): 445.
- Cao, H., Wang, Y., Chen, J., Jiang, D., Zhang, X., Tian, Q. and Wang, M. 2022. Swin-unet: Unet-like pure transformer for medical image segmentation. In *European conference on computer vision*. Cham: Springer Nature Switzerland. pp. 205-218.
- Cao, K. and Zhang, X. 2020. An improved res-unet model for tree species classification using airborne high-resolution images. *Remote Sensing*, 12(7): 1128.
- Chen, L. C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F. and Adam, H. 2018. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. In *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*. pp. 801-818.
- Choi, S. H., Park, K. B. and Lee, J. Y. 2023. SwinResNet: Volumetric Medical Image Segmentation by Fusing Swin Transformer and ResNet. *Korean Journal of Computational Design and Engineering* 28(3): 282-293.
- Cifuentes-Croquevielle, C., Stanton, D. E. and Armesto, J. J. 2020. Soil invertebrate diversity loss and functional changes in temperate forest soils replaced by exotic pine plantations. *Scientific reports*, 10(1): 7762.
- Das, S. 2024. A new technique for classification method with imbalanced training data. *International Journal of Information Technology*, 16(4): 2177-2185.
- Digumarti, S. T., Schmid, L. M., Rizzi, G. M., Nieto, J., Siegwart, R., Beardsley, P. and Cadena, C. 2019. An approach for semantic segmentation of tree-like vegetation. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. pp. 1801-1807.
- Franklin, S. E. and Ahmed, O. S. 2018. Deciduous tree species classification using object-based analysis and machine learning with unmanned aerial vehicle multispectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16): 5236-5245.
- Geng, S., Zhai, S. and Li, C. 2024. Swin transformer based transfer learning model for predicting porous media permeability from 2D images. *Computers and Geotechnics*, 168: 106177.
- Grabska, E., Hostert, P., Pflugmacher, D. and Ostapowicz, K. 2019. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*, 11(10): 1197.
- He, K., Zhang, X., Ren, S. and Sun, J. 2016. Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. pp. 770-778.
- Huang, M. H. and Rust, R. T. 2018. Artificial intelligence in service. *Journal of service research*, 21(2): 155-172.
- Kükenbrink, D., Marty, M., Bösch, R. and Ginzler, C.

2022. Benchmarking laser scanning and terrestrial photogrammetry to extract forest inventory parameters in a complex temperate forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113: 102999.
- Lee, J., Cai, X., Lellmann, J., Dalponte, M., Malhi, Y., Butt, N., Schönlieb, C.B. and Coomes, D. A. 2016. Individual tree species classification from airborne multisensor imagery using robust PCA. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(6): 2554-2567.
- Lee, S. H. and Lee, M. J. 2020. A study on deep learning optimization by land cover classification item using satellite imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6_2): 1591-1604.
- Liu, Z., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S. and Guo, B. 2021. Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows. In *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*. pp. 10012-10022.
- Lobo Torres, D., Queiroz Feitosa, R., Nigri Happ, P., Elena Cué La Rosa, L., Marcatto Junior, J., Martins, J., Olá Bressan, P., Nunes Gonçalves, W. and Liesenberg, V. 2020. Applying fully convolutional architectures for semantic segmentation of a single tree species in urban environment on high resolution UAV optical imagery. *Sensors*, 20(2): 563.
- Long, J., Shelhamer, E. and Darrell, T. 2015. Fully convolutional networks for semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. pp. 3431-3440.
- Loshchilov, I. and Hutter, F. 2017. Fixing weight decay regularization in adam. *arXiv preprint arXiv:1711.05101*, 5.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y. and Qiu, G. 2007. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11): 2636-2651.
- Mishra, N. B., Mainali, K. P., Shrestha, B. B., Radenz, J. and Karki, D. 2018. Species-level vegetation mapping in a Himalayan treeline ecotone using unmanned aerial system (UAS) imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11): 445.
- Mohd Zaki, N. A. and Abd Latif, Z. 2017. Carbon sinks and tropical forest biomass estimation: a review on role of remote sensing in aboveground-biomass modelling. *Geocarto International*, 32(7): 701-716.
- Moisen, G. G., Freeman, E. A., Blackard, J. A., Frescino, T. S., Zimmermann, N. E. and Edwards Jr, T. C. 2006. Predicting tree species presence and basal area in Utah: a comparison of stochastic gradient boosting, generalized additive models, and tree-based methods. *Ecological modelling*, 199(2): 176-187.
- Mountrakis, G., Im, J. and Ogole, C. 2011. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 66(3): 247-259.
- Panda, S. S., Ames, D. P. and Panigrahi, S. 2010. Application of vegetation indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote sensing*, 2(3): 673-696.
- Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T. 2015. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical image computing and computer-assisted intervention—MICCAI 2015: 18th international conference, proceedings, part III* 18. Springer International Publishing. pp. 234-241.
- Rouhi, R., Jafari, M., Kasaei, S. and Keshavarzian, P. 2015. Benign and malignant breast tumors classification based on region growing and CNN segmentation. *Expert Systems with Applications*, 42(3): 990-1002.
- Smith, L. N. and Topin, N. 2019. Super-convergence: Very fast training of neural networks using large learning rates. In *Artificial intelligence and machine learning for multi-domain operations applications*. SPIE. pp. 369-386.
- Somers, B. and Asner, G. P. 2014. Tree species mapping in tropical forests using multi-temporal imaging spectroscopy: Wavelength adaptive spectral mixture analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31: 57-66.
- Talukder, M. A., Sharmin, S., Uddin, M. A., Islam, M. M. and Aryal, S. 2024. MLSTL-WSN: machine learning-based intrusion detection using SMOTETomek in WSNs. *International Journal of Information Security*, 23(3): 2139-2158.
- Wang, H., Xing, C., Yin, J. and Yang, J. 2022. Land cover classification for polarimetric SAR images based on vision transformer. *Remote Sensing*, 14(18): 4656.
- Xu, R., Dong, X. M., Li, W., Peng, J., Sun, W. and Xu, Y. 2024. DBCTNet: Double branch convolution-transformer network for hyperspectral image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. pp. 1-15.

