

용기크기와 시비처리에 따른 모감주나무 용기묘의 생장 및 묘목품질

하영광^{1,2} · 안재영² · 이진협^{1,2} · 김보미^{1,2} · 윤준혁^{1*} · 이도형^{2*}

¹국립산림과학원 산림바이오소재연구소, ²영남대학교 산림자원학과

Effects of Container Size and Fertilization on the Growth and Quality of *Koelreuteria paniculata* Laxm. Container Seedlings

Young Kwang Ha^{1,2}, Jae Yeong An², Jin Hyeop Lee^{1,2}, Bo Mi Kim^{1,2},
Jun Hyuck Yoon^{1*} and Do Hyeong Lee^{2*}

¹Forestry Reasercher, Forest Biomaterials Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea

²Department of Forest Resource, Yeongnam University, Gyeonsan 38541, Korea

요약: 본 연구는 천연기념물 군락지 및 희귀식물로서 보호가치가 높은 모감주나무(*Koelreuteria paniculata* Laxm.)를 대상으로 우량한 용기묘 생산을 위해 용기종류(KK-SI500, KCNR-SI810, KCNR-SI1300)와 시비처리(0, 1.0, 2.0, 3.0 g·L⁻¹)에 따른 생장특성(간장, 근원경, H/D율, 묘목 품질지수)과 생리특성(엽록소 함량)에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 실험결과, 간장과 근원경 생장은 KCNR-SI1300 용기와 시비수준 3.0 g·L⁻¹에서 가장 우수하였으며, 물질생산량 또한 KCNR-SI1300 용기에서 가장 큰 수치를 나타냈으며, 전반적으로 간장 및 근원경 생장 결과와 유사한 경향으로 나타났다. 묘목의 품질을 나타내는 지수인 SQI(Seedling quality index) 역시 KCNR-SI1300 용기에서 3.82로 가장 높은 값을 보였다. 따라서 용기 용적이 클수록 생육밀도가 낮아지면서 개체별 생장량이 증가하는 경향을 보였고, 시비수준 증가에 따라 생장 촉진 효과도 나타났다. 시비처리에 따른 경제성과 환경적 지속 가능성을 고려할 때, 모감주나무 용기묘 생산에 적절한 시비 처리는 KCNR-SI1300(6-cell) 용기 기준 2.0 g·L⁻¹으로 판단된다. 본 연구 결과는 모감주나무의 효율적인 묘목 생산체계 구축과 안정적인 공급 기반 마련에 기여할 수 있는 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

Abstract: This study examined how container type (KK-SI500, KCNR-SI810, and KCNR-SI1300) and fertilization level (0, 1.0, 2.0, and 3.0 g·L⁻¹) influence the growth characteristics—height, root collar diameter, height-to-diameter ratio, and Seedling Quality Index (SQI)—and physiological traits (chlorophyll content) of *Koelreuteria paniculata* Laxm., a species of high conservation value designated both a natural monument and a rare plant. Seedlings grown in the KCNR-SI1300 container with the 3.0 g·L⁻¹ fertilization treatment showed the most significant height and root collar diameter. Dry matter production was likewise highest in the KCNR-SI1300 container, mirroring patterns observed in height and diameter growth. The SQI, a key indicator of seedling vigor, also reached its maximum value (3.82) in the KCNR-SI1300 treatment. Overall, results indicate that larger container volumes, which reduce plant density, promote more robust individual seedling growth, and that higher fertilization rates further enhance growth performance. Considering both economic efficiency and environmental sustainability, a fertilization rate of 2.0 g·L⁻¹ in combination with the KCNR-SI1300 (6-cell) container is recommended for producing high-quality *K. paniculata* seedlings. These findings provide essential baseline information for developing efficient propagation systems and securing a stable supply of this conservation-important species.

Key words: *Koelreuteria paniculata*, container seedling, fertilization, seedling quality

* Corresponding author
E-mail: dhlee@yu.ac.kr; jhyoon7988@korea.kr

ORCID

Do Hyeong Lee  <https://orcid.org/0000-0002-9411-7140>

Jun Hyuck Yoon  <https://orcid.org/0000-0003-4467-777X>

서론

무환자나무목(Sapindales) 무환자나무과(Sapindaceae) 모감주나무속(*Koelreuteria*) 모감주나무(*Koelreuteria paniculate* Laxm.)는 동아시아 전역, 특히 중국 동북부, 일본 혼슈 및 한국에 주로 분포하는 동아시아 종으로서, 국내에서는 1920년 황해도 초도와 장산곶 사이의 사구에서 처음 발견되어 보고되었으며(Lee et al., 1993), 국내에서는 전남 완도와 충남 안면도, 경기 백령도, 경남, 거제도, 남해, 대구, 포항 등 각 지역에 소규모 독립 집단으로 분포하고 있다(Song et al., 2000). 모감주나무는 내륙의 하천변 퇴적암 지대, 바닷가 사면, 해안사구, 산지 계곡 등 제한적 환경에서 자생하며, 해류에 의해 종자가 산포되며, 주요 지표종으로 기능한다(Lee et al., 1997).

모감주나무는 6~7월 노란색 꽃이 만개하는 낙엽성 소교목으로, 자연경관을 목적으로 관상수 또는 조경수로 많이 식재되고 있으며, 작은 크기와 아름다운 수형으로 소규모 정원, 공원, 도심 등 다양한 녹지 공간에 식재하기에 적합하다(Rehman and Park, 2000). 납(Pb)으로 오염된 토양 복원에 효과적인 대안으로 고려되며, 특히 해안가의 공업단지 및 항만 지역에서도 염해에 강한 조경수로서 높은 활용 가치를 지닌다(Choe, 1994; He et al., 2021; Liu et al., 2023).

기후변화, 인력부족, 조림 시기의 변화에 대한 요구가 커짐에 따라, 시설양묘(Container nursery)는 고품질 묘목의 안정적 생산 기반으로서 그 중요성이 갈수록 부각되고 있다. 이러한 양묘 방식은 전통적인 노지양묘(field nursery)에 비해 다양한 측면에서 우위를 가진다. 용기묘(container seedlings)는 높은 활착률과 우수한 생장률을 나타내며, 연중 조림이 가능하고 생육 기간 단축, 노동력 절감, 자동화 적용이 가능하다(Haase et al., 2006; Salifu and Jacobs, 2006; Wilson et al., 2007). 특히 온실 내 생육환경을 정밀 제어함으로써 이상기후로 인한 묘목 피해를 효과적으로 예방할 수 있다.

용기묘는 굴취 과정이 생략되어 뿌리 손상이 적으며, 이에 따라 수분 스트레스 내성이 높아지고 활착률 또한 향상된다(Grossnickle and El-Kassaby, 2016). 또한 생육 상토와 함께 식재되므로 초기 생장 속도도 빠르며, 적절한 시비 처리를 병행할 경우 생리적 활성도 높게 유지된다(Cho et al., 2012; Song et al., 2012; Yang et al., 2014).

Landis et al.(1995)은 용기묘 생육에 영향을 미치는 요인을 토양요인과 대기요인으로 구분하였다. 전자는 수분과 무기양분을 포함하고, 후자는 빛, 온도, 습도, 이산화탄소 농도 등으로 구성된다. 또한 용기의 형상 및 크기, 상토 구성, 시비 방법, 관수 시스템, 양묘 기술 등 물리적, 기술적 요인이 용기묘 생장에 결정적인 영향을 미친다(Landis et al., 1989). 특히

용기의 크기와 형태는 뿌리의 공간적 제약, 수분 저장 능력, 통기성 등에 영향을 미치며, 결과적으로 근원경과 간장 생장에 큰 차이를 초래한다(Kim et al., 2010; Dominguez-Lerena et al., 2006; Ortega et al., 2006).

