

소나무 모수림 시업지의 임분구조 및 치수생육특성

이대성¹ · 최정기^{2*}

¹핀란드 자연자원연구원, ²강원대학교 산림과학부

Stand Structure and Sapling Growth Characteristics of Korean Red Pine Stands Regenerated by the Seed Tree Method

Daesung Lee¹ and Jungkee Choi^{2*}

¹Natural Resources Institute Finland (Luke), Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki, Finland

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

요약: 본 연구는 소나무 모수작업에 따른 천연갱신 조성방안 및 산림시업지침을 마련할 수 있도록 2001년 실시된 소나무 천연하중갱신 시업지를 대상으로 작업 후 18년이 경과한 시기에 표준지조사를 실시하고 임분현황 및 치수생육상태를 분석하여 성장특성 및 임분자료를 제공하고자 하였다. 연구대상지는 강원도 춘천시 동산면 원창리 내 강원대학교 학술림에 위치하고 있으며, 설치된 모수시험림에서 2018년 11월 조사된 흉고직경, 수고, 수관급, 수간형질, 수령, 수고생장량 등의 자료를 활용하였다. 분석 시 흉고단면적, 재적, 형상비와 더불어 임분상대밀도, 임목축적도 등의 추가인자를 산출하여 시업지의 현황을 분석하였다. 잔존모수는 58본/ha로 임목축적도 17.7%이었으며, 치수는 2,330본/ha로 임목축적도 79.0%로 진단되었다. 치수의 수령은 2001~2007년에 발아분포를 보이고 있었는데 대부분은 15~16년생에 속하였다. 치수 생육상태는 흉고직경 10 cm, 수고 8 m로 파악되었다. 수관급이 우세할수록 흉고직경과 수고가 더 크게 나타났으며, 분산분석 및 Duncan 다중비교검정에서도 수관급별 차이는 통계적으로 매우 유의하였다($p < 0.0001$). 형상비는 80~90% 범위에 많이 분포하였으며, 95%이상 대부분 치수의 형질은 수간이 곧고 분지가 없으며, 초두부가 부러지지 않고 병해충의 피해가 없는 양질의 형태로 파악되었다. 치수의 평균 연년수고생장량은 1년생 21.9 cm, 5년생 43.3 cm, 10년생 54.3 cm, 15년생 64.3 cm이었으며, 전체적으로 수령증가에 따라 생장량이 우상향하는 것으로 나타났다. 공분산분석 결과, 수관급별 연년수고생장량에서도 유의적인 차이가 나타났으며, 회귀분석의 파라미터 추정치는 수령이 증가하거나 수관급이 우세할수록 연년수고생장량이 높은 것으로 분석되었다.


Abstract: This study was conducted to provide growth characteristics and stand information in preparation for natural regeneration method and silvicultural treatment of seed tree method in Korean red pine stands by using the field inventoried data 18 years after the seed tree regeneration method in 2001 and analyzing the stand and sapling characteristics. The study area was located in the Research Forest of Kangwon National University, Chuncheon-si, Gangwon-do. In November 2018, we collected tree measurement factors, such as diameter at breast height (DBH), height, crown class, stem quality, tree age, and annual height increment on the established plots. We calculated the basal area, volume, height-diameter ratio (HD ratio), and additional stand density variables such as the relative density and %stocking to analyze the managed stands. The number of mother trees was 58 trees/ha, with a 17.7% stocking level, whereas the number of saplings was 2,330 trees/ha, with a 79.0% stocking level. In germination, the age distribution of saplings ranged from 2001 to 2007, with most belonging to 15-16 years. The development condition of saplings was 10 cm in DBH and 8 m in height. DBH and height were higher as the crown class is more dominant, and this difference was statistically significant in the analysis of variance and Duncan's multiple comparison test ($p < 0.0001$). HD ratio ranged mostly between 80% and 90%, and more than 95% of sapling stems were of high quality, with a straight, unbroken top, non-sweep, and non-diseased stem. On average, the annual height increment of saplings was 21.9 cm at 1 year, 43.3 cm at 5 years, 54.3 cm at 10 years, and 64.3 cm at 15 years. The overall height growth with age increased smoothly. According to the analysis of covariance, the annual height growth by crown class differed significantly. The regression analysis parameters revealed that annual height growth increased with age and dominant crown class.

Key words: *Pinus densiflora Siebold & Zucc.*, natural regeneration, saplings, age distribution, stand density, annual height increment

* Corresponding author
E-mail: jungkee@kangwon.ac.kr

ORCID

Daesung Lee  <https://orcid.org/0000-0003-1586-9385>

Jungkee Choi  <https://orcid.org/0000-0001-8205-267X>

서론

우리나라 대표 향토수종인 소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.)는 우수한 재질·특성으로 목재가치가 높고 송이생산과 식·약용으로도 널리 이용되어 왔으며, 우량재의 경우 수입재와 비교해도 수요 및 가격경쟁력을 갖추고 있다(Korea Forest Research Institute, 2008; 2012). 또한, 소나무는 척박지에서도 잘 자라는 특성으로 황폐했던 우리나라 산림녹화에 크게 기여하여 현재 1,562,843 ha의 산림면적을 차지하고 있다. 이는 우리나라 전체 침엽수 면적의 66.8%에 해당하는 높은 비율이며, 최근 5년간 평균 조림면적은 4,449 ha로 전체 침엽수 조림면적의 31.8%를 차지하고 있어 매우 주요한 경제 침엽수종이다(Korea Forest Service, 2020).

국내 산림은 1970~80년대 치산녹화기의 조림으로 인해 전체 산림면적의 약 69%가 4영급 이상에 편중되어 있어 근래에는 벌채수확을 통한 활발한 목재생산이 이루어지고 있다(Korea Forest Service, 2020). 그 중 낙엽송과 더불어 넓은 산림면적과 많은 임목축적을 가지고 있는 소나무가 주요수확 대상으로 벌채되고 있어 이에 따른 재조림이 요구되고 있다(National Institute of Forest Science, 2017). 특히 산림청은 최근 2만 ha 이상의 산림면적에 1천억원 이상의 예산으로 조림·갱신계획을 추진하고 있으나 아직까지 묘목식재를 이용한 인공조림에 대한 의존도가 큰 실정이다(Korea Forest Service, 2021; National Institute of Forest Science, 2021).

산림청은 조림계획 면적이 점차 늘어남에 따라 보다 효율적인 후계림 조성방안을 모색하고 있으며, 특히 단순개벌 및 인공조림보다는 이와 병행하여 천연갱신 시업기준 및 관리 등 효과적이고 다양한 방안을 필요로 하고 있다. 천연갱신은 기존 임분에서 자연적으로 공급되어진 종자의 번식력과 재생력을 이용하여 후계림을 조성하는 방법이다(Lee et al., 2010). 최근 조림면적 확대에 따른 묘목의 낮은 생산을 및 공급을, 조림비용 증가와 같은 인공조림의 단점을 보완할 수 있으며 기후변화의 영향으로 인한 입지 환경적응에도 유리할 수 있어 천연갱신에 대한 관심이 높아지고 있다(Park and Jeon, 2010; National Institute of Forest Science, 2017; Byeon and Yun, 2018).

