시설양묘과정에서 관수 주기 처리에 따른 두 활엽수종의 생장 및 광합성 기구 변화

조민석^{1*} · 이수원² · 황재홍¹ · 김재원¹

¹국립산림과학원 산림생산기술연구소, ²한국임업진흥원 개발확산팀
(2012년 2월 28일 접수; 2012년 3월 28일 수정; 2012년 3월 30일 수락)

Growth Performance and Photosynthesis of Two Deciduous Hardwood Species under Different Irrigation Period Treatments in a Container Nursery System

Min seok Cho^{1*}, Soo won Lee², Jaehong Hwang¹ and Jae won Kim¹

¹Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-821, Korea

²Division of Forestry Consulting, Korea Forestry Promotion Institute, Seoul 121-904, Korea

(Received February 28, 2012; Revised March 28, 2012; Accepted March 30, 2012)

ABSTRACT

This study was conducted to investigate growth performance, photosynthesis, water use efficiency (WUE), and stomatal conductance (g_s) of container seedlings of *Liriodendron tulipifera* and *Zelkova serrata* growing under three different irrigation periods (1 time/1 day, 1 time/2 days and 1 time/3 days) for high seedling quality. The root collar diameter and height of *L. tulipifera* and *Z. serrata* seedlings were highest with 1 time/1 day irrigation, whereas they were lowest with 1 time/3 days irrigation. The two species showed low drought tolerance. As irrigation period was shortened, biomass and seedling quality index (SQI) of the two species increased. The ratio of height to root collar diameter (H/D) and the ratio of below to aboveground biomass (T/R) of the two species were lower with 1 time/3 days than at other irrigation periods. *L. tulipifera* and *Z. serrata* seedlings showed significantly higher photosynthetic capacity with 1 time/1 day irrigation. As irrigation period was shortened, g_s of two species increased, while their WUE decreased significantly ($P<0.05$). These results show that 1 time/1 day irrigation provides the most optimal water condition for container seedling production of two species and irrigation controlling is very important for growth and quality of container seedlings.

Key words: Irrigation period, Container seedling, Photosynthesis, Growth performance, *Liriodendron tulipifera*, *Zelkova serrata*

I. 서 론

양묘과정에서 우량 묘목의 생산은 조림 시 높은 활착률과 우수한 조림성으로 이어지며, 건전한 임분 조성의 시작이라 할 수 있다(Cho *et al.*, 2011). 수목에 대한 양묘는 노지양묘와 시설양묘로 나누어지며, 우리

나라에서 시설양묘에 의한 묘목생산을 시작한 것은 얼마 되지 않았다(Kim *et al.*, 2008). 시설양묘는 노지양묘보다 조림 시 높은 활착률, 우수한 생장, 연중 조림 가능, 양묘기간 단축, 생력화 가능, 노동력 절감 등의 이점을 가지고 있다(Wilson *et al.*, 2007). 또한 현재 시설양묘 대상 수종 확대 및 기준 마련과 현장에서의

* Corresponding Author : Min seok Cho
(gungdong@hanmail.net)

다양한 수종에 대한 용기묘 식재 요구가 증가하고 있는 실정이다(Kwon *et al.*, 2009).

시설양묘과정(Container Nursery System)에서는 광, 온도, 수분 등의 생육환경 조절과 용기 종류, 상토, 시비기술 등이 중요한 영향을 미친다(Grossnielke, 2005). 특히, 수분은 수목의 생장, 광합성 활동, 시비 효율 및 양분이용능력에 매우 큰 영향을 미치며(Warsaw *et al.*, 2009), 수분 과·부족에 의한 스트레스는 불량한 묘목 생산으로 이어진다. 수분은 시설양묘과정에서 온실 내 온도 조건을 변화시켜 용기묘의 호흡 및 증산량에 영향을 주어 광합성 능력, 기공전도도, 수분이용효율 등의 광합성 기구 변화를 가져온다(Lee *et al.*, 2010; Muraoka *et al.*, 1997). 또한 생육상토 내 통기성 및 수분함량을 변화시켜 용기묘의 뿌리 생장, 단근 및 뿌리돌림 등에 영향을 미친다(Lamberti, *et al.*, 2001). 수분은 시설양묘과정에서 가장 중요한 무기환경인자 중 하나로서, 수분과 가장 밀접한 관계가 있는 관수 주기 및 관수량에 대한 연구가 수행되어야 한다고 판단된다.

시설양묘과정에서 시비는 반드시 실시되어야 하며, 대부분의 시비는 관수와 병행하여 이루어진다(Broschat, 1995). 그러나 무분별한 관수는 시비량 증가, 양분이용효율 감소, 시설양묘장 주변의 토양 및 계류수 오염으로 인한 환경 문제, 묘목생산비용 증가 등의 부정적인 문제를 일으킬 수 있다. 반면, 수종별 적정 관수 시 시비량과 용기 용적을 낮출 수 있기 때문에 묘목생산비용을 감소시킬 수 있으며, 환경오염 저감 효과도 기대된다(Park *et al.*, 2012). 따라서 용기묘의 생장 및 생리적 활동에 피해가 없는 관수 주기 및 관수량 조절 기술이 필요한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 주요 조림수종인 백합나무(*Liriodendron tulipifera*)와 느티나무(*Zelkova serrata*) 용기묘를 대상으로 수분 조건에 가장 큰 영향을 미치는 관수 주기 처리 별 생장 특성 및 광합성 능력, 수분이용효율, 기공전도도 등의 광합성 기구의 변화를 조사·분석하여, 용기묘 양묘 시 요구되는 최적의 수

