

## 상록활엽수 7수종의 건조스트레스에 대한 생리적 반응

진언주<sup>1</sup> · 조민기<sup>1</sup> · 배은지<sup>1</sup> · 박준형<sup>1</sup> · 이광수<sup>1</sup> · 최명석<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 남부산림자원연구소, <sup>2</sup>경상대학교 환경산림과학부

### Physiological Responses to Drought Stress of Seven Evergreen Hardwood Species

Eon-Ju Jin<sup>1</sup>, Min-Gi Cho<sup>1</sup>, Eun-Ji Bae<sup>1</sup>, Junhyeong Park<sup>1</sup>,  
Kwang-Soo Lee<sup>1</sup> and Myung Suk Choi<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Southern Forest Resources Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52828, Korea


<sup>2</sup>Division of Environmental Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 52825, Korea

**요약:** 본 연구는 현재 국내에서 조경수 및 가로수로 이용되고 있는 상록활엽수들 중 *Cinnamomum camphora* Sieb., *Camellia japonica* L., *Quercus glauca* Thunb., *Machilus thunbergii*, *Dendropanax morbifera* LEV., *Daphniphyllum macropodum* Miq., *Raphiolepis indica* var. *umbellata* (Thunb.) Ohashi. 등 7 수종에 대해서 내건성을 비교분석하기 위해 진행되었다. 수종별 내건성을 분석하기 위하여 2016년 9월 5일~10월 5일까지 30일간 무관수 처리하였고 5일 간격으로 수종별 건조량, 잎의 상대습수량, 상대수분손실량, 전해질 용출 등을 측정하여 내건성을 비교하였다. 4가지 측정방법으로 비교한 결과 *C. japonica* > *R. indica* > *Q. glauca* > *M. thunbergii*, *D. morbifera* > *D. macropodum* > *C. camphora* 순으로 내건성이 강한 것으로 나타났다. 비선형 회귀분석의 로지스틱 모델을 사용하여 수종별 건조처리에 따른 치사기간을 분석한 결과 22.7~37.6일의 범위로 측정되었으며, *C. japonica* 37.6일, *R. indica* 36.8일, *Q. glauca* 35.3일, *M. thunbergii* 31.0일 등으로 30일 이상으로 높은 내건성을 보인 반면, *C. camphora* 22.7일, *D. morbifera* 27.5일, *D. macropodum* 22.8일로 수분 결핍에 따른 건조저항성이 낮은 것으로 조사되었다. 즉, 상록활엽수 7수종 중 *C. japonica*, *R. indica*, *Q. glauca*는 수분스트레스에 저항하는 적응력을 보였기에 시기를 조정하여 식재하면 안정적인 가로수 조성이 가능할 것으로 판단된다.

**Abstract:** This research aims to analyze and compare the drought resistance of 7 species of landscape trees commonly grown in Korea. The 7 species are: *Camellia japonica*, *Raphiolepis indica*, *Quercus glauca*, *Machilus thunbergii*, *Daphniphyllum macropodum*, *Dendropanax morbifera* and *Cinnamomum camphora*. In order to analyze their drought resistance, the samples were left without irrigation for 30 days (05/09/2016 ~ 05/10/2016), during which period their respective drought resistor, relative water content, electrolyte elution figures and proline content were measured. As the non-irrigation proceeded, *C. camphora* was the first to wither, followed by *D. morbifera*, then *D. macropodum*, then *M. thunbergii*, then *Q. glauca*, then *R. indica* then finally *C. japonica*. Of the 7 species, *Q. glauca*, *C. japonica* and *R. indica* can be considered highly drought resistant, since they survived for longer than 3 weeks without irrigation. Relative water content (RWC) plummeted dramatically after the first 15 days of non-irrigation. Whereas RWC readings of *C. camphora*, *D. morbifera*, *D. macropodum* and *M. thunbergii* dropped by 40% or more, the other 4 species reported a relatively low rate of decrease at 20% or lower. The *Camellia japonica*, the *R. indica* and *Q. glauca*, which were the species with relatively high drought resistance, showed low proline content and electrolyte elution figures, whereas those of *C. camphora*, *D. macropodum*, *D. morbifera* and *M. thunbergii* were higher. Analysis through the nonlinear regression analysis logistic model showed that non-irrigation proved fatal for the 7 sample species in a range of 22.7 to 37.6 days. The *C. japonica*, *R. indica*, *Q. glauca* and *M. thunbergii* demonstrated a high drought resistance of 30 days or longer, whereas *C. camphora*, *D. morbifera* and *D. macropodum* had a low resistance of 25 days or less to drought from lack of water. In conclusion, out of the 7 species of broad-leaved evergreen trees tested, *C. japonica*, *R. indica* and *Q. glauca* seem to be suitable for use as landscape trees, owing to their high drought resistance.