현재까지 국내에서 진행된 천연갱신 연구들도 일부 존재하나(Lee and Kim, 1989; Na et al., 2010), 소나무 모수림 연구는 여전히 부족한 상황이다(Byeon and Yun, 2018; 2019). 특히 소나무 모수시업지 내 천연갱신에 따른 치수생육에 관한 연구는 더욱 부족한 실정이다. 아직까지 우리나라에서는 소나무 천연림의 질적·양적 개선을 위한 무육방법과 이론 및 기술이 부족하여 산림시업 관리에 많은

어려움을 겪고 있다(Korea Forest Research Institute, 2008). 따라서 본 연구는 소나무 모수작업에 따른 천연갱신 조성방안 및 산림시업지침을 마련할 수 있도록 모수림 시험림을 대상으로 입분제원 및 치수생육상태를 파악하여 생장특성 및 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 표준지 설계

본 연구대상지는 강원도 춘천시 동산면 원창리 내 강원대학교 산림환경과학대학 학술림에 위치해 있다(Figure 1). 기후는 온대대륙성으로써 하계에는 고온다습하고 동계에는 저온 건조하다. 기상청에서 발표한 춘천지역 과거 연별 평년값 통계에 따르면, 2001~2010년 평균기온 11.4°C, 최고 17.5°C, 최저 6.3°C, 강수량 1,439.2 mm이었으며 2011~2020년 평균기온 11.7°C, 최고 17.6°C, 최저 6.6°C, 강수량 1,295.4 mm이었다(Korea Meteorological Administration, 2021). 토양은 대부분 양토 및 사질양토를 이루고 있으며, 낙엽분해산물과 광물질이 혼합되어 유기질이 풍부하고 식물생육에 적합하다(Choi, 2003).

소나무 모수시험지는 2000년 말 학술연구목적으로 지정되어 시험지 내 우량 형질의 소나무 모수를 제외한 모든 교목 및 관목류가 별도되었다. 이듬해 2001년 종자살포 및 방조망 설치, 2002~2003년 불량활엽수 제거, 지면균기, 소나무 종자파종, 2002~2004년 연 2회 제초작업이 실시되었다. 이후 2005~2006년 잡초 및 관목류 제거, 2007~2010년 하예작업이 수행되었다(Lee et al., 2018). 이러한 시업연혁에 근거하면 해당 시험림은 소나무 천연하중갱신 시업과 일부 직파작업이 같이 이루어진 특징이 있다.

소나무 천연갱신으로 시행된 시험지 1, 2의 당초 작업면적은 각 3,000 m², 2,000 m²이었으며, 금번 조사 시 시험지별 정방형 표준지를 설치한 후 모수 및 치수를 대상으로 현장조사를 실시하였다(Figure 2). 시험지별 표준지 합계 면적은 각 1,900 m², 1,000 m²이며, 현장조사를 통해 사면방향, 경사, 표고, 지위지수, 경위도 좌표 등의 지형 및 위치정보를 수집·기록하였다(Table 1). 표준지 위치정보는 Garmin사 Oregon 550 GPS기기를 이용하여 취득하였으며, 측정 당시 시험지의 모수 및 치수 생육상태 사진을 촬영하여 함께 기록하였다(Figure 3).

2. 조사인자 및 측정방법

현장조사는 2018년 11월에 수행되었으며, 설치된 표준지 내 모든 임목을 대상으로 모수/치수 여부와 임목번호를 기록하고, 수종, 흉고직경, 수고, 지하고, 수관급, 형질, 임목위치, 고사여부를 조사하였다. 흉고직경 측정은 직경

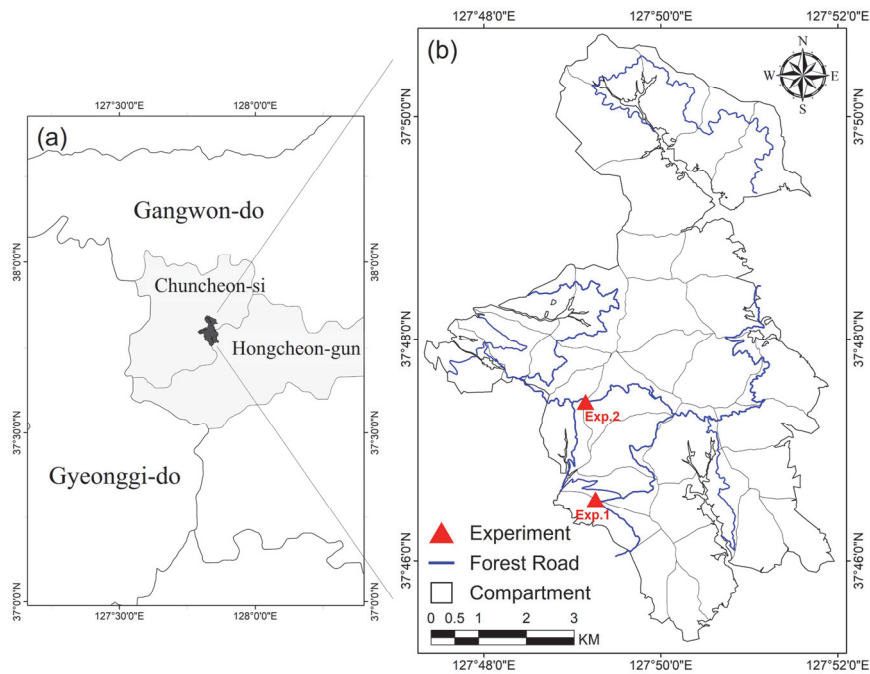


Figure 1. Map of the study area in research forest of Kangwon National University, Chuncheon-si, Gangwon-do, South Korea. The plot (a) presents the location of research forest, and plot (b) displays the location of experiments in the research forest.

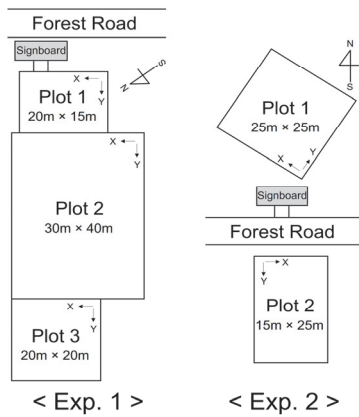


Figure 2. Sample plot design of Korean red pine for the research of seed tree regeneration method in study sites.



Figure 3. The photos of seed tree method experiments with saplings and mother seed trees in the research forest of Kangwon National University, Chuncheon-si, Gangwon-do, South Korea.

Table 1. Summary of site characteristics in seed tree method experiments of Korean red pine.

Experiment	Treatment area (m ²)	Plot area (m ²)	Established year	Aspect (°)	Slope (°)	Elevation (m)	Site index (m)	Location
1	3,000	1,900	April, 2001	210	13	481	18	N: 37°46'33" E: 127°49'16"
2	2,000	1,000		160	25	484		N: 37°47'26" E: 127°49'09"

Note: Site index was computed according to the site index table provided by Korea Forest Research Institute (2012). The coordinate system of location is WGS 84 Web Mercator.

