

## 묘령 및 식재밀도에 따른 느티나무 조림목의 초기 생육 특성

노남진<sup>ID</sup> · 조민석<sup>ID\*</sup>

국립산림과학원 산림기술경영연구소

### Early Growth Performance of *Zelkova serrata* Trees According to Seedling Age and Planting Density

Nam Jin Noh<sup>ID</sup> and Min Seok Cho<sup>ID\*</sup>

Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science,  
Pocheon 11186, Korea

**요약:** 본 연구는 조림목 묘령과 식재밀도가 느티나무 조림목의 초기 생육 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행되었다. 2017년 3월말에 온대 남부지역인 영덕지역 2 ha 면적에 묘령[용기묘(1-0), 용기묘(2-0)] × 식재밀도(3,000본 ha<sup>-1</sup>, 5,000본 ha<sup>-1</sup>) 4가지 조합으로 느티나무 묘목을 식재하였다. 각 처리별 3개의 조사구를 설치하였고, 조림목의 근원경과 수고 생장을 매년 9월마다 3년 동안(2017-2019년) 측정하여 수간 재적을 계산하였다. 느티나무의 초기생존율은 처리간에 차이를 나타내지 않았다. 수고는 묘령(1-0)과 묘령(2-0)에서 밀식처리의 효과가 나타나지 않았으나, 근원경과 H/D율은 묘령(2-0)에서 식재 후 3년차에 밀식처리 효과가 나타났다. 개체목당 수간재적은 묘령(2-0) 5,000본 ha<sup>-1</sup> 처리구에서 가장 높았으며, 묘령(1-0) 3,000본 ha<sup>-1</sup> 처리구에서 가장 낮았다. 수간재적은 묘령과 식재밀도 간에 상호작용 효과는 없었고, 묘령과 식재밀도가 높을수록 높은 수간재적을 보였다. 단위면적당 수간 재적은 용기묘(1-0) 3,000본 ha<sup>-1</sup> 대비 용기묘(1-0) 5,000본 ha<sup>-1</sup>는 85%, 용기묘(2-0) 3,000본 ha<sup>-1</sup>와 5,000본 ha<sup>-1</sup>는 각각 약 68%, 300% 향상되었다. 본 연구는 식재밀도가 묘령에 따라 생장에 다르게 영향을 미친다는 것을 보여주며, 용기묘(2-0)의 초기 생장을 향상시키는데 5,000본 ha<sup>-1</sup> 처리가 적합하다는 것을 제안한다.

**Abstract:** We investigated the effect of seedling age and planting density on early growth performance of *Zelkova serrata* trees. Containerized *Z. serrata* seedlings, 1-year-old and 2-year-old, were planted according to two different planting densities (3,000 and 5,000 trees ha<sup>-1</sup>) at the end of March, 2017. Three plots were established for each treatment (2 seedling ages × 2 planting densities). We calculated the survival rate (%) of out-planted seedlings as well as the stem volume based on the root collar diameter (RCD) and height (H) in September of each year, from 2017 to 2019. Seedling age and planting density did not affect survival rate of the out-planted trees. Planting density did not affect height of the trees, whereas the treatment significantly affected RCD and the H/D ratio for 2-year-old seedlings in 2019. The stem volume per tree was highest in the plot of 2-year-old seedlings at 5,000 trees ha<sup>-1</sup> and lowest in the 1-year-old seedlings at 3,000 trees ha<sup>-1</sup>. In addition, the tree height in both 1-year-old and 2-year-old *Z. serrata* trees was greater in the 5,000 trees ha<sup>-1</sup> plot than in the 3,000 trees ha<sup>-1</sup> plot. There was no interactive effect between seedling age and planting density on stem volume; however, as seedling age and planting density increased, stem volume of *Z. serrata* trees increased. The values for stem volume per hectare are 85%, 68%, and 300% higher in 1-year-old 5,000 trees ha<sup>-1</sup>, 2-year-old 3,000 trees ha<sup>-1</sup>, and 2-year-old 5,000 trees ha<sup>-1</sup> plots, respectively, compared to the values in 1-year-old 3,000 trees ha<sup>-1</sup>. This result shows that high planting density (close planting) affects tree growth differently based on seedling age, and suggests that the planting density of 5,000 trees ha<sup>-1</sup> is suitable for 2-year-old seedlings to improve early growth field performance.

**Key words:** container seedling, field performance, planting practice, seedling age, size

\* Corresponding author  
E-mail: mscho1143@korea.kr

#### ORCID

Nam Jin Noh <sup>ID</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5227-7437>  
Min Seok Cho <sup>ID</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2847-8412>

## 서론

식재밀도에 의해서 결정되는 조림 초기의 생육공간은 조림목의 활착률과 생장에 중요한 영향을 미친다(Harms et al., 2000; Benomar et al., 2012; Noh et al., 2020). 적절한 식재밀도는 개체들 간의 자원경쟁을 유도하여(Iwasa et al., 1984; Antony et al., 2012), 수고, 근원경, 재적 등의 생장을 증가시키거나(Burkes et al., 2003; Kerr, 2003; Toillon et al., 2013; Saha et al., 2014; Van de Peer et al., 2017; Noh et al., 2020), 측지 발달을 제한하여 지하고를 높이고, 수간 통직성을 향상시키는데 기여할 수 있다(Alcorn et al., 2007; Will et al., 2010; Newton et al., 2012; Akers et al., 2013; Wang et al., 2018). 그러나 동일한 밀도로 식재되더라도 조림목의 묘령 또는 크기에 따라 생육공간이 달라질 수 있기 때문에 적절한 식재밀도 구명을 위해서는 식재시의 묘령 또는 크기에 따른 입지환경, 조림지 정리작업 및 관리 방법 등도 함께 고려되어야 한다(Cho et al., 2020).

현재 우리나라의 활엽수 조림용 용기묘는 1년생묘(1-0) 또는 2년생묘(2-0)가 식재되고 있으며, 양묘단계에서 이식 없이 동일 용기에서 생산되고 있으나, 묘령에 따라 수고, 근원경 등 묘목 크기는 차이가 있다(KFS, 2014, 2020). 조림목의 묘령은 묘목의 크기를 결정하며 조림지에서 식재 이후 생육공간과 자원이용효율에 영향을 미친다(South and Mitchell, 1999). 식재 초기에 조림목의 크기는 하층식생과의 경쟁이 있거나 야생동물에 의한 섭식피해가 있을 경우, 대묘가 소묘에 비해 우수한 활착률과 생장을 보일 수 있다(Close et al., 2010). 또한 양분이 적거나 식물체내 저장된 양분과 탄수화물이 적은 조림목은 그렇지 않은 조림목에 비해 광합성 및 자원이용에 있어서 불리하고 조림지에서의 초기 생장 및 활착에 있어서도 취약할 수 있다(Canham et al., 1999; Grossnickle, 2000; Oliet et al., 2009). 반면 섭식피해로부터 보호받을 경우, 소묘는 대묘에 비해 더 높은 직경생장을 보였고(Close et al., 2010), 경운 또는 토양 개량 처리한 조림지에서도 소묘가 대묘에 비해 더 큰 수고와 직경생장을 보였다(Renou-Wilson et al., 2008; Johansson et al., 2007). 이처럼 묘령 및 크기가 조림목의 생육특성에 미치는 영향은 수종 및 입지환경, 조림지 관리 방법에 따라 다양할 수 있다(Johansson et al., 2015).