분 환경을 구명하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 시험지 및 공시수종

본 연구의 시험지는 경기도 포천에 위치한 국립산림과학원 산림생산기술연구소 시설온실(북위 37° 45', 동경 127° 10')이며, 주요 조림수종인 백합나무와 느티나무 두 수종을 이용하였다. 국립산림과학원 산림유전 자원부에서 2009년 2월 파종한 백합나무 종묘를 분양 받아 2009년 4월 용기에 헥당 1개씩 이식하였으며, 느티나무는 2009년 4월 파종하였다. 양묘 시 용기는 20헥 용기(400mL/cell-150seedlings/m², Kukilchem, Korea), 생육상토는 피트모스:펄라이트:질석(1:1:1, v/v)의 상토(Table 1)를 이용하였다. 상토의 토양분석에 사용된 모든 방법은 농업기술연구소(RDA, 2002)의 토양분석 방법에 준하여 실시하였다. 시비는 6월부터 3개월 간 수용성 비료인 MultiFeed 19(19N:19P₂O₅:19K₂O, Haifa Chemicals, Israel)를 1g·L⁻¹ 배액으로 희석하여 주 1회 m²당 20L의 관수와 병행하여 실시하였다.

2.2. 관수 주기 처리

수종 및 관수 주기 처리별 각각 8tray씩 24tray에 양묘를 하였으며, 수종 당 총 480본의 용기묘를 이용하였다. 파종 및 이식 후부터 관수 주기 처리 전 6월까지 모든 처리구에 1회/1일 관수를 하였으며, 6월부터 9월까지 3개월 동안 m²당 20L씩 1회/1일, 1회/2일, 1회/3일 등의 세 가지 관수 주기 처리를 실시하였다. 고온 및 햇빛에 의한 관수 피해를 줄이기 위해 오전 8시에서 10시 사이에 관수를 실시하였다.

2.3. 생장 특성

수종별 관수 주기 처리에 따른 생장을 조사하기 위하여 6월 초 관수 주기 처리 실시 전과, 그 후 20일 간격으로 9월 중순까지 처리별·수종별 묘목을 각 40

Table 1. The physical and chemical properties of media for container seedling.

Composition rate(%)			pH	EC (ds·m ⁻¹)	Total N (g·kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg·kg ⁻¹)	Ex-Cations (cmol _c ·kg ⁻¹)			C.E.C. (cmol _c ·kg ⁻¹)
Peat moss	Perlite	Vermiculite					K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
33.3	33.3	33.3	5.3	0.1	3.7	13.6	0.20	1.52	0.85	17

본씩 선정하여 근원경과 간장을 반복 측정하였다. 상대생장량 분석을 위해 처리 전 근원경과 간장의 측정 값에 대한 각각의 측정 기간(20일) 및 총 양묘기간(100일)에 대한 상대생장량($\text{mm or cm} \cdot \text{day}^{-1}$)을 계산하였다(Hughes and Freeman, 1967; Lee *et al.*, 2006). 또한 양묘 된 묘목의 건전도를 판단할 수 있는 H/D율[SQ ; Sturdiness Quotient= $\text{height}(\text{cm})/\text{root collar diameter}(\text{mm})$]을 계산하였다(Bayala *et al.*, 2009). 간장과 근원경 측정 시 전자식캘리퍼스와 스틸테이프를 이용하였다. 2009년 9월 중순 모든 실험이 끝난 후 묘목을 처리별 각 10본씩 채취하여 잎, 가지, 뿌리를 구분하여 건조기에 48시간 동안 65°C 로 건조한 후, 각각의 건조량을 측정하였다. 건조량 측정결과에 의해 묘목 각각의 물질생산량, 총 물질생산량과 배분비율 및 T/R율을 계산하였다(Šestak *et al.*, 1971). 또한 양묘 된 묘목의 품질을 나타내는 묘목품질지수[SQI ; Seedling Quality Index= $\text{Seedling dry weight}(\text{g})/(\text{H/D ratio} + \text{T/R ratio})$]를 계산하였다(Deans *et al.*, 1989).

2.4. 광합성 특성 및 수분이용효율

관수 주기 처리에 따른 광합성 차이를 조사하기 위하여 2009년 8월 초 처리별 생장속도가 비슷하고, 평균적인 생육상태를 유지하고 있는 용기묘 3본을 선정하여 줄기 끝에서 2~3번 잎을 대상으로 휴대용 광합성측정장치(Portable photosynthesis system, LI-6400, LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 측정 시 광도를 임의로 조절할 수 있는 LED light source (LI-6400-02, LI-COR Inc., USA)를 이용하여 PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density)를 0, 25, 50, 100, 200, 500, 800, 1,000, 1,500, 2,000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 10단계로 차이를 두어 오전 10시부터 오후 2시까지 광합성 반응을 측정하였다. 광합성측정기의 leaf chamber에 유입되는 공기의 유량은 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, 온도는 25°C 로 설정하여 외기의 환경변화로 인한 영향이 없도록 하였다. 또한 광합성측정기에 CO_2 injector system(LI-6400-01, LI-COR Inc., USA)을 부착하여 CO_2 농도를 $400 \pm 2 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 범위 내에서 안정된 상태를 유지시켰다(Kim *et al.*, 2001; Lim *et al.*, 2006). 광도별 광합성 속도를 측정하였으며(Barker *et al.*, 1997; Kim and Lee, 2001), 관수 주기 처리에 따른 수분이용효율(Water use efficiency) 및 기공전도도(Stomatal conductance)의 차이를 조사하기 위해서

PPFD $1,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 광합성 능력과 증산량 및 기공전도력 값을 이용하여 수분이용효율(광합성능력/증산량)을 계산하였다(Ashraf *et al.*, 2002).