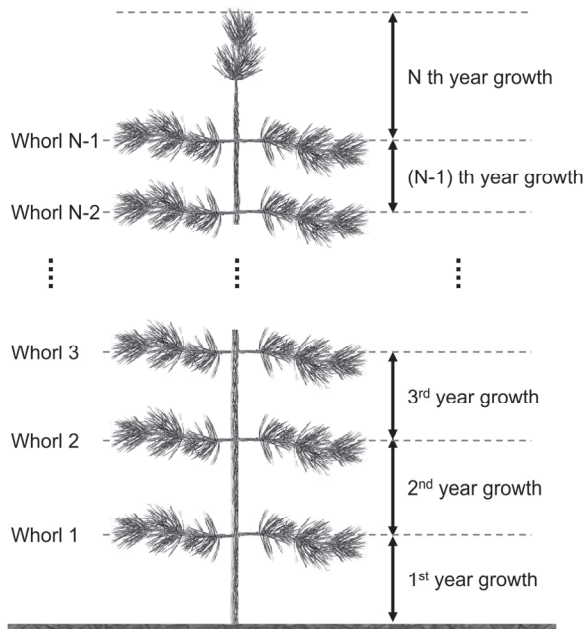


Figure 4. Measurement of saplings for age and height growth. Age was counted by the number of whorls and annual height growth was measured by the length between whorls. The example with age N represents each whorl and its growth by year.

테이프(D-tape)를, 수고 및 지하고 측정은 Haglof사 Vertex VI 기자재를 사용하였다. 지하고는 생가지가 위치한 최하단 잎가지의 높이를 측정하였으며, 수관급은 우세목(Dominant), 준우세목(Codominant), 중간목(Intermediate), 피압목(Suppressed)으로 구분하여 기록하였다(Choi et al., 2010, 2014, 2015). 형질은 4단계로 코드화하여 측정하였으며, 1단계로 수간의 분지여부, 2단계로 수간의 초두부가 부러진 여부, 3단계로 수간의 구부러진 형태, 4단계로 수간 및 수관에 병해충 피해여부를 조사하였다(Choi et al., 2010). 입목위치는 표준지의 한 꼭지점을 원점으로 하여 X방향과 Y방향으로의 거리를 측정하여 미터(m) 단위로 기록하였다(Figure 2).

표준지 내 포함된 모든 치수 중 1/3 입목을 대상으로 수령과 수고연년성장량 파악을 위해 지절개수 및 지절간격(지절고)를 측정하였다. 개체목이 가지는 크기 및 특성에 관계없이 임의적으로 표본을 수집하기 위하여, 지절측정 입목은 매 3번째 치수를 선정하는 계통추출법을 사용하였다. 치수의 각 지절별 위치는 육안으로 판단하였으며, 해당 지절높이는 수고측정봉을 이용하여 입목의 근원부부터 초두부 방향으로 측정하였다(Figure 4).

3. 분석방법 및 통계적 검정

임분 및 입목의 다양한 생육진단을 위해 본 분석에서는 수집된 자료를 기반으로 개체목 및 임분단위의 추가변수

들이 계산되었다. 형상비(Height-diameter (HD) ratio)는 수고/흉고직경 값을 퍼센트로 표현한 값이며, 지위지수는 표준지 내 치수의 우세목수고 및 해당 수령을 대상으로 국립산림과학원의 지위지수표를 이용하여 산출되었다(Korea Forest Research Institute, 2012). 흉고단면적(BA)은 흉고직경을 기반으로 식 1과 같이 산출되었으며, 입목재적(V)은 Lee et al.(2017)에 보고된 이변수 재적식 중 소나무 Model 4를 이용하여 식 2와 같이 산출되었다.

$$BA = \pi \times \left(\frac{1(m)}{100(cm)} \right)^2 \times \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (1)$$

$$V = 0.0228 + 0.00003506D^2H \quad (2)$$

BA: Tree basal area (m²), D: Tree diameter at breast height (cm),

π: mathematical constant approximately equal to 3.14159,

V: Tree volume (m³), H: Tree height (m).

임분단위에서는 임분밀도와 관련된 추가변수들이 산출·분석되었다. 평방평균흉고직경(\bar{D}_q)은 입목들의 평균흉고단면적에 해당하는 흉고직경으로써 식 3과 같이 계산되었다. 임분밀도지수(SDI)와 상대임분밀도(RD)는 Lee and Choi(2019)에 의해 보고된 국내 소나무 임분밀도지수 산출파라미터를 이용하여 식 4-6과 같이 적용한 값이며, 임목축적도(%Stocking)는 Lee and Choi(2020)가 제시한 방법 및 계수를 이용하여 식 7과 같이 산출되었다.

$$\bar{D}_q = \sqrt{\frac{BA}{\pi/(4 \times 10,000)}} \quad (3)$$

$$SDI_{max} = 30241.86 \times 25^{-1.0466} \quad (4)$$

$$SDI = \exp\left(\ln(TPH) + 1.0466 \times \ln(\bar{D}_q) - 1.0466 \times \ln(25)\right) \quad (5)$$

$$RD = \frac{SDI}{SDI_{max}} \quad (6)$$

$$\%Stocking = \frac{TPH \times (0.9153 + 0.0962\bar{D}_q)^2}{10,000} / \frac{1}{100} \quad (7)$$

\bar{D}_q : Quadratic mean diameter (cm), \overline{BA} : average tree basal area in a stand (m²),

SDI: Stand density index (trees/ha), exp: mathematical constant approximately equal to 2.71828,

SDI_{max}: Maximum stand density index (trees/ha at 25 cm of \bar{D}_q),

ln: natural logarithm, RD: Relative density, %Stocking: Percent stocking (%),

All other variables are the same as those previously defined.

임분 내 치수 생육상태 파악하고자 히스토그램으로 분포특성을 파악하였으며, 상자그림을 통해 수관급별 생육현황을 비교하였다. 해당 수관급별 차이에 대한 통계적 검정으로써 일원분산분석(One-way analysis of variance, one-way ANOVA) 및 Duncan의 다중비교검정 방법을 이용하였다. 추가적으로 수간형질별 치수현황을 비교하여 우량 목재생산을 위한 임목상태를 파악하였으며, 흉고직경과 수고의 관계를 파악 후 선형회귀모형을 개발하여 후속연구에 유용하도록 파라미터를 제공하였다.

표준지 내 수고봉으로 측정된 지질 수를 활용해 치수 수령을 계산하였으며, 이를 기반으로 표준지 내 수령 미측정 치수들에 비례적으로 적용하여 치수의 수령분포를 단위면적인 ha당 값으로 추정·환산하였다. 측정된 치수들의 수고연년생장량을 산출한 후 선행연구와 비교하였으며, 수관급별 분석을 추가하여 생장량 패턴을 심층적으로 분석하였다. 최종적으로 수령에 따른 수관급별 수고생장량에 대해 공분산분석(Analysis of covariance, ANCOVA)과 다중 선형회귀분석을 실시하여 통계검정결과 및 파라미터를 제공하였다. 회귀모델의 수관급은 더미변수로 적합되었으며, 본 연구에서 사용된 모든 통계분석 및 모델개발은 R 통계소프트웨어를 통해 수행되었다(R Core Team, 2019).

