

간벌 횟수에 따른 가뭄에 대한 잣나무 임분의 회복탄력성 평가

이주현 · 윤순진 · 김민수 · 김아름 · 이기웅 

국립산림과학원 산림생태연구과

Evaluation of Resilience of Korean Pine Plantations to Drought by Thinning Frequency

Juhyun Lee, Soon Jin Yun, Minsu Kim, A Reum Kim and Kiwoong Lee 

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

요약: 기후변화로 인한 가뭄 및 이상고온으로 대규모 산림 고사가 점차 빈번해지면서, 기후변화 적응 및 대응 전략으로써 산림 시업의 중요성이 증가하였다. 이에, 본 연구는 강원도 춘천시 가리산에 위치한 약 63년생 잣나무 조림지를 대상으로 간벌 횟수에 따른 가뭄에 대한 회복탄력성을 평가하였다. 연구대상지는 대조구(Control), 2007년(임분 밀도의 35% 제거) 한 번 간벌처리한 지역(Thin 1)과 2000년(임분 밀도의 20% 제거), 2007년(임분 밀도의 35% 제거) 총 두 번 간벌처리한 지역(Thin 2)으로 선정하였다. 회복탄력성의 평가는 2022년 목편을 추출하여 흉고단면적 성장량을 계산한 뒤, 이를 바탕으로 3번의 가뭄(2001년, 2008년, 2014~2017년)과 가뭄 전후 각 2년간 성장량을 이용하여 총 세 가지의 회복탄력성 지수(저항성, 회복성, 탄력성)를 산출하여 이루어졌다. 흉고단면적을 계산한 결과, 흉고단면적 성장량이 간벌 횟수에 따라 증가하였다. 또한, 두 간벌 처리구의 2008년 가뭄에 대한 저항성이 유의미하게 증가하였고, 이는 간벌이 가뭄 기간 동안 성장량 감소를 완화한다는 것을 보여준다. 2000년 간벌 이후 처리구 간에 회복탄력성 지표의 차이가 나타나지 않은 것은 심한 가뭄에 비해 낮은 간벌 강도 때문으로 생각되고, 2008년 가뭄에 대해 간벌 횟수에 따른 저항성의 차이가 나타나지 않은 것은 성장량을 회복탄력성으로 정량화 하는 기법과 가뭄 전후 반영되는 기간이 짧았기 때문으로 분석된다. 본 연구는 국내 잣나무 조림지에 간벌 횟수가 가뭄에 대한 간벌 효과에 미치는 영향과 흉고단면적 성장량을 기반으로 한 회복탄력성 지표의 적용 가능성을 확인하였다.

Abstract: Mass forest die-offs have become more frequent in recent decades and are expected to increase further due to drought and heat waves driven by climate change. Consequently, forest management has gained importance as a strategy for climate change adaptation and mitigation. This study assessed drought resilience in relation to thinning frequency in a 63-year-old Korean pine plantation on Mt. Gari, Chuncheon, Gangwon-do. The study site included three treatment areas: (1) Control, (2) Thin 1(thinned in 2007 with a 35% reduction), and (3) Thin 2(thinned in 2000 with a 20% reduction and again in 2007 with a 35% reduction). In April 2022, tree-ring cores were extracted from each area to construct chronologies and measure basal area increment(BAI). A resilience index was applied to three drought events in 2001, 2008, and 2014~2017 to assess thinning effects. Dendrochronology results showed that BAI increased with thinning frequency. Resistance was significantly higher in the thinned plots compared with the control plots during the 2008 drought. However, low resistance was observed in 2000, which may be attributed to the relatively low thinning intensity compared with drought severity. No significant difference was observed between thinned plots, which may result from using BAI to quantify resilience or an insufficient timeframe for capturing pre- and post-drought growth. These findings confirm that thinning enhances drought resilience and highlight the potential of applying the resilience index to evaluate thinning effects in Korean pine plantations.

Key words: drought, thinning, resilience, dendrochronology, basal area increment

* Corresponding author
E-mail: woongs0718@gmail.com

ORCID
Kiwoong Lee  https://orcid.org/0000-0002-7294-3214

서론

전 세계적으로 기후변화로 인한 가뭄 및 이상고온으로 산림의 고사가 점차 빈번해지고 있다(Allen et al., 2010; Brodribb et al., 2020; Hartmann et al., 2020). 2018년 극심한 가뭄 및 이상고온으로 중부 유럽은 2,450 km²에 달하는 산림면적이 피해를 입었으며 북미에서는 내건성이 높은 수종까지 고사하여 기후변화로 인한 가뭄 스트레스가 수목이 적응할 수 있는 수준을 넘어서고 있다는 것을 보여주었다(Allen et al., 2010; Anderegg et al., 2019; Schuldt et al., 2020; Kannenberg et al., 2021).

특히, 가뭄과 이상고온은 수목의 건강성을 저하하여 교란에 취약한 상태로 만들고 병해충이나 산불과 같은 다른 산림 재해의 원인이 되어 대규모의 산림 손실을 야기할 수 있다(Allen et al., 2015). 산림 고사는 산림이 조절하는 에너지 및 물질 순환과 생물다양성, 생태계 기능 및 생태계 서비스 제공에 막대한 영향을 초래할 수 있다(Pan et al., 2011; Anderegg et al., 2015; Hartmann et al., 2018). 산림은 지구 육지 면적의 31%를 차지하고 인간의 활동으로 배출된 탄소 중 25%를 흡수하기 때문에(Pan et al., 2011), 대규모 산림 고사는 산림의 생산성을 감소시키고 기후변화에 대한 취약성을 증가시킨다(FAO, 2020).

기후변화로 인한 가뭄 스트레스가 커짐에 따라, 산림의 온전성을 유지하기 위한 시업의 중요성이 증가하였다. 현재 해외에서는 생태계의 구조적, 구성적 다양성을 높여 기후변화에 대응하는 산림 시업에 주목하고 있다(D'Amato et al., 2011). 산림 시업의 방법으로는 가뭄에 저항성이 높은 수종을 식재하거나 단순림을 연령 및 수종이 다양한 혼효림으로 전환하는 것 등이 있으나, 많은 연구를 통해 간벌이 단기간의 가뭄에 대한 산림의 안정성과 활력을 증진시킨다는 결과가 보고되었다(Lindner, 2000; Lasch et al., 2002; Kohler et al., 2010).

간벌은 가장 흔하게 이용되는 산림 시업 방법으로, 임분의 수관층을 열어 새로운 하층식생의 발달과 침입을 유도하여 산림의 구조 및 구성을 변화시킨다(Hunter and Calhoun, 1996). 간벌로 인한 임분 밀도의 감소는 생육여건이 향상되어 생장을 촉진하고 형질을 개선시킨다(Wilson and Puettmann, 2007). 특히, 간벌은 수목 간 경쟁을 완화해 잔존하는 수목들이 이용할 수 있는 자원의 양과 이용 효율을 높여 가뭄에 대한 저항성과 회복탄력성을 향상시키는 데에 효과적이다(D'Amato et al., 2013; Lechuga et al., 2017). 간벌로 인한 수관층의 감소로 임상에 도달하는 강수량은 증가하고 잎을 통한 증산량이 감소하며, 이로 인해 토양 수분과 수목의 수분 이용 효율이 향상된다(del

Campo et al., 2022). 또한, 토양 수분 및 임상에 도달하는 광량의 증가로 토양온도가 높아지고, 이로 인해 미생물의 활동, 물질 분해, 질소 고정 및 질소 순환이 촉진된다(Zhou et al., 2021). 토양 내 영양분과 수분의 증가는 뿌리 생장을 촉진하고, 뿌리는 토양층 깊이 뚫어 나가 더 많은 자원에 도달할 수 있어 가뭄에 대한 저항성이 높아진다(Sword-sayer and Tang, 2004; Wang et al., 2019; Comeau, 2021).