관수 주기 처리에 따른 측정결과를 비교·분석하기 위해서 Duncan의 다중검정법으로 각각의 처리구간 유의성 분석을 실시하였으며, 모든 통계분석은 PC SAS program Version 8.2(SAS, 2000)를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 생장 특성

관수 주기에 따른 백합나무의 근원경과 간장 생장은 1회/1일 관수 처리구에서 가장 높았으며, 관수 주기가 짧을수록 생장이 우수하였다($P < 0.05$). 그러나 근원경에서 1회/2일과 1회/3일 관수 처리구 간의 차이는 없었다(Fig. 1). 백합나무 생장은 토양 및 공중 습도에 가장 큰 영향을 받으며(Ryu *et al.*, 2003), 토심이 얇고 건조한 토양에서 생육이 불량하다는 보고(Lino and Olson, 1961)를 참고하여 해석할 수 있다. 이것은 관수 주기가 길어질수록 상토 내 수분 함량이 낮아짐에 따라 식물의 양분 흡수가 원활히 이루어지지 않았기 때문이라 할 수 있다(Grime and Hunt, 1975). 상대생장량은 세 처리구 모두 7월 15일 이후 급격히 증가하였으나, 1회/2일과 1회/3일 관수 처리구는 양묘기간이 지날수록 1회/1일 처리구보다 상대생장량이 급격히 감소하였다. 또한 백합나무는 6월 말부터 8월 중순까지 생장 활동이 가장 왕성하다는 것을 알 수 있으며, 적정의 수분 조건인 1회/1일 처리구에서는 생장 활동이 더 길어지는 것을 볼 수 있었다. 생장 패턴은 기후에 따라 변하며 수분, 광선, 양분, 온도 등의 환경 조절에 의해 식물은 다양한 생장 및 물질생산의 변화를 나타낼 수 있다(Lambers and Poorter, 1992). 특히 토양 내 수분 함량에 많은 영향을 받으며, 토양 수분 함량이 부족하면 상대생장량은 감소하는 경향을 보인다(Downes *et al.*, 1999). 즉, 수분 조건이 불량하면 상대생장량의 증가 속도는 느리며, 반면 상대생장량 감소는 급격하게 이루어진다. 그러나 수종별 수분 요구량이 충분한 조건이면 상대생장량의 증가 속도는 빠르고, 상대생장량 감소는 천천히 이루어진다(Wright *et al.*, 2001). 본 연구에서의 상대생장량 결과도 같은 경향을 보였으며, 1회/1일 관수 처리구에서 지속적인 상대생장량에 의해 높은 근원경과 간장 생장

Fig. 1. The growth patterns of root collar diameter and height of container seedlings of *L. tulipifera* under different irrigation periods. Vertical bars represent SD of the mean ($n=40$). Different letters show statistical differences among irrigation period treatments at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

이 나타난 것으로 판단된다.

느티나무의 생장은 백합나무와 같이 관수 주기가 짧을수록 생장이 우수한 경향을 보였지만, 근원경 생장은 처리간 차이가 없었다(Fig. 2). 근원경은 모든 처리구에서 8월 말까지 지속적인 상대생장량을 나타냈기 때문에 차이를 보이지 않은 것으로 판단되며, 간장 생장은 7월 중순부터 1회/2일과 1회/3일 관수 처리구에서 증가 속도는 느리면서 감소는 급격히 이루어졌기 때문에 1회/1일 처리구와 차이를 보인 것이다. 온대 지방의 느티나무는 대부분 4월 말부터 9월 초순까지 성장 활동이 이루어지며(Yoda *et al.*, 2003), 본 연구에서도 이와 유사한 시기별 상대생장량을 보였다. 그러나 상대생장량의 증가 속도는 적정 관수 조건인 1회/1일 관수 처리구에서 매우 빠르게 나타났으며, 시설양묘의 특성상 다른 두 처리구보다 느티나무 규격묘를 빨리 생산할 수 있다. 즉, 생육환경을 조절할 수 있는 시설양묘는 적정 생육환경 조건에서 우량 용기묘 생산과 함께, 양묘기간의 단축을 기대할 수 있다.

백합나무와 느티나무의 근원경과 간장 생장 결과는 가문비나무(*Picea glauca*) 용기묘(1·0묘)에서 상토 내 수분 함량이 높을수록 우수한 생장 및 생리적 특성을 보인 결과와 유사한 경향을 나타낸 것이다(Lamberti *et al.*, 2001). 두 수종 모두 파종 후 6월 중순까지 관수 주기 처리에 따른 근원경과 간장 생장은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 생육활동이 왕성한 시기인 6월 말~8월 말 사이에 중점적인 관수 관리가 필요할 것을 의미한다. 이 시기 전까지는 1회/2일~3일 관수가 가능하지만, 비용적인 측면과 환경오염적인 측면을 동시에 고려한 적정 관수를 실시해야 할 것이다.

관수 주기 처리에 따른 총 양묘 기간(100일)의 상대생장량($\text{mm or cm} \cdot \text{day}^{-1}$)은 두 수종 모두 1회/1일 관수 처리구에서는 가장 높은 값을 보였으며, 느티나무 근원경을 제외하고 두 수종 모두 처리간 차이를 나타냈다. 양묘된 묘목의 건전도를 판단할 수 있는 H/D율은 처리간 차이를 보이면서 백합나무는 관수 주기

Fig. 2. The growth patterns of root collar diameter and height of container seedlings of *Z. serrata* under different irrigation periods. Vertical bars represent SD of the mean ($n=40$). Different letters show statistical differences among irrigation period treatments at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

Table 2. The root collar diameter, height and H/D ratio of container seedlings of two species under different irrigation periods.