이러한 요소들은 현지 식재 이후의 생장 결과에도 큰 영향을 미치므로, 용기 선택 시 묘목의 목표 규격 및 생리적 특성에 대한 사전 고려가 필수적이다(Romero et al., 1986; Marler and Willis, 1996). 또한 빛과 양분은 광합성률, 탄소 화물 축적, 대사 활성 등 다양한 생리적 과정을 통해 묘목의 최종 생장량을 결정짓는 핵심 요인으로 작용한다(Kozłowski and Pallardy, 1997; Kim et al., 2015; Song et al., 2015; Park and Lee, 2020).

자작나무를 대상으로 한 연구에서는 본 연구에서 사용된 KK-SI500(15-cell) 용기보다 용적이 큰 KK-SI350 용기에서 간장 및 근원경 생장이 유의하게 높게 나타난 바 있으며, 소나무와 낙엽송에서도 용적이 크고 생육 밀도가 낮은 용기에서 생장 반응이 우수하다는 결과가 보고되었다(Lee, 2019; Kim et al., 2010; Jun, 2007). 이와 같이 용기 용적과 묘목 생장은 여러 수종에서 일정한 경향을 보이지만, 용기묘 생산에서 요구되는 용기, 규격, 시비 수준 및 생육 관리 기준은 수종별 생장 속도, 초기 발달 특성, 조림 적용 목적에 따라 달라질 수 있다.

모감주나무(*Koelreuteria paniculata*)는 도시 조경 및 생태복원 수요가 높은 수종임에도 불구하고, 기존 연구는 주로 자생집단의 형태, 생태적 특성과 보전·관리 방안에 집중되어 있다(Lee et al., 1997; Park et al., 2022). 반면, 용기묘 생산을 위한 재배 기준은 아직 체계적으로 확립되지 않은 실정이다. 따라서 모감주나무에 대하여 용기 규격 및 시비 수준에 따른 생육 반응을 실증적으로 규명하여, 시설양묘에 체계에서 적용가능한 묘목 생산 기준을 마련할 필요가 있다.

최근 도시 조경, 기후 적응형 식재, 식생복원 수요 증가에 따라 다양한 활엽수종에 대한 용기묘 개발 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 국내 활엽수종의 생육 특성에 적합한 용기, 시비, 상토 조합에 대한 체계적인 연구가 요구된다.

본 연구에서는 모감주나무(*Koelreuteria paniculata*)의 적합한 용묘 용기 규격 및 생육 반응을 분석하고 근원경, 간장, 건물생량량, 묘목품질지수 등을 중심으로 생장 특성을 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 결과는 향후 시설양묘 체계에서 모감주나무를 비롯한 다양한 활엽수종의 대량 생산과 조림 효율화를 뒷받침할 과학적 근거자료로 활용될 것으로 기대된다.

재료 및 방법

1. 시험지 및 공시수종

본 연구는 경상북도 경산에 위치한 영남대학교 유리온실(N 35° 49', E 128° 45')에서 실행하였다. 해당 시설은 측면 개폐가 가능하며, 내부 온도는 자동 환풍기를 통해 환기 및 온도 조절이 가능하도록 설계되어 있다. 온실의 온도와 습도를 파악하기 위해 온습도 측정기(HOBO data logger, U12, Onset Corp., USA)를 설치하여 1시간 간격으로 측정 하였다. 월별 평균 온도와 습도를 Figure 1에 나타내었다. 공시 수종은 국내 자생 모감주나무(*Koelreuteria paniculata*)로, 종자는 결실기인 2022년 10월 20일부터 11월 15일 사이에 채집하여 실험에 사용하였다. 채종한 종자는 실온에서 건조한 후, 손으로 마찰하여 탈종하였다. 이후 체(testing sieve 2.00 mm/10, 청계상사, 한국)를 사용하여 종자를 선별한 뒤, 풍선법을 통해 열매 껍질과 불순물을 제거하였다. 다음으로 종자를 물에

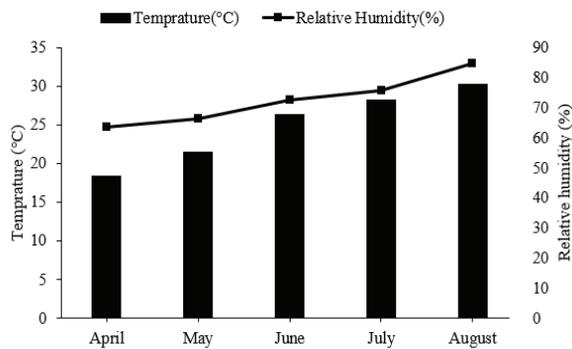


Figure 1. Temperature and relative humidity on a greenhouse for the experiment.

침지하여 가라앉은 종자만을 선별하였다(Lee, 2003). 선별된 종자는 음지에서 7일간 건조한 후 밀봉하여 영하 20°C 종자 저장고에 보관하였다. 이러한 저온 저장 처리는 종자 내 배와 배유의 손상을 방지하고 장기 저장 중 발아력 저하를 최소화하기 위한 방법으로 알려져있다(Baskin and Baskin, 2014; Rehman and Park, 2000). 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 1년간 저장한 종자를 실험에 사용하였다. 파종 2달전 95% 농황산을 60분 동안 처리한 후 후르는 물에 24시간 동안 침지하였다. 침지가 완료된 종자와 젖은 모래를 혼합하여 박스에 담에 5°C 저온 저장고에서 2024년 2월 1일부터 4월 2일까지 저온습사 처리를 하였다(Lee, 2003).

2. 양묘 용기 종류 및 시비처리

파종은 종자의 저온습사 처리를 마친 4월 2일에 실시하였다. 국내에서 상용화된 입엽용 플라스틱 트레이 용기(Shinill Science Inc., Korea)를 사용하였으며, 용기 모델은 KK-SI500(15-cell), KCNR-SI810(12-cell), KCNR-SI1300(6-cell)이다. 각 용기에 산림 양묘 전용 한아름 상토(Shinsung mineral. co., ltd., Korea)를 충전하여 종자를 이식하였다. 용기 구조와 상토 조성 비율은 Table 1, Figure 2 및 Table 2에 나타내었다. 배치는 6-cell의 경우 7반복, 12-cell 및 15-cell의 경우 각각 3반복으로 배치하였으며, 총 492본의 용기묘를 대상으로 시비처리를 수행하였다. 모든 처리구는 동일한 관수 조건 (20 L · m⁻²) 하에서 하향식 스프링클러와 자동 타이머를 이용하여 하루 관수량을 일정하게 유지 하였다.

시비 처리는 6월 13일부터 12주 동안 주 1회씩 수행하였다. 시비처리시에는 산림청 종묘사업 실시요령에서 제시하는 20 L · m⁻² 관수 기준을 적용하였으며, 이에 따라 각 용기 구당 90 mL의 희석 양액을 공급하였다. 시비에 사용한 비료는

Table 1. Types of container used for the experiment.

Container type	Container size (cm)	Cavity volume (mL)	Cavity diameter (cm)	Cavity per container (No.)	Seedling density (cavity/m ²)
KK-SI500 (15-cell)	W41×D25×H16	500	7.5	15	146
KCNR-SI810 (12-cell)	W42×D31×H16	810	9.5	12	81
KCNR-SI1300 (6-cell)	W45×D30×H16.8	1300	12	6	45

Table 2. Soil ratio bed soil used for the experiment.