낙엽활엽교목인 느티나무(*Zelkova serrata*)는 우리나라 온대 중남부지역에 주로 식재되고 있으며, 최근 목재산업을 위한 주요 용재수로서의 가치를 인정받아 조림면적이 점차 확대되고 있다(Otsamo, 2002; Hwang et al., 2015; KFS, 2019). 느티나무에 관한 조림학적 관점에서의 국내 연구는 양묘 단계 또는 조림지에서의 초기 생장 특성 구명에 관한 연구가 보고된 바 있고(Yang et al., 2014, 2016; Cho

et al., 2017a, 2017b; Yang and Cho, 2019), 최근 1년생 노지묘의 느티나무 조림지에서 3,000-10,000본 ha<sup>-1</sup>의 식재밀도 중에서 10,000본 ha<sup>-1</sup>의 고밀도 식재가 조림목의 초기 생장을 향상시키는 긍정적인 효과가 보고된 바 있다(Noh et al., 2020). 그러나 양묘 단계에서 용기묘 생산 기술 개발로 인해 용기묘의 현지 보급 및 조림이 점차적으로 증가하는 추세에도 불구하고(Cho et al., 2020), 용기묘의 묘령과 식재밀도를 함께 고려한 조림지에서의 초기 생육 특성 연구 결과는 보고된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 온대 남부지역의 느티나무 조림지에서 묘령[용기묘(1-0)와 용기묘(2-0)]과 식재밀도(3,000본 ha<sup>-1</sup>, 5,000본 ha<sup>-1</sup>)에 따른 느티나무 조림목의 초기 활착률 및 근원경, 수고를 조사하여 수간재적을 향상시키기 위해 느티나무 조림목의 묘령에 따라 적합한 식재밀도 기준을 제안하는데 그 목적이 있다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구 대상지

연구 대상지는 경상북도 영덕(36°39'13" N, 129°16'29.43" E, 448-470 m a.s.l.)에 위치하며, 연구 대상지의 경사는 18-24° 범위였으며, 북동사면 또는 북북동사면에 위치하였다(Figure 1). 조사기간 동안(2017-2019년)의 연평균 기온은 13.8 °C, 연평균강수량은 1,234 mm였다(KMA, 2020). 토양은 식재 당년인 2017년에 처리별 3개 지점에서 토양 시료 채취기를 이용하여 20 cm 까지의 시료를 채취하였다. 토성은 Hydrometer법, 토양 pH는 토양과 증류수를 1:5 비율로 희석하여 pH meter(Orion Star A211, Thermo, USA)로 측정하였다. 전질소 농도는 Kjeldahl 증류법, 유기물 농도는 Tyurin법, 유효인산 농도는 Lancaster법으로 측정하였다. 또한 치환성 양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>) 농도는 Brown No.1법에 따른 추출액을 이온분석기(ICP-OES, Optima 8300, PerkinElmer, Singapore)로 측정하였다(Jones Jr., 1999; RDA, 2000; Noh et al., 2020).

### 2. 조림목 식재 및 생장 조사

2017년 3월말에 2가지 묘령[용기묘(1-0), 용기묘(2-0)]의 느티나무 조림목을 2가지 식재밀도[3,000본 ha<sup>-1</sup> (1.8 m × 1.8 m), 5,000본 ha<sup>-1</sup> (1.4 m × 1.4 m)]에 따라 총 4가지 처리로 식재하였다. 식재면적은 처리별 0.5 ha로 총 2 ha에 식재되었다(Figure 1(a)). 식재밀도는 현재 우리나라에서 경제림 조성을 위한 식재밀도 기준인 3,000본 ha<sup>-1</sup>와 국외에서 용재생산을 위한 활엽수 조림시 활용되고 있는 5,000본 ha<sup>-1</sup>를 식재밀도 처리의 기준으로 하였다(Saha et al., 2014). 조림지 풀베기 작업은 식재 당년도에 1회, 식재 2-3

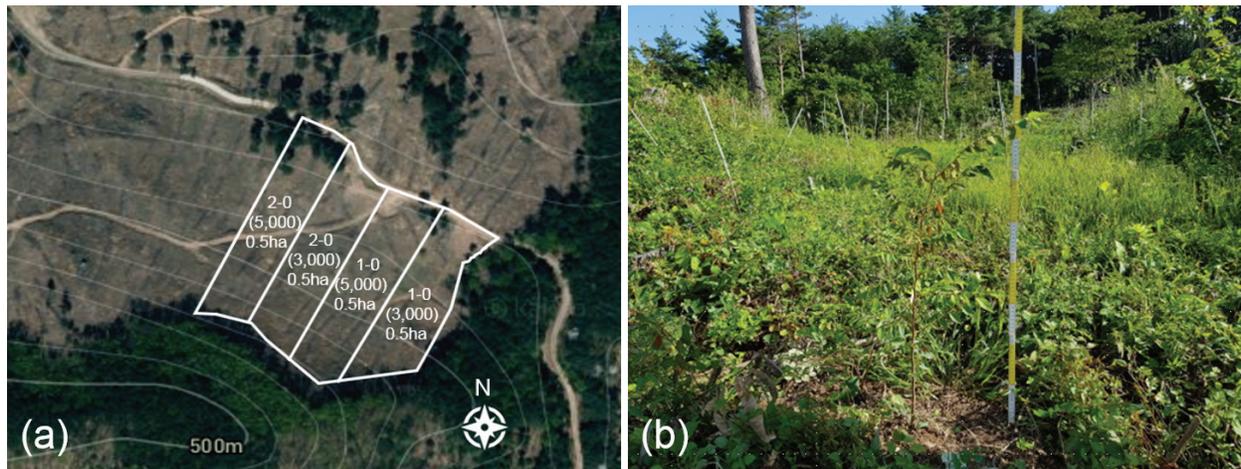


Figure 1. Experimental design for the treatments of seedling age and planting density (a) and a photo for 1-year-old seedlings (b) in *Zelkova serrata* plantation sites.