**Key words:** drought resistance, electrolyte leakage, logistic-nonlinear regression analysis, lethal temperature, relative water content, proline

\* Corresponding author  
E-mail: mschoi@gnu.ac.kr

ORCID  
Myung Suk Choi  <http://orcid.org/0000-0003-1464-1573>

## 서론

최근 급격한 기후변화로 인해 식물은 여러 가지 환경 스트레스를 받으며 성장한다. 이러한 식물이 받는 스트레스는 생물적인 요인과 무생물적인 요인으로 구분할 수 있으며, 그 중 건조는 무생물적인 스트레스 요인으로 체내의 수분함량이 줄고, 성장량이 감소하여 모든 대사과정에서 직·간접적으로 영향을 미친다. 식물은 건조에 대해 생리 및 형태적으로 다양한 반응을 보이는 것으로 알려져 있으며, 이러한 능력은 식물의 양적 형질로써 여러 반응의 상호작용에 의하여 수분 부족에 대한 내건성을 나타낸다. 지구온난화에 의한 환경문제가 심각해지면서 내건성에 대한 내성 기작의 생리·생화학적 또는 유전적인 구명과 내성 능력이 높은 수종 및 품종 개발을 위한 연구가 전 세계적으로 이루어지고 있다(Oh and Han, 2005). 온난화는 기온 변화 이외에도 토양 수분 함량에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며(Rustad et al., 2001), 온난화에 대한 식물의 성장 반응이 건조 스트레스에 영향을 받기도 한다(Yin et al., 2008). 그러나 수분 스트레스에 대한 내성은 수종마다 다르며, 생리·화학적 인자들 간에도 서로 상반된 관계가 있어 내건성 수종에 대한 보다 효율적인 선발 시스템이 필요하다. 내건성 식물의 육종은 야외에서 수분이용효율과 식물의 성장모형을 이용하여 행하여지며, 이러한 연구는 비용과 시간이 많이 소모되고 또한 환경적인 영향을 많이 받는다. 식물이 수분 스트레스를 받게 되면, 여러 부위 또는 기관에서 생리적인 장애가 나타나며, 이러한 생리·화학적 인자들은 식물이 수분 결핍에 대한 기작의 이해와 내건성 식물을 선발하는데 매우 중요하다. 증산작용은 내건성과 매우 밀접한 관계가 있으며, 증산량이 많으면 식물체내의 수분이 고갈되어 건조 피해를 유발한다. 식물 생장은 수분스트레스에 의해 강한 영향을 받는데(Seki et al., 2007), 수분스트레스를 받은 식물의 반응과 연관된 것으로 알려진 식물화학물질(phytochemicals)에는 전해질 용출, 프롤린 등이 있다. 먼저 전해질 용출은 식물의 생육에 영향을 미치며, 전해질 용출이 높은 경우 식물은 수분을 흡수하기가 어려워져 세포생육은 느려지고 세포벽은 두꺼워져 식물의 잎은 작고 단단해진다(Zhao, 2013). 또한 식물은 프롤린과 같은 용질을 잎에 축적하여 삼투 포텐셜을 감소시키는 삼투 조절은 잎으로의 수분 이동을 촉진시켜 기공 세포가 팽창되어 잎의 팽압을 유지시킨다(Hong, 2009). 삼투조절에 의한 기공세포의 팽창은 극심한 수분스트레스 동안 이산화탄소 동화를 가능하게 하여 식물 성장을 돕는다(Hare et al., 1998). 프롤린은 식물에서 글루탐산(glutamic acid)과 오르니틴(ornithine)으로부터 합성되고,