Species	Irrigation treatment	Root collar diameter		Height		H/D ($\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)
		Growth (mm)	Relative growth rate ($\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$)	Growth (cm)	Relative growth rate ($\text{cm} \cdot \text{day}^{-1}$)	
<i>L. tulipifera</i>	1 time/1 day	$9.6 \pm 0.2^{\text{a2}}$	$0.082 \pm 0.002^{\text{a}}$	$56.8 \pm 3.2^{\text{a}}$	$0.543 \pm 0.027^{\text{a}}$	$5.9 \pm 0.3^{\text{a}}$
	1 time/2 days	$8.2 \pm 0.6^{\text{b}}$	$0.069 \pm 0.006^{\text{b}}$	$44.3 \pm 1.9^{\text{b}}$	$0.418 \pm 0.020^{\text{b}}$	$5.4 \pm 0.5^{\text{b}}$
	1 time/3 day	$7.8 \pm 0.1^{\text{b}}$	$0.065 \pm 0.001^{\text{b}}$	$31.5 \pm 2.0^{\text{c}}$	$0.290 \pm 0.023^{\text{c}}$	$4.1 \pm 0.3^{\text{c}}$
<i>Z. serrata</i>	1 time/1 day	$6.1 \pm 0.8^{\text{a}}$	$0.053 \pm 0.006^{\text{a}}$	$78.2 \pm 2.6^{\text{a}}$	$0.729 \pm 0.019^{\text{a}}$	$12.9 \pm 1.5^{\text{a}}$
	1 time/2 days	$5.4 \pm 0.5^{\text{a}}$	$0.046 \pm 0.007^{\text{a}}$	$67.8 \pm 1.5^{\text{b}}$	$0.628 \pm 0.015^{\text{b}}$	$12.6 \pm 1.3^{\text{a}}$
	1 time/3 days	$5.2 \pm 0.4^{\text{a}}$	$0.045 \pm 0.004^{\text{a}}$	$64.0 \pm 1.3^{\text{c}}$	$0.605 \pm 0.018^{\text{b}}$	$12.3 \pm 1.1^{\text{a}}$

Values are means of 40 replicates $\pm$ SD. Values with different letters in the columns within a species indicate statistical differences at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

가 길어질수록 낮아지는 경향이 나타났다. 느티나무는 처리간 차이는 보이지 않았지만 유사한 경향을 나타냈다(Table 2). 이것은 수분 결핍에 의해 간장 생장보다 직경 생장에 광합성 산물이 더 많이 분배된 결과로, 수분 부족에 따라 수분이용효율을 증가시키기 위해 간

장 생장을 감소시키고, 직경 생장을 증가시켜 뿌리 생산량을 높이기 위한 결과라 판단된다(Lee *et al.*, 2010).

관수 주기 처리에 따른 잎, 줄기, 뿌리 및 총 물질 생산량은 두 수종 모두 처리간 차이를 보이면서 관수

주기가 짧아질수록 높은 값을 나타냈으며, 백합나무는 1회/1일 관수 처리구가 1회/2일과 1회/3일 관수 처리구보다 약 2배 이상의 높은 물질생산량을 보였다. 이는 백합나무가 건조구보다 습윤구에서 우수한 물질생산량을 보였으며, 특히 수분 함량이 높은 피음구보다는 수분 함량이 부족한 전광구에서 그 차이가 더 컸다는 결과와 같은 경향을 나타낸 것이다(Holmgren, 2000). 또한 Atlantic White Cedar(*Chamaecyparis thyoides*) 용기묘는 건조구보다 습윤구에서 약 30~60% 이상 높은 물질생산량과 우수한 양분함량을 보였다(Derby and Hinesley, 2005). 특히, 시설양묘과정에서 관수는 생장, 물질생산량, 시비 효과 등에 큰 영향을 미치며, 물질생산량과 각각의 배분비율은 수분 조건에 따라 수종별로 다르게 나타난다(Cho *et al.*, 2007). 이는 생육환경에 따른 물질배분이 수종별로 어떻게 이루어지는지를 판단할 수 있는 것이다(Groves *et al.*, 1998; Tyler *et al.*, 1996). 수목은 대부분 수분 함량이 낮아지면 지하부가 지상부보다 높은 생장을 보이면서 T/R율이 감소한다(Seiler and Johnson, 1988). 두 수종 모두 관수 주기가 길어질수록 수분 조건이 불량해짐에 따라 T/R율은 낮아져 처리간 차이를 보였는데, 이것은 위의 H/D율의 결과와 유사한 이유인 것으로 판단된다(Table 3).