간벌의 긍정적 효과는 간벌 전후 수목의 생리 반응을 비교하는 연구들을 통해서도 입증되어 왔다(Dannenmann et al., 2006; Park et al., 2018; Comeau, 2021). Park et al.(2018)은 잣나무림을 대상으로 간벌 후 수액 속 밀도 변화를 측정하였는데, 간벌 강도와 상관없이 간벌 직후 수액 속 밀도가 증가하는 것을 발견했다. 이는 변재 내의 수분 흐름과 수분전도도의 증가를 의미하며 간벌을 통해 수목이 활발하게 증산작용을 하고 더 많은 물을 이용할 수 있음을 나타낸다(Dannenmann et al., 2006). 북미 사시나무와 가문비나무의 혼효림을 대상으로 시행된 간벌에 대한 연구에서는 수종 별 생장 반응의 차이가 있으나, 공통적으로 흉고단면적 성장량(Basal Area Increment, BAI)과 수관 폭을 증가시킨다는 것을 입증하였다(Comeau, 2021).

그러나, 간벌 전후 생리적 반응을 비교하는 방법은 가뭄에 대한 간벌 효과 자체를 입증할 수 있지만 그 효과를 정량화하고 지표로 환산하는 것이 어렵다. 따라서, Lloret et al.(2011)은 “Engineering Resilience”로부터 유래되어 개체 또는 생태계가 교란 이전의 상태로 되돌아갈 수 있는 능력인 회복탄력성의 개념을 적용해 세 가지 지표(저항성, 회복성, 탄력성)로 구성된 평가 방법을 제시하였다(Holling, 1973; Vitasse et al., 2019). Lloret et al.(2011)의 회복탄력성 지표는 흉고단면적 성장량에 기반하여 계산이 간단하고 간벌 효과를 정량화할 수 있으며, 이를 바탕으로 다른 비생물적, 생물적 요소와의 관계를 규명하는 것이 가능하다. 회복탄력성 지표를 바탕으로, Lloret et al.(2011)은 수령 및 과거 산불 발생 여부에 따른 가뭄에 대한 회복탄력성의 변화와 가뭄의 누적 효과를 분석하여 수령이 높을수록 저항성이 낮아지며 과거 가뭄의 누적 효과 또한 저항성을 감소시킨다는 것을 밝혔다. 또한, Steckel et al.(2020)은 간벌 강도가 높을수록 생장 민감도가 높아지고 수종마다 가뭄에 대한 회복탄력성 지표의 변화가 다르다는 것을 입증했다.

우리나라에서는 상수리나무와 일본잎갈나무의 병해충 피해 연구에서 회복탄력성 지표를 사용한 사례가 있지만(Jung et al., 2024), 현재까지 가뭄에 대한 간벌의 효과성을 평가하기 위해 사용된 사례는 거의 없다. 따라서, 본 논문에서는 회복탄력성 지표를 통해 가뭄에 대한 1) 간벌의 효

과성과, 2) 간벌 횟수의 효과성을 정량화하여 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 강원도 춘천시 춘천 국유림 관리소 관내의 7영급(약 63년) 잣나무 조림지(N37°52'19.12, E127°52'30.11)에서 수행되었다. 조림지의 전체 면적은 약 100 ha이며, 해발고도 약 400~500 m에 위치하고 있다. 연구대상지는 경사 24~25° 서남 사면에 위치하며, 대조구(무처리구, 이하 Control), 2007년에 간벌 된 지역(간벌 처리구, 이하 Thin 1) 그리고 2000년 및 2007년에 간벌 된 지역(반복 간벌 처리구, 이하 Thin 2)으로 선정하였다(Figure 1). 2000년 시행된 간벌은 Thin 2에서 산림 관리 목적으로 임

분 밀도의 20%를 제거하였으며, 2007년에는 두 간벌 처리구에서 잣나무 조림지의 성장 및 종다양성 변화에 미치는 영향을 확인하기 위한 연구의 일환으로 임분 밀도의 35%를 제거하는 간벌을 시행하였다(Kwon et al., 2010). 2021년 기준 Control, Thin 1, Thin 2의 임분 밀도는 각각 1,250본/ha, 475본/ha, 200본/ha이며 흉고직경(Diameter at Breast Height, DBH)은 Thin 2가 41.9 cm로 가장 크고, Thin 1은 32.5 cm, Control은 22.8 cm로 가장 작다(Table 1).

가리산이 위치한 춘천의 지난 20년간의 연평균 기온은 11.1°C($\pm 0.12^\circ\text{C}$)이며, 1월에 가장 낮고(-4.6°C) 8월에 가장 높다(24.6°C). 연 강수량은 1347.3 mm(± 70.8 mm)으로, 1월에 가장 적고(20.3 mm) 7월에 가장 많다(383.8 mm)(KMA, 2024). 지질은 화강암이며 토양은 갈색전조산림토양이고(Kwon et al., 2010), 토심은 얇은 편이며 유기물 함량이 낮은 편이다(Park et al., 2009).

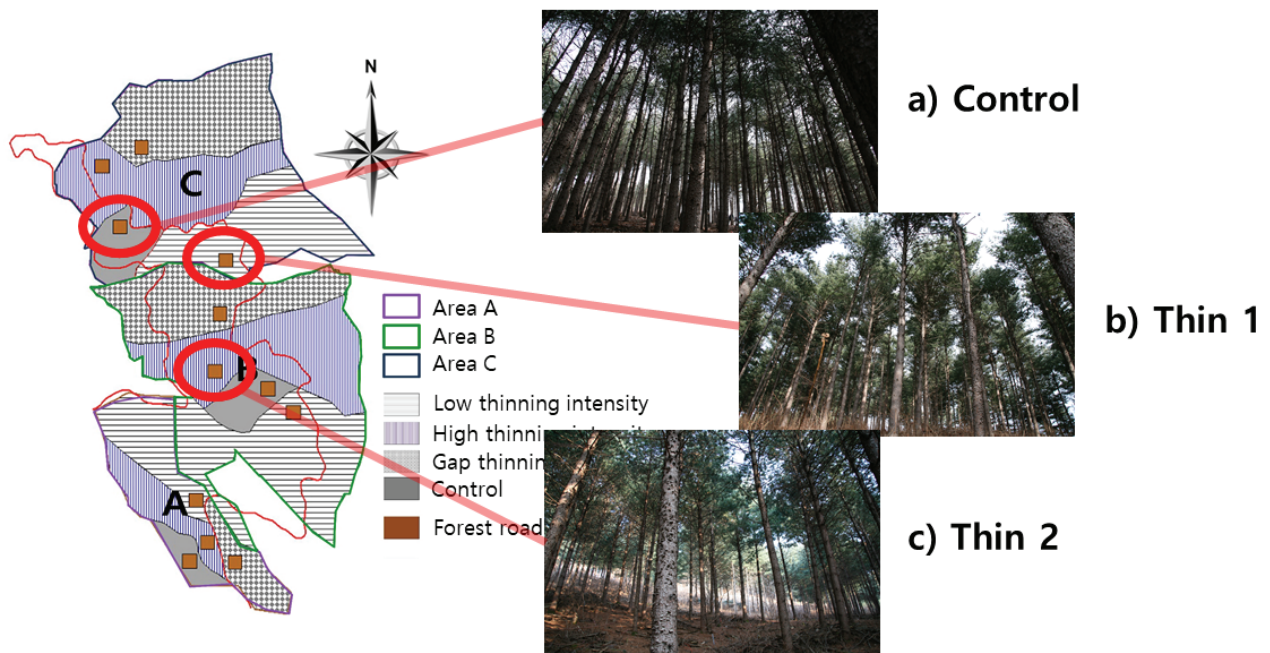


Figure 1. The map of study sites and their pictures in Gari mountain, Chuncheon, Gangwon-do.