Ingredient	coco peat	peat moss	perlite	vermiculite	zeolite	fertilizer	wetting agent
ratio (%)	64.3	15	10	2.5	8	0.09	0.1



Figure 2. Container used for the experiment.

수용성 복합비료인 Multifeed 20(N : P₂O₅ : K₂O = 20 : 20 : 20, Halifa Chemicals, Israel)으로, 관수와 병행하여 처리하였다. 산림청 종묘사업실시요령에 따르면 활엽수 용기묘의 표준 시비기준은 10-20 g · 20 L⁻¹ · m²로 제시되어 있다(Korea Forest Service, 2020). 본 연구에서는 해당 기준의 최대 300% 수준까지를 포함하여 대조구(0g · L⁻¹), 약도(1g · L⁻¹), 중도(2g · L⁻¹), 강도(3g · L⁻¹)로 총 네 수준으로 시비처리를 구성하였다.

3. 측정 및 결과 분석

1) 생장특성

용기 크기에 따른 시비처리 생장특성을 조사하기 위해 6월 초에 시비 처리 전과 처리 후 8월 말까지 14일 간격으로 처리구별로 각 용기 내 개체의 근원경과 간장을 측정하였다. 간장 측정은 절척기(Stabila Serie 600, Stabila Co., Germany)를 이용하여 근원부에서 정아까지의 길이를 측정하였다. 근원경은 디지털 캘리퍼스(CD- 15CPX, Mitutoyo Corp. Japan)를 이용해 근부 직경을 측정하였다. 측정된 근원경 및 간장값은 각각 측정 간격 일수 및 총 양묘 일수로 나누어 상대생장률을 계산하였다(Hughes and Freeman, 1967). 또한 묘목의 건전도를 평가하기 위해 H/D율을 계산하였다(Hasse, 2007).

2024년 9월 말 실험 종료 후, 처리구당 묘목 16본을 굴취하여 65°C에서 48시간 동안 건조하여 잎, 줄기, 뿌리로 구분한 후 각각의 건조량을 전자저울(E02140, OHAUS Co., Switzerland)을 사용하여 정밀 측정하였다. 측정된 건조량을 바탕으로 묘목 부위별 물질생산량, 총 물질생산량, 배분 비율 및 지상부/뿌리 비율(S/R ratio)을 산출하였다(Haase, 2008). 또한 양묘된 묘목 품질 평가는 Seedling Quality Index(SQI)를 통해 수행되었으며(Deans et al., 1989), 계산식은 다음과 같다.

$$SQI = \frac{\text{Total dry weight (g)}}{\frac{\text{Height (cm)}}{\text{Root collar diameter (mm)}} + \frac{\text{Top dry weight (g)}}{\text{Root dry weight (g)}}}$$

2) 엽록소 함량

용기 크기와 시비수준에 따른 묘목의 엽록소 함량 변화를 분석하기 위해, 실험 종료일(2024년 8월 27일) 이후 4주 뒤에 엽록소 함량을 측정하였다. 각 처리구마다 생육 상태가 평균적인 묘목 4본을 선정하여 각 개체의 선단을 기준으로 2~3번째 잎을 채취하였다. 채취한 잎은 50 mg씩 잘라 시약병에 넣고 DMSO(dimethyl sulfoxide) 용액 5 ml를 첨가하여 65°C 항온기(WBC-1520, Jejo Tech Co., Ltd., Korea)에서 6시간 동안 엽록소를 추출하였다(Hiscox and Israelstam, 1979). 추출한 용액을 UV-Visible spectrophotometer(U-2900, Hitachi Co., Japan)를 이용하여 653 nm와 645 nm의 파장에서 각각 흡광도를 측정하고, 다음 계산식(Mackinney, 1941: Amon, 1949)을 이용하여 엽록소 a, b 및 총 엽록소(a+b) 함량을 계산하였다.

$$\text{Chlorophyll a (mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ fresh weight)} = 12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645}$$

$$\text{Chlorophyll b (mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ fresh weight)} = 22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}$$

$$\text{Chlorophyll a+b (mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ fresh weight)} = 20.2 \times A_{645} + 8.02 \times A_{663}$$

4. 통계분석

용기 크기에 따른 모감주나무 1년생 용기묘의 생장 특성 차이를 검증하기 위해 SPSS (Version 27, IBM, USA) 통계 프로그램을 사용하였다. 처리 수준에 따른 간장, 근원경, H/D 비율(Height/Diameter ratio), 건물생산량, 건중비, S/R비율(Stem/Root ratio), 묘목품질지수(Seedling Quality Index, SQI), 엽록소 함량 간의 차이를 검증하기 위해 이원배치 분산분석(Two-Way ANOVA)을 실시하였다. 이후 평균값 차이를 검증하기 위해 5% 유의수준에서 던컨의 다중 범위 검정법(Duncan's multiple rate test)을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 간장 및 근원경 생장

모감주나무 종자는 모든 처리구에서 안정적인 득묘를 보였으며(Table 3), 20주차에는 용기별 시비 처리에 따른 생장 차이가 뚜렷하게 나타났다.

본 연구에서 사용된 용기(KK-SI500(15-cell), KCNR-SI810(12-cell), KCNR-SI1300(6-cell))에서 생장한 용기묘의 간장과 근원경을 분석한 결과, 처리구 간에 유의한 차이를 보였다(Table 4, $p < 0.001$). 시비수준이 높아질수록 용기별 생장량도 증가하는 경향을 보였다. 용기별 시비수준 증가에 따라 간장과 근원경이 가장 높게 나타난 용기는 KCNR-SI1300 용기였으며, 간장은 강도($3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 $22.60 \pm 9.15 \text{ cm}$ 로 가장 높은 값을 나타냈으며, 반면 근원경은 중도($2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 $5.25 \pm 1.20 \text{ mm}$ 로 가장 높게 나타났다. 다음으로 생장량이 높은 용기는 KCNR-SI810(12-cell)이며, 간장은 강도($3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 $15.34 \pm 7.41 \text{ cm}$, 근원경은 약도($1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 3.67 ± 0.87 로 높게 나타났으며, 용기별 시비처리구 중 가장 낮은 생장을 보인 KK-SI500(15-cell) 용기에서는 약도($1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구이며, 간장은 $10.07 \pm 3.05 \text{ cm}$, 근원경은 $3.33 \pm 0.66 \text{ mm}$ 로 나타났다. 일반적으로 묘목의 시비처리량이 증가함에 따라 수종별로 간장과 근원경 생장량이 증가하며, 수종별로 다양한 생장 반응을 보이는데, 이는 탄소동화작용에 필요한 충분한 양분이 공급됨에 따라 묘목의 생장이 대조구에 비해 더욱 활발하게 진행된 것으로 판단된다(Wallenda et al., 1996; Malik and Timmer, 1998). 자작나무 용기묘 연구에서는 본 실험과 동일한 용기인 KK-SI500(15-cell) 용기보다 구 용적이 더 큰 KK-SI350 용기에서 간장 및 근원경 생장물이 높게 나타났으며, 소나무와 낙엽송을 대상으로 한 연구에서도 용적크기가 크고 생육밀도가 낮은 용기에서 생장이 더 높게 나타났다고 보고하였다(Lee, 2019; Kim et al., 2010; Jun, 2007). 이러한 결과는 본 실험의 모감주나무 용기묘 연구 결과와 일치하며 KK-SI500(15-cell) 용기보다 용적이 큰 KCNR-SI1300(6-cell), KCNR-SI810(12-cell) 용기에서 생장물이 높은 것과 유사한 경향을 나타내었다. 이는 비교적 용적이 크고 생육밀도가 낮은 용기에서는 물과 양분의 유실이 적고 지하부 및 지상부 생장촉진 되었기 때문에 가장 생장이 좋았던 것으로 판단된다. 근원경 생장 측정 결과 KCNR-SI1300(6-cell) 용기에서는 중도($2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 높은 근원경 생장을 보였으며, KCNR-SI810(12-cell), KK-SI500(15-cell) 용기에서 약도($1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)에서 높은 생장량을 나타내었다. 상수리나무의 경우 근원경 생장이 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 에서 가장 높았으며, 더 높은 시비수준 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 에서는 생장

량 감소가 나타났으며, 쉬나무의 경우 근원경 생장량이 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 수준까지 증가하였으며, 이후 시비 수준에서는 통계적으로 차이는 없었으나 수치상으로는 생장량이 낮게 나타나 생장량은 모감주나무와 차이를 보였지만, 생장 패턴은 유사한 경향을 나타내었다(Choi et al., 2019).