년차에 연 2회로 총 5회 실시하였다. 느티나무 조림목의 생존율과 성장 특성을 조사하기 위하여 각 처리구 마다 30분씩 3반복으로 총 90본의 조림목을 선정하였다. 2017년부터 2019년까지 매년 9월에 생존율을 조사하고, 전자식 캘리퍼스과 절척을 이용하여 조림목의 근원경(Root collar diameter, RCD, mm)과 수고(Height, H, cm)를 측정하였다. 측정된 값을 이용하여  $H/D$ 율( $H/D$  ratio =  $H / RCD$ )과 조림목 초기 품질의 평가 지표인 수간 재적(Stem volume ( $cm^3$ ) =  $\Pi \times RCD^2 \times H / 6$ )을 계산하였다(Pinto et al., 2011).

### 3. 통계 분석

묘령과 식재밀도가 느티나무 조림목의 생존율, 근원경, 수고, H/D율, 및 수간 재적에 미치는 영향을 분석하기 위하여 이원분산분석을 실시하였고, 유의성이 인정된 인자들의 처리에 따른 유의성 분석을 위해 t-test 또는 Duncan의 다중검정법( $p < 0.05$ )을 이용하였다. 수고와 근원경의 관계는 Pearson 상관 분석을 실시하였고, 식재밀도처리가 수고와 근원경의 관계에 미치는 영향 분석을 위해 식재밀도를 고정효과, 개체목의 근원경을 임의효과로 하는 선형

혼합모형(Linear mixed effect model)을 이용하였다. 모든 통계 분석에는 SAS(ver. 9.4) 또는 R 소프트웨어(version 4.0.2) 프로그램을 사용하였다.

## 결과 및 고찰

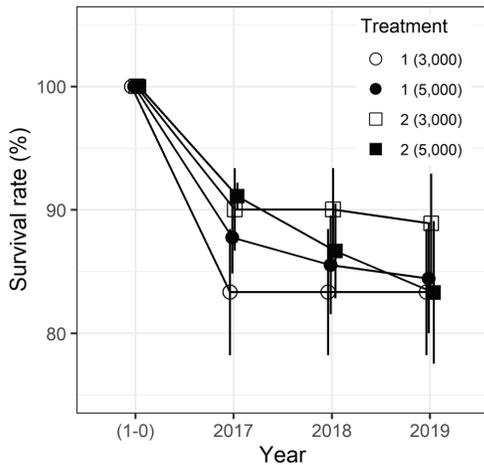
### 1. 생존율

조림지의 토양은 미사질양토였으며, 토양 pH는 5.7-6.4, 토양전질소농도는 0.06-0.14%, 유기물농도는 2.6-5.9%, 치환성양이온농도는 29.8-36.3  $cmol_c\ kg^{-1}$ 의 범위를 나타냈고, 조사구간에 유의적인 차이를 보이지 않았다(Table 1). 유효태인산농도는 조사구간에 유의적인 차이가 있었으나 ( $p < 0.05$ ), 3.9-7.5  $mg\ kg^{-1}$  범위로 우리나라 산림토양 평균 25.6  $mg\ kg^{-1}$ 에 비해 전체적으로 낮은 수준을 나타냈다(Jeong et al., 2002). 조림목의 생존율은 묘령과 식재밀도에 따라 유의적인 차이를 보이지 않았다(Figure 2). 용기묘(1-0)의 경우 조림목의 고사가 대부분 조림 당해연도에 발생하였으며, 용기묘(2-0)의 경우 조림후 연차에 따라 감소하는 경향을 보였다. 2019년 조림 3년차의 생존율은 모든 처리구에서 83% 이상의 수준을 보였다. 본 연구에서 용기묘

Table 1. The soil properties of *Zelkova serrata* plantation sites in 2017.

Seedlings age	Planting density (tree $ha^{-1}$ )	pH	Total N (%)	Available P ( $mg\ kg^{-1}$ )	Organic matter (%)	C.E.C. ( $cmol_c\ kg^{-1}$ )	Exchangeable cations ( $cmol_c\ kg^{-1}$ )			
							Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
1-year-old	3,000	5.7±0.5	0.06±0.01	4.6±0.8	4.9±3.5	30.4±9.7	9.8±5.5	3.39±2.18	0.39±0.14	0.06±0.03
	5,000	5.9±0.3	0.21±0.18	2.6±0.4	3.9±2.6	33.9±1.5	13.1±1.5	4.84±0.43	0.17±0.12	0.07±0.00
2-year-old	3,000	6.3±0.4	0.14±0.05	4.2±1.4	5.9±3.3	36.3±1.3	15.8±1.8	4.80±0.74	0.30±0.02	0.06±0.01
	5,000	6.4±0.5	0.14±0.02	7.5±2.0	4.1±0.6	29.8±0.0	11.2±0.9	3.38±1.17	0.51±0.14	0.04±0.01

Values indicate mean ± standard deviation (n=3).



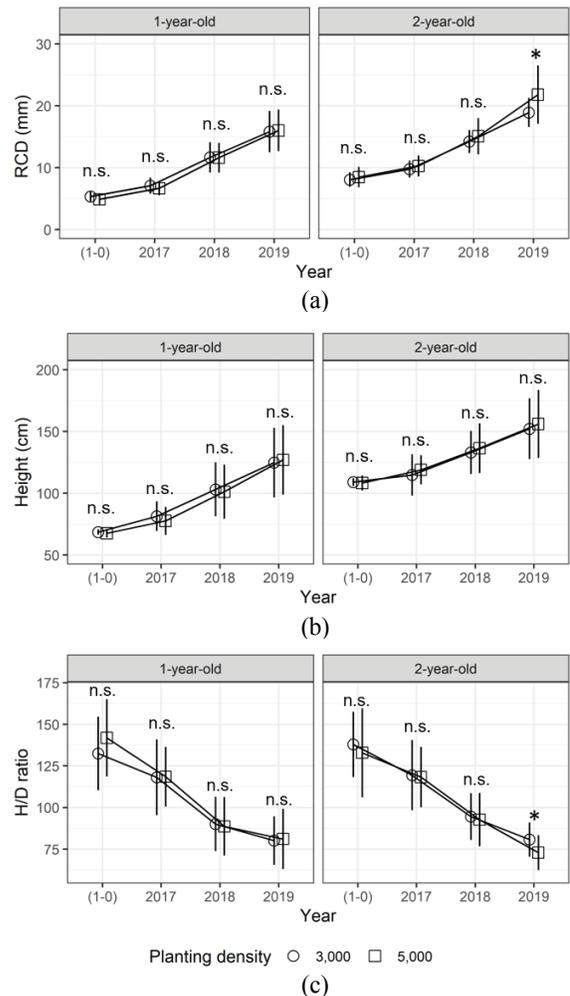
**Figure 2.** The survival rate of *Zelkova serrata* trees according to seedling age (1-year-old, 2-year-old) and planting density (3,000 trees ha<sup>-1</sup>, 5,000 trees ha<sup>-1</sup>) in plantation sites. Vertical bars indicate standard deviation of the mean (n=3).