양묘 된 묘목의 품질지수를 나타내는 Seedling Quality Index(SQI)는 두 수종 모두 1회/1일 관수 처리구에서 가장 높았으며, 관수 주기가 길어질수록 묘

Fig. 3. The effect of irrigation period treatments on the seedling quality index(SQI) of container seedlings of two species. Vertical bars represent SD of the mean (n=10). Different letters within a species show statistical differences among irrigation period treatments at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

목품질이 떨어지는 경향을 보였다(Fig. 3). 양묘하여 생산된 묘목이 낮은 H/D율과 T/R율 및 높은 물질생산량과 묘목품질지수일 때 건전하게 생산된 묘목으로 평가 받는다(Bayala *et al.*, 2009). 본 연구 결과에서 두 수종 모두 수분 조건이 가장 적합한 1회/1일 관수 처리구의 물질생산량과 묘목품질지수에서 이와 같은 결과를 보였지만, 반대로 T/R율과 H/D율은 높은 값을 나타냈다. 이러한 이유는 1회/1일 관수 처리구의 물질생산량이 다른 두 처리구에 비해 월등하게 높았으며, H/D율과 T/R율의 차이는 크지 않았기 때문에 세 처리구 중 가장 우수한 묘목을 생산한 것으로 판단된

Table 3. The effect of irrigation period treatments on the biomass production, biomass distribution and T/R ratio of container seedlings of two species

Species	Irrigation treatment	Dry weight(g)				T/R (g · g ⁻¹)
		Leave	Shoot	Root	Total	
<i>L. tulipifera</i>	1 time/1 day	4.44 ± 0.44 ^{a1} (30) ²	4.44 ± 1.15 ^a (29)	6.07 ± 0.22 ^a (41)	14.95 ± 1.48 ^a (100)	1.47 ± 0.29 ^a
	1 time/2 days	2.07 ± 0.14 ^b (27)	1.35 ± 0.09 ^b (17)	4.34 ± 0.35 ^b (56)	7.76 ± 0.51 ^b (100)	0.79 ± 0.06 ^b
	1 time/3 days	1.63 ± 0.08 ^c (24)	1.26 ± 0.08 ^b (19)	3.82 ± 0.13 ^b (57)	6.71 ± 0.12 ^b (100)	0.76 ± 0.03 ^b
<i>Z. serrata</i>	1 time/1 day	2.89 ± 0.12 ^a (28)	4.66 ± 0.30 ^a (45)	2.85 ± 0.15 ^a (27)	10.39 ± 0.49 ^a (100)	2.65 ± 0.14 ^a
	1 time/2 days	2.42 ± 0.24 ^b (32)	2.97 ± 0.15 ^b (39)	2.22 ± 0.10 ^b (29)	7.62 ± 0.19 ^b (100)	2.43 ± 0.12 ^a
	1 time/3 days	1.87 ± 0.09 ^c (31)	2.28 ± 0.26 ^c (37)	1.93 ± 0.08 ^c (32)	6.08 ± 2.15 ^c (100)	2.15 ± 0.11 ^b

Values are means of 10 replicates ± SD. The numbers in parenthesis indicate the percentages(%) of dry weight of each part to total dry weight of seedlings. Values with different letters in the columns within a species indicate statistical differences at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

다. 그러나 위의 세 가지 평가기준으로는 단정적으로 묘목의 질적, 양적 평가를 하기에는 부족하다(Cout-Picon *et al.*, 2004; Mattsson, 1996). 즉, 생장 및 형태학적 특성 결과와 함께 광합성, 환경 스트레스 지표인 엽록소 형광 반응 등의 생리적 특성 결과를 연계한 평가 지표 모델을 만들 필요가 있다(Davis and Jacobs, 2005; Gazal *et al.*, 2004). 또한 이러한 지표 모델은 묘목의 양적 평가와 동시에 질적 평가가 이루어 질 것으로 기대된다.

관수 주기 처리에 따른 수분 조건은 생육환경조절에 의한 시설양묘과정에서 매우 큰 영향을 미치며, 묘목의 품질 향상과 밀접한 관계가 있다. 적정 수분 조건 구명으로 관수 주기 조절은 건전한 묘목의 생산과 동시에 양묘과정에서의 관수 및 시비 조절에 따른 생산 비용의 절감과 양묘기간의 단축 등의 경제적 측면에서도 이점을 줄 수 있을 것이다.

3.2. 광합성 특성 및 수분이용효율

관수 주기 처리에 따른 광합성 능력은 백합나무와 느티나무 두 수종 모두 1회/1일 관수 처리구가 다른 두 처리구에 비해 1.5~3배 이상의 높은 값을 보이면서 각각 5.78, 4.62 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 가장 높은 광합성률을 나타냈으며, 관수 주기가 길어질수록 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 4). 백합나무 용기묘가 수분 스트레스에 의해 엽육 내 CO_2 농도와 기공전도도가 낮아지는 결과(Cannon, Jr and Roberts, 1995)와 습윤구가 건조구보다 높은 광합성 능력과 암호흡을 보인 결과(Holmgren, 2000)와 같은 경향을 나타낸 것이다. 식물은 건조할 때 기공을 닫아 광합성을 제한하는데, 불량한 수분 조건에서 기공의 닫힘은 탄소동화를 하는

데 있어서 가장 중요한 제한 인자로 작용하는 것을 알 수 있다(Muraoka *et al.*, 1997). 두 수종 모두 수분 스트레스에 대해 민감하지만, 느티나무는 불량한 수분 조건에 대한 적응력이 백합나무보다 높은 것으로 판단된다. 이는 수분 조건과 관련된 온도 처리에 따른 연구에서 백합나무가 느티나무보다 고온에 대한 스트레스 적응력이 낮았다(KFRI, 2009)는 결과와 비교하여 해석할 수 있다.

관수 주기 처리에 따른 수분이용효율(Water use efficiency)은 두 수종 모두 1회/1일 관수 처리구에서 가장 낮게 나타났으며, 관수 주기가 길어질수록 수분 조건이 불량해짐에 따라 수분이용효율이 높아지는 경향을 보였다(Fig. 5). 그러나 기공전도도(Stomatal conductance)는 두 수종 모두 1회/1일 관수 처리구가

Fig. 5. The water use efficiency of container seedlings of two species under different irrigation periods. Vertical bars represent SD of the mean ($n=9$). Different letters within a species show statistical differences among irrigation period treatments at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

Fig. 4. The effect of irrigation period treatments on the photosynthetic rate of container seedlings of two species.