스트레스 환경(고염, 고온, 건조)에서는 주로 글루탐산으로부터 합성된다(Delaunet, 1993). 20세기 중반 이후 급격히 증가한 지구온난화로 인해 가뭄발생 빈도 증가로 식물은 수분 스트레스에 따른 피해가 증가하고 있다. 이에 대한 근본적인 해결책으로 자연강우만으로도 식물생육이 건전하게 유지될 수 있도록 내건성이 비교적 강한 식물소재를 활용하는 것이 중요하다. 따라서 조경소재로 많이 이용되고 있는 상록활엽수 7수종에 수분스트레스를 처리하여 무관수 상태의 생리 특성 및 수종별 치사기간을 파악하여 내건성에 강한 수종을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시재료 및 건조처리

공시재료는 우리나라 난대 상록활엽수 중 가로수로 식재되고 있는 녹나무(*Cinnamomum camphora*), 동백나무(*Camellia japonica*), 후박나무(*Machilus thunbergii*), 황칠나무(*Dendropanax morbifera*), 굴거리나무(*Daphniphyllum macropodum*), 종가시나무(*Quercus glauca Thunb.*), 다정큰나무(*Raphiolepis indica*)의 7수종을 국립산림과학원 남부산림자원연구소에서 양묘한 2년생 묘목을 연구재료로 사용하였다. 2016년 6월 4구 포트에 심겨진 묘목을 피트모스:펄라이트:질석(1:1:1, v/v/v)을 혼합한 배양토를 담은 플라스틱 포트(D 16 cm × H 20 cm)에 옮겨 심었다. 포트에 옮겨 심은 묘목은 활착을 위하여 1개월간 유리 온실에서 순화과정을 거쳤다. 1개월이 경과 후 각 수종별 평균 묘고 및 근원경은 녹나무 묘고 94.02±0.78 cm, 근원경 6.09±0.71 mm, 동백나무 묘고 30.31±2.05 cm, 근원경 5.20±0.17 mm, 후박나무 묘고 54.42±0.04 cm, 근원경 6.14±0.6 mm, 황칠나무 묘고 51.41±2.78 cm, 근원경 5.43±0.83 mm, 굴거리나무 묘고 56.35±0.83 cm, 근원경 7.76±0.52 mm, 종가시나무 묘고 45.02±0.45 cm, 근원경 5.46±0.31 mm, 다정큰나무 55.0±0.15 cm, 근원경 5.46±0.31 mm였으며, 비가림 시설이 되어있는 비닐온실로 옮긴 후 수종별 50개체씩 완전임의배치법으로 배치하였다. 건조 스트레스 처리 전 충분히 관개한 후 무관수 시작 후 5일마다 식물의 각 지표를 측정하였다. 또한 비닐온실 내 위치효과를 줄이기 위하여 1주일 간격으로 화분의 위치를 변경하였다.

### 2. 건조저항일

건조저항일은 인공적으로 건조처리 된 식물체의 실제 생존율을 분석함으로써 건조치사기간을 구명하고, 생리적 평가간의 비교를 위한 기준으로 활용하고자 수행되었다. 충분히 활착기간을 거친 균일한 묘목 5본씩 5일 간격

으로 6번을 측정하여 30일간 일괄적으로 관수를 차단하여 생존율에 따른 건조저항일(Resistant dry days, RDS, day)을 조사하였다. 건조저항일 산출공식은 식 1과 같다 (Chen and Ding, 2011).

$$RDS = \sum(Ti \times Nsi) / N \quad (1)$$

Ti : 시든 식물 조사일, Nsi : 시든 식물의 수,  
N : 총 식물의 수

### 3. 물질생산량

수종별 건조처리기간에 따른 부위별 물질생산량을 분석하기 위해 건조스트레스 처리 1일, 15일, 30일을 간격으로 총 3회 분석하였다. 수종별 건조처리 기간에 따라 50분의 묘목 중 무작위로 각 10본씩 선정하여 잎, 가지, 뿌리로 구분하여 세척한 뒤 70°C에서 48시간 동안 건조시킨 후 각각의 건중량을 측정하였다.