Table 1. Site description on the study site. SD and DBH indicate stand density and diameter at breast height. Values are presented as mean $\pm$ standard error.

Area	Age (Yrs)	Total area (ha)	Altitude (m)	Aspect	Slope ($^\circ$)	SD in 2021 (No./ha)	DBH (cm)	Thinning	Thinning intensity (%)
Control	63	3.9	400	WS	25	1250	22.8 $\pm$ 0.7		
Thin 1		13.9	403	WS	24	475	32.5 $\pm$ 1.1	2007	35
Thin 2		18.5	401	WS	24	200	41.9 $\pm$ 1.1	2000 2007	20 35

2. 분석 재료 및 방법

1) 목편 추출 및 연륜 분석

2022년 대조구 및 두 간벌 처리구 내에 $20 \times 20 \text{ m}^2$ 의 방형구를 각 3개씩 설치하여 흉고직경(Diameter at Breast Height, DBH)이 6 cm 이상인 수목을 대상으로 1.2 m 높이에서 흉고직경 및 수고를 측정하였고, 세 처리구 각각의 평균 흉고직경값을 산출하였다. 각 방형구에서 평균 흉고직경값과 비슷한 흉고직경을 가진 개체목을 5~7개 선정하고 성장추를 이용하여 1.2 m 높이에서 같은 방향으로 개체목 당 하나의 목편을 추출하였다. 추출된 목편은 Control 20개, Thin 1 20개, Thin 2 23개로 총 63개이며, 연륜연대기 분석에는 Control, Thin 1, Thin 2에서 각각 20개, 16개, 22개로 총 58개의 샘플을 이용하였다.

채취된 목편은 마운트에 목공풀로 고정한 후, 100방에서 400방의 사포를 사용하여 연륜이 선명하게 보일 때까지 갈아 Yamaguchi(1991)의 the List method를 적용해 각 목편 사이의 크로스데이팅(Cross-dating)을 시행하였다. 그 후, 목편들을 1600 해상도로 스캔하고(EPSON V370; Epson Corp., Nagano, Japan), CooReader and Cdendro 연륜분석 프로그램(Cybis Electronic, version 9.8.4; Maxwell and Larsson, 2021)을 사용하여 0.001 mm의 정확도로 연륜폭을 측정하고 크로스데이팅을 검증하였다.

공동된 시계열(1970~2021)의 흉고단면적 성장량(Basal Area Increment, BAI)은 연륜 연대기의 신뢰성과 대표성이 검증된 연대기를 대상으로 다음 식 1를 이용하여 계산하였다.

$$BAI_t(\text{cm}^2) = \pi \times (\text{DBH}_t/2)^2 - \pi \times (\text{DBH}_{t-1}/2)^2 \quad (1)$$

여기서, BAI는 특정 연도 t 의 연간 흉고단면적 성장량을 의미하며, $t-1$ 은 특정 연도 t 의 한 해 이전의 연도를 의미한다. DBH(cm)는 1.2 m 높이의 흉고단면이 원형이라는 가정하에 흉고직경을 의미한다. 디트렌딩(Detrending)은 수목의 나이 및 크기에 따른 성장추세를 제거하고 정규화하기 위해 수행하였으며, R package dplR(version 1.7.6) 내 Smooth spine method를 적용하여 Ring Width Index(RWI)를 계산하였다(Fritts, 2001; Bunn, 2008; Bunn, 2010; Bunn et al., 2023).

연륜 연대기의 일관성과 민감도를 평가하기 위해 연대기 간 평균상호상관(Mean Inter-series correlation, R_{bar}), 평균 민감도(Mean sensitivity), Expressed Population Signal (EPS) 및 Subsample Signal Strength(SSS)를 동일한 R package를 이용하여 계산하였다. 연대기 간 평균상호상관은 모든 연대기 상호 간 상관관계를 의미하며, 평균 민감도는 수목이 성장에 영향을 주는 인자들에 얼마나 민감하게 반응하는지를 나타내는 지표이다. EPS는 표본으로 이용된 연륜 연대기들이 가상의 모집단 연륜 연대기를 얼마나 대표할 수 있는지를 나타내며 0.85가 경계값으로 통용되고 있다(Buras, 2017). SSS는 모집단에서 나타나는 연륜 폭의 변화나 패턴을 해당 연륜 연대기가 얼마나 잘 반영하고 있는지를 나타내는 지수로, EPS와 마찬가지로 0.85보다 높은 값을 보일 때 대표성과 신뢰성이 있다고 평가된다. 따라서, 분석기간은 EPS와 SSS 둘 다 0.85가 넘는 연도를 기준으로 설정하였다.

2) 가뭄시기 선정

가뭄시기는 Standardized Precipitation-Evaporation Index (SPEI)가 -1보다 작고 전년도의 BAI로부터 10% 이상 감

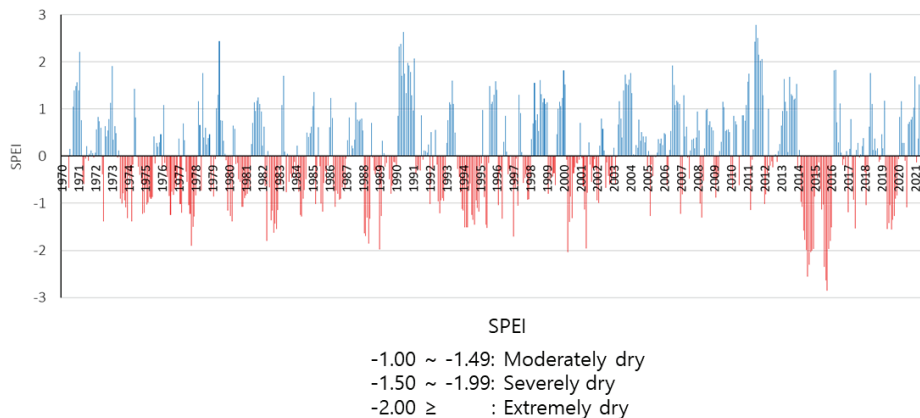


Figure 2. SPEI(Standardized Precipitation-Evaporation Index) of the common period(1970~2021). Each bar indicates the monthly index values in red for <0 , and blue for >0 values. Index values between -1.00 and -1.49 represent moderately dry climate while less than -2.00 indicate extremely dry conditions. The values in between moderately dry and extremely dry conditions (-1.50~-1.99) express the severely dry condition.

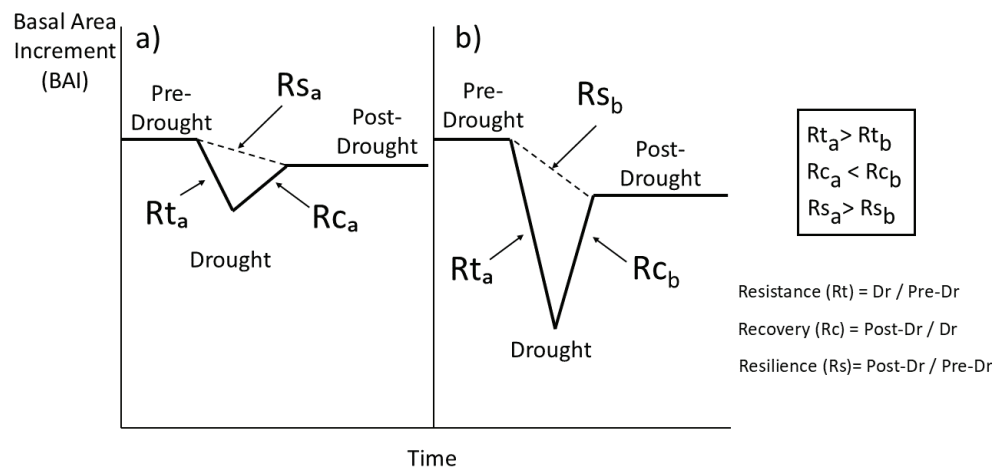


Figure 3. Resilience indices in two hypothetical cases: (a) tree with high drought resistance and (b) tree with high recovery. Modified from Lloret et al., 2011.