Fig. 6. The Stomatal conductance of container seedlings of two species under different irrigation periods. Vertical bars represent SD of the mean (n=9). Different letters within a species show statistical differences among irrigation period treatment at the 5% levels by Duncan's multiple range test.

가장 높은 값을 보였으며, 관수 주기가 길어질수록 처리간 차이를 보이면서 값이 낮아지는 상반된 경향을 나타냈다(Fig. 6). 용기묘 4 수종이 수분 함량이 낮을수록 높은 수분이용효율과 낮은 기공전도도를 나타냈다는 결과(Warsaw *et al.*, 2009)와 같은 경향을 보였으며, Kwon and Lee(1994)의 수분 처리에 따른 참나무류와 물푸레나무의 엽록소 함량, 기공증산저항, 수분포텐셜 등 변화 연구에서도 전반적으로 습윤구에서 우수한 생리적 특성을 나타낸 결과를 참고할 수 있다.

식물의 CO₂와 수분 교환은 90% 이상 기공을 통해 일어나며, 기공을 통해 흡수된 CO₂로 광합성을 하고, 증산을 통해 수분조절을 한다(Sung *et al.*, 2009). 식물이 수분 스트레스를 받게 되면, 내부의 수분 손실을 막기 위한 방어기작으로 기공을 닫아 증산율을 낮추어 광합성을 통해 CO₂를 얻는 것보다 수분 손실을 감소시켜 수분이용효율을 증대시킨다(Je *et al.*, 2006). 그러나 식물이 기공을 닫게 되면 엽육 세포내 CO₂ 농도는 낮아지게 되고, 이에 따라 광합성 능력이 떨어지는 현상을 동반한다(Hernandez *et al.*, 1995; Takemura *et al.*, 2000). 본 연구에서도 두 수종 모두 수분 조건이 불량해짐에 따라 증산율이 낮아져 수분이용효율이 높아졌지만, 광합성 능력과 기공전도도가 떨어지는 경향을 보였다. 즉, 수분 조건에 따라 광합성 기구가 유동적으로 변하는 것을 알 수 있다.

수분, 광, 온도 등과 같이 식물체 내의 생리 대사 활동에 중요한 역할을 담당하는 요인들의 결핍 하에서

는 정상적인 대사작용이 제약을 받을 수 밖에 없으며 그 결과 식물체의 근원경과 간장 생장이 부진하다(Berkowitz and Gibbs, 1993). 본 연구결과에서도 관수 주기가 길어질수록 수분 조건이 불량해짐에 따라 용기묘의 품질 저하와 생리적 활성이 떨어지는 결과를 가져왔다. 그러나 이러한 생육환경은 시설양묘과정에서는 조절이 가능하며, 수종별 적정 수분 조건 구명 연구를 통한 관수량 및 관수 주기의 조절로 우량 용기묘 생산이 가능하다고 판단된다. 일반적인 노지 양묘 자연환경에서는 태양의 복사열에 의해 온도가 상승되며, 이러한 온도의 상승은 식물체 엽육 온도의 상승, 토양 내 증기압 결핍, 식물체 호흡 증가로 나타난다(Chen *et al.*, 1995). 즉, 태양의 복사열에 의해 수분 스트레스가 발생되며 수분 조건과 광도 조건은 밀접한 연관이 있는 것이다. 이에 따라 시설양묘과정에서는 수분 스트레스를 방지하기 위해서 관수 조건의 조절과 함께 광도 조절을 같이 실시해야 할 것으로 판단된다. 또한 노지양묘와 달리 생육환경 조절이 보다 용이하며, 정밀·복합적으로 실시할 수 있기 때문에 현재 지구 온난화로 인한 이상기후, 기상재해 등에 의한 양묘 관련 문제점들을 해결할 수 있는 방법 중 하나인 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 주요 조림수종인 백합나무와 느티나무 용기묘를 대상으로 수분 조건에 가장 큰 영향을 미치는 관수 주기 처리 별 생장 특성 및 광합성 능력, 수분 이용효율, 기공전도도 등 광합성 기구의 변화를 조사·분석하여, 용기묘 양묘 시 최적의 수분 환경을 구명하고자 실시하였다.

백합나무와 느티나무의 근원경과 간장 생장 및 상대 생장량은 1회/1일 관수 처리구에서 가장 높았으며, 관수 주기가 짧을수록 생장이 우수한 경향을 보였다. 물질생산량과 묘목품질지수 또한 두 수종 모두 처리간 차이를 보이면서 관수 주기가 짧아질수록 높은 값을 나타냈다. 또한, 관수 주기가 길어질수록 수분 조건이 불량해짐에 따라 T/R율과 H/D율은 낮아지는 경향을 보였다. 광합성 능력은 두 수종 모두 1회/1일 관수 처리구에서 다른 두 처리구에 비해 1.5~3배 이상의 높은 값을 보였다. 수분이용효율은 두 수종 모두 1회/1일 관수 처리구에서 가장 낮았으며, 관수 주기가 길

어질수록 수분 조건이 불량해짐에 따라 수분이용효율이 높아지는 경향을 보였다. 그러나 기공전도도는 관수 주기가 길어질수록 처리간 차이를 보이면서 값이 낮아지는 상반된 경향을 나타냈다.