모감주나무의 H/D율은 KK-SI500(15-cell), KCNR-SI810(12-cell), KCNR-SI1300(6-cell) 용기 모두 대조구와 시비처리구 간에 차이가 낮으며, 시비수준이 증가함에 따라 H/D율이 증가하는 결과를 보였다. 쉬나무(*Tetradium daniellii*)는 용기별 1차 측정 결과에 비해 2차 측정에서 H/D비율이 감소하는 경향을 보여, 본 연구 결과와는 차이를 보였다. 굴거리나무의 경우 시비처리구보다 대조구에서 H/D율이 낮게 나타나 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 이는 근원경 생장에 비해 간장 생장이 상대적으로 저조했기 때문으로 판단된다.

2. 물질생산량 및 묘목 품질지수

본 실험에서는 용기별 시비처리에 따라 모든 처리구에서 물질생산량이 증가하였다. 총 및 부위별 물질생산량은 KK-SI500(15-cell), KCNR-SI810(12-cell), KCNR-SI1300(6-cell) 용기 모두에서 처리구별로 유의한 차이를 보였다. 잎, 줄기, 뿌리 및 총 물질생산량은 용기 크기와 시비수준이 증가함에 따라 함께 증가하였다. 이러한 결과는 근원경 및 간장 생장이 우수한 처리구에서 물질생산량과 양분 이용 효율이 높게 나타났다고 보고한 Cho et al.(2015)의 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 용기별로 총 물질생산량은 강도($3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 가장 높게 나타났으며, KCNR-SI1300(6-cell) 용기에서는 $17.63 \pm 5.84 \text{ g}$ 로 가장 높은 값을 나타내었다. KCNR-SI810(12-cell) 용기에서 $9.27 \pm 2.81 \text{ g}$ 로 두 번째로 높으며, 반면 KK-SI500(15-cell)은 $4.30 \pm 1.64 \text{ g}$ 로 가장 낮은 총 물질생산량을 보였다. 잎 건중량, 줄기 건중량과 뿌리 건중량은 용기별 시비수준에 따라 증가하였으며, KCNR-SI1300(6-cell) 용기에서는 각각 $5.18 \pm 1.79 \text{ g}$ (잎), $3.37 \pm 1.27 \text{ g}$ (줄기), $9.08 \pm 3.23 \text{ g}$ (뿌리)로 가장 높은 물질생산량을 보였다(Table 5). KCNR-SI810(12-cell) 용기의 강도($3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 잎 건중량은 $3.45 \pm 1.32 \text{ g}$ 로 가장 높았으며, 줄기 건중량과 뿌리 건중량은 각각 $2.24 \pm 0.87 \text{ g}$, $4.99 \pm 1.88 \text{ g}$ 이었으며, 뿌리 건중량은 중도($2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 감소하였다. KK-SI500(15-cell) 용기의 강도($3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 처리구에서 잎 건중량은 $1.32 \pm 0.46 \text{ g}$ 로 가장 높게 나타났으며, 줄기 건중량과 뿌리 건중량은 각각 $0.81 \pm 0.31 \text{ g}$, $2.17 \pm 0.95 \text{ g}$ 으로 대조구($0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 약도($1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 중도($2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)에 비해 높게 나타났다. 또한 용기별 시비처리구에서 과시비로 인한 생장 감소가 나타나지 않았으며, 시비수준이 높아지면서 KK-SI500(15-cell) 용기 처리구에서 물질생산량에서는 뿌리 및 잎과

Table 3. Seedling emergence, mortality rates of *Koelreuteria paniculata*.

Container type	Fertilization concentration (g · L ⁻¹)	Number of seeds sown	Number of emerged seedlings	seedling emergence rate(%)	Mortality rate(%)
KK-SI500 (15-cell)	0	45	43	95.56	4.44
	1	45	40	88.89	11.11
	2	45	39	86.67	13.33
	3	45	37	82.22	17.78
KCNR-SI810 (12-cell)	0	36	36	100.00	0.00
	1	36	35	97.22	2.78
	2	36	35	97.22	2.78
	3	36	36	100.00	0.00
KCNR-SI1300 (6-cell)	0	42	42	100.00	0.00
	1	42	42	100.00	0.00
	2	42	42	100.00	0.00
	3	42	42	100.00	0.00

Table 4. Effect of fertilization concentration on height, root collar diameter and H/D and ratio of *Koelreuteria paniculata* container seedlings.

Container type	Fertilization concentration (g · L ⁻¹)	Height		Root collar diameter		H/D ratio (cm · mm ⁻¹)
		Growth (cm)	Relative growth rate (cm · day ⁻¹)	Growth (cm)	Relative growth rate (cm · day ⁻¹)	
KK-SI500 (15-cell)	0	6.26±1.39 ^g	0.043±0.013 ^e	2.81±0.41 ^f	0.021±0.006 ^{ef}	2.26±0.57 ^e
	1	10.07±3.05 ^e	0.064±0.031 ^d	3.33±0.66 ^{de}	0.023±0.010 ^{ef}	3.02±0.65 ^d
	2	10.63±4.14 ^d	0.066±0.038 ^d	3.13±0.75 ^{ef}	0.022±0.010 ^{ef}	3.38±0.90 ^{cd}
	3	11.48±4.96 ^{de}	0.067±0.045 ^d	3.05±0.58 ^{ef}	0.020±0.010 ^f	3.68±1.02 ^{bc}
KCNR-SI810 (12-cell)	0	7.11±2.48 ^{fg}	0.051±0.018 ^{de}	3.15±0.60 ^{ef}	0.025±0.005 ^{de}	2.22±0.44 ^e
	1	13.25±4.97 ^{cd}	0.092±0.038 ^c	3.87±0.92 ^c	0.030±0.009 ^{cd}	3.37±0.73 ^{cd}
	2	14.48±6.38 ^{bc}	0.101±0.048 ^{bc}	3.72±1.06 ^{cd}	0.029±0.010 ^{cd}	3.82±0.92 ^b
	3	15.34±7.41 ^{bc}	0.110±0.053 ^{bc}	3.67±0.87 ^c	0.031±0.009 ^{cd}	3.85±0.95 ^b
KCNR-SI1300 (6-cell)	0	9.24±3.16 ^{ef}	0.067±0.024 ^d	3.55±0.64 ^{cd}	0.028±0.005 ^{cd}	2.57±0.59 ^e
	1	16.08±6.74 ^b	0.116±0.049 ^{bc}	4.41±0.93 ^b	0.035±0.007 ^b	3.58±1.09 ^{bc}
	2	21.35±8.65 ^a	0.161±0.066 ^a	5.25±1.20 ^a	0.041±0.008 ^a	3.99±1.09 ^a
	3	22.60±9.15 ^a	0.149±0.066 ^a	5.17±1.04 ^a	0.041±0.011 ^a	4.30±1.18 ^{ab}
Container type		2517.317 ^{***}	0.128 ^{***}	96.257 ^{***}	0.006 ^{***}	11.754 ^{***}
Fertilization concentration		1687.563 ^{***}	0.86 ^{***}	16.867 ^{***}	0.001 ^{***}	53.814 ^{***}
Container type * Fertilization concentration		187.599 ^{***}	0.10 ^{***}	6.19 ^{***}	0.12 ^{***}	0.935 ^{ns}

Note: ^zMean±SD ***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05. F-values are statistical significance in two-way ANOVA. Different letters on the each columns indicate statistical differences at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

Table 5. Effect of fertilization concentration on dry mass production and T/R ratio of *Koelreuteria paniculata* container seedlings.