(1-0)과 용기묘(2-0)의 생존율은 Noh et al. (2020)에 의한 1년생 노지묘를 이용한 연구에서 조림 3년차에 90% 이상의 생존율을 보인 것에 비해 비교적 낮은 생존율을 보였으나, 3,000본 ha<sup>-1</sup>과 5,000본 ha<sup>-1</sup>의 식재밀도처리 간에 생존율의 차이가 나타나지 않은 것과는 일치하는 결과였다. 한편 용기묘(2-0)의 생존율은 용기묘(1-0)과 유의적인 차이를 보이지 않아, *Pinus halepensis*, *P. sylvestris*, *Picea abies*, *Larix olgensis* 등의 수종에서 대묘가 소묘에 비해 높은 생존율을 보인 선행 연구 결과와는 다르게 나타났으나(Puértolas et al., 2003; Li et al., 2011; Johansson et al., 2015), *Quercus rubra*에서 묘령에 따라 유의적 차이를 보이지 않은 결과와는 일치하였다(Chaney and Byrnes, 1993). 일반적으로 조림목의 활착은 조림목의 묘령 또는 크기가 클수록 유리한 것으로 알려져 있으나(South et al., 2005), 이는 조림목 체내의 양분과 잡목과의 경쟁조건과 같은 조림지의 입지환경에 따라 다를 수 있다. 따라서 향후 용기묘의 묘령이 생존율에 미치는 영향을 정확하게 구명하기 위해서는 식물체내 질소 및 비구조성 탄수화물 함량 등의 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다(Landhäuser et al., 2012; Villar-Salvador et al., 2012, 2015).

**2. 근원경 및 수고생장**

근원경생장은 용기묘(1-0)의 경우 조사기간 동안 식재 밀도에 따른 유의적 차이를 나타내지 않았으나, 용기묘(2-0)의 경우 식재후 3년차에 유의적인 차이를 나타냈으며, 용기묘(2-0) 5,000본 ha<sup>-1</sup>의 고밀도 처리구(21.8 mm)에서 3,000본 ha<sup>-1</sup> 처리구(18.9 mm)에 비해 유의적으로 더 큰 근원경을 나타냈다[Figure 3(a), Table S1]. 그러나 조림

목의 수고생장은 용기묘(1-0)와 용기묘(2-0) 모두에서 식재후 3년간 식재밀도에 따른 유의적인 차이를 보이지 않았다[Figure 3(b)]. 근원경생장에 있어서 묘령이 4년생이 되는 2019년에 용기묘(2-0)의 경우, 3년생이 된 용기묘(1-0)에 비해 생육 공간에 있어서 경쟁 환경이 조성되었기 때문에 밀식의 효과가 나타난 것으로 보인다. 근원경과 수고를 동일한 묘령을 기준으로 비교하였을 때, 조림지에 식재된지 3년이 경과된 2019년의 용기묘(1-0)가 2년이 경과된 2018년 용기묘(2-0)에 비해 근원경은 더 큰 반면 더 작은 수고를 나타낸 것은 조림목이 식재된 후 수고생장보다 근원경생장을 더 증가시키고 있는 것을 의미하며, 이를 통해 지하부 물질생산량을 증가시키고 있음을 추정할 수 있다(Marziliano et al., 2015). 또한 이러한 결과는 생육 초기

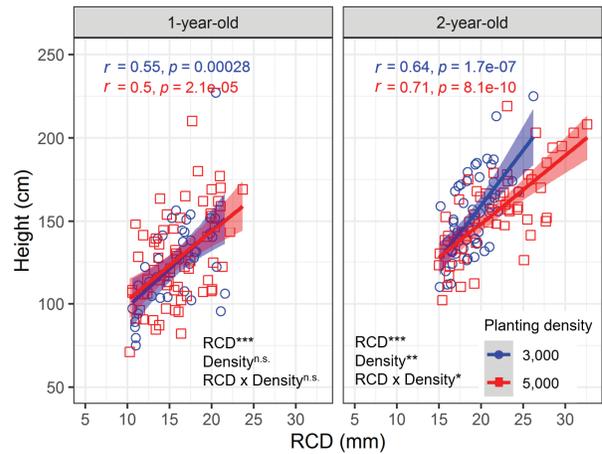


**Figure 3.** The root collar diameter (RCD, mm) (a), height (cm) (b), and H/D ratio (c) of *Zelkova serrata* trees according to seedling age (1-year-old and 2-year-old seedlings) and planting density (3,000 trees ha<sup>-1</sup> and 5,000 trees ha<sup>-1</sup>) in plantation sites. Vertical bars indicate standard deviation of the mean (n=3). Asterisks indicate significant differences in the variables between the treatments by t-test (p < 0.05), n.s. (not significant).

에 많은 양분을 필요로 하는 다비성 수종인 느티나무의 조림학적 특성인 것으로 보인다(Hwang et al., 2015; Yang and Cho, 2019). 한편 수고생장에 있어서 유의적인 차이를 보이지 않은 것은 경쟁 환경에 있어서 측아 우세현상을 보이는 느티나무의 성장특성과도 관련이 있을 것으로 판단된다(Millet et al., 1998). 그러나 용기묘에 비해 규격이 큰 노지묘를 이용한 Noh et al.(2020)의 선행연구에서 식재당 년도부터 근원경과 수고생장 모두에 있어서 유의적인 차이를 나타낸 것을 고려할 때, 규격이 상대적으로 작은 용기묘를 이용한 본 연구에서도 향후 연차가 증가함에 따라 수고생장에 있어서 밀식의 효과가 나타날 가능성이 있다. 2019년 용기묘(2-0) 식재 2년 후의 수고가 고밀도에서  $156.2 \pm 3.6$  cm, 저밀도에서  $152.2 \pm 3.3$  cm로 나타나 경산, 순창 지역의 느티나무 노지묘(1-0) 식재후 2년의 수고와 유사하였기 때문에 지속적인 성장 모니터링을 통해 식재밀도 효과의 정확한 구명이 필요할 것으로 보인다(Table S1). 또한 이러한 성장 특성의 차이는 입지환경에 따라 다를 수 있기 때문에 입지 토양 환경 조건이 다른 조림지에서의 추가적인 실험도 요구된다(South et al., 2005; Johansson et al., 2015).