본 연구 결과를 종합해 보면 수분 부족 시 증산량 감소와 동시에 수분이용효율이 증가되지만, 이에 따라 광합성 능력과 기공전도도의 감소 및 생장 저하와 불량한 묘목 품질이 초래되는 것을 알 수 있었다. 즉, 양묘과정에서 수종별 수분 요구도에 맞는 생육환경조절은 시설양묘사업에 의한 건전한 묘목을 대량 생산함과 동시에 조림과정에서도 높은 활착 및 생장으로 우수한 조림성과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 일률적인 관수를 실시하는 것이 아니라, 기간별 상대생장량을 조사하여 수종별 생장패턴에 따라 기간별 수분 요구량에 맞는 집중·효율적인 관수를 실시할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Ashraf, M., M. Arfan, M. Shahbaz, M. Ahmad, and A. Jamil, 2002: Gas exchange characteristics and water relations in some elite skra cultivars under water deficit. *Photosynthetica* **40**(4), 615-620.
- Barker, M. G., M. C. Press, and N. D. Brown, 1997: Photosynthetic characteristics of *dipterocarp* seedlings in three tropical rain forest light environments: a basis for niche partitioning. *Oecologia* **112**(4), 453-463.
- Bayala, J., M. Dianda, J. Wilson, S. J. Ouédraogo, and K. Sanon, 2009: Predicting field performance of five irrigated tree species using seedling quality assessment in Burkina Faso, West Africa. *New Forests* **38**, 309-322.
- Berkowitz, G. A. and M. Gibbs, 1993: Reduced osmotic potential inhibition of photosynthesis. *Plant Physiology* **72**, 1100-1109.
- Broschat, T. K., 1995: Nitrate, phosphate, and potassium leaching from container-grown plants fertilized by several methods. *Hortscience* **30**(1), 74-77.
- Cannon, Jr, W. N. and B. R. Roberts, 1995: Stomatal resistances and the ratio of intercellular to ambient carbon dioxide in container-grown yellow-poplar seedlings exposed to chronic ozone fumigation and water stress. *Environmental and Experimental Botany* **35**(2), 161-165.
- Chen, J., J. F. Franklin, and T. A. Spies, 1995: Growing-season microclimatic gradients from clearcut edges into old-growth Douglas-fir forests. *Ecological Applications* **5**, 74-86.
- Cho, M. S., K. W. Kwon, and J. H. Choi, 2007: Photosynthetic responses and growth performances in the three deciduous hardwood species under different shade treatments. *Journal of Korean Forest Society* **96**(4), 462-468. (in Korean with English abstract)
- Cho, M. S., S. W. Lee, B. B. Park, and G. S. Park, 2011: The effects of fertilization on growth performances and physiological characteristics of *Liriodendron tulipifera* in a container nursery system. *Journal of Korean Forest Society* **100**(2), 305-313. (in Korean with English abstract)
- Court-Picon, M., C. Gadbin-Henry, F. Guibal, and M. Roux, 2004: Dendrometry and morphology of *Pinus pinea* L. in lower province (France): adaptability and variability of provenances. *Forest Ecology and Management* **194**, 319-333.
- Davis, A. S. and D. F. Jacobs, 2005: Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forests* **30**, 295-311.
- Deans, J. D., W. L. Mason, M. G. R. Cannell, A. L. Sharpe, and L. J. Sheppard, 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.
- Derby, S. A. and L. E. Hinesley, 2005: Growth of containerized Atlantic white cedar seedlings as affected by container volume, substrate, fertilizer, and irrigation. *Hortscience* **40**(6), 1755-1759.
- Downes, G., C. Beadle, and D. Worledge, 1999: Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in relation to climate. *Trees* **14**(2), 102-111.
- Hernandez, J. A., E. Olmos, F. J. Corpas, F. Sevilla, and L. A. del Rio, 1995: Salt-induced oxidative stress in chloroplasts of pea plant. *Plant Science* **105**(2), 151-167.
- Holmgren, M., 2000: Combined effects of shade and drought on tulip poplar seedlings: trade-off in tolerance or facilitation?. *Oikos* **90**, 67-78.
- Hughes, A. P. and P. R. Freeman, 1967: Growth analysis using frequent small harvests. *Journal of Applied Ecology* **4**, 553-560.
- Gazal, R. M., C. A. Blanche, and W. M. Carandang, 2004: Root growth potential and seedling morphological attributes of narra (*Pterocarpus indicus* Willd.) transplants. *Forest Ecology and Management* **195**, 259-266.
- Grime, J. P. and R. Hunt, 1975: Relative growth-rate: its range and adaptive significance in a local flora. *Journal of Ecology* **63**, 393-422.
- Grossnickle, S. C., 2005: Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests* **30**, 273-294.
- Groves, K. M., S. L. Warren, and T. E. Bilderback, 1998: Irrigation volume, application, and controlled-release fertilizer: I. Effect on plant growth and mineral nutrient content in containerized plant production. *Journal of Environmental Horticulture* **16**, 176-181.
- Je, S. M., S. G. Son, S. Y. Woo, K. O. Byun, and C. S. Kim, 2006: Photosynthesis and chlorophyll contents of