결과 및 고찰

1. 임분제원 및 치수발생동향

본 연구시험지의 소나무 모수는 58본/ha이었으며, 이는 국립산림과학원의 모수립 천연갱신 사례지 중 삼척 80본/ha보다는 적으며, 인제 20본/ha보다는 많은 본수였다(National Institute of Forest Science, 2017). 국내 통상적으로 ha당 30~50본을 존치시키는 소나무 모수작업을 감안하면, 해당 시험지는 적정본수의 모수를 존존시켜 갱신을 유도한 시험지로 평가된다(Lee et al., 2010). 본 시험지 모수들은 평균흉고직경 48.3 cm, 평균수고 17.3 cm로써 앞선 사례지들의 모수 흉고직경 52.8~61.6 cm, 수고 21.0~26.8 m 보다는 상대적으로 작은 것으로 파악되었다(Table 2).

모수의 임분밀도를 진단한 결과, 임목축적도(%Stocking)는 17.7%로써 Lee and Choi(2020)에 따르면 소나무 B-level stocking보다 낮은 단계로 분석되었는데, 이 결과는 임분 내 수관올폐를 충분히 낮은 상태로 유도하여 천연하중갱신이 적합하게 적용될 수 있는 임목축적도를 의미한다. 따라서 잔존모수본수를 절대적인 범위로 선정하는 본수 2~3%, 재적 10%, 30~50본/ha 등 기존방식과 달리 임목축적도는 모수의 크기에 따라 잔존본수를 조절하여 기존매뉴얼과

Table 2. Summary statistics of saplings and mother trees by tree-level and stand-level in the experimental sites. Tree-level statistics indicate Mean±SD(Min–Max).

Level	Variables	Sapling tree		Mother seed tree	
Tree	No. of observations	616		17	
	age (year)	15.5±1.2	(12–18)		
	dbh (cm)	9.3±3.1	(1.0–17.4)	48.3±7.6	(38.0–62.7)
	height (m)	7.9±2.1	(1.6–13.0)	17.3±4.3	(10.5–24.0)
	clear height (m)	2.5±1.2	(0.2–9.0)	6.9±2.0	(2.8–9.3)
	height-diameter (HD) ratio (%)	89.6±18.4	(52.3–174.1)	36.3±9.5	(17.7–60.9)
	basal area (m ²)	0.0075±0.0046	(0.0001–0.0238)	0.1878±0.0589	(0.1134–0.3088)
	volume (m ³)	0.0526±0.0227	(0.0229–0.1462)	1.5006±0.6266	(0.5572–2.7519)
Stand	No. of observations		2		2
	Stand density (trees/ha)		2,330		58
	Mean dbh (cm)		9.2		47.4
	Quadratic mean diameter (cm)		9.6		47.8
	Mean height (m)		7.8		17.2
	Stand basal area (m ² /ha)		16.4		10.6
	Stand volume (m ³ /ha)		116.2		84.4
	Stand density index (trees/ha)		858		115
	Relative density		0.82		0.11
%stocking		79.0		17.7	

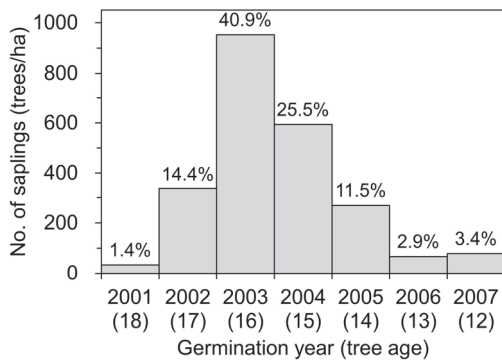


Figure 5. Age distribution of Korean red pine saplings at the measurement time of 2018 with the germination year.

함께 참고지표로 사용가능하다고 판단된다. 임분밀도치수에 따른 모수의 상대임분밀도는 0.11로써 임목축적도와 유사한 결과가 산출되었으며, 참고활용이 가능할 것으로 평가된다.

발생한 치수는 2018년 말 기준 대부분 15~16년생에 분포하였으며, 치수의 임분밀도는 2,330본/ha이었다(Figure 5). 임목축적도는 79%로 진단되었는데, 본 시험지 초기 임내 많은 종자가 유입된 후 수령이 증가하면서 3천본 이하의 임분상태에 도달한 것으로 판단된다. 또한, 치수의 상대임분밀도는 0.82로써 임목축적도와 결과가 유사하였는데, 밀도진단에 참고지수로써 활용이 기대된다. Byeon and Yun(2018)는 모수림 시업 후 10년 경과된 현장조사에서 비피압목 3,175본으로 보고하였는데, 이는 갱신발달에 따른 본수감소를 고려하면 본 연구 16년생의 임분밀도와 유사한 결과로 분석되었다.

National Institute of Forest Science(2021)은 삼척 소나무 모수림 시업지에서 3년생 이상 치수의 생존본수가 ha당 1만본을 상회하였으나, 치수의 생존 및 생장이 안정됨에 따라 매년 본수가 감소하는 경향을 보고하였다. 또한, 인제 소나무 모수림 천연갱신 사례지에서도 갱신 6년차 때 12,000본/ha에서 갱신 23년차 때 2,735본/ha으로 치수의 밀도가 감소된 것으로 보고되었다(National Institute of Forest Science, 2017). 이를 참고하면 본 시험지의 치수는 평균 16년생 2,330본/ha로써 선행연구 범위 내 적정수준으로 포함되며, 임분밀도지수 및 임목축적도 진단결과에서도 과밀 혹은 과소하지 않은 상태로 평가된다.

본 연구대상지의 임분밀도 및 평균생장을 진단하고자 국립산림과학원의 시업지침자료를 비교검토한 결과, 지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼에서는 소나무 천연림의 경우 우량대경재 생산을 위해 12년생 때 어린나무가꾸기 2차 작업을 통해 1,800본/ha으로 밀도조절을 실시하고 18년생 때 1,200본/ha로 1차 솎아베기를 권고하고 있는데

(Korea Forest Research Institute, 2005), 본 시험지는 평균 흉고직경 9.2 cm, 평균수고 7.8 m이면서도 표준매뉴얼보다 임분밀도는 다소 높은 것으로 진단되었다. 또한, Korea Forest Research Institute(2008)은 소나무 천연갱신지에서의 임분밀도관리를 수고급에 따라 제시하기도 하였는데, 평균수고 8 m의 경우 1,500~1,800본/ha을 권고하는 것과 비교하여 본 연구의 평균수고는 유사하였지만 임분밀도는 2,330본/ha로 다소 높았다.