소한 연도로 정의하였다(Sohn et al., 2016). SPEI(SPEI-6) 값은 춘천시에 위치한 기상 관측소의 1970년부터 2021년 까지 데이터와 R package SPEI를 적용하여 월별로 산출하였다(Beguería and Vincento-Serrano, 2023). 두 가지 조건을 충족하는 연도는 2001년, 2008년, 2014~2017년이였다(Figure 2).

3) 회복탄력성 지수

가뭄에 대한 간벌 효과성 평가 지표로는 저항성, 회복성, 탄력성 총 세 가지가 사용되었다(Figure 3). 저항성은 가뭄에 따른 성장량 감소에 저항한 정도로, 가뭄 기간 동안의 성장량(BAI_{Dr})을 가뭄 전 2년간 성장량(BAI_{Pre-Dr})으로 나누어 값으로 정량화하였다. 회복성은 가뭄으로 받은 피해 대비 가뭄 후 회복하는 정도로, 가뭄 후 2년간 성장량($BAI_{Post-Dr}$)과 가뭄 기간 동안 성장량(BAI_{Dr}) 사이의 비율로 나타낸다. 탄력성은 가뭄 후에 가뭄 전 성장량에 도달할 수 있는 능력으로, 가뭄 전 2년과 가뭄 후 2년간 성장량 사이의 비율로 계산된다(Lloret et al., 2011).

$$\text{저항성} = BAI_{Dr} / BAI_{Pre-Dr} \quad (2)$$

$$\text{회복성} = BAI_{Post-Dr} / BAI_{Dr} \quad (3)$$

$$\text{탄력성} = BAI_{Post-Dr} / BAI_{Pre-Dr} \quad (4)$$

3. 통계분석

가뭄에 대한 간벌의 효과성 평가 지표의 통계적 유의성은 일원분산분석(One-way ANOVA)을 이용하여 검정하였다. 가뭄 시기별 세 가지 지표 각각에 ANOVA 검정을

시행하였고($p < 0.05$), 유의성이 확인된 지표에만 본페로니 검정(Bonferroni Correlation)을 통해 사후검정을 시행하였다($p < 0.05$). 모든 통계분석은 통계 프로그램 R을 사용하였다(R core team, 2021).

결과 및 고찰

1. 연륜 연대기 분석

연대기 간 평균상호상관관은 Control, Thin 1, Thin 2 각각 0.45, 0.51, 0.40였다(Table 2). 평균 민감도는 Thin 1과 Control이 각각 0.27, 0.26으로 비슷한 민감도를 보였고 Thin 2가 0.23으로 세 처리구 중에 가장 낮은 평균 민감도를 보였다. 세 처리구 모두 1970년 이후로 EPS 값이 0.85보다 높으므로, 1970년부터 2021년까지를 분석 기간으로 정의하였으며 분석에 사용되는 연대기들이 모집단을 대표하여 사용될 수 있음을 확인하였다. 세 처리구의 SSS 또한 1970년 이후부터 0.85보다 높은 값을 보여 앞서 정의된 분석 기간의 높은 신뢰성을 나타내었다(Figure 4).

2. 흉고단면적 성장량의 변화

디트렌딩 하지 않고 흉고단면적 성장량을 계산한 결과, 간벌 처리 전 세 처리구 간에 임분 초기 성장량 차이가 존재하였다[Figure 5(a)]. 세 처리구의 입지 환경이 비슷하기 때문에 임분 환경이 초기 성장에 주는 영향이 적을 것으로 생각된다(Table 1). 따라서 임분 초기 성장량의 차이는 임분 밀도에서 차이가 난 것으로 추측되어 디트렌딩 되지 않은 연대기와 디트렌딩 된 연대기 모두 분석하였다.

두 연륜 연대기 모두 2000년에 간벌을 하지 않은 Thin 1과 Control에서는 2001년 가뭄으로 인해 BAI가 감소하였

Table 2. Descriptive statistics of dendrochronology. Control indicates the non-treated area, while Thin 1 and Thin 2 express the areas with different frequencies of thinning on numbers. Three indices explain the statistical explanation of dendrochronology. R_{bar} and EPS represent Inter-series correlation and Expressed Population signal, respectively.

Area	R_{bar}	Mean sensitivity	EPS
Control	0.45	0.26	0.87
Thin 1	0.51	0.27	0.90
Thin 2	0.45	0.23	0.91

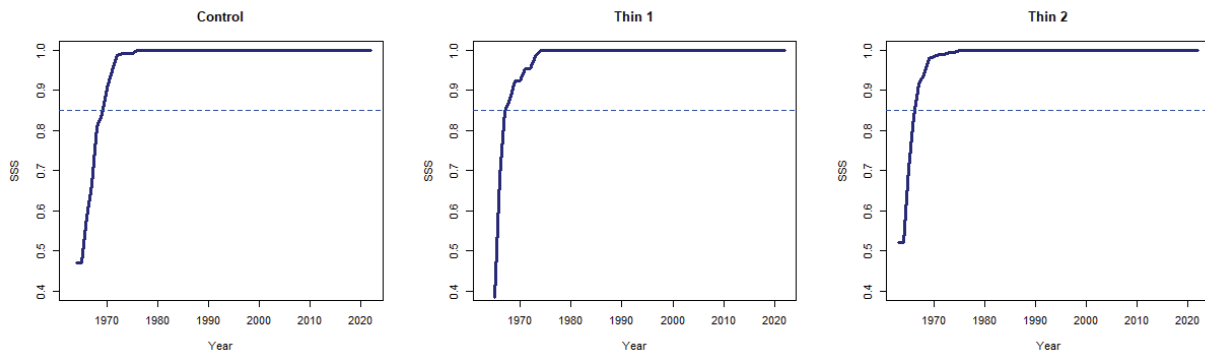


Figure 4. Graph of SSS (Subsample Strength Signal) for the common period(1970~2021) of three studied sites. The dashed line shows the threshold value, 0.85. The periods with values above 0.85 was proved to represent the population.

으나, 20% 간벌이 시행된 Thin 2에서는 가뭄임에도 BAI가 소폭 증가하였다(Figure 5). 디트렌딩 되지 않은 연대기에서는 2001년 가뭄 이후 2002년 Control, Thin 1, Thin 2 모두 BAI가 크게 증가하였는데, 특히 Thin 2에서는 Control, Thin 1에 비해 2배 이상 높은 성장량을 보였다. 디트렌딩 된 연륜 연대기에서도 Thin 2가 2001년 0.64에서 2002년 1.02로 RWI가 약 0.4 정도 증가하여 세 처리구 중 가장 높은 증가량을 보였다. 두 연대기 모두 2003년 이후 Thin 2는 다음 간벌 연도인 2007년까지 꾸준히 증가하였지만, Thin 1과 Control에서는 가뭄 전과 비슷한 성장량을 보였다. 디트렌딩 여부에 상관없이 2001년 가뭄 이후 2007년까지 Thin 2에서 성장량의 증가를 보였으므로, Thin 2의 성장량 증가는 간벌로 인한 결과이며 간벌의 효과가 약 6년간 지속되었다는 것을 의미한다.