Container type	Fertilization concentration (g · L ⁻¹)	Dry mass production (g)				S/R ratio (g · g ⁻¹)
		Leaves	Stem	Root	Total dry weight(g)	
KK-SI500 (15-cell)	0	0.19±0.09 ^g	0.16±0.07 ^f	0.66±0.27 ^f	1.02±0.50 ^d	0.48±0.14 ^e
	1	1.01±0.4 ^{fg}	0.51±0.14 ^f	1.96±0.86 ^{ef}	3.48±1.52 ^d	0.77±0.28 ^{abc}
	2	1.09±0.59 ^{fg}	0.71±0.25 ^{ef}	1.82±0.92 ^{ef}	3.62±1.36 ^d	0.99±0.38 ^{abc}
	3	1.32±0.46 ^{ef}	0.81±0.31 ^{ef}	2.17±0.95 ^{ef}	4.30±1.64 ^{cd}	0.98±0.19 ^{ab}
KCNR-SI810 (12-cell)	0	0.56±0.22 ^{fg}	0.29±0.05 ^f	1.59±0.44 ^{ef}	2.64±0.71 ^d	0.56±0.09 ^e
	1	2.15±0.89 ^{de}	1.30±0.67 ^{de}	4.45±2.70 ^{cd}	7.13±3.33 ^{bc}	0.78±0.31 ^{cde}
	2	2.83±0.98 ^{cd}	1.55±0.68 ^{cd}	4.17±1.52 ^{cd}	7.02±3.55 ^{bc}	1.05±0.24 ^{abc}
	3	3.45±1.32 ^{bc}	2.24±0.87 ^b	4.99±1.88 ^c	9.27±2.81 ^b	1.14±0.37 ^{abc}
KCNR-SI1300 (6-cell)	0	0.65±0.29 ^{fg}	0.53±0.15 ^e	2.68±0.87 ^{de}	4.01±1.28 ^{cd}	0.44±0.11 ^{de}
	1	2.50±0.92 ^d	2.05±0.41 ^{bc}	6.94±2.70 ^b	9.19±4.40 ^b	0.66±0.18 ^{bcd}
	2	4.14±1.79 ^b	3.23±1.27 ^a	7.86±2.85 ^{ab}	15.23±5.69 ^a	0.94±0.27 ^a
	3	5.18±1.31 ^a	3.37±1.28 ^a	9.08±3.23 ^a	17.63±5.84 ^a	0.94±0.30 ^{abc}
Container type		34.815 ^{***}	18.827 ^{***}	136.146 ^{***}	477.182 ^{ns}	0.013 ^{***}
Fertilization concentration		24.374 ^{***}	8.802 ^{***}	37.374 ^{***}	190.381 ^{***}	1.234 ^{***}
Container type * Fertilization concentration		2.907 ^{***}	1.721 ^{***}	4.638 ^{ns}	24.877 [*]	0.028 ^{ns}

Note: ^aMean±SD ***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05. F-values are statistical significance in two-way ANOVA. Different letters on the each columns indicate statistical differences at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

비교하여 큰 차이를 나타내지는 않았다. 이는 전체적으로 시비수준의 증가와 용기의 생육밀도가 감소하면서 용기 별로 잎, 줄기, 뿌리 물질생산량이 증가하였으며, 쉬나무 용기묘의 경우 생육밀도가 낮은 KK-SI350 용기에서 물질생산량이 가장 높았으며(Choi, 2019), 편백나무(*Chamaecyparis obtusa*) 용기묘의 경우 15구 및 20구의 용기가 24구 용기에 비해 잎, 줄기, 뿌리 건중량이 더 높았다고 보고하였다(Jae et al., 2015). 또한 용기 종류에 따른 모감주나무 용기묘의 뿌리 발달은 간장, 근원경, 물질생산량 등의 성장과 밀접한 상관관계를 갖는다. 뿌리 생장이 활발할수록 수분과 양분의 흡수 능력이 증대되어 지상부 성장뿐만 아니라 묘목 전체 및 기관별 물질생산량 증가로 이어진다(Fox et al., 1990). 이러한 경향은 본 실험에서도 확인되었으며, 특히 생육밀도가 낮고 근계 발달이 가장 우수했던 KCNR-SI1300(6-cell) 용기에서 처리구에서 나타났다. 이는 모감주나무(*Koelreuteria paniculata*)의 초기 성장에서 개체당 넓은 생육 공간이 요구되며, 이러한 특성은 용기 크기와 생육밀도가 성장에 영향을 미치는 주요 요인으로 판단된다.

S/R율(Stem/Root ratio)은 지상부 생체중을 지하부 생체중으로 나눈 비율로, 묘목의 성장 균형을 평가하는 지표로 사용된다(Haase, 2007). 일반적으로 S/R율이 낮을수록 뿌리 발달이 양호한 양호한 개체로 평가되지만, 지상부의 건중량이 과도

하게 낮은 경우, S/R율이 낮더라도 생육이 불량한 묘목일 가능성이 있다. 따라서 S/R을 해석 시 묘목의 전체 성장 수준을 함께 고려하는 것이 필요하다(Sung, 2011). 용기별 시비수준에 따른 모감주나무의 S/R율은 KCNR-SI810(12-cell) 용기의 강도(3.0 g · L⁻¹) 처리구에서 1.14±0.3g · g⁻¹로 가장 높았고, 용기 처리구 중에 생육밀도가 가장 낮은 KCNR-SI1300(6-cell) 용기에서 비교적 낮은 S/R율로 나타났으며, 대조구(0 g · L⁻¹)에서는 0.44±0.11g · g⁻¹로 가장 낮게 나타났다. 총 건물생산량과 상이한 결과를 보였다. 이는 시비 수준이 증가함에 따라 지상부의 생장이 촉진된 반면, 지하부의 성장량은 제한된 용기 용적으로 인해 시비수준 간에 큰 차이를 보이지 않았다. Aranda et al.(2002)은 지상부 물질생산량과 S/R율이 높은 묘목의 경우 조림 시 수분 스트레스 저항 능력을 감소시켜 불량한 조림성상을 보일 수 있음을 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 용기내 용기선에 따라 뿌리 분(plug)이 형성되어 근계가 가장 잘 발달한 형태를 보여, 조림 시에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

양묘 된 묘목의 품질을 나타내는 묘목품질지수(Seedling Quality Index; SQI)는 처리구 간 유의한 차이를 나타냈다(Table 6, p<0.001). 묘목품질지수는 KK-SI500(15-cell), KCNR-SI810(12-cell), KCNR-SI1300(6-cell) 각 용기의 대조구에서 0.33±0.09, 0.88±0.21, 1.43±0.43으로 가장 낮았고

Table 6. Effect of fertilization concentration on dry weight ratio and SQI of *Koelreuteria paniculata* container seedlings.