Zeng, Y., Hao, D., Huete, A., Dechant, B., Berry, J., Chen, J. M., Joiner, J., Frankenberg, C., Lamberty, B. B., Ryu, Y., Xiao, J., Asrar, G. R. and Chen, M. 2022. Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(7): 477-493.

Zhang, L., Zhang, L. and Du, B. 2016. Deep learning for remote sensing data: A technical tutorial on the state of the art. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 4(2): 22-40.

Zhang, Z. and Sabuncu, M. 2018. Generalized cross entropy loss for training deep neural networks with noisy labels. *Advances in neural information processing systems*, pp. 8778-8788.

-
- Received 10 May 2024
 - Finally Revised 14 June 2024
 - Accepted 20 June 2024

임업의 6차 산업화에 대한 임업인 선호도 및 경제성

박기현¹ · 배지윤² · 원가영¹ · 유중원¹ · 정형식¹ · 김다영¹ · 한 희^{1,3*}

¹서울대학교 농림생물자원학부 · ²서울대학교 산림과학부 · ³서울대학교 농업생명과학연구원

Foresters' Preferences and Economic Feasibility in the Sixth Industrialization of Forestry

Gihyun Park¹ · Jiyeon Bae² · Gayoung Won¹ · Jungwon You¹ · Hyungsik Jeong¹ ·
Dayoung Kim¹ · Hee Han^{1,3*}

¹Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

²Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

³Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

요약 : 본 연구는 임업의 6차 산업화에 대한 임업인 선호도와 그 경제적 효과를 분석하기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위해 산림경영인협회 회원 200명을 대상으로 설문조사를 실시하였고, 6차 산업화를 진행하고 있는 2개 임가의 내부수익률과 투자자본 회수기간을 분석하였다. 연구 결과, 임업인들은 6차 산업화가 고부가가치 창출, 일자리 창출에 기여할 수 있다고 평가하였고, 향후 6차 산업화 시행 의향에 대해서 매우 긍정적으로 생각하고 있는 것으로 나타났다. 6차 산업화를 시행하고 있는 임업인의 정책 만족도는 보통으로 나타나는데, 초기 투자비용 부담과 제도적 뒷받침의 한계가 그 원인인 것으로 나타났다. 6차 산업화의 경제적 효과는 기존 목재생산 위주의 육림업의 수익률(0.5~3%)보다 6차 산업화 수익률(10~12%) 약 4배 이상 높은 것으로 나타났다. 자본투자 회수기간은 목재생산일 때 30~40년이었지만 6차 산업화는 20년 이하로 짧아지는 것으로 분석되었다. 따라서 기존 1차 산업 중심의 경영방식에서 1·2·3차 산업의 융복합으로의 전환을 실행할 수 있다면 임업 발전 및 임가 소득 증대에 기여할 수 있다고 판단된다.

ABSTRACT : This study was conducted to analyze the preferences of foresters for the sixth industrialization of forestry and its economic effects. To this end, a survey was conducted on 200 members of the Korean Forest Management Association, and the internal rate of return and payback period of capital investment were analyzed for two forestry enterprises undergoing the sixth industrialization. The results of the study indicate that foresters evaluated the sixth industrialization as being able to contribute to the creation of high added value and job opportunities, and they showed a very positive intention towards the implementation of the sixth industrialization in the future. The policy satisfaction of foresters currently implementing the sixth industrialization was average, mainly due to the burden of initial investment costs and the limitations of institutional support. The economic effects of the sixth industrialization showed a rate of return (10-12%) more than four times higher than that of traditional silviculture focused on timber production (0.5-3%). The payback period of capital investment shortened from 30-40 years in timber production to less than 20 years with the sixth industrialization. Therefore, if the transition from the traditional primary industry-focused management to an integration of the primary, secondary, and tertiary industries can be realized, it is believed that it could contribute to the development of forestry and the increase of forester income.

Key words : Sixth industrialization, Integrated forest management, Economic feasibility, Payback period, Internal rate of return

I. 서 론

우리나라는 지난 50년간 국토녹화를 통해 황폐된 산림을 빠르게 복원하였지만, 산업적 측면에서 임업의 발전은 상대적으로 이루지 못하였다. 70년대 중반 원목 수입 자유화 조치 이후, 지속된 목재의 수요에도 불구하고 국내의 나무들은 해외의 값싼 목재들에 의해 경쟁력을 잃게 되었고(Kim, 1999) 사유림의 산주 수는 지속적으로 늘어간 데 비해 산림의 소유 면적은 줄어들면서(Korea Forest Service, 2022) 산림경영의 효율성 측면에서 점차 어려운 여건이 되어가고 있다. 목재생산은 조림에서 수확까지 상당히 긴 기간이 소요되는 사업으로, 국내의 경우 자본 회수의 불확실성이 높고 낮은 경제성을 보이는 특징을 가진다. 이에 국내 대다수의 산주들은 장별기 임업에 대해 부정적인 인식을 가지고 있다(Han et al., 2018).