### 3. H/D율

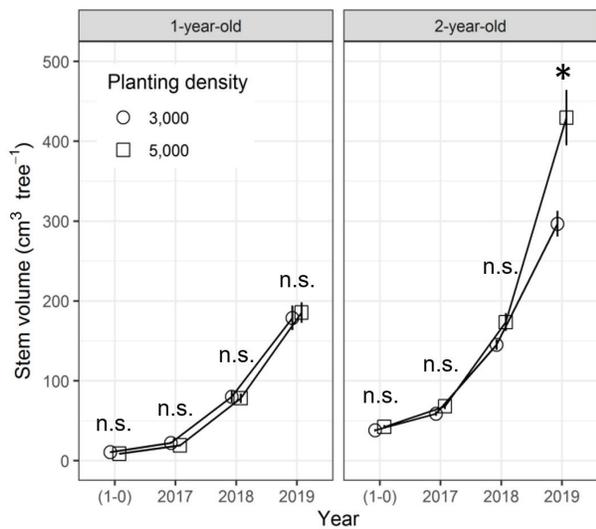
조림목의 H/D율은 시간이 경과함에 따라 모든 처리구에서 감소하는 일반적인 경향을 보였다[Figure 3(c)]. 2019년 조림후 3년차의 H/D율은 용기묘(2-0) 5,000본  $ha^{-1}$  처리구에서 72.8로 3,000본  $ha^{-1}$  처리구 82.7에 비해 유의적으로 낮았다( $p < 0.05$ ). 한편 용기묘(1-0)의 H/D율은 식재밀도처리에 따른 유의적인 차이를 보이지 않았다[Figure 3(c), Table S1]. 모든 처리구에서 수고생장과 근원경생장은 유의적인 상관관계를 보였고( $r > 0.50$ ,  $p < 0.01$ ), 식재밀도의 효과에 따른 기울기의 변화는 용기묘(2-0)에서 나타났다( $p < 0.01$ , Figure 4). 이는 용기묘(2-0) 5,000본  $ha^{-1}$  처리구의 조림목이 다른 처리구에 비해 수고생장 보다 근원경생장의 증가가 더 크다는 것을 의미하며, H/D율의 감소는 안정적인 활착과 함께 묘목의 품질이 향상되고 있음을 나타낸다(Bayley and Kietzka, 1996). 느티나무 1년생 노지묘를 이용한 선행연구에서 식재당년도에 3,000본  $ha^{-1}$ 에 비해 5,000본  $ha^{-1}$ 의 식재밀도 처리구에서 유의적으로 낮은 H/D율을 보였으나, 식재후 2년차부터는 식재밀도의 효과가 나타나지 않았다(Noh et al., 2020). 한편 H/D율 외에, 묘목의 품질을 나타내는 지표로서 밀식에 따른 가지의 발생 및 크기, 각도 감소 및 지하고의 증가 등이 4년생 유칼립투스(*Eucalyptus* spp.)와 5년생 *Betula alnoides* 조림지 등에서 보고된바 있기 때문에(Alcorn et al., 2007; Wang et al., 2018), H/D율의 장기적인 모니터링과 함께 용기묘와 노지묘의 현지적응성 비교분석 연구가 필요할 것으로 보인다.



**Figure 4.** The relationship between height (cm) and root collar diameter (RCD, mm) of *Zelkova serrata* trees to seedling age (1-year-old and 2-year-old seedlings) and planting density (3,000 trees  $ha^{-1}$  and 5,000 trees  $ha^{-1}$ ) in plantation sites. The results from Pearson correlation and linear mixed effect model of the RCD and planting density and their interaction effects on height are shown in each panel. Asterisks denote statistical significances. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$  \*\*\*  $p < 0.001$ . n.s. (not significant).

### 4. 수간 재적

식재밀도에 따른 개체목당 수간 재적은 용기묘(1-0)의 경우 식재밀도 처리구 간에는 식재후 3년간 유의적인 차이를 보이지 않았으나, 용기묘(2-0)은 조림후 3년차에 5,000본  $ha^{-1}$  식재 처리구에서 유의적으로 가장 높은 수간 재적을 보였다( $p < 0.05$ , Figure 5). 2019년, 용기묘(2-0) 3,000본  $ha^{-1}$ 과 5,000본  $ha^{-1}$  식재 처리구에서의 평균 수간 재적은 각각  $296.7 m^3$  본 $^{-1}$ 과  $429.5 m^3$  본 $^{-1}$ 으로 용기묘(1-0) 3,000본  $ha^{-1}$  식재 처리구  $178.8 m^3$  본 $^{-1}$ 에 비해 1.66배, 2.32배 크게 나타났다. 한편 양묘와 조림과정의 비용적 측면에서, 묘령과 식재밀도의 처리구별 식재밀도와 생존 본수를 동시에 고려했을 때, 조림후 3년차인 2019년에 단위면적당 수간재적은 용기묘(1-0) 3,000본  $ha^{-1}$  ( $44.5 m^3 ha^{-1}$ ) 대비 용기묘(1-0) 5,000본  $ha^{-1}$  ( $82.5 m^3 ha^{-1}$ )은 85% 증가, 용기묘(2-0) 3,000본  $ha^{-1}$  ( $74.8 m^3 ha^{-1}$ )와 5,000본  $ha^{-1}$  ( $178.2 m^3 ha^{-1}$ )는 각각 약 68%, 300% 증가되는 결과를 보였다. 이는 느티나무와 *Fraxinus excelsior* 등의 초기 성장 연구에서의 밀식의 긍정적인 효과를 뒷받침한다(Kerr, 2003; Noh et al., 2020). 그러나 용재수 생산을 위한 최적의 식재 방법을 결정하는데 있어서 식재기술 뿐만 아니라 조림지 사후관리도 중요한 요소이다. 자원경쟁을 유발시키는 조림목 주변의 초본 또는 목본을 제거하는 풀베기 작업과 같은 조림지 관리는 조림목의 활착 및 초기생장을 향상시킬 수 있지만(Benayas et al., 2005; Garau et al., 2009; Fukumoto et al., 2017; Park et al., 2020), 조림목의



**Figure 5.** The stem volume of *Zelkova serrata* trees according to seedling age (1-year-old and 2-year-old seedlings) and planting density (3,000 trees ha<sup>-1</sup> and 5,000 trees ha<sup>-1</sup>) in plantation sites. The value with vertical bar represents standard error of the mean (n=3). Asterisks indicate significant differences in stem volume between the treatments by t-test ( $p < 0.05$ ). n.s. (not significant).