### 4. 상대수분함량

수종별 잎의 상대수분함량(Relative water content, RWC, %) 측정을 위해 무관수 상태에서 5분의 묘목에서 5일마다 수종별 각 지표를 측정하였다. 잎의 채취는 오전 10시에 생장점 주변 3~4번째 잎을 대상으로 3엽을 채취한 뒤 엽맥을 중심으로 직경 10 mm 크기의 샘플을 채취하여 지퍼백에 넣어 실험실로 옮긴 후 바로 생장량(FW)을 칭량하였다. 생장량을 측정한 후 50 ml 폴리프로필렌 튜브에 2차 증류수 50 ml을 넣고 24시간 정지 처리하였다. 24시간 후 잎의 포화중량을 측정한 후 70°C로 설정한 건조기에 넣고 48시간 동안 건조한 후 건중량을 측정하였다. 시료는 7수종에 대하여 수종별로 각각 3본의 나무에서 잎을 채취하여 함수량을 측정하고 평균값을 구하였다(식 2).

$$RWC(\%) = (FW-DW)/(TW-DW) \times 100 \quad (2)$$

FW=fresh weight (0.5 g), TW=Saturated fresh weight, and DW=dry weight

### 5. Proline 함량

proline의 함량은 수종별 생장점 주변 3~4번째 잎을 대상으로 각각 5분의 묘목에서 3개의 잎을 채취하여 함량을 측정하고 평균값을 구하였다. 수종별 잎 0.5 g을 파쇄한 후 3% sulfosalicylic acid 10 ml을 넣어 균질화하고 원심분리(3,400×g, 4°C, 20 min) 후 상등액을 회수하였다. 상등액 2 ml에 acid-ninhydrin (glacial acetic acid 30 ml, 6 M phosphoric acid 20 ml, 1.25 g ninhydrin) 2 ml과

acetic acid 2 ml을 넣은 후 100°C에서 1시간 동안 반응시켰다. 반응 후 반응물을 바로 얼음으로 옮긴 후, toluene 4 ml을 넣고 15~20초 동안 vortexing하여 추출하였다. Toluene에 추출된 발색단을 수층으로부터 분리하고 상온에서 toluene을 정량하여 분광광도계를 이용해 520 nm에서 흡광도를 측정하였다. 표준곡선은 L-proline을 사용하여 작성 하고 정량하였다.

### 6. 전해질 용출 반응

수분공급이 차단된 환경에서 건조스트레스를 받은 식물들은 엽육세포가 파괴되어 전해질이 높아지므로 그에 따른 세포손상 정도를 알아보기 위하여, Orion star A329 (Thermo Scientific, USA)을 이용하여 전해질 용출량을 측정하였다. 시료는 7수종에 대하여 상대수분함량과 프롤린을 측정한 동일한 묘목 5개체에서 채취한 잎을 2차 증류수로 깨끗이 씻은 후 잎의 일부를 분리하여 0.5 g씩 무게를 측정하였다. 0.5 g의 잎의 조각을 50 ml 폴리프로필렌 튜브에 넣고 2차 증류수 20 mL와 함께 넣어 초기 전도도(Rc, electrical conductivity, EC)값을 측정하였다. 초기 EC값을 측정한 후 실온에서 24시간이 지난 뒤 기준 전도도(Ro, electrical conductivity, EC)을 측정하여 80°C의 항온수조(DS-23S, Dasol Scientific Co., Ltd., Suwon, Korea)에 넣어 4시간 동안 열처리 한 뒤 조직을 괴사시킨 후 수조에서 꺼내어 24시간 동안 실온에 두었다가 최종 EC값(Rb, electrical conductivity, EC)을 측정하였다. 건조스트레스 처리 시 전해질이 용출되었으며, 각 처리에 대한 전해질 용출은 식 3과 같다. 열처리로 괴사시킨 식물 조직은 침출액의 전기전도도에 대한 건조처리 후 식물조직 침출액 전기전도도의 비를 백분율로 산출하였으며, 산출식은 다음과 같다(Lee, 2004).

$$REC(\%) = (Rc-Ro)/(Rb-Ro) \times 100 \quad (3)$$

Rc = initial electrolyte leakage, Rb = final electrolyte leakage, Ro = baseline level of electrolyte leakage