2022년 산림청 자료에 따르면 임가의 연간 평균소득은 2021년 기준 약 38백만 원으로, 농가의 평균소득 48백만 원의 79.8%, 어가의 평균소득 52백만 원의 72.8%에 불과하다(Korea Forest Service, 2022). 산림청은 임가 소득 증진을 목적으로 목재산업 확대, 임업직불제, 숲경영체험림 도입 등의 정책을 현재 실행 중이나 정책이 도입된 기간이 짧아 임가소득에 미치는 영향을 알기 어렵고 관련 정책에 대한 임업인들의 의견에 대해 연구된 바가 없다. 또한, 정부 정책에 대한 임업인들의 다양한 의견이 반영될 창구가 불충분하여 임업 현장에 대한 이해와 임업인들의 현황에 대한 정책적 이해가 부족한 실정이다.

한편 산림관광 및 휴양·복지에 대한 대중의 관심이 증가함에 따라 이와 관련된 산림수요는 증가하는 추세이다(Moon and Lee, 2016). 문화체육관광부의 2021년 국민여가 활동 조사에 따르면 이용 희망 여가공간 상위권에 '산'이 위치하고 있다. 특히 귀농·귀촌 가구 수 증가, 산림교육, 산림휴양·치유 등 산림복지서비스에 대한 국민적 수요의 증가는 수요에 맞는 공급을 통해 임업 전반의 산업적 반전을 꾀할 수 있는 기회로 여겨진다. 이와 관련해 최근 임업 고부가가치 창출 및 국민 수요 충족의 방

안으로 임업의 융복합 산업이 대두되고 있고, 그 중 1차, 2차, 3차 산업을 복합적으로 운용하는 6차 산업화가 주목받고 있다. 임업 부문의 6차 산업화는 '임산자원(1차)과 임산물 가공(2차), 외식·유통·관광·레저(3차) 등 산업의 융복합을 통해 새로운 상품과 시장을 창출하여 부가가치를 높이고 일자리를 창출하는 경제활동(Korea Forestry Promotion Institute, 2023)'이라고 정의할 수 있다.

국내에서 사유림이 차지하는 면적은 전체 산림의 2/3인 약 66%로, 산업적 측면에서 임업은 그 특성상 지역사회와의 협력, 특히 산주들의 참여 없이는 발전을 기대할 수 없다. 본 연구는 6차 산업의 국내 임업으로의 발전적 적용 측면에서 먼저 설문조사를 통해 임업인들이 수행하고 있는 6차 산업의 현황과 임업인들이 겪고 있는 6차 산업화의 어려움을 파악하고자 하였다. 또한, 실제로 6차 산업을 시행하고 있는 두 임가를 방문하여 6차 산업화가 얼마만큼의 소득을 증대시킬 수 있는지에 대해 확인하고, 각 사업체의 재무 자료를 사용하여 그 경제성을 검증하였다. 이를 통해 임업 분야 6차 산업 활성화를 위한 정책적 개선방안을 도출하고자 하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 6차 산업화 현황 및 임업인 선호도 조사

1) 조사 대상

2023년 7월, 한국산림경영인협회 회원 200명을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 한국산림경영인협회는 독립가들로 구성된 협회로, 구성원들이 일정 규모 이상의 산림을 소유하고 실질적으로 크고 작은 규모의 임업경영을 하고 있다.

2) 조사 내용

설문조사는 임업의 6차 산업화에 대한 국내 현황 및 임업인들의 선호도 등을 파악하기 위한 목적으로 실시되

Table 1. Survey Questionnaire Structure

Section	Content
I. General Respondent Information	Respondents' gender, age, career, etc.
II. The Sixth Industrialization of Forestry	Respondents' perception and current status of the sixth industrialization in forestry
II-a. Production-Centered Forestry (1st Industry)	Current status of production and forestry direct incomes
II-b. Processing-Centered Forestry (2nd Industry)	Current status of processing and related incomes
II-c. Tourism and Recreation-Centered Forestry (3rd Industry)	Current status of tourism and recreation programs and related incomes

었다. 설문지는 Table 1에서와 같이 응답자 일반, 임업의 6차 산업화 각 항목(1차 생산업, 2차 가공업, 3차 체험·관광업)에 대한 내용으로 구성되었다. 구체적인 설문 내용은 6차 산업화에 대한 임업인들의 인식과 현황, 기대 수요, 애로사항 등을 포함하였다. 문항 작성 과정에서 필요한 산림청 정책 정보 등은 산림청에서 발간한 각종 안내와 산림청 홈페이지 등을 참고하였다.

3) 분석 방법

설문 응답지의 통계 분석은 엑셀 함수와 KSDC(Korean Social Science Data Center) 데이터베이스에서 제공하는 온라인 통계분석(E-STAT 3.0) 기능을 이용하였다. 각 설문 문항에 따른 응답별 빈도수를 분석하고 응답에 따른 인구통계학적 분석과 그룹간 비교를 진행하였다.

2. 6차 산업화 경제성 분석

1) 조사 대상

임업의 6차 산업화에 따른 경제적 효과를 밝히기 위하여 실제 6차 산업을 시행하고 있는 두 곳의 사업체를 선정하였다. 첫 번째 사업체는 평창에 소재한 A 업체로 육림업을 기반으로 2004년부터 체험 및 관광업을 운영하는 곳이며, 두 번째 사업체는 경산에 소재한 B 업체로 2012년부터 육림업과 함께 임산물 가공 및 판매, 체험 사업을 운영하고 있다. 조사는 2023년 11월부터 같은 해 12월까지 두 달간 진행하였다.