디트렌딩 하지 않은 연대기에서 2007년 두 간벌 처리구에서 실행된 간벌로 2008년 가뭄임에도 불구하고 성장량이 증가하였으며, 두 차례 간벌이 진행된 Thin 2에서 더 높은 증가율을 보였다. 이러한 성장량의 증가가 디트렌딩 된 연대기에서도 나타나는 것으로 보아 성장량의 증가는 간벌 효과임을 알 수 있다. 가뭄 기간 동안에도 성장량이 증가한 것은 2000년 간벌로 Thin 2의 엽면적과 세균 바이오피가 증가한 결과로 생각되며, 2007년 반복 간벌로 생육조건이 좋아짐에 따라 빠르게 반응한 것으로 보인다(Sohn et al., 2016). 그 이후 디트렌딩 여부에 상관없이

2013년 이전까지 Control과 마찬가지로 Thin 1, Thin 2 모두 성장량이 감소하였고, 디트렌딩 하지 않은 연대기에서 Thin 2의 성장량 감소율이 3%로 Thin 1보다 낮게 나타났다. 이는 Thin 2가 반복 간벌에 의해 Thin 1보다 상대적으로 회복력이 증가한 것으로 보이며, Sohn et al.(2016)은 강도 간벌과 반복 간벌 처리구에서 회복력이 가장 높다고 보고하였다.

2014년부터 2017년까지 지속된 가뭄 기간에는 Control, Thin 1, Thin 2 모두 생장 패턴이 다르게 변화하였으며 디트렌딩 여부에 상관없이 동일한 패턴을 보였다. Thin 2는 SPEI 지수가 -2보다 낮았던 2014, 2015년에는 성장량이 계속 감소했다가 2016년 SPEI 지수가 +로 올라감에 따라 성장량이 급증하였으나, 다시 2017년 약한 가뭄으로 2014년보다 낮은 성장량을 보여 가뭄 기간 동안 감소하는 추세를 보였다. Thin 2가 가뭄기간 동안 감소 추세를 보인 것은 환경이 더욱 급변하여 수목 생장이 빠르게 반응하는 것으로 보인다(Sohn et al., 2013; Ford et al., 2017; Lechuga et al., 2017). Thin 1과 Control은 2014년부터 2016년까지 성장량이 증가하였는데, Thin 1이 Control보다 더 높은 성장량을 보였다. 이후 2017년 급격하게 감소하였으나 가뭄이 끝난 후에 증가하는 추세를 보였다. 디트렌딩을 한 결과에서도 가뭄 기간 동안 Thin 1이 Control보다 더 높은 성장량을 보인 것으로 보아 Thin 1의 높은 성장량은 간벌 효과로 추측되며, Control은 이미 수목 간의 경

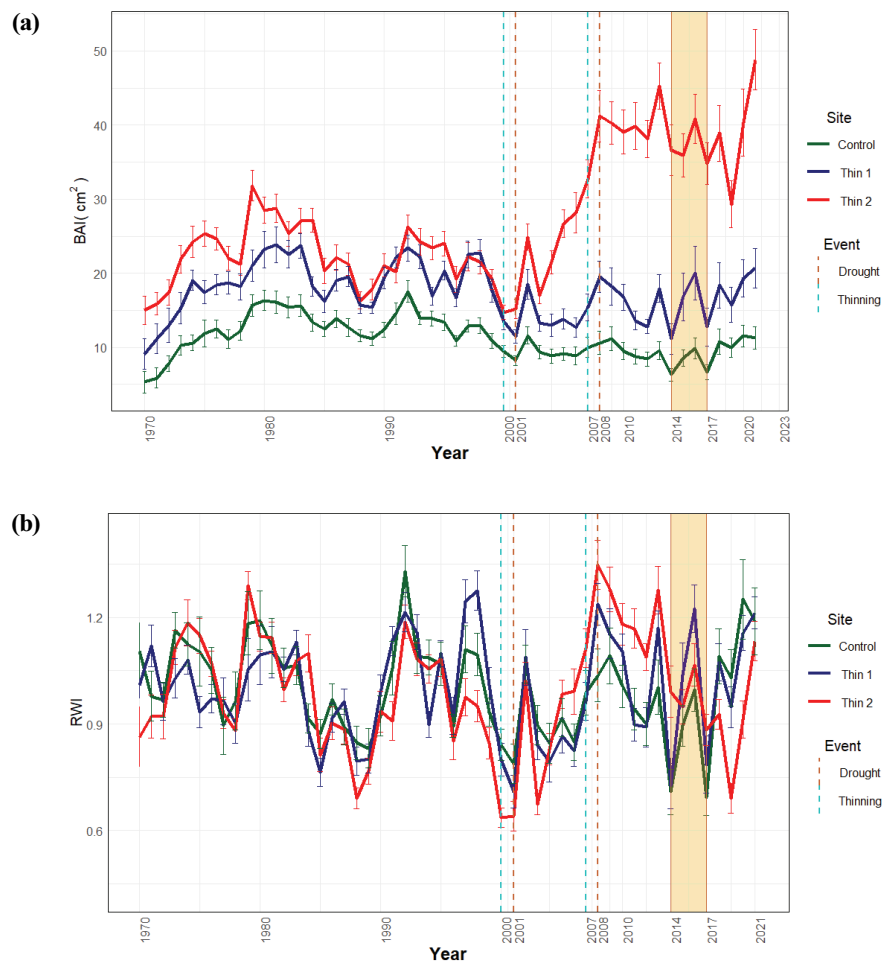


Figure 5. Dendrochronology of three studied sites(Control: Green, Thin 1: Blue, Thin 2: Red) during the common period(1971~2021) with drought year(vertical dotted line in brown) and thinning year(vertical dotted line in sky blue). (a) Dendrochronology in BAI (Basal Area Increment, cm^2); (b) Standardized dendrochronology after detrending. The error bar indicates the standard error.

쟁이 높아 가뭄임에도 둔감하게 반응하는 것으로 보인다 (Ford et al., 2017; Gleason et al., 2017).

가뭄 기간에 성장량 변화의 원인을 규명하기 어려운 것은 SPEI 지수와 성장량의 변동으로 가뭄 연도를 특정하는 방법 때문일 가능성이 있다(Schwarz et al., 2020). 그 이유로는 우리나라의 복잡한 산악지형은 국지적인 공간 변화에도 기상 현상의 변동성이 크고(Yoon et al., 2016; Jang et al., 2022), 가까운 기상관측소로부터 얻은 정보는 실제 가뭄의 정도와 지속 기간을 정확히 반영하기 어렵기 때문이다(Schwarz et al., 2020). 따라서, 2019년부터 사용된 가리산의 산악기상정보를 이용했을 경우, 더욱 정확한 결과가 나타났을 것으로 생각된다.

3. 회복탄력성 지표를 이용한 간벌의 효과성 평가

2001년 가뭄에 대한 회복탄력성 지표는 세 처리구 모두 유의한 차이를 보이지 않았다[Figure 6(a)]. 저항성은 2000

년 간벌이 수행된 Thin 2에서 가장 높았고, 간벌을 하지 않은 Control보다 Thin 1에서 더 낮은 경향을 보였다. 세 처리구 모두 저항성이 1.0보다 낮은 것을 고려해 볼 때, 가뭄으로 인한 성장량의 저하가 일어났으며 그 영향은 Thin 2에서 가장 낮은 것으로 보인다. 회복성은 저항성과 같은 추세를 보였는데, Thin 2에서 가장 높고 Thin 1에서 가장 낮았다. 또한 두 간벌 처리구와 Control 모두 회복성이 1.0보다 높았는데, 이는 가뭄 이후 성장량이 가뭄 동안의 성장량보다 높은 것을 의미한다. 탄력성의 경우, 두 간벌 처리구가 Control 보다 높은 경향을 보였다. 세 처리구 모두 탄력성이 1.0보다 높았기 때문에 가뭄 이후 성장량이 가뭄 전보다 높았다는 것을 알 수 있다.