치수 수령분포는 시기별 발아에 따라 2001년부터 2007년까지 구성되어 있었으며, 특히 시업 후 3~4년 경과시기에 많은 치수들이 분포하는 것으로 파악되었다. 이는 임지 정리 및 풀베기 작업이 있었던 인제 용대리 성공사레지에서 초기 2~6년생이 분포했던 것과 삼척 이천리 성공사레지에서 3~4년생의 치수발생량이 가장 많았다고 보고한 것과 유사하였다(National Institute of Forest Science, 2017).

Byeon and Yun(2018)의 정선 소나무 천연갱신지 연구 결과, 시업 후 5~7년차에 많은 치수들이 발생하였는데, 본 연구에서는 3~4년차에 많은 치수들이 발생하여 1~2년 정도의 차이가 있었다. 이 차이는 본 연구대상지에서 실시된 산림시업(예: 임지정리)이 갱신 및 치수생육에 미친 유의한 영향에 따른 것으로 판단되는데, 향후 구체적인 후속연구 설계 및 분석을 통해 심층적인 고찰이 필요하다.

또한, Byeon and Yun(2018)은 천연하중갱신시업의 성공 유무를 판단하기 위해서 작업 후 5~8년이 경과해야 한다고 하였는데, 본 연구에서도 갱신 5년차까지 발생한 93.7%의 많은 치수들이 최소 1~3년생까지 성장하여 안정되기까지 갱신 후 총 5~8년의 기간이 소요되는 것으로 분석되었다. 따라서 모수림 천연하중갱신의 성공여부는 치수생존 및 초기활착이 진단될 때까지 작업 후 최소 5~8년 정도의 경과기간을 지켜봐야 하는 것으로 사료된다.

2. 치수특성에 따른 생장분석

분석인자별 치수생육특성을 히스토그램으로 분석한 결과, 솎아베기가 실시되기 전으로써 흉고직경 및 수고분포는 치수들이 자라면서 평균을 중심으로 봉우리를 형성하는 종모양의 정규분포 형태로 도시되었다(Figure 6). 지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼에서는 우량대경재 생산을 목표로 18년생 흉고직경 13 cm, 수고 10 m로 권고하였는데(Korea Forest Research Institute, 2005), 본 연구는 평균 16년생, 흉고직경 10 cm, 수고 8 m로써 이에 부합하는 생육환경에 있는 것으로 분석되었다. 또한, 국립산림과학원 인제 용대리 모수시업지의 치수는 갱신 23년차 2,735본/ha, 흉고직경 12 cm, 수고 8 m로 보고되었는데, 본 연구의 치수는 2,333본/ha, 흉고직경 10 cm, 수고 8 m로써 평균 수령 16년생을 고려하면 상대적으로 우세한 생육특성이

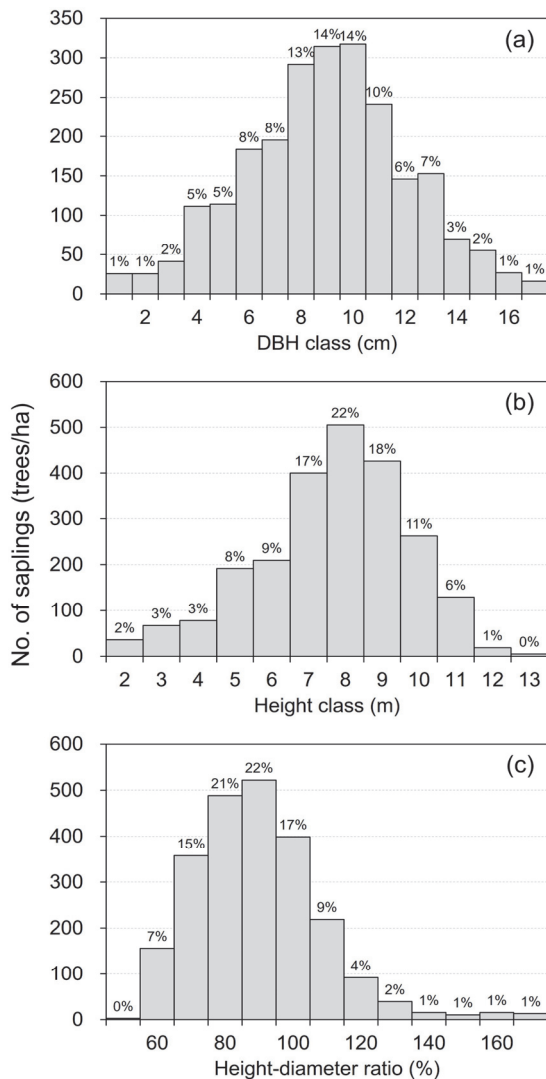


Figure 6. Distribution of DBH (a), height (b), and height-diameter ratio (c).

나타났다(National Institute of Forest Science, 2017).

형상비의 경우 90% 전후에서 치수분포가 가장 많았으며, 100%가 넘는 치수들도 일부 존재하였다. 이 결과는 지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼에서 권장하는 우량대경재 목표림의 형상비 116%(12년생)와 77%(18년생) 사이에 위치하는 값으로 안정적인 치수 형상비 분포를 나타내고 있었다(Korea Forest Research Institute, 2005). Kang et al. (2019)은 장령림에서 강원지방소나무 평균형상비가 70.8%로 대부분이 70~80% 범위라고 보고하였는데, 본 연구의 치수들은 평균 16년생의 유령림으로써 장령림의 형상비보다 높았다. 본 연구에서 형상비가 90% 전후로 가장 많이 분포함을 고려하면 적정 형상비도 영급 및 개체목 크기에 따라 차이가 있음을 시사한다.