2) 조사 내용

각 사업체별 6차 산업화에 따른 경제성을 비교 분석하기 위해 각 업체의 재무정보를 수집하였다. 재무정보는 초기 사업투자를 위한 투자비용과 사업기간 내 연년별 평균 수익(매출)과 비용(지출, 세금) 등의 항목으로 구성되었다.

3) 분석 방법

본 연구에서는 재무적 타당성을 평가하여 각 사업체의 경제성을 분석하고자 하였다. 재무적 타당성 평가 방법으로 회수기간법(Payback Period Method)과 내부수익률법(Internal Rate of Return Method)을 활용하였다. 회수기간법은 총 투자 자금을 그 투자안의 현금흐름으로부터 회수하는데 걸린 기간을 계산하여 이 계산된 투자기간을 기초로 경제성을 분석하는 방법이다. 내부수익률법은 투자로 인해 기대되는 미래 수입의 현재가치와 소요되는 총 투자 자금의 현재가치를 동일하게 만드는 할인율을 계산하여 이 할인율을 기초로 경제성을 분석하는 방법이

Table 2. Regulatory Standard Useful Life

Item	Useful Life (Years)
Steel Frame Building	40
Wooden Building	20
Temporary Building	10
Machinery	5

다. 본 연구는 각 업체로부터 수집한 재무정보를 바탕으로 업체별 투자회수기간과 내부수익률을 계산하여 경제성을 분석하였다. 투자회수기간과 내부수익률은 다음 공식을 통해 계산하여 분석에 활용하였다. 한편, 비용분석에 포함되는 감가상각의 경우, 법인세법 시행규칙에 따라 기준내용연수를 계산하였다(Table 2).

$$Payback\ Period(n) = \frac{Initial\ Investment}{Annual\ Cash\ Flow} \quad (1)$$

$$\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

where,

C_t = Total cost in year t

R_t = Total revenue in year t

n = Duration of the project

r = Discount rate

III. 연구결과 및 고찰

1. 6차 산업화 현황 및 임업인 선호도

1) 응답자 일반

설문조사 결과, 총 158명이 응답하였으며 평균 응답자 나이는 60.7세(중간값 62, 최빈값 65), 평균 임업경영 경력 13년인 것으로 나타났다(Figure 1a). 응답자의 산지 소유면적은 10ha에서 30ha 구간이 41%로 가장 많은 것으로 나타났다(Figure 1b). 응답자들의 연간 임업수익은 1천만원 미만이 대부분으로 전체 응답자의 65%로 나타났다(Figure 1c), 주요 자금 조달 방식은 자부담이 전체의 65%로 대다수를 차지했다(Figure 1d).