- Chloranthus glaber* under different shading treatments. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(2), 54-60. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. J., K. H. Son, and T. S. Yoon, 2008: Optimum management for overwintering of *Pinus densiflora* container seedlings. *Journal of Korean Forest Society* **97**(1), 53-60. (in Korean with English abstract)
- Kim, P. G. and E. J. Lee, 2001: Ecophysiology of photosynthesis 1: Effect of light intensity and intercellular CO₂ pressure on photosynthesis. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(2), 126-133. (in Korean with English abstract)
- Kim, P. G., Y. S. Yi, D. J. Chung, S. Y. Woo, J. H. Sung, and E. J. Lee, 2001: Effect of light intensity on photosynthetic activity of shade tolerant and intolerant tree species. *Journal of Korean Forest Society* **90**(4), 476-487. (in Korean with English abstract)
- KFRI(Korea Forest Research Institute), 2009: *Report of research project in 2009. Development of forest resources sector*. KFRI, 740 pp.
- Kwon, K. W. and J. H. Lee, 1994: Growth performances and physiological responses *Quercus* spp. and *Fraxinus rhynchophylla* subjected to different soil moisture regimes and nutrition levels. *Journal of Korean Forest Society* **83**(2), 167-174. (in Korean with English abstract)
- Kwon, K. W., M. S. Cho, G. N. Kim, S. W. Lee, and K. H. Jang, 2009: Photosynthetic characteristics and growth performances of containerized seedling and bare root seedling of *Quercus acutissima* growing at different fertilizing schemes. *Journal of Korean Forest Society* **98**(3), 331-338. (in Korean with English abstract)
- Lambers, H. and H. Poorter, 1992: Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences. *Advances in Ecological Research* **23**, 187-261.
- Lamhamedi, M., G. Lambany, H. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux, and P. Y. Bernier, 2001: Growth, physiology, and leachate losses in *Picea glauca* seedlings(1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. *Canadian Journal of Forest Research* **31**, 1968-1980
- Lee, C. H., C. H. Shin, K. S. Kim, and M. S. Choi, 2006: Effects of light intensity on photosynthesis and growth in seedling of *Kalopanax pictus* Nakai. *Korean Journal of Medicinal Crop Science* **14**(4), 244-249. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. W., M. S. Cho, and G. N. Kim, 2010: Effect of different irrigation period on photosynthesis and growth performances of containerized seedling of *Eucalyptus pellita* and *Acacia mangium*. *Journal of Korean Forest Society* **99**(3), 414-422. (in Korean with English abstract)
- Lim, J. H., S. Y. Woo, M. J. Kwon, J. H. Chun, and J. H. Shin, 2006: Photosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining Korean Fir in Mt. Halla. *Journal of Korean Forest Society* **95**(6), 705-710. (in Korean with English abstract)
- Lino, D. B. and D. F. Olson, 1961: Soil-site studies in Piedmont hardwood and Pine hardwood upland forests. *Forest Science* **7**, 320-329.
- Mattsson, A., 1996: Predicting field performance using seedling quality assessment. *New Forests* **13**, 227-252.
- Muraoka, A., Y. Tang, H. Koizumi, and I. Washitani, 1997: Combined effects of light and water availability on photosynthesis and growth of *Arisaema heterophyllum* in the forest understory and an open site. *Oecologia* **112**(1), 26-34.
- Park, B. B., M. S. Cho, S. W. Lee, R. D. Yanai, and D. K. Lee, 2012: Minimizing nutrient leaching and improving nutrient use efficiency of *Liriodendron tulipifera* and *Larix leptolepis* in a container nursery system. *New Forests* **43**, 57-68.
- RDA(Rural Development Administration), 2002: *Standard analysis of media*. RDA. pp. 191.
- Ryu, K. O., S. S. Jang, W. Y. Choi, and H. E. Kim, 2003: Growth performance and adaptation of *Liriodendron tulipifera* in Korea. *Journal of Korean Forest Society* **92**(6), 515-525. (in Korean with English abstract)
- SAS Institute Inc., 2000: *SAS/STAT TM Guide for Personal Computer. Version 8 Edition*. SAS Institute Inc., N.C. 1026 pp.
- Seiler, J. R. and J. D. Johnson, 1988: Physiological and morphological responses of three half-sib families of loblolly pine to water-stress conditioning. *Forest Science* **34**(2), 487-495.
- Šestak, Z., J. Èatsk, and P. G. Jarvis, 1971: *Plant Photosynthetic Production Manual of Methods*. The Hague. Hertogenbosch. 818 pp.
- Sung, J. H., S. M. Je, S. H. Kim, and Y. G. Kim, 2009: Effect of calcium chloride(CaCl₂) on the characteristics of photosynthetic apparatus, stomatal conductance, and fluorescence image of the leaves of *Cornus kousa*. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(4), 143-150. (in Korean with English abstract)
- Takemura, T., N. Hanagata, K. Sugihara, S. Baba, I. Karube, and Z. Dubinsky, 2000: Physiological and biochemical responses to salt stress in the mangrove, *Bruguiera gymnorrhiza*. *Aquatic Botany* **68**(1), 15-28.
- Tyler, H. H., S. L. Warren, and T. E. Bilderback, 1996: Reduced leaching fractions improve irrigation use efficiency and nutrient efficacy. *Journal of Environmental Horticulture* **14**, 199-204.
- Warsaw, A. L., R. T. Fernandez, B. M. Cregg, and J. A. Andresen, 2009: Container-grown ornamental plant growth and water runoff nutrient content and volume under four irrigation treatments. *Hortscience* **44**(6), 1573-1580.
- Wilson, E. D., K. C. Vitols, and A. Park, 2007: Root characteristics and growth potential of container and bare-root seedlings of red oak(*Quercus rubra* L.) in

- Ontario, Canada. *New Forests* **34**, 163-176.
- Wright, I. J., P. B. Reich, and M. Westoby, 2001: Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats. *Functional Ecology* **15**(4), 423-434.
- Yoda, K., H. Wagatsuma, M. Suzuki, and H. Suzuki, 2003: Stem diameter changes before bud opening in *Zelkova serrata* saplings. *Journal of Plant Research* **116**, 13-18.