치수들의 수관급별 흉고직경, 수고, 형상비를 상자그림

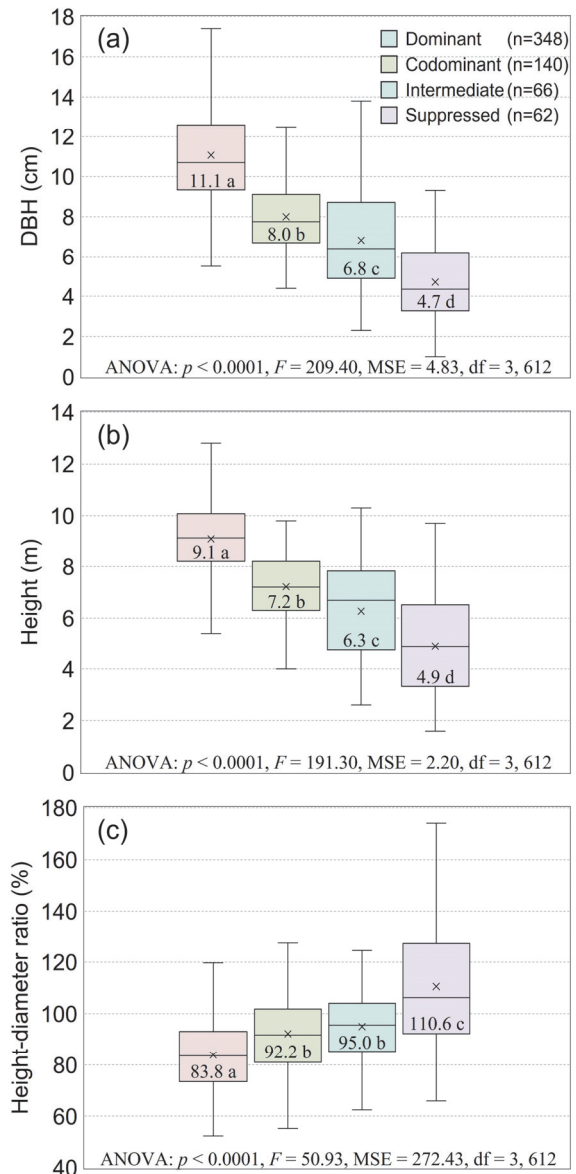


Figure 7. Box and whisker plots for tree DBH (a), Height (b), and height-diameter ratio (c) of saplings by crown class with one-way ANOVA. The numeric values inside each box represent the arithmetic mean. The result of Duncan's test for multiple comparison was presented with the alphabet letter in each box. The same letters of Duncan's test were not significantly different in error rate of $\alpha = 0.05$.

으로 도시하고 일원분산분석을 실시한 결과, 모든 인자에서 통계적으로 유의적인 차이가 나타났다(Figure 7). 흉고 직경과 수고는 수관급별로 모두 차이가 나타났는데, 특히 흉고직경은 우세목 평균 11.1 cm로 피압목 평균 4.7 cm보다 두 배 이상 큰 것으로 분석되었다. 또한, 형상비도 수관급에 따라 유의적인 차이가 나타났는데, 특히 피압목 형상비가 평균 110.6%로 가장 높았다. 따라서 추후 미래목을

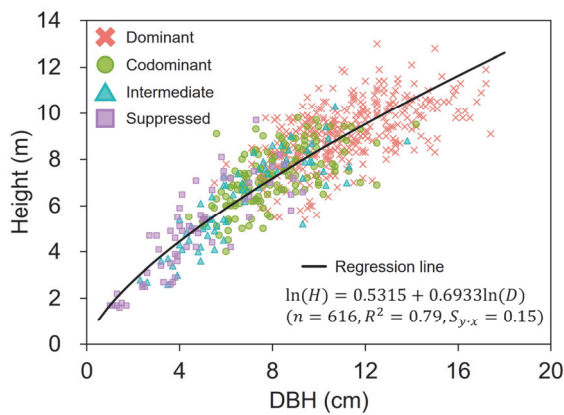


Figure 8. Scatterplot of Height-DBH by crown class with a regression line. The regression line of ln (Height) as a function of ln (DBH) was fitted to overall observations. ln is natural logarithm. The predictor and intercept were all significant ($p < 0.0001$).

잔존시키고 하층간벌을 유도하는 피압목 솥아베기를 실시하면 산림자원관리 표준매뉴얼에서 제시하는 형상비 77%(18년생)에 상응할 것이라 판단된다(Korea Forest Research Institute, 2005). 한편, 형질급에서 치수 95.1%가 수간이 곧고 초두부가 분지되지 않은 양질의 생육상태를 나타내고 있어 우량재 생산목표에도 적합한 것으로 분석되었다. 그 외 수간이 다소 휘거나 초두부가 분지된 4.9%의 일부 치수들은 추후 우선적으로 솥아베기 할 대상임목으

로 고려된다.

치수들의 흉고직경과 수고는 선형성이 높은 생육상태에 있었으며, 이 경향은 흉고직경-수고 산점도에서 명료하게 표현되었다(Figure 8). 특히, 우세목의 흉고직경과 수고가 가장 큰 것으로 나타났으며, 뒤이어 준우세목, 중간목 순으로 확인되었고 피압목의 생육상태가 가장 낮은 것으로 파악되었다. 전체 치수들을 대상으로 흉고직경-수고 추정식을 제시하고자 흉고직경을 예측변수로 적용한 선형회귀모델을 적합시켜 파라미터 및 통계량을 제공하였다(Figure 8). 그 결과 절편을 제외한 모든 파라미터는 매우 유의적으로 추정되었으며($p < 0.0001$), 결정계수(R^2)는 0.79 이상의 적합성을 나타내어 향후 유사한 흉고직경 범위를 갖는 소나무 모수시업지의 수고추정 시 본 모델이 활용가능할 것이라 사료된다.

3. 치수 수고성장량 추이

전체자료와 수관급에 따라 수령별 치수의 수고성장량을 살펴보았으며(Table 3), 표본 수가 부족한 16년생 이상의 일부 수치를 제외한 후 성장량 패턴을 도시하여 선행연구와 비교하였다(Figure 9). 치수의 평균수고성장량은 1년생 21.9 cm, 5년생 43.3 cm, 10년생 54.3 cm, 15년생 64.3 cm 로써 수령에 따라 전체적으로 우상향하고 있었다(Figure 9a). 이와 같은 연년수고성장량의 증가경향은 정선과 안면도의 모수시업지를 대상으로 한 선행연구의 치수성장분석

Table 3. Mean and standard deviation of annual tree height increment (cm/year) with the number of observations (n) in parenthesis.

Age	Dominant	Codominant	Intermediate	Suppressed	Overall
1	23.0±12.1 (83)	21.4±10.1 (45)	16.7±6.1 (18)	22.8±11.0 (25)	21.9±11.0 (171)
2	29.9±10.9 (83)	24.7±9.5 (45)	22.4±9.9 (18)	24.8±13.0 (25)	27.0±11.1 (171)
3	40.5±15.3 (83)	33.1±11.3 (45)	31.5±21.1 (18)	25.5±11.6 (25)	35.4±15.5 (171)
4	51.1±15.3 (83)	39.0±14.2 (45)	33.2±14.2 (18)	23.7±12.1 (25)	42.1±17.5 (171)
5	51.6±16.4 (83)	39.9±11.6 (45)	35.8±12.2 (18)	27.5±11.4 (25)	43.3±16.6 (171)
6	52.1±16.6 (83)	41.6±12.9 (45)	35.9±12.9 (18)	30.3±14.2 (25)	44.5±17.0 (171)
7	60.7±20.3 (83)	46.8±16.3 (45)	43.1±21.3 (18)	39.8±20.6 (25)	52.1±21.2 (171)
8	67.0±23.9 (83)	53.8±17.9 (45)	49.0±21.5 (18)	41.7±23.3 (25)	57.9±24.0 (171)
9	69.3±19.5 (83)	55.8±14.5 (45)	45.7±20.3 (18)	35.6±18.2 (25)	58.3±21.9 (171)
10	62.5±20.0 (83)	52.0±13.8 (45)	44.3±18.9 (18)	38.4±18.5 (25)	54.3±20.2 (171)
11	58.0±20.6 (83)	47.8±12.1 (45)	45.0±17.1 (18)	41.2±26.4 (25)	51.5±20.4 (171)
12	61.1±21.7 (83)	46.9±15.0 (45)	45.3±19.5 (18)	41.2±20.8 (25)	52.8±21.3 (171)
13	68.9±24.4 (82)	55.0±25.5 (45)	50.6±22.7 (15)	50.0±22.3 (22)	60.8±25.5 (164)
14	76.3±28.0 (79)	60.4±27.8 (45)	60.4±22.8 (14)	47.9±24.2 (20)	66.8±28.7 (158)
15	70.5±31.9 (73)	61.4±20.1 (36)	57.6±14.6 (13)	44.2±30.6 (13)	64.3±28.7 (135)
16	58.7±36.6 (47)	49.9±25.1 (29)	51.4±23.8 (8)	60.7±24.7 (7)	55.4±31.4 (91)
17	47.3±32.2 (12)	55.3±14.7 (7)	34.0±5.7 (2)	28.0±20.7 (3)	46.1±25.9 (24)
18		17.0 (1)		12.0 (1)	14.5±3.5 (2)