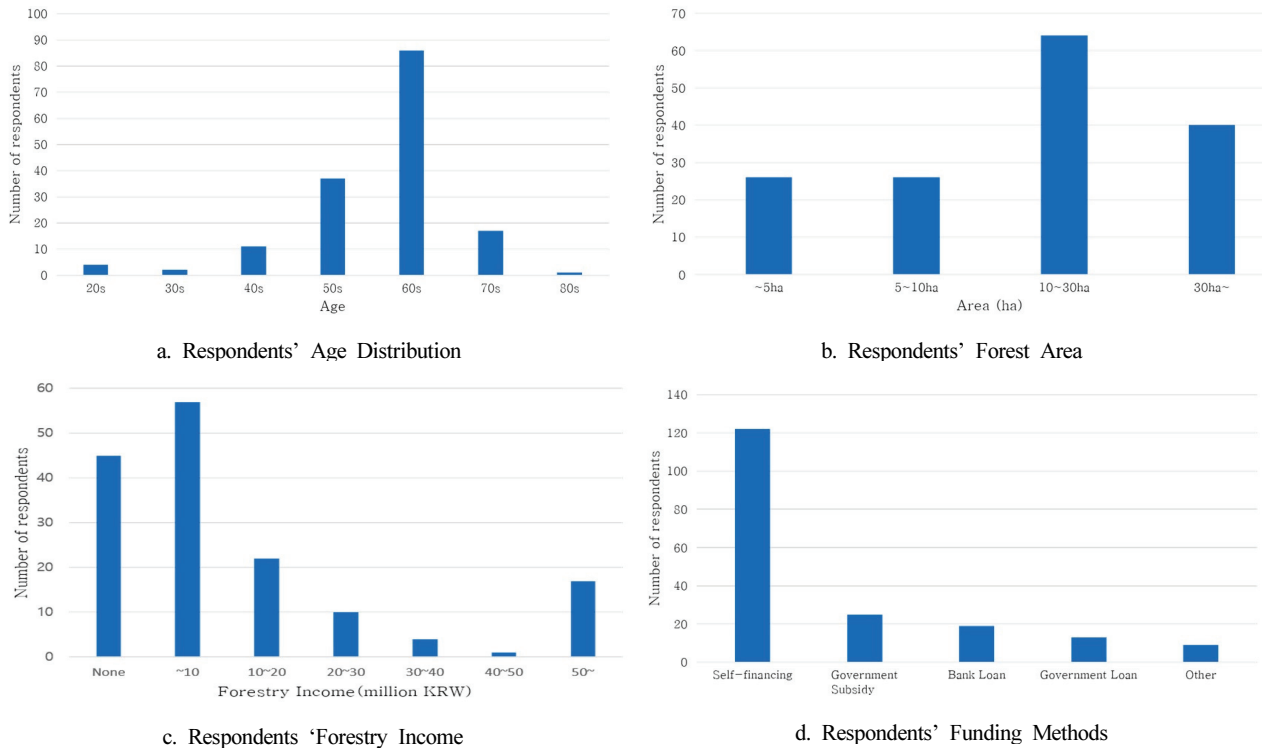


Figure 1. Respondents' Profile

2) 임업의 6차 산업화에 대한 인식 및 현황

임업인들의 6차 산업화에 대한 인식 조사 결과, 6차 산업화가 임가 소득 증진에 긍정적으로 기여한다고 생각하는 응답자가 상대적으로 더 많았으며(매우 긍정적 24%, 긍정적 45%), 그 이유로 '고부가가치 창출' 및 '일자리 창출'을 통해 6차 산업화가 임가 소득 증진에 긍정적으로 기여할 수 있다고 생각하기 때문인 것으로 나타났다(Figure 2a, Figure 2b). 하지만 6차 산업화가 임가 소득에 기여하지 않는다고 생각하는 그룹은 '초기 투자비용'과 '제도적 뒷받침 부재'를 6차 산업화의 소득 증진 기여 여부에 대한 부정적 이유로 뽑았다(Figure 2c).

6차 산업화 시행 여부에 대한 조사 결과, 전체 응답자들 중 약 20%에 해당하는 32명이 현재 6차 산업화를 시행하고 있는 것으로 나타났으며(Figure 3a), 6차 산업화 사업체 운영에 대한 만족도는 '보통' 수준인 것으로 나타났다(Figure 3b). 한편, 6차 산업화를 아직 시행하지 않는 응답자들도 추후 시행 의향에 대해서는 대다수가 긍정적이었으며(Figure 3c), '휴양 등 서비스업 중심'으로 한 경영(40%)을 가장 선호하는 것으로 나타났다(Figure 3d).

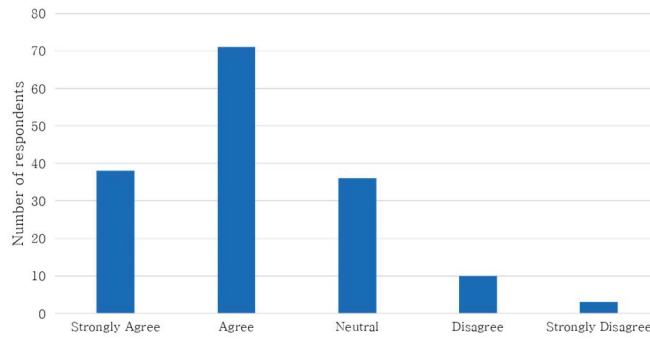
이상의 내용을 종합하면, 임업인들의 6차 산업화에 대한 인식은 수익 기여도 측면에서 긍정적이라고 볼 수 있었으며 시행 의향에 대해서도 적극적인 것으로 나타났다. 하지만 6차 산업 시행에 대한 만족도는 '보통'으로 나타

나 개선의 필요성이 있다고 판단되었다. 임업인들이 6차 산업화를 시행하고자 하는 주목적은 소득 증진, 일자리 창출, 영세한 임가의 규모화, 지역 경제 활성화 등인 것으로 나타났다. 특히 3차 산업(체험·관광)에 높은 부가 가치를 기대하는 경향이 뚜렷하였다. 한편, 설문 대상의 평균 연령은 60세 이상으로 높게 나타났는데 이런 점을 고려할 때 고령 및 정보 부족으로 임업경영에 소극적인 산주들에게 6차 산업 관련 세미나와 교육 프로그램을 적극적으로 진행하는 것이 필요할 것으로 판단되었다.

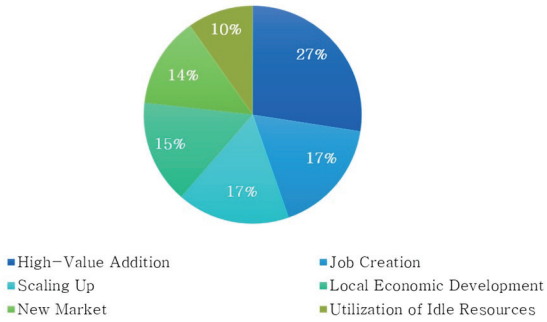
2. 6차 산업화 경제성

실제 6차 산업을 시행하고 있는 두 곳의 사업체를 대상으로 각 업체별 재무정보를 수집한 결과는 Table 3~5와 같다. 단기소득임산물 가공과 체험 프로그램을 융복합하여 운영하는 B 업체의 경우 개별 사업에 들어가는 수익과 비용 정보를 구분하여 수집하였다. Table 3은 평창의 A 업체 재무정보이다. 휴양 시설 준비에 큰 초기비용이 투자되었지만 매년 소득 규모 크게 나타났다. Table 4는 B 업체의 단기소득임산물 가공 재무정보로 가공이 이루어지고 있는 건물과 가공품들을 포장·배달하기 위한 패키징 기계가 주 비용으로 조사되었다. Table 5는 B 업체에서 체험프로그램을 추가적으로 운영하면서 발생한 재