2008년 가뭄의 경우, 세 가지 회복탄력성 지표 중 저항성만 Control과 두 간벌 처리구 간 유의한 차이를 나타냈다[Figure 6(b)]. 간벌 횟수가 다른 Thin 1과 Thin 2에서는 저항성의 차이가 없었으나, 두 간벌 처리구에서는 저항성

이 Control보다 유의하게 높았다. 세 처리구 모두 저항성이 1.0보다 높은 것으로 봤을 때 가뭄 동안의 성장량이 가뭄 전보다 증가했음을 알 수 있다. 회복성의 경우, 간벌하지 않은 Control이 간벌을 시행한 Thin 1보다 높았고, Thin 2가 Control보다 높은 경향을 나타냈다. 다른 지표들

과 다르게 회복성은 1.0과 비슷하거나 낮은 값을 보였는데, 회복성이 1.0보다 큰 Control과 Thin 2는 가뭄 후 성장량이 가뭄 전 성장량보다 높고, Thin 1은 지표가 1.0보다 작은 것으로 보아 가뭄 후 성장량이 가뭄 전 성장량보다 작다는 것을 의미한다. 이에 반해, 탄력성은 저항성과 같은 추세를 보여 Control이 가장 낮고 간벌 횟수가 증가할수록 높았으나 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다. 그러나 탄력성 또한 저항성과 비슷하게 세 처리구 모두 1.0을 넘었으며 이는 가뭄 후 성장량이 가뭄 동안의 성장량보다 높다는 것을 뜻한다.

2015년 가뭄에 대한 회복탄력성 지표는 2001년과 마찬가지로 세 처리구 모두 유의한 차이는 없었다[Figure 6(c)]. 다른 가뭄 기간과는 다르게, 세 지표 모두 1.0보다 비슷하거나 낮았다. 저항성의 경우, Thin 1이 가장 높고 Control이 가장 낮지만, Thin 2와 Control간의 차이가 작은 경향을 보였다. 또한 세 처리구 모두 값이 1.0보다 낮은 것으로 보아 가뭄으로 인한 성장량 저하가 일어났음을 알 수 있다. 회복성의 경우, Control이 1.0보다 높았으며 Thin 1과 Thin 2는 1.0보다 낮은 값을 보였고 두 간벌 처리구 간의 차이는 작았다. 1.0보다 높은 회복성을 보인 Control은 가뭄 후 성장량이 가뭄 동안의 성장량보다 높다는 것을 의미하고, 다른 두 간벌처리구에서는 가뭄 후 성장량이 가뭄 동안의 성장량보다 적으므로 가뭄으로 인한 성장량 감소가 계속되고 있음을 알 수 있다. 탄력성도 저항성과 비슷한 경향을 보였는데, Control과 Thin 1에서는 아주 작은 차이로 Thin 1이 가장 높았으며 Thin 2는 큰 차이로 가장 낮은 값을 보였다. 저항성과 같이 탄력성은 모든 지역에서 1.0보다 낮았는데, 이로 미루어 보아 가뭄 후에도 가뭄 전 성장량에 미치지 못하는 것으로 생각된다.

본 연구에서 보인 2008년 가뭄에 대한 저항성의 증가는 북아메리카와 스페인에서 *Pinus* 속에 속하는 다른 수종을 대상으로 한 이전 연구들과 유사한 결과이다(Bottero et al., 2017; Manrique-Alba et al., 2020; Navarro-Cerrillo et al., 2023). 저항성 증가의 원인으로는 간벌로 인한 임분 밀도의 감소에 따른 광량의 증가로 내부의 온도가 상승하여 부식질의 분해가 촉진되고, 이에 따른 영양분 공급의 증가와 수목 간 경쟁의 완화로 생육 가능한 면적이 증가함에 따라 이용 가능한 자원(수분, 영양분, 광량)이 증가하기 때문으로 볼 수 있다(Bréda et al., 1995; Aussenac, 2000). 수분이 부족할 경우 기공을 빨리 닫는 침엽수의 수분 이용 특성으로 인해 침엽수는 회복성, 탄력성이 높다는 Sohn et al.(2016)의 메타 분석 결과와는 반대로, 본 연구 논문은 간벌한 지역의 저항성만 높고 회복성과 탄력성은 간벌 여부에 따른 유의미한 차이를 보이지 않았다. 이는 높은 저

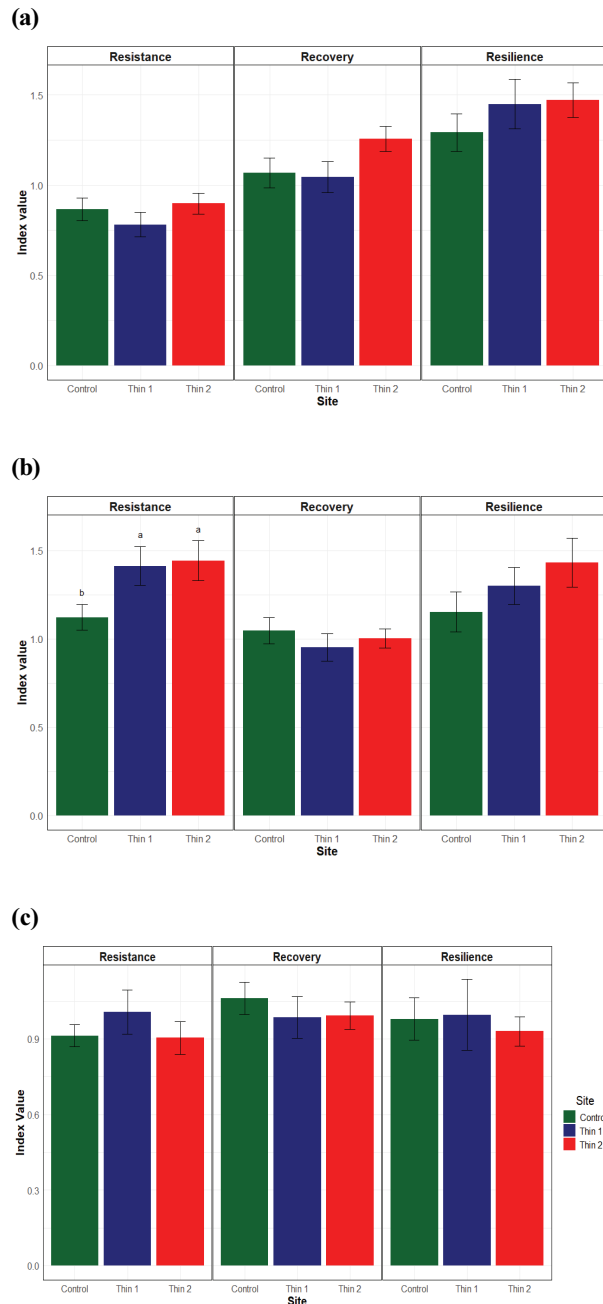


Figure 6. Indices calculated as the ratio of BAI(Basal Area Increment, cm²) between 2 years average of pre-/post-drought and drought(Control: Green; Thin 1: Blue; Thin 2: Red). (a) 2002 drought; (b) 2008 drought; (c) 2014-2017 drought. Different letters by treatments indicate significantly different means($p < 0.05$). The error bars represent the standard error.

항성으로 가뭄으로 인한 성장량의 감소가 줄어들에 따라 가뭄 전에 비해 가뭄 기간 동안과 가뭄 후 성장량의 차이가 작아졌기 때문에 회복성과 탄력성이 낮은 것으로 보인다(Manrique-Alba et al., 2020)(Figure 3).