크기가 작거나 밀식조림의 경우에는 풀베기작업의 효율성이 낮아져 사업비용이 증가될 수 있다. 느티나무 용기묘(2-0)은 용기묘(1-0)과 양묘 과정에서 동일한 용기를 사용하기 때문에 조림목의 규격에 따른 가격 차이가 크지 않다. 용기묘(1-0) 3,000본 ha<sup>-1</sup> 대비 용기묘(2-0) 5,000본 ha<sup>-1</sup>는 조림 및 조림지관리(풀베기작업 3년) 비용 약 76% 증가 되었다고 보고된바 있다(Cho et al., 2020, Table S2). 느티나무 식재 및 조림지 관리 측면에서, 용기묘(2-0) 식재에 따른 성장 향상 및 조림 초기 조림목 관리의 효율성을 종합적으로 고려할 때 용기묘(2-0) 밀식조림의 장점을 기대할 수 있을 것으로 보인다. 또한 본 연구에서 보여주는 묘령과 식재밀도가 초기 생장에 미치는 효과에 대한 결과는 향후 느티나무 성목의 재적생장 및 품질향상과 연계되는 지표가 될 수 있는지 분석하기 위한 중요한 기초자료로 활용될 것이다.

### 결론

초기 식재밀도가 느티나무 조림목의 초기생장을 증가시키는 긍정적인 효과를 바탕으로(Noh et al., 2020), 본 연구에서는 밀식의 효과와 경제적 비용을 고려하여 느티나무 묘령[용기묘(1-0)과 용기묘(2-0)]과 식재밀도(3,000본 ha<sup>-1</sup>, 5,000본 ha<sup>-1</sup>)의 차이에 따른 느티나무 조림목의 초기 생육 특성을 연차적으로 분석하여 조림목의 생존율 및 성장 특성을 이해하고자 수행되었다. 조림후 3년동안 묘령 및 식재밀도 처리구 사이에 생존율의 차이가 나타나지 않아 느

티나무 용기묘(2-0)을 고밀도로 식재하더라도 생존율을 감소시키지 않을 것으로 보인다. 밀식처리는 용기묘(2-0)의 수고에 영향을 미치지 않았으나 근원경을 증가시켜, 결과적으로 H/D율과 재적생장을 유의적으로 향상시켰다. 조림후 3년차인 2019년에 단위면적당 수간재적은 용기묘(1-0) 3,000본 ha<sup>-1</sup> 대비, 용기묘(1-0) 5,000본 ha<sup>-1</sup>는 85%, 용기묘(2-0) 3,000본 ha<sup>-1</sup>와 5,000본 ha<sup>-1</sup>는 각각 약 68%, 300% 향상되었다. 그러나 식재밀도의 유의미한 효과가 용기묘(2-0)의 식재후 3년차에 나타난 것을 고려할 때, 개체목간 경쟁이 보다 심화될 수 있는 3년차 이후의 성장특성을 지속적으로 모니터링해야할 필요가 있을 것으로 보인다. 본 연구에서 묘령에 따른 묘목의 규격과 식재밀도에 따른 수간재적의 정량적 분석 결과는 느티나무 조림지의 초기 생존율 및 성장과 함께 조림지 사후관리 비용까지 고려한 적정 식재밀도 및 조림기술을 개발하는데 중요한 자료로 활용될 것이다.

### References

Akers, M.K., Kane, M., Zhao, D., Teskey, R.O. and Daniels, R.F. 2013. Effects of planting density and cultural intensity on stand and crown attributes of mid-rotation loblolly pine plantation. *Forest Ecology and Management* 310: 468-475.

Alcorn, P.J., Pyttel, P., Bauhus, J., Smith, R.G.B., Thomas, D., James, R. and Nicotra, A. 2007. Effects of initial planting density on branch development in 4-year-old plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* trees. *Forest Ecology and Management* 252(1-3): 41-51.

Antony, F., Schimleck, L.R., Jordan, L., Daniels, R.F. and Clark III, A. 2012. Modeling the effect of initial planting density on within tree variation of stiffness in loblolly pine. *Annals of Forest Science* 69(5): 641-650.

Bayley, A.D. and Kietzka, J.W. 1996. Stock quality and field performance of *Pinus patula* seedlings produced under two nursery growing regimes during seven different nursery production periods. *New Forests* 13(1-3): 337-352.

Benayas, J.M.R., Navarro, J., Espigares, T., Nicolau, J.M. and Zavala, M.A. 2005. Effects of artificial shading and weed mowing in reforestation of Mediterranean abandoned cropland with contrasting *Quercus* species. *Forest Ecology and Management* 212(1-3): 302-314.

Benomar, L., DesRochers, A. and Larocque, G.R. 2012. The effects of spacing on growth, morphology and biomass production and allocation in two hybrid poplar clones growing in the boreal region of Canada. *Trees* 26: 939-949.

Burkes, E.C., Will, R.E., Barron-Gafford, G.A., Teskey, R.O.