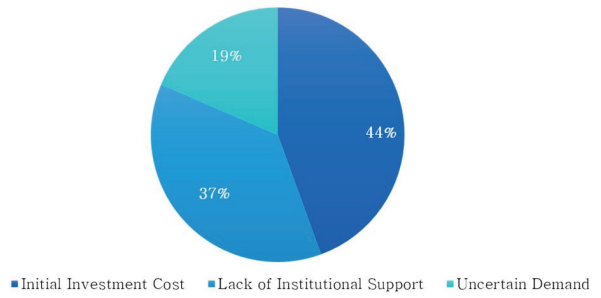
임업의 6차 산업화에 대한 임업인 선호도 및 경제성



a. Expectations of Sixth Industrialization to Increased Revenue

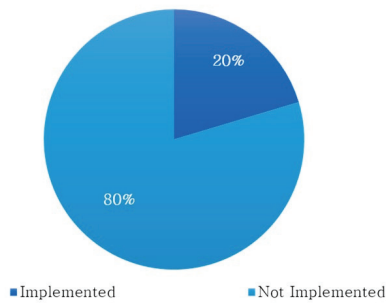


b. Reasons for Positive Preference toward Sixth Industrialization

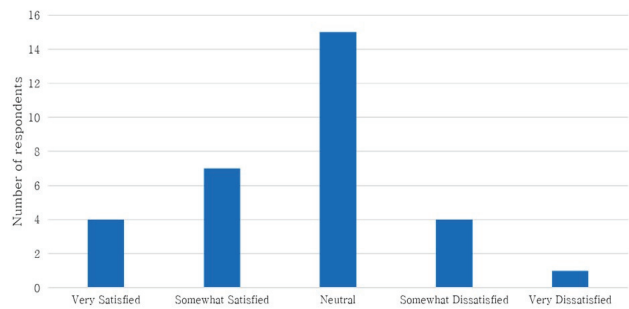


c. Reasons for Negative Preference toward Sixth Industrialization

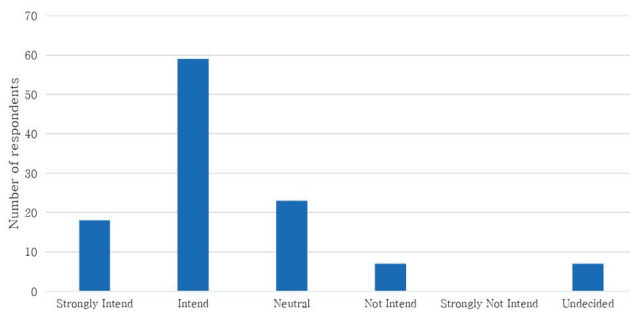
Figure 2. Respondents' Perceptions and Status



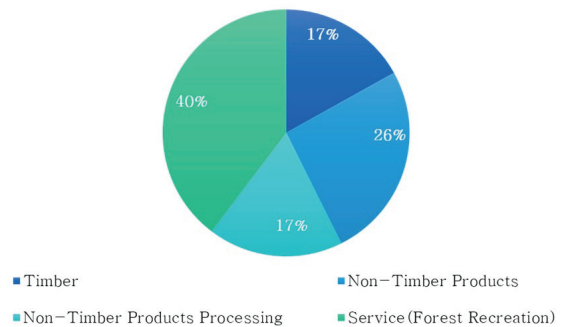
a. Implementation Status of Sixth Industrialization



b. Satisfaction with Sixth Industrialization Implementation



c. Intention to Implement Sixth Industrialization



d. Preferred Directions of Sixth Industrialization

Figure 3. Respondents' Profile

Table 3. Financial data of company A (forest recreation)

Item		Amount (1,000 KRW)
Annual Average Revenue		180,000
Annual Average Costs		36,000
Taxes	Income Tax	48,600
Initial Investment Cost	Civil Engineering Costs	15,000
	Architectural Design Costs	15,000
	Sewage Treatment Facility	45,000
	Restrooms and Shower Facilities	100,000
	Cabins (10)	300,000
	Deck Sites (15)	75,000
	Electrical Facilities	15,000
	Experience Facilities	10,500
Depreciation	Facilities	26,750

Table 4. Financial data of company B (processing)

Item		Amount (1,000 KRW)
Annual Average Revenue		60,000
Annual Average Costs		23,000
Initial Investment Cost	Building	180,000
	Packaging Machine	30,000
Depreciation	Building	4,500
	Packaging Machine	6,500

Table 5. Financial data for company B (tour experience program)

Item		Amount (1,000 KRW)
Annual Average Revenue		9,000
Annual Average Costs		4,500
Taxes	Value Added Tax	450
Initial Investment Cost	Rest Facilities	6,000
	Greenhouse	7,000
Depreciation	Rest Facilities	600
	Greenhouse	700

무정보이다. 체험활동을 위해 체험을 위한 비닐하우스를 증설하였고 체험장소에 간이 휴식시설을 설치한 것이 비용으로 조사되었다. 체험프로그램의 경우, 기존의 단기소득임산물 가공 시설(건물)을 공유·활용함으로써 상당한 비용을 줄인 것으로 분석되었다.

이상의 정보를 바탕으로 업체별 경제성을 분석한 결과 먼저 A 업체의 경우 8년 차에 사업 수지가 적자에서 흑

Table 6. Internal rate of return analysis results for company A (forest recreation)

Year	Annual Net Profit (1,000 KRW)	Internal Rate of Return (IRR)
0	-575,500	
1	68,650	-88%
2	68,650	-59%
3	68,650	-38%
4	68,650	-24%
5	68,650	-15%
6	68,650	-9%
7	68,650	-4%
8	68,650	-1%
9	68,650	1%
10	68,650	3%
20	68,650	10%

자로 전환되고, 9년 차에 수익이 1%, 10년 차에 3%, 20년 차에 10% 발생하는 것으로 나타났다(Table 6). 회수기간별 분석 결과로는 투자비용이 회수되는데 약 8.4년이 소요되는 것으로 나타났다.