2008년 가뭄에 대해서만 저항성에 유의미한 결과가 나타난 것은 심한 가뭄에 비해 낮은 강도로 성장량의 감소는 저하시켰으나 회복탄력성 지수에 유의미한 증가를 야기하지 않은 것으로 보인다. 게다가, 많은 연구에서는 간벌 강도가 40%일 때 간벌로 인한 효과가 가장 크다고 보고하고 있다(Cabon et al., 2018; Bello et al., 2019; Steckel et al., 2020; Zamora-Pereira et al., 2021; Moreau et al., 2022). 2008년 간벌 강도는 35%로 40%와 차이가 크지 않아 저항성의 유의미한 차이를 야기하였으나 2000년 간벌은 20%로 유의미한 차이를 야기할 만큼 간벌 효과가 높지 않은 것으로 판단된다.

2008년 가뭄에 대해 간벌 횟수에 따라서 저항성의 유의미한 변화가 나타나지 않은 것은 가뭄 전후 각 2년간 성장량의 평균값을 사용하여 가뭄과의 비율로 환산하는 회복탄력성 지표 계산법 때문일 것으로 생각된다. Thin 2에서 가뭄 전까지 급격하게 성장량이 증가한 것을 고려하면, 평균적으로 높은 가뭄 전 성장량과 가뭄 기간 동안에도 높은 성장량 값을 갖는 Thin 2와 상대적으로 가뭄 전 2년간 성장량의 변동이 적었던 Thin 1이 비율 상으로 유의미한 차이가 나타나지 않았을 것으로 추측된다. 또한, 2014년과 2017년 가뭄 전후 기간이 겹치는 것을 피하기 위해 설정된 2년의 기간을 회복탄력성 지표 계산에 적용하였는데, 가뭄 전후 2년은 2002년 이후 급격하게 증가한 Thin 2의 성장량을 고려하면 실제 변화하는 성장량을 회복탄력성 지표에 반영하기에는 충분하지 않은 것으로 보인다.

간벌 효과의 평가를 위해 BAI를 이용하여 회복탄력성을 정량화하는 방법은 계산이 간단하고 많은 데이터를 필요로 하지 않기 때문에 편리하나, 급격한 성장량의 변화가 평균치로 환산됨에 따라서 실제적인 변화가 잘 반영되지 않을 수 있고 가뭄 전후 성장량의 변동을 충분히 포함시키지 못하는 한계가 있을 수 있다. 또한, 가뭄의 전후 수분조건 및 가뭄 시기가 고려되지 않아 성장량 변화를 해석하기에 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서 이용된 회복탄력성 평가 방법은 계산의 편의성이 높지만, 구체적인 해석이 어렵기 때문에 향후 연구에서는 토양 수분 함량이나 실제 산악기상 정보를 이용하는 것이 필요할 것으로 보인다(Zhang et al., 2019). 회복탄력성 지수를 사용할 때, 간벌 전후의 적절한 성장기간을 선정하는 것이 중요하다고 생각된다. 또한 가뭄에 대한 저항성을 높이는 방법으로써 간벌이 적절하게 이루어

지기 위해서는 간벌 강도에 따른 회복탄력성 변화에 관한 연구가 요구된다. 결과적으로, 간벌은 가뭄으로 인한 성장량 감소를 완화하는 효과가 있으므로, 간벌 강도에 따른 회복탄력성 평가를 통해 적절한 간벌 강도를 찾는 것이 필요해 보이며 회복탄력성 지수를 적용할 때에 실제 성장량을 잘 반영하도록 해야 한다.

결론

본 연구는 연륜폭을 바탕으로 계산한 BAI를 이용하여 회복탄력성을 세 가지 지표(저항성, 회복성, 탄력성)로 정량화하고, 정량화된 회복탄력성 지수를 적용해 간벌 횟수에 따른 가뭄에 대한 잣나무림의 회복탄력성을 평가하였다. 공통된 시계열 내(1970~2021) 간벌 후 나타난 세 가뭄 시기에서 BAI가 증가하였으나, 이를 지표로 환산하였을 때 2008년의 저항성만이 간벌로 인해 유의미하게 증가하였고 간벌 횟수에 따라서 저항성의 유의미한 차이는 없었다. 간벌 횟수에 따라 흉고단면적 성장량의 증가율이 높아지는 것을 고려했을 때, 회복탄력성 지표가 실제 성장량의 변화를 반영하는 데에는 한계가 있어 보인다. 따라서, 간벌이 가뭄에 대한 저항성을 향상시키는 데에 효과적이고 회복탄력성 지수를 적용하는 데에는 주의가 필요한 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 “산림생태계서비스 정보 활용체계 구축 및 산림관리 효과성 평가기법 개발” 연구(과제 번호: FE0100-2021-01-2024)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Allen, C.D. et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4): 660-684.
- Allen, C.D., Breshears, D.D. and McDowell, N.G. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6(8): 1-55.
- Anderegg, W.R. et al. 2015. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist* 208(3): 674-683.
- Anderegg, W.R., Anderegg, L.D., Kerr, K.L. and Trugman, A.T. 2019. Widespread drought-induced tree mortality

- at dry range edges indicates that climate stress exceeds species' compensating mechanisms. *Global Change Biology* 25(11): 3793-3802.
- Aussenac, G. 2000. Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* 57(3): 287-301.
- Beguería, S. and Vicente-Serrano, S.M. 2023. SPEI: Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. R package version 1.8.1. <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>.
- Bello, J., Vallet, P., Perot, T., Balandier, P., Seigner, V., Perret, S., Couteau, C. and Korboulewsky, N. 2019. How do mixing tree species and stand density affect seasonal radial growth during drought events? *Forest Ecology and Management* 432: 436-445.
- Bottero, A., D'Amato, A.W., Palik, B.J., Bradford, J.B., Fraver, S., Battaglia, M.A. and Asherin, L.A. 2017. Density-dependent vulnerability of forest ecosystems to drought. *Journal of Applied Ecology* 54(6): 1605-1614.
- Bréda, N., Granier, A. and Aussenac, G. 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology* 15(5): 295-306.
- Brodribb, T.J., Powers, J., Cochard, H. and Choat, B. 2020. Hanging by a thread? Forests and drought. *Science* 368(6488): 261-266.
- Bunn, A.G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2): 115-124.
- Bunn, A.G. 2010. Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia* 28(4): 251-258.
- Bunn, A.G., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Mérian, P., Qeadan, F. and Zang, C. 2023. dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.6. <https://CRAN.R-project.org/package=dplR>.
- Buras, A. 2017. A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia* 44: 130-132.
- Cabon, A., Mouillot, F., Lempereur, M., Ourcival, J.M., Simioni, G. and Limousin, J.M. 2018. Thinning increases tree growth by delaying drought-induced growth cessation in a Mediterranean evergreen oak coppice. *Forest Ecology and Management* 409: 333-342.
- Comeau, P.G. 2021. Effects of thinning on dynamics and drought resistance of aspen-white spruce mixtures: Results from two study sites in Saskatchewan. *Frontiers in Forests and Global Change* 3: 621752.
- D'Amato, A.W., Bradford, J.B., Fraver, S. and Palik, B.J. 2011. Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *Forest Ecology and Management* 262(5): 803-816.
- D'Amato, A.W., Bradford, J.B., Fraver, S. and Palik, B.J. 2013. Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in northern temperate forest ecosystems. *Ecological Applications* 23(8): 1735-1742.
- Dannenmann, M., Gasche, R., Ledebuhr, A. and Papen, H. 2006. Effects of forest management on soil N cycling in beech forests stocking on calcareous soils. *Plant and Soil* 287: 279-300.
- del Campo, A.D., Otsuki, K., Serengil, Y., Blanco, J.A., Yousefpour, R. and Wei, X. 2022. A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management* 519: 120324.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 2020. Global Forest Resources Assessment: Main report. Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>. (2024.08.23).
- Ford, K.R., Breckheimer, I.K., Franklin, J.F., Freund, J.A., Kroiss, S.J., Larson, A.J., Theobald, E.J. and HilleRisLambers, J. 2017. Competition alters tree growth responses to climate at individual and stand scales. *Canadian Journal of Forest Research* 47(1): 53-62.
- Fritts, H. 2001. *Tree Rings and Climate*. Blackburn. New Jersey, U.S.A. pp. 567.
- Gleason, K.E. et al. 2017. Competition amplifies drought stress in forests across broad climatic and compositional gradients. *Ecosphere* 8(7): e01849.
- Hartmann, H. et al. 2018. Research frontiers for improving our understanding of drought-induced tree and forest mortality. *New Phytologist* 218(1): 15-28.
- Hartmann, H., Bahn, M., Carbone, M. and Richardson, A.D. 2020. Plant carbon allocation in a changing world—challenges and progress. *New Phytologist* 227(4): 981-988.
- Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 4: 1-23.
- Hunter, M.L. and Calhoun, A. 1996. A triad approach to land use allocation. pp. 447-491. In : Szaro, R.C. (Ed.). *Biodiversity in Managed Landscapes*. Oxford University Press, New York, U.S.A.
- Jang, K., Min, S., Kim, I., Chun, J. and Won, M. 2022. Mountain meteorology data for forest disaster prevention and forest management. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 24(4): 346-352.
- Jung, J.B., Kim, E.S., Lim, J.H. and Choi, W.I. 2024.