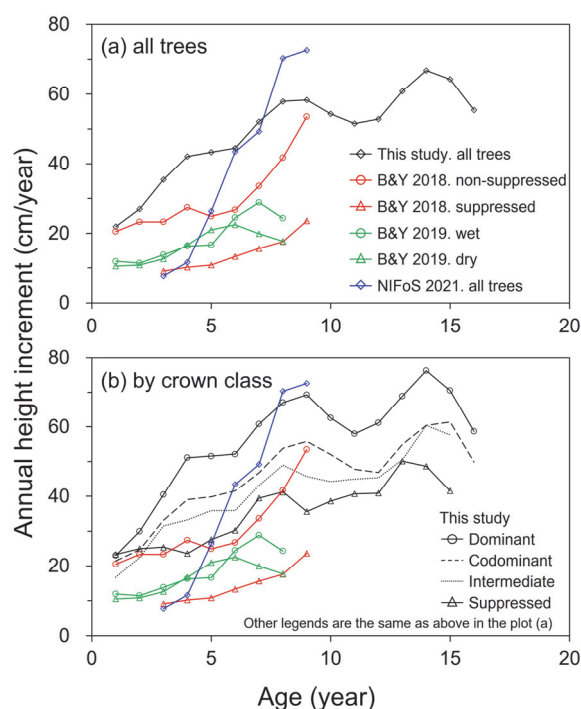


Figure 9. Annual tree height increment of saplings by age. The plot (a) presents overall annual height increment with all trees and the plot (b) by crown class. The results of the present study were compared with the preceding studies (Byeon and Yun 2018, 2019; National Institute of Forest Science 2021). The samples of annual height increment after age 15 in the present study were not included in the figure due to the lack of observations ($n < 30$) and large variance.

에서도 동일하게 확인되었다(Byeon and Yun, 2018, 2019).

또한, National Institute of Forest Science(2021)가 보고한 삼척 모수시업지의 경우, 본 연구와 비교하여 수고생장량은 3~5년생에서 낮았고 6~7년생에서 유사하였으며, 8년생부터 더 높았다[Figure 9(a)]. 따라서 모수시업지의 미세지형 및 임지생산성에 따라 연구간 다소 차이는 존재하

였지만, 전체적인 수고생장량 증가경향은 동일한 것으로 확인되었다. 한편, 동일한 소나무 천연하중갱신 작업임에도 본 연구의 연년수고생장량이 선행연구보다 전반적으로 높았는데(Byeon and Yun, 2018, 2019), 본 시험림은 선행연구와 토양 등 임지생산성뿐만 아니라 시업연혁에서도 차이가 있었다. 본 시험림은 학슬림 내 설치되어 시기별로 불량활엽수제거, 제초작업, 잡초·관목류 제거, 하에작업 등 시업관리가 적절히 수행됨에 따라 치수생육환경에 유리한 영향이 일부 작용했을 것으로 판단된다.

치수의 연년수고생장량은 수관급별 세부분석에서도 차이가 나타났다[Figure 9(b)]. 특히 우세목은 국립산림과학원의 8~9년생 수치와 유사하였으며, 중간목과 준우세목도 선행연구들과 유사한 성장량 구간이 존재하였다(Byeon and Yun, 2018; National Institute of Forest Science, 2021). 이러한 수령 및 수관급별 성장량 차이에 대하여 식 8과 같이 공분산분석을 실시하였는데(Table 4), 모두 통계적으로 유의적인 차이가 있는 것으로 분석되었다($p < 0.0001$). 또한, 수령과 수관급을 대상으로 식 9와 같이 분석된 다중선형회귀모델에서는 수령에 따라 수고생장량이 증가하였으며, 수관급에 따라 우세목, 준우세목, 중간목, 피압목 순으로 파라미터가 추정되어 실제 측정값의 추세에 적합한 결과가 도출되었다[Table 4, Figure 9(b)].

$$\Delta h = \mu + \tau_i + \gamma(A_{ij} - \bar{A}) + \epsilon \quad (8)$$

Δh : annual height increment (cm/year), μ : global mean, τ_i : the effect of crown class i ,

γ : slope coefficient of the covariate, \bar{A} : the global mean for covariate, tree age (A),

A_{ij} : the j th observation of the covariate, tree age (A), in the i th crown class,

ϵ : the error term.

Table 4. Analysis of covariance (ANCOVA) and multiple linear regression model with parameter estimates of age and crown class to predict annual height increment (cm/year) of saplings.

Analysis of covariance (ANCOVA)						Multiple linear regression model ($R_{adj}^2=0.869$, $S_{y \cdot x}=19.61$)				
Source	DF	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr > F	Effect	Estimate	Std. Error	t Value	Pr > t
Age	1	335326.2	335326.2	870.3	<0.0001	Age	2.6788	0.0921	29.08	<0.0001
Crown class	3	148200.2	49400.1	128.2	<0.0001	Dominant	34.7617	0.9196	37.80	<0.0001
Residuals	2504	964789.8	385.3			Codominant	23.9102	1.0531	22.70	<0.0001
						Intermediate	19.7140	1.4137	13.95	<0.0001
						Suppressed	14.5882	1.2571	11.60	<0.0001

Note : Modeling data ranged between 1 and 15 year in tree age. Results refer to the ANCOVA testing the main effects assuming slope homogeneity. The models were presented in Eq. (8). for ANCOVA and in Eq. (9) for the multiple linear regression model, respectively. R_{adj}^2 is adjusted coefficient of determination. $S_{y \cdot x}$ is standard error of the estimate. Age is the age of saplings (year). Dominant, Codominant, Intermediate, and Suppressed are the dummy variables of crown class.

$$\Delta h = b_1 AGE_{tree} + b_2 CR_{class} + \epsilon \quad (9)$$

AGE_{tree} : tree age (year),

CR_{class} : crown class (dominant, codominant, intermediate, suppressed).

All other variables are the same as those previously defined.