Table 7은 B 업체의 단기소득임산물 가공판매와 체험 프로그램 운영으로 인한 경제성 분석 결과를 보여준다. 먼저 단기소득임산물 가공판매 재무정보 분석에 따르면 A 업체와 마찬가지로 8년 차에 사업수지가 전환되고 9년 차에 수익이 3%, 10년 차에 4%, 20년 차에 11% 발생하는 것으로 나타났다. 투자비용을 회수하기 위한 기간은 7.9년으로 A 업체에 비해 상대적으로 짧은 것으로 분석되었다. 체험 프로그램의 경우 5년 차에 사업수익률 2%를 달성하고 20년 차에 21% 수익률이 발생하는 것으로 분석되었다. 투자비용이 회수되는데 소요되는 기간은 약 4.7년으로 나타났다. 이러한 결과를 종합하면 B 업체는 6차 산업을 통해 8년 차에 사업수익률이 흑자로 전환되고 20년 차에 12% 수익률이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 최종적으로 투자금이 회수되는데 필요한 기간은 7.6년으로 나타났다.

이상의 결과는 농업부문의 2023년도 논벼(쌀) 생산에 대한 단년도 수익률인 40.9%(Statistics Korea, 2024), 수산업부 무지개송어 양식의 10년 차 기준 내부수익률 25.62%(Paek, 2016)이나 제주지역 넙치 양식 8.9%(Kim et al., 2022) 등의 결과에 비해 비교적 낮은 값이다. 그러나 Min et al (2019)의 연구에 따르면 국내 임업에서 목재생산을 통한 내부투자수익률은 대체로 0.5~3% 수준으로 본 연구에서 분석된 두 업체의 20년 차 내부투자수익률인 10~12%은 기존의 임업 대비 높은 경제성을 보이고 나타났다. 특히 B 업체의 경우 임산물의 가공·판매에

Table 7. Internal rate of return analysis results for company B (processing+tour experience program)

Year	Processing		Tour Experience		Integrated	
	Annual Net Profit (1,000 KRW)	Internal Rate of Return (IRR)	Annual Net Profit (1,000 KRW)	Internal Rate of Return (IRR)	Annual Net Profit (1,000 KRW)	Internal Rate of Return (IRR)
0	-210,000		-13,000		-223,000	
1	26,500	-87%	2,750	-79%	29,250	-87%
2	26,500	-58%	2,750	-42%	29,250	-57%
3	26,500	-36%	2,750	-20%	29,250	-35%
4	26,500	-23%	2,750	-6%	29,250	-22%
5	26,500	-14%	2,750	2%	29,250	-13%
6	26,500	-7%	2,750	7%	29,250	-6%
7	26,500	-3%	2,750	11%	29,250	-2%
8	26,500	0%	2,750	13%	29,250	1%
9	26,500	3%	2,750	15%	29,250	3%
10	26,500	4%	2,750	17%	29,250	5%
20	26,500	11%	2,750	21%	29,250	12%

체험 프로그램을 추가함으로써 투자자본의 회수기간이 짧아지고 수익률이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 체험 프로그램을 추가하는 것이 기존의 임산물 가공 판매 장비 및 시설을 활용할 수 있어 상대적으로 적은 투자로 새로운 수입원을 창출할 수 있기 때문으로 보인다. 또한, B 업체 체험 프로그램의 경우, 비닐하우스 설치비용을 50% 지원하는 지원금 제도가 수익률 상승에 실질적인 영향을 미친 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 정리하면 기존 육림업을 수행 중인 임업인이 체험 프로그램처럼 초기 투자비용이 적고 회수가 빠른 사업을 병행한다면 단일 사업을 경영할 때보다 더 높은 수익률을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 육림업을 수행하지 않고 있는 경우, 산림관리에 추가적인 비용이 발생하기 때문에 기대 수익률이 낮아질 수도 있다.

IV. 결 론

본 연구는 임업의 6차 산업화에 대한 국내 현황과 임업인의 선호도를 조사하고 실제 6차 산업화를 실시한 사업체의 경제성을 분석하여 국내 임업의 낮은 소득을 높일 수 있는 대안을 찾고자 하였다. 연구 결과, 임업인들은 대체로 6차 산업화가 ‘고부가가치 창출’, ‘일자리 창출’ 부분에서 임가 소득 증진에 기여한다고 생각하고 있었다. 하지만 실제로 6차 산업화를 기존에 시행하여 사업체를 운영 중인 임업인들의 만족도는 ‘보통’ 수준으로 높지 않았다. 주요 원인으로 ‘초기 투자비용 부담’과 ‘제도적 뒷받침의 부재’ 등이 만족도를 하락시키는 요인으로

나타났다.

다음으로 임업 분야에서 6차 산업화를 실시하여 사업체를 운영하고 있는 두 임업경영체 사례에 대해 경제성을 평가한 결과, 기존 임업(내부수익률 1~3%) 대비 두 업체 모두 6차 산업화 모델의 운영을 통해 높은 수익을 창출하여 사업의 경제성을 크게 높이고 있는 것으로 나타났다. 특히, 체험·관광 프로그램 같은 고부가가치 3차 산업 항목을 기존 사업에 추가할 경우 수익률이 더 높아지고 투자회수기간이 더 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 기존 육림업을 수행 중인 임업인이 체험 프로그램처럼 초기 투자비용이 적고 회수가 빠른 사업을 병행한다면 단일 사업을 경영할 때보다 더 높은 수익률을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 6차 산업을 통한 임업 수익 증대가 현장에서 이루어지기 위해서는 향후 더 다양한 사례 분석을 통해 국내에 적용 가능한 6차 산업의 최적 모델 모색이 지속적으로 시도될 필요가 있다.

References

Bae, J.Y. 2023. <http://www.6차산업.com/portal/cont/senaryintroduction.do> (2023.11.10).