Container type	Fertilization concentration (g · L ⁻¹)	Dry mass production (g)			SQI
		LWR	SWR	RWR	
KK-SI500 (15-cell)	0	0.19±0.03 ^c	0.16±0.02 ^c	0.65±0.10 ^c	0.33±0.09 ^c
	1	0.29±0.07 ^d	0.15±0.02 ^{de}	0.56±0.16 ^{cde}	0.80±0.37 ^{de}
	2	0.30±0.07 ^d	0.20±0.04 ^{cd}	0.50±0.13 ^{de}	0.68±0.23 ^c
	3	0.31±0.06 ^d	0.19±0.04 ^{cde}	0.50±0.13 ^{de}	0.87±0.33 ^{de}
KCNR-SI810 (12-cell)	0	0.23±0.05 ^d	0.12±0.01 ^{de}	0.65±0.16 ^{bcd}	0.88±0.21 ^{cde}
	1	0.27±0.07 ^{bc}	0.16±0.05 ^{bc}	0.56±0.26 ^{abc}	1.90±0.79 ^b
	2	0.33±0.14 ^{ab}	0.18±0.09 ^b	0.49±0.15 ^{bcd}	1.75±0.61 ^{bc}
	3	0.32±0.09 ^{abc}	0.21±0.10 ^{ab}	0.47±0.25 ^{bcd}	2.13±0.46 ^b
KCNR-SI1300 (6-cell)	0	0.17±0.08 ^d	0.14±0.04 ^{cd}	0.69±0.18 ^{ab}	1.43±0.43 ^{bcd}
	1	0.22±0.07 ^c	0.18±0.07 ^{ab}	0.60±0.49 ^a	3.12±0.80 ^b
	2	0.27±0.07 ^{abc}	0.21±0.10 ^a	0.52±0.27 ^{abc}	3.53±0.67 ^a
	3	0.29±0.06 ^a	0.19±0.05 ^a	0.51±0.20 ^{ab}	3.82±0.64 ^a
Container type		0.135 ^{***}	0.070 ^{***}	0.700 ^{***}	12.457 ^{***}
Fertilization concentration		0.074 ^{***}	0.022 ^{***}	0.041 ^{ns}	2.078 ^{***}
Container type * Fertilization concentration		0.003 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.016 ^{ns}	0.317 ^{ns}

Note: ^aMean±SD ***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05. F-values are statistical significance in two-way ANOVA. Different letters on the each columns indicate statistical differences at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

시비수준이 높아짐에 따라 증가하였으며, 높은 건중량, H/D 율 및 S/R 율을 보인 KCNR-SI1300(6-cell) 용기의 강도(3.0 g · L⁻¹) 처리구에서 3.82±0.64로 가장 높게 나타났다. 헛개나무와 쉬나무에서도 시비수준이 높아짐에 따라 묘목품질지수가 증가하는 양상을 보여, 본 연구 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 또한 자작나무(*Betula pendula*) 용기묘 실험 결과 용적이 크고 생육밀도가 낮은 SI-350 용기에서 묘목품질지수가 0.13으로 가장 높게 나타났으며, 용적이 작고 생육밀도가 높은 KCNR-250에서 0.90로 가장 낮은 값을 나타냈다(Lee et al., 2021). 소나무(*Pinus densiflora*) 2년생 용기묘는 시비수준 1.0 g · L⁻¹에서 묘목품질지수가 2.05로 높게 나타났으며, 편백나무(*Chamaecyparis obtusa*) 2년생 용기묘는 시비수준 2.0 g · L⁻¹에서 0.83으로 높게 나타나, 수중별로 최적 시비농도에서 품질지수가 상이한 결과를 보였다(Park and Lee, 2020; Park et al., 2019).

3. 엽록소 함량

시비처리가 모감주나무 용기묘의 엽록소 함량에 미치는 영향을 분석한 결과, 용기별로 시비수준이 증가함에 따라 총 엽록소 함량(a+b)과 엽록소 a, 엽록소 b 함량이 증가하는 경향을 보였다(Table 7). 이는 내음성이 높아 엽면적이 넓어지며, 엽록소 함량이 증가하여 빛의 이용 효율이 증가하

였기 때문이다(Valladares and Niinemets, 2008). 전체 엽록소 함량은 KCNR-SI1300(6-cell) 용기구의 강도(3.0 g · L⁻¹) 처리구에서 21.89±3.76 mg · g⁻¹으로 용기구 중 가장 높게 나타났으며, KK-SI500(15-cell) 용기구에서 11.52±1.80 mg · g⁻¹으로 용기구 중 가장 최저값을 나타냈다. 이는 용적이 작고 생육밀도가 높은 경우 엽록소 함량이 감소하는 경향을 보인 자작나무 용기묘에 대한 Lee(2019)의 선행 연구 결과와 일치한다. 엽록소 비(a/b)는 KCNR-SI1300(6-cell) 및 KCNR-SI810(12-cell) 용기에서 대조구(0 g · L⁻¹)와 시비 처리구 간 유의한 차이가 나타났지만, 용기별 시비수준에 따른 유의적 차이는 나타나지 않았다. 용기별로 대조구(0 g · L⁻¹)와 시비처리구 간 엽록소 차이가 크게 나타나는 것은 시비로 인한 엽록소 a의 증가량이 엽록소 b의 증가량 보다 높기 때문에 시비처리구에서 엽록소비(a/b)가 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 경향은 시비에 의해 양분 조건이 적절히 유지되어 광합성 효율이 향상되고, 이에 따라 모감주나무의 엽록소 합성이 촉진된 것으로 판단된다. Kang et al.(2021)과 Lee(2021)의 연구에서도 동일한 경향이 보고되었는데, 시비처리에 따라 엽록소 b보다 엽록소 a의 함량 증가율이 더 높게 나타나면서 엽록소비(a/b)가 상승하였다. 이는 시비처리가 엽록소 b보다 엽록소 a의 함량 증가에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 7. Effect of fertilization concentration on Chlorophyll contents and Chlorophyll a/b ratio of *Koelreuteria paniculata* container seedlings.

Container type	Fertilization concentration (g · L ⁻¹)	Chlorophyll contents (mg · g ⁻¹ fresh weight)			chlorophyll a/b ratio
		chlorophyll a	chlorophyll b	Total chlorophyll	
KK-SI500 (15-cell)	0	11.52±1.80e	2.82±0.37h	14.34±2.16f	4.08±0.19a
	1	15.93±2.27d	4.22±0.67fg	20.15±2.94e	3.79±0.12bcd
	2	16.05±1.05d	4.18±0.36fg	20.23±1.38e	3.85±0.15bc
	3	17.24±3.72cd	4.60±1.14def	21.84±4.85cde	3.77±0.12bcde
KCNR-SI810 (12-cell)	0	13.37±3.86e	3.52±1.06gh	16.89±4.91f	3.79±0.18bcd
	1	17.23±2.11cd	4.83±0.76cdef	22.05±2.86cde	3.58±0.16fg
	2	19.17±2.73bc	5.15±0.85bcde	24.32±3.57bcd	3.73±0.12cdef
	3	20.95±3.28ab	5.97±1.04ab	26.92±4.31ab	3.52±0.11g
KCNR-SI1300 (6-cell)	0	16.91±1.83cd	4.34±0.59efg	21.24±2.41ab	3.91±0.13b
	1	19.79±3.87ab	5.35±1.58abcd	25.13±5.41abc	3.77±0.31bcde
	2	20.20±2.02ab	5.52±0.67abc	25.71±2.68ab	3.67±0.11defg
	3	21.89±3.76a	6.17±1.66a	28.06±5.40a	3.62±0.30efg
Container type		244.911 ^{***}	23.927 ^{***}	420.639 ^{***}	0.555 ^{***}
Fertilization concentration		240.905 ^{***}	25.759 ^{***}	423.661 ^{ns}	0.542 ^{***}
Container type *					
Fertilization concentration		6.570 ^{ns}	0.444 ^{ns}	10.150 ^{ns}	0.046 ^{ns}