### 7. 비선형 회귀분석에 의한 치사기간 예측

전해질 용출(electrolyte Leakage, EL)과 건조처리 기간의 관계를 설명하기 위하여 비선형 회귀분석 중 Logistic 모형을 선택하였다. 건조처리 후 식물조직 침출액의 전해질 용출값을 초기값으로 하고 괴사시킨 식물조직 침출액 값을 최대값으로 하여 이들의 비를 백분율로 산출하였다. 건조스트레스를 부여한 후 세포의 전해질 용출을 측정하면 S자 반응곡선을 나타내고, 이 곡선의 변곡점은 최대 전해질 용출량의 50%가 되는 온도로서 치사

기간(LT50)로 많이 표현되고 있다(Suhgang et al., 2006; Chen et al., 2011). LT50값을 예측하기 위해 Logistic 비선형 회귀분석식은 식 4와 같이 계산하였다.

$$Y = k/(1+ae^{-bx}) \quad (4)$$

- Y = REC(%)
- a = gradual curve
- b = curve slope
- k = equation coefficient
- x = processing period

8. 통계분석

측정을 통해 얻은 결과의 유의성 분석은 통계자료 SPSS 12.0.0 for Windows (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA, 2003)를 이용한 Duncan의 다중 검정법으로 평균간 차이의 유의성(p<0.05)를 검정하였다. 건조처리에 대한 치사기간을 예측하기 위해 반응곡선과 매개변수는 SAS (SAS version 6.12, 1989, SAS Institute Inc., USA)를 이용하여 최소유의차 검정(Least Significant Different test; LSD test)과 General linear model (GLM)을 적용하여 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 건조처리 기간에 따른 건조저항일

상록활엽수 7수종의 수분결핍에 따른 수종별 치사기간을 조사한 결과는 다음과 같다(Figure 1). 녹나무의 경우 관수 중단 9일 후부터 잎의 테두리부터 마름현상으로 피해증상을 보였고, 15일 이후에는 50% 이상이 피해를 입었으며, 20일 후 90% 이상 잎이 고사하였다. 황칠나무와 굴거리나무 또한 무관수처리 10일 후부터 초두부 잎마름과 잎처짐 현상이 나타났으며, 18일 이후부터 50% 이상

이 피해를 입어, 20일 이후부터는 80% 이상 잎이 고사하였다. 위에서 언급한 녹나무, 황칠나무, 굴거리나무 등 수종들은 피해현상일을 기점으로 전체적인 위조현상이 나타나기 시작하여 다른 공시수종들에 비해 건조 스트레스에 따른 내성이 약한 것으로 나타났다. 후박나무의 경우 무관수 처리 15일 이후부터 일부 잎의 마름과 낙엽이 있었으나 전체적인 위조현상은 나타나지 않았다. 동백나무, 증가시나무, 다정큼나무의 경우 무관수 처리 25일이 지난 후부터 일부 잎 처짐현상이 나타났으며, 특히 동백나무, 다정큼나무의 경우 관수를 중단한지 30일이 지난 이후에도 고사율이 10% 이하로 공시수종 중 건조스트레스에 따른 저항성이 가장 강한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 피해정도의 차이는 있겠지만 Ihm(1993)의 연구 중에서 무관수 처리 21일 이후에도 동백나무의 수분함량이 83.5%로 다른 수종들에 비해 내건성이 강한 것으로 나타났으며, Choi(2013)의 연구에서도 다정큼나무의 경우 관수중단 24일 이후부터 50% 이상의 피해를 보여 유사한 경향으로 나타났다. 식물은 토양 수분함량의 감소에 따라 증산작용을 억제하기 위해 기공전도도가 감소하고(Beadle, 1993), 그에 따라 식물의 대사작용이 저하된다고 보고되었다(Guo, 2008; Shin, 2011). 이러한 수분부족에 의한 기공전 도도의 감소는 잎의 water potential을 감소시킬 뿐만 아니라 잎의 비대, 질소동화작용과 같은 형태학적 및 생리적 과정에도 영향을 미친다고 하였다(Hsiao, 1973; Kramer, 1995; Turner and Jones, 1980). 본 연구에서는 녹나무의 경우 관수 중단 9일부터 초단부의 줄기에서 마름현상으로 가시적인 피해가 나타나기 시작하였으며, 관수중단일을 시점으로 수종별 건조 스트레스에 따른 건조저항일을 분석한 결과 동백나무 > 다정큼나무 > 증가시나무 > 후박나무 > 황칠나무 > 굴거리나무 > 녹나무 순으로 내건성이 큰 것으로 나타났다.