Gobe, M. 2010. Emotional branding: The new paradigm for connecting brands to people. Simon and Schuster.

Han, H., Seol, A., Jung, Y., Chung, J. 2018. Maintaining long-rotation forestry: a new challenge for sustained yield of timber resources in South Korea. *International Forestry Review* 20(2): 199-205.

- Kim, WoiJeong. 1999. Forestry Management Strategies for the New Century: Focusing on the Cultivation of Timber Forests. *Forest Management*, 141, 12-21.
- Kim, HyukSoo. 2012. An Explorative Case Study for Feasibility Study of Development Oriental Medicine. *Korea Journal of Tourism and Hospitality Research* 26(1): 335-349.
- Kim, HyukSoo. 2014. A feasibility study on the oriental medicine tourism's job creation using old houses and mountain town-houses. *Korean Association Of Business Education* 29(1): 253-270.
- Kim, HyukSoo. 2023. A study on the feasibility of financial business in healing tourism area: focused on the business feasibility analysis of the mental and physical tourism business plan linked to the storytelling the first place of cultivation for medicinal ginseng herbs by scenario. *Journal of Hospitality and Tourism Studies* 25(9): 91-101.
- Kim, NamLee., Han, HyunSob., Lee, SeungHan., Kim, KangWoong., Kim, DoHoon. 2023. An Economic Analysis of the Extruded Pellets on the Olive Flounder Farms in the Jeju Region. *Korean Journal of Fisheries Science and Technology* 55(5): 681-687.
- Korea Forest Service. 2022. Forest Product Income Survey, pp. 107-121. Seoul: Korea Forest Service.
- Korea Rural Economic Institute. 2015. Status Survey of Professional Personnel in Certified Companies of the 6th Industrialization. Seoul: Korea Rural Economic Institute.
- Korea Forestry Promotion Institute. 2023. https://www.kofpi.or.kr/info/rFarm_07_01.do (2023.11.09.)
- Korean Social Science Data Center. 2023. <https://www.ksdc.re.kr/> (2023.08.09.)
- Lee, Deoksoon and Lee, Kwangwon. 1989. Estimation of the Economic Recreational Tourism Value of Forest Resources. *Journal of Rural Development* 12(4): 137-147.
- Lee, SeungHee and Hwang, DongRyong. 2021. A Study on Policy Plan and Promotion Tasks for Revitalization of the 6th Industry. *Journal of Industrial Convergence* 19(2): 33-38.
- Min, Kyungtaek. 2019. Forestry profitability in Korea with evaluating stumpage prices. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(3): 405-417.
- Moon, Eunjung and Lee, Yangsook. 2016. A Proposal on a Total Service Business Model of Sixth Industry based on Forestry - Building the 'Healing Lifestyle Village (HLV)' -. *Society of Design Convergence* 15(2): 285-299.
- Paek, JinYi and, Park, KyoungIl. An Economic Analysis of Rainbow Trout(*Onchorhynchus mykiss*) Aquaculture Farms. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* 8(5): 1280-1289.
- Statistics Korea. 2024. 2023 Rice Production Cost Survey. [https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301080100&bid=227&act=view&list_no=430131&tag=&nPage=1&ref_bid=222,223,225,226,227,228,229,230,11321&keyField=T&keyWord=\(2024.05.25.\)](https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301080100&bid=227&act=view&list_no=430131&tag=&nPage=1&ref_bid=222,223,225,226,227,228,229,230,11321&keyField=T&keyWord=(2024.05.25.))
- Youn, YeoChang and Kim, SeongIl. 1992. Comparative Study of Economic Evaluation Methodologies for the Recreational Value of Forest Resources. *Environmental and Resource Economics Review* 1(1): 155-184.

-
- Received 18 May 2024
 - Finally Revised 11 June 2024
 - Accepted 19 June 2024

산림경영정보학회지 임원 명단

편집위원회	위원장	박주원(경북대학교)
	위 원	강진택(국립산림과학원), 곽두안(순천대학교), 김문일(평택대학교), 김성용(안동대학교), 김현준(전남대학교), 박진우(강원대학교), 원현규(국립산림과학원), 정왕기(충남대학교), 한 희(서울대학교)
연구윤리위원회	위원장	김형호(경상대학교)
	위 원	임종수(국립산림과학원), 조장환(원광대학교)
고 문		이동섭, 신만용, 정주상, 이우균, 이경학, 정영교, 김철민, 최정기, 이영진, 이상현
회 장		이정수(강원대학교)
부회장		이원희(산림청), 배재수(국립산림과학원), 최돈하(한국임업진흥원), 이성권(산림조합중앙회), 박현재(산림조합중앙회), 김진(한국산지보전협회), 조현국(한국산지환경조사연구회)
이 사		원명수(국립산림과학원), 강진택(국립산림과학원), 지동훈(한국임업진흥원), 최고미(산림조합중앙회), 최인규(한국산지환경조사연구회), 송정은(한국산지보전협회)
감 사		박정목(국립산림과학원), 곽두안(순천대학교)
간 사		심우담(강원대학교)

ISSN 2636-0098

산림경영정보학회지 제14권 제1호

2024년 6월 30일 인쇄

2023년 6월 30일 발행

발행인 : 이정수

발행처 : 사단법인 산림경영정보학회

주 소 : (34417) 대전광역시 대덕구 동서대로 1800, 산림조합중앙회 산림자원조사본부 3층 산림경영정보학회

메 일 : ksfmi20@hanmail.net

홈페이지 : <https://ksfmi.co.kr/>

인 쇄 : 한국학술정보(주)