- and Shiver, B. 2003. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. *Forest Science* 47(2): 224-234.
- Canham, C.D., Kobe, R.K., Latty, E.F. and Chazdon, R.L. 1999. Interspecific and intraspecific variation in tree seedling survival: Effects of allocation to roots versus carbohydrate reserves. *Oecologia* 121(1): 1-11.
- Chaney, W.R. and Byrnes, W.R. 1993. Effect of seedling age and taproot length on performance of oak. *Northern Journal of Applied Forestry* 10(4): 175-178.
- Cho, M.S., Jeong, J. and Yang, A-R. 2017a. Growing density and cavity volume of container influence major temperate broad-leaved tree species of physiological characteristics in nursery stage. *Journal of Korean Forest Society* 106(1): 40-53 (In Korean with English abstract).
- Cho, M.S., Kwon, B., Kim, W. and Jeong, D.H. 2020. Development of Silvicultural Techniques for Major Hardwood Species. National Institute of Forest Science. Seoul, Korea. Research report 20-03. pp. 7-34 (In Korean).
- Cho, M.S., Meng, L., Song, J.H., Han, S.H., Bae, K. and Park, B.B. 2017b. The effects of biochars on the growth of *Zelkova serrata* seedlings in a containerized seedling production system. *Forest Science and Technology* 13(1): 25-30.
- Close, D.C., Paterson, S., Corkrey, R. and McArthur, C. 2010. Influences of seedling size, container type and mammal browsing on the establishment of *Eucalyptus globulus* in plantation forestry. *New Forests* 39(1): 105-115.
- Fukumoto, K., Ota, T., Mizoue, N., Yoshida, S., Teraoka, Y. and Kajisa, T. 2017. The effect of weeding frequency and timing on the height growth of young sugi (*Cryptomeria japonica*) in southwestern Japan. *Journal of Forest Research* 22(3): 204-207.
- Garau, A.M., Ghersa, C.M., Lemcoff, J.H. and Barañano, J.J. 2009. Weeds in *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* (F. Muell) establishment: Effects of competition on sapling growth and survivorship. *New Forests* 37(3): 251-264.
- Grossnickle, S.C. 2000. Ecophysiology of Northern Spruce Species: The Performance of Planted Seedlings. NRC Research Press, Ottawa.
- Harms, W.R., Whitesell, C.D. and Debell, D.S. 2000. Growth and development of loblolly pine in a spacing trial planted in Hawaii. *Forest Ecology and Management* 126(1): 13-24.
- Hwang, J., Cho, M.S. and Yang, A. 2015. Development of Silvicultural Techniques for Species Replacement in Major Plantations. National Institute of Forest Science. Seoul, Korea. Research report 15-10. pp. 120. (In Korean)
- Iwasa, Y., Cohen, D. and Leon, J.A. 1984. Tree height and crown shape, as results of competitive games. *Journal of Theoretical Biology* 112(2): 279-297.
- Jeong, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H. and Kim, C.S. 2002. Physio-chemical properties of Korean forest soils by regions. *Journal of Korean Forestry Society* 91(6): 694-700.
- Johansson, K., Hajek, J., Sjölin, O., and Normark, E. 2015. Early performance of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* – a comparison between seedling size, species, and geographic location of the planting site. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30(5): 388-400.
- Johansson, K., Nilsson, U. and Allen, H.L. 2007. Interactions between soil scarification and Norway spruce seedling types. *New Forests* 33(1): 13-17.
- Jones Jr, J.B. 1999. Soil and Plant Analysis Laboratory Registry. 2nd Ed. Soil and Plant Analysis Council. CRC Press LLC. Florida, USA. pp. 209.
- Kerr, G. 2003. Effects of spacing on the early growth of planted *Fraxinus excelsior* L. *Canadian Journal of Forest Research* 33(7): 1196-1207.
- KFS (Korea Forest Service). 2014. The guidelines for seed and nursery practices. pp. 100 (in Korean)
- KFS (Korea Forest Service). 2019. Statistical Yearbook of Forestry. Korea Forest Service, Korea. pp. 444. (in Korean)
- KFS (Korea Forest Service). 2020. Annual action plan of forest resources in 2020. pp. 397. (in Korean)
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2020. [https://www.weather.go.kr/weather/climate/past\\_cal.jsp](https://www.weather.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp). Climate Information Portal (2020.09.25.).
- Landhäusser, S.M., Pinno, B.D., Lieffers, V.J. and Chow, P.S. 2012. Partitioning of carbon allocation to reserves or growth determines future performance of aspen seedlings. *Forest Ecology and Management* 275: 43-51.
- Li, G.L., Liu, Y., Zhu, Y., Yang, J., Sun, H.Y., Jia, Z.K. and Ma, L.Y. 2011. Influence of initial age and size on the field performance of *Larix olgensis* seedlings. *New Forests* 42(2): 215-226.
- Marziliano, P.A., Laforteza, R., Medicamento, U., Lorusso, L., Giannico, V., Golangelo, G., Sanesi, G. 2015. Estimating belowground biomass and root/shoot ratio of *Phillyrea latifolia* L. in the Mediterranean forest landscapes. *Annals of Forest Science* 72(5): 585-593.
- Millet, J., Bouchard, A. and Édelin, C. 1998. Plagiotropic architectural development of four tree species of the temperate forest. *Canadian Journal of Botany* 76(12): 2100-2118.
- Newton, M., Lachenbruch, B., Robbins, J.M. and Cole, E.C. 2012. Branch diameter and longevity linked to plantation spacing and rectangularity in young Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* 266: 75-82.

- Noh, N.J., Kwon, B., Yang, A.R. and Cho, M.S. 2020. Effect of planting density on early growth performances of *Zelkova serrata* trees. *Journal of Korean Society of Forest Research* 109(3): 281-290. (In Korean with English abstract)
- Oliet, J.A., Planelles, R., Artero, F., Rosario, V., Jacobs, D.F. and Segura, M.I. 2009. Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seedling morphology and mineral nutrition. *New Forests* 37(3): 313-331.
- Otsamo, A. 2002. Early effects of four fast-growing tree species and their planting density on ground vegetation in Imperrata grasslands. *New Forests* 23(1): 1-17.
- Park, B.B., Seo, J.M., Han, S.H., Youn, W.B., Jung, Y.K., Namgung, B.S., Lee, S.J. and Lee, S.I. 2020. Analysis of the current status of weeding operation and crop tree growth across planting periods. *Journal of Korean Society of Forest Research* 109(2): 179-188.
- Pinto, J.R., Marshall, J.D., Dumroese, R.K., Davis, A.S. and Cobos, D.R. 2011. Establishment and growth of container seedlings for reforestation: A function of stocktype and edaphic conditions. *Forest Ecology and Management* 261(11): 1876-1884.
- Puértolas, J., Gil, L. and Pardos, J.A. 2003. Effects of nutritional status and seedling size on field performance of *Pinus halepensis* planted on former arable land in the Mediterranean basin. *Forestry* 78(2): 159-168.
- Renow-Wilson, F., Keane, M. and Farrell, E.P. 2008. Effects of planting stocktype and cultivation treatment on the establishment of Norway spruce on cutaway peatlands. *New Forests* 36(3): 307-330.
- RDA (Rural Development Administration). 2000. Soil and Plant Analysis. National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration. pp. 202.
- Saha, S., Kuehne, C. and Bauhus, J. 2014. Intra- and inter-specific competition differently influence growth and stem quality of young oaks (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.). *Annals of Forest Science* 71(3): 381-393.
- South, D.B. and Mitchell, R.J. 1999. Determining the "optimum" slash pine seedling size for use with four levels of vegetation management on a flatwoods site in Georgia, USA. *Canadian Journal of Forest Research* 29(7): 1039-1046.
- South, D.B., Menzies, M.I. and Grant Holden, D. 2005. Stock size affects outplanting survival and early growth of fascicle cuttings of *Pinus radiata*. *New Forests* 29(3): 273-288.
- Toillon, J., Fichot, R., Dallé, E., Berthelot, A. and Brignolas, F. 2013. Planting density affects growth and water-use efficiency depending on site in *Populus deltoides* × *P. nigra*. *Forest Ecology and Management* 304: 345-354.
- Van de Peer, T., Verheyen, K., Kint, V., Van Cleemput, E. and Muys, B. 2017. Plasticity of tree architecture through interspecific and intraspecific competition in a young experimental plantation. *Forest Ecology and Management* 385: 1-9.
- Villar-Salvador, P., Puértolas, J., Cuesta, B., Peñuelas, J.L., Uscola, M., Heredia-Guerrero, N. and Benayas, J.M.R. 2012. Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations. Insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival. *New Forests* 43(5-6): 755-770.
- Villar-Salvador, P., Uscola, M. and Jacobs, D.F. 2015. The role of stored carbohydrates and nitrogen in the growth and stress tolerance of planted forest trees. *New Forests* 46(5): 813-839.
- Wang, C.S., Tang, C., Hein, S., Guo, J.J. and Zhao, Z.G. 2018. Branch development of five-year-old *Betula alnoides* plantations in response to planting density. *Forests* 9(1): 42, <http://doi.10.3390/f9010042>.
- Will, R., Hennessey, T., Lynch, T., Holeman, R. and Heinemann, R. 2010. Effects of planting density and seed source on loblolly pine stands in southeastern Oklahoma. *Forest Science* 56(5): 437-443.
- Yang, A-R. and Cho, M.S. 2019. The growth performances and soil properties of planted *Zelkova serrata* trees according to fertilization in harvested *Pinus rigida* plantation over 6 years after planting. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(1): 29-39 (In Korean with English abstract).
- Yang, A-R., Cho, M.S. and Hwang, J. 2014. The effects of seedling types and soil properties in relation to aspects on the early growth of planted *Zelkova serrata* seedlings. *Journal of Agriculture & Life Science* 48(4): 1-12 (In Korean with English abstract).
- Yang, A-R., Hwang, J., Cho, M.S. and Son, Y. 2016. The effect of fertilization on early growth of konara oak and Japanese zelkova seedlings planted in a harvested pitch pine plantation. *Journal of Forestry Research* 27(4): 863-870.