2. 건조처리 기간에 따른 물질생산량

물질생산량은 묘목의 근원경과 매우 밀접하게 관련되어 있으며, 묘목의 물질생산량은 생존과 성장에 큰 영향을 미치는 요소이다(Switer and Nelson, 1963; Ritchie, 1984). 건조처리 기간에 따른 부위별 및 전체 묘목의 물질생산량을 측정한 결과 건조처리 기간이 길어질수록 모든 수종에서 물질생산량이 감소하였으며, 부위별 감소는 수종에 따라 다른 것으로 나타났다(Table 1). 녹나무의 경우 무관수 1일차에 비해 15일이 경과 후 뿌리의 물질생산량 감소가 크게 나타나면서 전체 물질생산량 또한 45.5% 감소하는 경향으로 위조현상이 나타나기 시작한 건조저항일과 유사한 결과로 나타났다. 동백나무와 후박나무 그리고 증가시나무, 다정큼나무의 경우 무관수 처

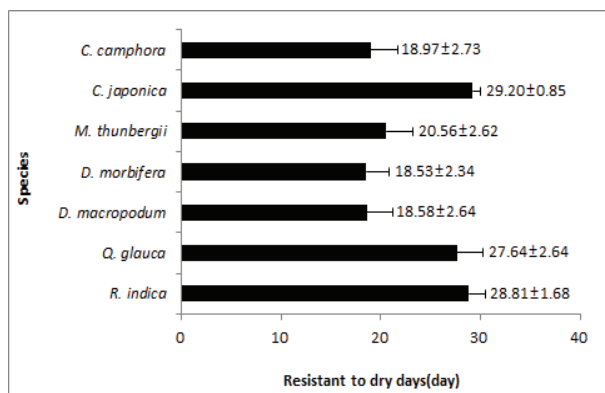


Figure 1. Variation of the Resistant to dry (day) of various plants in the condition of no irrigation.

**Table 1. Variation of leaves water contents in the biomass production.**

Species	Duration of water stress(day)	Dry weight(g)			
		Leaves	shoot	root	total
<i>C. camphora</i>	1	5.18±1.70a <sup>y</sup>	7.70±2.55a	7.32±1.65a	20.82±5.26a
	15	2.72±0.53b	4.45±2.26b	2.30±2.14b	9.47±3.61a
	30	1.37±0.03b	4.07±0.72b	1.62±0.20b	7.06±0.62b
<i>C. japonica</i>	1	3.37±0.23a	2.46±0.86a	5.22±1.23a	10.39±2.73a
	15	2.14±0.96a	1.63±0.58a	3.43±0.71b	7.20±1.88ab
	30	2.00±0.78a	1.51±0.08a	2.36±0.48b	5.87±1.18b
<i>M. thunbergii</i>	1	4.70±1.65a	4.80±1.57a	5.24±1.47a	14.74±4.18a
	15	4.24±0.61a	3.41±0.35ab	3.36±0.75b	11.01±1.34b
	30	2.72±0.72b	2.45±0.89b	2.56±0.84b	7.24±2.39c
<i>D. morbifera</i>	1	4.55±1.13a	4.13±1.29a	2.03±1.00a	10.71±3.20a
	15	2.19±0.91b	3.55±1.32a	1.29±0.64a	7.04±2.65ab
	30	1.10±0.09c	2.13±1.11b	1.47±1.17a	4.71±1.23b
<i>D. macropodium</i>	1	7.60±0.85a	8.41±1.28a	13.80±4.83a	29.81±6.74a
	15	4.09±0.32b	4.35±0.82b	8.93±4.66a	17.37±5.28ab
	30	3.41±0.96b	3.70±0.45b	7.54±1.43a	14.66±1.83b
<i>Q. glauca</i>	1	4.24±0.49a	3.38±0.81a	3.80±0.79a	11.42±1.61a
	15	3.94±0.68b	2.53±0.66ab	3.63±1.13a	9.20±2.14ab
	30	2.61±0.84b	2.02±0.62b	2.28±0.42b	6.75±0.82b
<i>R. indica</i>	1	2.59±0.52a	1.58±0.19a	1.75±0.30a	5.93±0.75a
	15	2.12±0.56ab	1.03±0.45b	1.38±0.60a	6.68±0.94a
	30	1.90±0.12b	0.81±0.16b	1.87±0.42a	4.57±0.43b

<sup>y</sup> Different letters within the columns indicate statistical differences at the 5% levels by Dunan's multiple range test.