Note: ^zMean±SD ^{***}p<0.001, ^{**}p<0.01, ^{*}p<0.05. F-values are statistical significance in two-way ANOVA. Different letters on the each columns indicate statistical differences at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

결론

본 연구는 조경수 및 밀원 자원으로 활용되며, 항산화 물질을 다량으로 함유하여 다양한 분야에 응용 가능성이 높은 모감주나무의 우량 묘목 생산을 위한 용기크기에 따른 시비기준 구명을 목적으로 실시되었으며, 모감주나무 1년생 용기묘를 대상으로 3가지 용기(KK-SI500(15-cell), KCNR-SI810(12-cell), KCNR-SI1300(6-cell))와 4가지 시비처리(대조구, 0, 1.0, 2.0, 3.0 g · L⁻¹) 실험을 하였으며, 이에 따라 간장, 근원경, H/D율, 건물생산량, 묘목품질지수, 엽록소 함량 등 생장 및 생리적 반응 특성을 조사하였다.

모감주나무의 간장 및 근원경 생장, 묘목품질지수, 건물생산량 등이 시비처리구에서 생장 증가가 나타났으며, 특히 강도(3.0 g · L⁻¹) 시비수준에서는 모든 용기에서 생장이 촉진되었다. 간장은 KCNR-SI1300(6-cell) 용기의 강도(3.0 g · L⁻¹) 처리구에서 22.60±9.15 cm, 근원경은 중도(2.0 g · L⁻¹) 처리구에서 5.25±1.20 mm로 가장 높게 나타났다. 건물생산량은 KCNR-SI1300(6-cell) 용기의 강도(3.0 g · L⁻¹) 시비 처리구에서 15.67±5.96g으로 가장 높게 나타났다. 묘목 품질지수는 용기 크기와 시비수준이 증가할수록 높아졌지만, KCNR-SI1300(6-cell)에서는 시비 수준에 따른 유의미한 차

이가 나타나지 않아 용적 크기로 인한 생육밀도의 이점이 충분히 나타났다. 엽록소 함량의 경우 용기별 시비처리구에서 대조구 보다 높게 나타났으며, 용기의 용적이 커질수록 함량 증가가 뚜렷하게 나타났다. 엽록소비(a/b)의 경우 시비 처리구가 대조구보다 높았으며, 용기별 시비처리구 간에는 KCNR-SI810(12-cell)과 KCNR-SI1300(6-cell) 용기에서 유의한 차이가 나타났다. 이는 용기의 용적 크기와 시비수준 증가가 영향을 준 것으로 판단되며, 시비처리가 엽록소 b 보다 엽록소 a의 생산을 더 촉진 시키기 때문인 것으로 여겨진다.

본 연구에서는 모감주나무 1년생 용기묘 생산 시 KCNR-SI1300(6-cell) 용기와 시비수준 3.0 g · L⁻¹ 수준으로 시비 처리할 경우 가장 우수한 생장과 생리적 반응이 나타남을 확인하였다. 그러나 2.0 g · L⁻¹, 처리구와 비교했을 때 생장 및 생리적 특성 간 통계적으로 유의한 차이가 없었으므로, 또한 시비처리에 따른 경제성과 환경적 지속 가능성을 고려할 때, 모감주나무 용기묘 생산을 위하여 적합한 시비수준은 KCNR-SI1300(6-cell) 용기의 시비수준 2.0 g · L⁻¹으로 판단된다. 본 연구 결과는 모감주나무의 효율적인 묘목 생산체계 구축과 안정적인 공급 기반 마련을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 영남대학교 산림자원학과 교수비 및 국립산림과학원 “유용 상록활엽수 8수종의 반려동물 피부개선 효능 평가 및 생산성 증진 연구(No. FP0400-2023-03-2024)”과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Aranda, I., Gil, L. and Pardos., J. A. 2002. Physiological responses of *Fagus sylvatica* L. seedlings under *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pyrenaica* Willd. overstories. *Forest Ecology and Management* 162(2-3): 153-164.
- Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* 24(1): 1-15.
- Baskin, C.C. and Baskin, J.M., 2014. *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Academic Press, San Diego, CA (USA).
- Cho, M. S., Lee, S. W., Hwang, J. H. and Kim, J. W. 2012. Growth performance and photosynthesis of two deciduous hardwood species under different irrigation period treatments in a container nursery system. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 14(1): 28-38.
- Cho, M.S., Yang, A. and Hwang, J. 2015. Growth Performances of Container Seedlings of Deciduous Hardwood Species Grown at Three Different Fertilization Treatments. *Journal of Korean Society of Forest Science* 104(1): 90-97.
- Choe, M.S. 1994. *Koelreuteria paniculata* Laxm. *Landscape Trees* 22(9): 28-30.
- Choi, K.S. 2019. A study on the optimal container, fertilization and shading level for the production of container seedling of *Tetradium daniellii*. Ph. D. Thesis Seoul. Konkuk Universtiy
- Choi, K.S., Koo, D.E., Sung, H.I., Kim, J.J., Won, C.O. and Song, K.S. 2019. Investigation of the optimal fertilization level for the mass production of container seedling of *Tetradium daniellii* (Benn.) TG Hartley. *Journal Agriculture. Life Science* 53(5): 115-125.
- Deans, J.D., Mason, W.L., Cannell, M.G.R., Sharpe, A.L. and Sheppard, L.J. 1989. Growing regimes for bare-root stock of Sitka spruce, Douglas fir and Scots-pine. 1. Morphology at the end of the nursery phase. *Forestry* 62: 53-60.
- Dominguez-Lerena, S., Sierra, N.H., Manzano, I.C., Bueno, L.O., Rubira, J.L.P. and Mexal, J.G. 2006. Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *Forest Ecology and Management* 221: 63-71.
- Fox, J.E.D., Surata, I.K. and Suriamidhardja, S. 1990. Nursery potting mixture for *Santalum album* L. in Timor. *Mulga Research Centre Journal* 10: 38-44.
- Grossnickle, S.C. and El-Kassaby, Y.A. 2016. Bareroot versus container stock types: a performance comparison. *New Forests* 47(1): 1-51.
- Haase, D.L. 2007. Morphological and physiological evaluations of seedling quality. pp. 3-8. In *National Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations*. Washington: USDA Forest Service Proceedings.
- Haase, D.L. 2008. Understanding forest seedling quality: measurements and interpretation. *Tree Planters' Notes* 52(2): 24-30.
- Haase, D.L., Rose, R. and Trobaugh, J. 2006. Field performance of three stock sizes of Douglas-fir container seedlings grown with slow-release fertilizer in the nursery growing medium. *New Forests* 31: 1-24.
- He, Q., Zhou, T., Sun, J., Wang, P., Yang, C., Bai, L., and Liu, Z. 2021. Transcriptome profiles of leaves and roots of goldenrain tree (*Koelreuteria paniculata* Laxm.) in response to cadmium stress. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(22): 12046.
- Hiscox, J.D. and Israelstam, G.F. 1979. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany* 57(12): 1332-1334.
- Hughes, A.P. and Freeman, P.R. 1967. Growth analysis using frequent small harvests. *J. of Applied Ecology* 4(2): 553-560.
- Jae, D.Y., Seo, H.Y., Cho, H.S., Ahn, H.C. and Kim, C.S. 2015. Growth of containerized *Chamaecyparis obtusa* seedlings as affected by fertilizer and container volume. *Journal of Korean Society of Forest Science* 104(1): 26-34.
- Jun, B.Y. 2007. Study on growth characteristics of *Pinus densiflora* container seedlings by container types. M. S. Thesis, graduate school, Konkuk University, Seoul, Korea.
- Kang, D.B., Seon, J W. and Lee, D. H. 2021. Effects of shading and fertilizer treatments on the growth characteristics of *Chamaecyparis obtusa* (S. et Z.) Endlicher seedlings. *Forest Science And Technology* 17(3): 125-134.