**Table S1. The survival rate, root collar diameter (RCD), height, H/D ratio and stem volume of *Zelkova serrata* trees according to seedling age and planting density in plantation sites and results of two-way ANOVA of the age, planting density and their interaction effects on the variables.**

Variables	Seedling age	Planting density (trees ha <sup>-1</sup> )	2017	2018	2019	
Survival rate (%)	1-year-old	3,000	83±5	83±5	83±5	
		5,000	90±3	90±3	89±4	
	2-year-old	3,000	88±3	86±4	84±4	
		5,000	91±2	87±3	83±6	
	Two-way ANOVA					
	Age		n.s.	n.s.	n.s.	
	Density		n.s.	n.s.	n.s.	
	Age × Density		n.s.	n.s.	n.s.	
	RCD (mm)	1-year-old	3,000	6.95±0.16 b	10.97±0.34 b	15.83±0.54 c
			5,000	6.54±0.12 b	11.44±0.29 b	15.99±0.41 c
2-year-old		3,000	9.45±0.19 a	13.65±0.27 a	18.90±0.32 b	
		5,000	10.01±0.20 a	14.42±0.37 a	21.80±0.62 a	
Two-way ANOVA						
Age			***	***	***	
Density			n.s.	n.s.	**	
Age × Density			n.s.	n.s.	**	
Height (cm)		1-year-old	3,000	82.0±1.4 b	98.4±2.3 b	124.7±4.5 b
			5,000	76.7±1.0 b	100.8±2.2 b	126.9±3.5 b
	2-year-old	3,000	115.2±1.8 a	130.4±2.0 a	152.2±3.3 a	
		5,000	118.4±1.4 a	134.1±2.4 a	156.2±3.6 a	
	Two-way ANOVA					
	Seedling age		***	***	***	
	Planting density		n.s.	n.s.	n.s.	
	Age × Density		*	n.s.	n.s.	
	H/D ratio	1-year-old	3,000	120.9±3.0 a	92.4±2.3 a	80.1±2.3 a
			5,000	119.5±2.2 a	90.3±2.1 a	81.1±2.2 a
2-year-old		3,000	124.9±3.1 a	97.7±2.2 a	80.7±1.4 a	
		5,000	120.9±2.2 a	95.7±1.9 a	72.8±1.4 b	
Two-way ANOVA						
Age			n.s.	n.s.	*	
Density			n.s.	n.s.	n.s.	
Age × Density			n.s.	n.s.	*	
Stem volume (cm <sup>3</sup> tree <sup>-1</sup> )		1-year-old	3,000	10.5±0.6 a	22.2±1.5 a	178.8±15.4 c
			5,000	8.6±0.4 a	19.0±1.3 a	185.4±12.9 c
	2-year-old	3,000	37.9±1.5 a	58.9±2.7 a	296.7±16.2 b	
		5,000	42.2±2.2 a	68.0±3.5 a	429.5±34.7 a	
	Two-way ANOVA					
	Age		n.s.	n.s.	***	
	Density		n.s.	n.s.	*	
	Age × Density		n.s.	n.s.	n.s.	

Values are means ± standard deviations for the survival rates and means ± standard errors for the other variables (n=3).. Different letters indicate significant differences according to seedling age and planting density in the year by Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$ . Asterisks denote statistical significances in two-way ANOVA. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ , and n.s. (not significant).

**Table S2. The management cost for planting and weeding according to seedling age and planting density in *Zelkova serrata* plantation and results of two-way ANOVA of the age, planting density and their interaction effects on labor efficiency.**

Seedling age	Planting density (trees ha <sup>-1</sup> )	Labor efficiency for weeding (person ha <sup>-1</sup> )	†Cost for seedlings (1000 won ha <sup>-1</sup> )	‡ Cost for weeding (1000 won ha <sup>-1</sup> )	Sum (1000 won ha <sup>-1</sup> )	% difference
1-year-old	3,000	1.67±0.11 c	5,325	7,019	12,344	100
	5,000	3.56±0.36 a	7,882	11,496	19,378	157
2-year-old	3,000	1.55±0.13 c	6,718	7,019	13,737	111
	5,000	2.37±0.09 b	10,280	11,496	21,766	176
Two-way ANOVA						
Age		*				
Density		***				
Age × Density		*				

Values are means ± standard errors (n=3). Different letters indicate significant differences according to seedling age and planting density in the year by Duncan’s multiple range test at  $p < 0.05$ . Asterisks denote statistical significances in two-way ANOVA. \*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.001$ . †547 won per each 1-year-old seedling, 955 won per each 2-year-old seedling, ‡ labor cost for 5 times weeding operation for 3 years referring to Construction Association of Korea (2015). This table is modified from the results reported by Cho et al. (2020).