리 15일까지는 부위별 물질생산량에서 건조스트레스에 따른 변화가 크게 나타나지 않았으며, 그 중 동백나무와 다정큼나무는 다른 수종들에 비해 지상부 및 지하부 물질생산량의 감소가 작은 것으로 나타났다. 이는 다른 수종들에 비해 지상부 성장보다 지하부 성장에 광합성 산물이 더 많이 분배된 것이다. 광합성 산물의 배분 및 근계발달은 성장에 큰 영향을 미치며, 지상부의 물질생산량이 높은 묘목은 수분 스트레스 저항 능력을 떨어뜨려 (Liva and Fernandez-ales, 1998), 불량한 성장을 보일 수 있다. 황칠나무와 굴거리나무의 경우 무관수 15일 후부터 감소하여 수분 스트레스 기간이 증가함에 따라 계속 감소하는 경향을 보였으며, 건조저항성과 비교해 볼 때 초기 위조 현상이 나타날 시점에서 잎의 물질생산량이 감소하여 지상부와 지하부의 물질생산량 또한 감소되는 것으로 판단된다. 최종적으로 무관수 처리 30일 후 측정된 수종별 총 물질생산량의 감소율을 비교해 볼 때 다정큼나무가 23%로 가장 낮은 값을 보였으며, 증가시나무

41%, 동백나무 44%, 후박나무와 황칠나무 그리고 굴거리나무는 51%, 녹나무 66% 순으로 나타났다.

### 3. 건조처리기간에 따른 상대수분함량의 변화

건조스트레스 처리에 따른 상대수분함량의 변화를 측정한 결과 무관수 기간이 경과함에 따라 수종별 잎의 상대수분함량은 감소하였다(Table 2). 무관수 처리 후 5일째 측정된 수종별 결과 녹나무 99.2±1.3%, 동백나무 96.2±2.2%, 후박나무 98.2±1.3%, 황칠나무 99.8±0.6%, 굴거리나무 99.0±0.5%, 증가시나무 95.5±3.9%, 다정큼나무 95.7±0.5%로 무관수 처리 10일째까지 90% 이상으로 나타났다. 15일 후 동백나무 95.2±1.8%, 후박나무 96.3±0.8%, 증가시나무 92.3±2.3%, 다정큼나무 95.1±1.7%로 90%이상 유지되었으며, 녹나무 86.4±9.3%, 황칠나무 87.3±1.5%, 굴거리나무 80.0±10.2%로 80% 이상으로 측정되었다. 20일 동안의 건조를 거쳐 식물들의 상대수분함량은 계속 감소하였지만 동백나무, 후박나무, 증가시나무, 다정큼나무는 90% 이상으



**Table 2. Variation of leaves water contents in the condition of non-irrigation.**

Species	Relative Water Content (RWC, %)					
	5day	10day	15day	20day	25day	30day
<i>C. camphora</i>	99.2±1.3a <sup>y</sup>	96.6±1.3a	86.4±9.3b	82.6±7.5b	67.1±8.2c	59.4±4.4c
<i>C. japonica</i>	96.2±2.2a	95.8±1.6a	95.2±1.8ab	91.9±4.5ab	88.1±11.1ab	86.0±4.2b
<i>M. thunbergii</i>	98.2±1.3a	96.8±0.5a	96.3±0.8a	93.4±2.3a	83.1±3.3ab	76.8±1.4b
<i>D. morbifera</i>	99.8±0.6a	99.0±5.2a	87.3±1.5b	75.4±5.3c	62.9±11.9d	57.7±5.0d
<i>D. macropodum</i>	99.0±0.5a	95.6±0.2a	80.0±10.2b	78.7±3.2b	70.0±2.7c	58.2±4.8d
<i>Q. glauca</i>	95.5±3.9a	95.4±1.2a	92.3±2.3ab	91.2±3.2ab	88.9±3.2b	78.9±4.8b
<i>R. indica</i>	95.7±0.5a	95.6±1.6a	95.1±1.7a	93.2±2.1a	84.3±7.6ab	82.0±9.2ab

<sup>y</sup> Different letters within the columns indicate statistical differences at the 5% levels by Dunan's multiple range test.