- Kim, G.N., Cho, M.S. and Lee, S.W. 2010. Physiological responses of the three deciduous hardwood seedlings growing under different shade treatment regimes. *Journal of Bio-Environment Control* 19(1): 36-48.
- Kim, J.H., Kim, D.H. and Lee, D.H. 2015. Effects of fertilizer treatment on the growth characteristics of 2-years old *Pinus koraiensis* Siebold and Zucc container seedlings. *Journal of Agriculture and Life Science* 49(1): 63-70.
- Kozłowski, T.T. and Pallardy, S.G. 1997. *Physiology of woody plants*. 2nd. ed. Academic press, San Diego. pp. 411.
- Landis, T.D., Tinus, R.W., McDonald, S.E. and Barnett, J.P. 1989. The biological component: Nursery pests and mycorrhizae, Vol. 5, The container tree nursery manual. *Agric. Handbk.* 674. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest service. pp. 171.
- Landis, T.D., Tinus, R.W., McDonald, S.E. and Barnett, J.P. 1995. Nursery planning, development and management. 1: The container tree nursery manual. USDA For Service Agriculture. Handbook 674, 188.
- Lee, C.S., Kim, E.H., Park, H.S., Kang, S.J. and H Cho, H.J. 1993. Structure and Maintenance Mechanism of *Koelreuteria Paniculata* Community. *Journal of Ecology and Environment* 16(4): 377-395.
- Lee, H.N. 2019. Growth characteristics of one-year-old container seedlings of *Betula platyphylla* var. japonica by container types. M. S. Thesis, graduate school, Konkuk University, Seoul, Korea.
- Lee, H.N., Choi, K.S., Song, K.S. and Sung, H.I. 2021. Changes in Growth and Physiological Characteristics of *Betula platyphylla* var. japonica seedlings by container types. *Institute of Agriculture and Life science*, 55(4): 85-94. <https://doi.org/10.14397/jals.2021.55.4.85>
- Lee, J.J. 2003. Development of techniques for seed selection and containerized seedling production of *Hovenia dulcis* Thunb. M. S. Thesis, graduate school, Cheongju. Chungbuk National University.
- Lee, S.W., Kim, S.C., Kim, W.W., Han, S.D. and Yim, K.B. 1997. Characteristics of leaf morphology, vegetation and genetic variation in the endemic populations of a rare tree species, *Koelreuteria paniculata* Laxm. *Journal of Korean Society of Forest Science* 86(2): 167-176.
- Liu, X., Zhao, R., Zhu, Y., Deng, S., Li, J., and Deng, Z. 2023. Mechanisms of seed vigour changes in the canopy seed bank of *Koelreuteria bipinnata*. *Journal of Nanjing Forestry University* 47(2): 35.
- Mackinney, G. 1941. Absorption of light by chlorophyll solutions. *Journal of Biological Chemistry* 140(2): 315-322.
- Malik, V. and Timmer, V.R. 1998. Biomass partitioning and nitrogen retranslocation in black spruce seedlings on competitive mixed wood sites: a bioassay study. *Canadian Journal of Forest Research* 28(2): 206-215.
- Marler, T.E. and Willis, D. 1996. Chemical or air root-pruning containers improve carambola, longan, and mango seedling root morphology and initial root growth after transplanting. *Journal of Environmental Horticulture* 14(2): 47-49.
- Ortega, U., Majada, J., Mena-Petite, A., Sanchez-Zabala, J., Rodriguez-Iturrizar, N., Txarterina, K., Azpitarte, J., and Dunabeitia, M. 2006. Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of container. *New Forests* 31(1): 97-112.
- Park, J.H. and Lee, D.H. 2020. Drought resistance characteristics of *Pinus densiflora* seedlings according to fertilization treatment. *Journal of Agriculture and Life Science* 54(2): 51-61.
- Park, J.H., Kim, J.H. and Lee, D.H. 2019. Drought resistance characteristics of 2-years old *Chamaecyparis obtusa* container seedlings according to fertilization treatment. *Journal of Agriculture and Life Science* 53(2): 97-107.
- Park, J.W. et al. 2022. Ecological Characteristics and Management of *Koelreuteria paniculata* Community, Natural Monument in Wando and Anmyeondo. *Journal of the Korea Institute of Garden Design*, 8(2): 53-72.
- Rehman, S. and Park, I.H. 2000. Effect of scarification, GA and chilling on the germination of goldenrain-tree (*Koelreuteria paniculata* Laxm.) seeds. *Scientia Horticulturae* 85(4): 319-324.
- Romero, A.E., Ryder, J., Fisher, J.T. and Mexal, J.G. 1986. Root system modification of container stock for arid land plantings. *Forest Ecology and Management* 16: 281-290.
- Salifu, K.F. and Jacobs, D.F. 2006. Characterizing fertility targets and multi element interactions in nursery culture of *Quercus rubra* seedlings. *Annals of Forest Science* 63: 231-237.
- Song, H.K., Park, G.S., Yee, S., Lee, J.M. and Ji, Y.U. 2000. The Study of Vegetation Structure and Soil Characteristics in *Koelreuteria paniculata* Communities of Anmyeondo and Gunhung-Myon, Taean-Gun. *The Korean Journal of Environment Biology* 18(1): 69-75.
- Song, K. S., Cha, Y.G., Choi, J.Y. and Kim, J.J. 2012. Comparison of growth characteristics of 1-and 2-year-old bare root and container seedling of *Chamaecyparis obtusa*. *Journal of Korean Society of Forest Science* 101(2): 317-323.

- Song, K.S., Choi, K.S., Sung, H.I., Jeon, K.S., An, K.J. and Kim, J.J. 2015. Characteristics of seedling quality of *Daphniphyllum macropodum* 2-year-old container seedlings by shading level. *Journal of Korean Society of Forest Science* 104(3): 390-396.
- Sung, H.I. 2011. Effects of shading and fertilizing treatment on qualities of 1-year-old container seedlings of *Quercus myrsinaefolia*. Ph. D. Thesis. Seoul. Konkuk University.
- Valladares, F. and Niinemets, Ü. 2008. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39(1): 237-257.
- Wallenda, T., Schaeffer, C., Einig, W., Wingler, A., Hampp, R., Seith, B. and Marschner, H. 1996. Effects of varied soil nitrogen supply on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.). *Plant and Soil* 186(2): 361-369.
- Wilson, E. R., Vitols, K. C. and Park, A. 2007. Root characteristics and growth potential of container and bare-root seedlings of red oak (*Quercus rubra* L.) in Ontario, Canada. *New Forests* 34(2): 163-176.
- 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 and Life Science* 48(4): 1-12.

Manuscript Received : July 25, 2025

First Revision : November 13, 2025

Accepted : November 17, 2025