결론

본 연구는 강원대학교 학술림 내 위치한 소나무 모수림을 대상으로 모수 및 치수의 임분제원과 시업 후 18년이 경과한 시점의 치수생육상태를 조사·분석하였다. 잔존 모수는 58본/ha이며 임목축적도(%Stocking) 17.7%로 수관 율폐가 충분히 낮아 천연하중갱신에 적합한 모수의 상대밀도로 진단되었다. 치수의 임분밀도는 2,330본/ha으로 임목 축적도 79%이었으며, 대부분 15~16년생에 분포하고 있었다. 치수의 수령분포는 2001~2007년에 발아된 것으로 파악되었으며, 특히 시업 후 3~4년 경과시기에 자라나는 치수들이 많이 분포하였다. 따라서 모수림 천연하중갱신의 성공여부는 시업 후 최소 5~8년 정도의 기간을 갖고 평가해야 한다고 사료된다. 본 시험림 내 치수들은 평균수령 16년생, 2,333본/ha, 흉고직경 10 cm, 수고 8 m으로써 선행연구와 비교하여 다소 우수한 생육상태로 진단되었다.

본 연구에서 전반적인 형상비는 80~90% 범위로써 기존에 보고된 장령림의 형상비 범위보다 높아 적정 형상비도 영급 및 개체목의 크기에 따라 차이가 있음을 시사하였다. 수관급별 치수생육분석에서도 유의적인 차이가 분석되었으며, 특히 평균흉고직경의 경우 우세목 11.1 cm, 피압목 4.7 cm로 두 배 이상의 차이가 나타났다. 형질의 경우 전체 치수의 95.1%가 우량목재생산을 위해 적합한 곧고 분지가 없는 수간형을 갖는 치수들로 나타났다. 치수의 연년수고성장량은 1년생 21.9 cm, 5년생 43.3 cm, 10년생 54.3 cm, 15년생 64.3 cm으로써, 수령증가에 따라 수고성장량도 전반적으로 우상향하는 경향이 파악되었다. 공분산분석 결과, 연년수고성장량은 수령 및 수관급에 따라 유의적으로 차이가 있었으며, 다중선형회귀모델에서는 수령이 크고 수관급이 우세할수록 수고성장량이 증가하는 파라미터가 제공되었다. 본 연구에서 분석한 모수 및 치수정보는 향후 모수림 천연하중갱신 시업을 위한 기초자료로 참고·활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구

재단 기초연구사업(No. NRF-2016R1D1A1B02011648)의 지원을 받아 수행되었습니다. 시험림을 관리하는 강원대학교 학술림 직원 일동과 현장조사를 함께 수행한 강원대학교 산림측정학실험실 학생들에게 고마움을 전합니다.

References

- Byeon, S.Y. and Yun, C.W. 2018. Understory species composition and *Pinus densiflora* natural regeneration in *Pinus densiflora* stands regenerated by seed-tree method. Journal of Korean Society of Forest Science 107(1): 25-34. (in Korean with English abstract)
- Byeon, S.Y., Kim, H.S., and Yun, C.W. 2019. Vegetation structure of lower stratum and *Pinus densiflora* natural regeneration features from micro-topography classification in *Pinus densiflora* Forest of Anmyeon-do Island. Journal of Korean Society of Forest Science 108(2): 189-199. (in Korean with English abstract)
- Choi, I.H. 2003. Income business and outline of the research forest of Kangwon National University. Journal of Research Forest of Kangwon National University 23: 64-79 (in Korean).
- Choi, J.K., Hong, S.W., Choi, G.H., Kang, S.H., Hong, S.W., Shin, J.W. and Choi, I.H. 2009. Investigation of permanent sample plots(1),(2),(3) in the artificial stand of *Pinus koraiensis*(I). Journal of Research Forest of Kangwon National University 30: 49-79. (in Korean)
- Choi, J.K., Lee, D.S., Seo, Y.W. and Choi, I.H. 2014. Investigation of thinning experimental plots(1),(2) of Korean white pine stand(II). Journal of Research Forest of Kangwon National University 34: 1-26. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.K., Seo, Y.W. and Lee, D.S. 2015. Investigation of thinning experimental plots(4~10) of Korean white pine plantation(III). Journal of Research Forest of Kangwon National University 35: 49-102. (in Korean with English abstract)
- Kang, J.T., Ko, C.U., Yim, J.S., Lee, S.J. and Moon, G.H. 2019. Estimating tree shape ratio by region for *Pinus Densiflora* and *Larix Kaempferi* in Korea. Journal of Korean Society of Forest Science 108(4): 600-609. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Research Institute. 2005. Standard manual for sustainable forest resource management. Korea Forest Research Institute, Seoul, pp. 289. (in Korean)
- Korea Forest Research Institute. 2008. Silvicultural treatment for natural forests of *Pinus densiflora*. Korea Forest Research Institute, Seoul, pp. 69. (in Korean)

- Korea Forest Research Institute. 2012. Commercial tree species 1 *Pinus densiflora*. Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea. pp. 250 (in Korean)
- Korea Forest Service. 2020. 2020 Statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service, Daejeon, p. 448 (in Korean)
- Korea Forest Service. 2021. Budget plan in 2021. <https://www.forest.go.kr/>. (in Korean)
- Korea Meteorological Administration. 2021. Annual climate value in Korea. <https://data.kma.go.kr/>. (in Korean)
- Lee, C.S. and Kim, H.E. 1989. Ecological study of natural regeneration by selfsown of *Pinus densiflora* forest. Journal of Agriculture & Life Science 7(2): 100-109. (in Korean with English abstract)
- Lee, D.K., Kwon, K.W., Kim, J.H. and Kim, G.T. 2010. Silviculture. Hyangmunsa, Seoul, pp. 334. (in Korean)
- Lee, D.S., Choi, J.K. and Song, C.H. 2018. Investigation of experimental plots(1),(2) in the mother tree system stand of *Pinus densiflora* (I). Journal of Research Forest of Kangwon National University 38: 29-61. (in Korean with English abstract)
- Lee, D. and Choi, J. 2019. Evaluating maximum stand density and size–density relationships based on the competition density rule in Korean pines and Japanese larch. Forest Ecology and Management 446: 204-213.
- Lee, D. and Choi, J. 2020. Stocking diagrams for silvicultural guideline in Korean pines and Japanese larch. Forests 11(8): 833.
- Na, S.J., Woo, K.S., Kim, C.S., Yoon, J.H., Lee, H.H. and Lee, D.H. 2010. Comparison of above-ground growth characteristics between naturally regenerated and planted stands of *Pinus densiflora* for. erecta Uyeki in Gangwon Province. Journal of Korean Forest Society 99(3): 323-330. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Forest Science. 2017. Natural Regeneration Mechanism and Medium · Large Timber Harvest Operation for Major Species. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea. pp. 188 (in Korean)
- National Institute of Forest Science. 2021. Silviculture Technology of *Pinus koraiensis* and *Larix kaempferi* for Secondary Growth Forest by Natural Regeneration. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea. pp. 181 (in Korean)
- R Core Team, 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Manuscript Received : November 1, 2021

First Revision : November 30, 2021

Accepted : December 1, 2021