- Host-specific growth responses of *Larix kaempferi* and *Quercus acutissima* to Asian gypsy moth defoliation in central Korea. *Scientific Reports* 14(1): 1477.
- Kannenbergh, S.A., Driscoll, A.W., Malesky, D. and Anderegg, W.R. 2021. Rapid and surprising dieback of Utah juniper in the southwestern USA due to acute drought stress. *Forest Ecology and Management* 480: 118639.
- Kohler, M., Sohn, J., Nägele, G. and Bauhus, J. 2010. Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning? *European Journal of Forest Research* 129: 1109-1118.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2024. Open Weather Data Portal. <https://data.kma.go.kr/resources/html/aowdp.html>. (2024.06.14).
- Kwon, T.S., Yang, H.M., Shin, J.H., Kim, S.K. and Yi, H.B. 2010. Effects of thinning on abundance and community structure of arthropods in a *Pinus koraiensis* plantation. *Korean Journal of Applied Entomology* 49(3): 187-198.
- Lasch, P., Linder, M., Erhard, M., Suckow, F. and Wenzel, A. 2002. Regional impact assessment on forest structure and functions under climate change-the Brandenburg case study. *Forest Ecology and Management* 162(1): 73-86.
- Lechuga, V., Carraro, V., Viñeola, B., Carreira, J.A. and Linares, J.C. 2017. Managing drought-sensitive forests under global change. Low competition enhances long-term growth and water uptake in *Abies pinsapo*. *Forest Ecology and Management* 406: 72-82.
- Lindner, M. 2000. Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change. *Tree Physiology* 20(5-6): 299-307.
- Lloret, F., Keeling, E.G. and Sala, A. 2011. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old Ponderosa pine forests. *Oikos* 120(12): 1909-1920.
- Manrique-Alba, À., Beguería, S., Molina, A.J., González-Sanchis, M., Tomás-Burguera, M., Del Campo, A.D., Colangelo, M. and Camarero, J.J. 2020. Long-term thinning effects on tree growth, drought response and water use efficiency at two Aleppo pine plantations in Spain. *Science of the Total Environment* 728: 138536.
- Maxwell, R.S. and Larsson, L.A. 2021. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. *Dendrochronologia* 67: 125841.
- Moreau, G., Chagnon, C., Achim, A., Caspersen, J., D'Orangeville, L., Sánchez-Pinillos, M. and Thiffault, N. 2022. Opportunities and limitations of thinning to increase resistance and resilience of trees and forests to global change. *Forestry* 95(5): 595-615.
- Navarro-Cerrillo, R.M., Cachinero-Vivar, A.M., Pérez-Priego, Ó., Cantón, R.A., Begueria, S. and Camarero, J.J. 2023. Developing alternatives to adaptive silviculture: Thinning and tree growth resistance to drought in a *Pinus* species on an elevated gradient in Southern Spain. *Forest Ecology and Management* 537: 120936.
- Pan, Y. et al. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333(6045): 988-993.
- Park, B.B., Lee, I.K. and Yang, H.M. 2009. The effects of thinning on fine root distribution and litterfall in a *Pinus koraiensis* plantation. *Journal of Ecology and Environment* 32(3): 159-165.
- Park, J., Kim, T., Moon, M., Cho, S., Ryu, D. and Kim, H.S. 2018. Effects of thinning intensities on tree water use, growth, and resultant water use efficiency of 50-year-old *Pinus koraiensis* forest over four years. *Forest Ecology and Management* 408: 121-128.
- R Core Team. 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Schuldt, B. et al. 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology* 45: 86-103.
- Schwarz, J., Skiadaresis, G., Kohler, M., Kunz, J., Schnabel, F., Vitali, V. and Bauhus, J. 2020. Quantifying growth responses of trees to drought—A critique of commonly used resilience indices and recommendations for future studies. *Current Forestry Reports* 6: 185-200.
- Sohn, J.A., Gebhardt, T., Ammer, C., Bauhus, J., Häberle, K.H., Matyssek, R. and Grams, T.E. 2013. Mitigation of drought by thinning: short-term and long-term effects on growth and physiological performance of Norway spruce (*Picea abies*). *Forest Ecology and Management* 308(2013): 188-197.
- Sohn, J.A., Saha, S. and Bauhus, J. 2016. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 380: 261-273.
- Steckel, M., Moser, W.K., del Río, M. and Pretzsch, H. 2020. Implications of reduced stand density on tree growth and drought susceptibility: a study of three species under varying climate. *Forests* 11(6): 627.
- Sword-Sayer, M.A. and Tang, Z. 2004. Long-term root growth response to thinning, fertilization, and water deficit in plantation Loblolly pine. pp. 458-464. In : *Proceedings of the Twelfth Biennial Southern Silvicultural Research Conference*. General Technical Report SRS-71. USDA Forest Service Southern Research Station, Asheville, U.S.A.

- Vitasse, Y. et al. 2019. Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. *Global Change Biology* 25(11): 3781-3792.
- Wang, D., Olatunji, O.A. and Xiao, J. 2019. Thinning increased fine root production, biomass, turnover rate and understory vegetation yield in a Chinese fir plantation. *Forest Ecology and Management* 440: 92-100.
- Wilson, D.S. and Puettmann, K.J. 2007. Density management and biodiversity in young Douglas-fir forests: challenges of managing across scales. *Forest Ecological Management* 246: 123-134.
- Yamaguchi, D.K. 1991. A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21(3): 414-416.
- Yoon, S., Won, M. and Jang, K. 2016. A study on optimal site selection for automatic mountain meteorology observation system (AMOS): The case of Honam and Jeju Areas. *Korea Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 18(4): 208-220.
- Zamora-Pereira, J.C., Yousefpour, R., Cailleret, M., Bugmann, H. and Hanewinkel, M. 2021. Magnitude and timing of density reduction are key for the resilience to severe drought in conifer-broadleaf mixed forests in Central Europe. *Annals of Forest Science* 78: 1-2.
- Zhang, Y., Huang, S., Huang, Q., Leng, G., Wang, H. and Wang, L. 2019. Assessment of drought evolution characteristics based on a nonparametric and trivariate integrated drought index. *Journal of Hydrology* 579: 124230.
- Zhou, T., Wang, C. and Zhou, Z. 2021. Thinning promotes the nitrogen and phosphorous cycling in forest soils. *Agricultural and Forest Meteorology* 311: 108665.

Manuscript Received : October 18, 2024

First Revision : December 23, 2024

Second Revision : January 9, 2025

Accepted : January 16, 2025