로 유지되어 다른 공시수종들에 비해 건조스트레스에 따른 내성이 높은 것으로 나타났다. 이들 수종들은 다른 수종들에 비해 지하부 물질생산량이 높게 나타났으며, 무관수 15일이 경과한 후에도 지하부 및 지상부 물질생산량의 감소가 작은 것으로 조사되었다. 무관수 처리 25일 후 수종별 잎의 상대수분함량을 분석한 결과 동백나무 88.1±11.1%, 후박나무 83.1±3.3%, 종가시나무 88.9±3.2%, 다정큼나무 84.3±7.6%로 80%이상으로 보유하고 있는 것으로 보아 내건성이 높은 것으로 나타났다. 온실 내에서 무관수 30일 후 동백나무, 다정큼나무의 경우 상대수분함량이 80% 이상으로 유지되어 내건성이 강한 것으로 확인되었다. 무관수 처리 5일째를 기준으로 잎의 상대수분함수 값을 기준으로 무관수 처리 30일 후 잎의 상대수분함수 감소율은 녹나무 40.1%, 동백나무 10.6%, 후박나무 21.8%, 황칠나무 42.2%, 굴거리나무 41.2%, 종가시나무 17.4%, 다정큼나무 14.3%로 나타나 동백나무, 다정큼나무의 경우 80% 이상의 상대수분함량이 유지되어 내건성이 강한 것으로 확인되었다. 식물의 수분 증산은 우선 잎과 인근의 변재부위에서 수분을 조달하게 되는데, 동일한 환경에서 상대수분함량이 낮

을수록 내건성이 더 약하고 상대수분함량이 높을수록 내건성이 강한 것으로 알려져 있다(Xu et al., 2012). 결과적으로 녹나무, 황칠 나무, 굴거리나무는 동백나무, 후박나무, 종가시나무, 다정큼나무에 비해 내건성이 약한 것으로 나타났으며, 공시재료인 7수종의 내건성은 동백나무 > 다정큼나무 > 종가시나무 > 후박나무 > 녹나무 > 굴거리나무 > 황칠나무 순으로 나타났다.

#### 4. 건조처리기간에 따른 Proline 함량의 변화

건조 스트레스는 세포 내 여러 가지 생화학적 반응의 속도를 감소시키며, 효소의 활동을 둔화시켜 수분 스트레스를 받은 식물체 내에는 일반적으로 proline이 축적된다. 건조 처리에 따른 수종별 proline 함량을 분석한 결과 처리 시간이 길어질수록 proline 함량은 증가하였다(Table 3). 건조 처리 시 녹나무와 굴거리나무, 황칠나무를 제외한 4수종의 식물들은 15일 동안의 건조처리에 따라 proline 함량의 변화가 크게 나타나지 않았으며, 15일 이후부터 증가현상이 뚜렷하게 나타났다. 5일 동안 처리 시 식물들의 proline 함량은 0.213~0.493 mg/0.05gfw으로 나타났으며, 10일 동안

**Table 3. Variation of the Proline contents in the condition of no irrigation.**

Species	Proline concentration (mg/0.05g FW)					
	5day	10day	15day	20day	25day	30day
<i>C. camphora</i>	0.493±0.004a <sup>y</sup>	0.587±0.005b	0.725±0.054b	1.220±0.048b	1.253±0.386ab	1.345±0.114b
<i>C. japonica</i>	0.364±0.009b	0.376±0.010e	0.382±0.003c	0.433±0.014d	0.494±0.254b	0.534±0.065d
<i>M. thunbergii</i>	0.362±0.009bc	0.393±0.014cd	0.407±0.011c	0.456±0.023d	0.490±0.023b	0.694±0.047cd
<i>D. morbifera</i>	0.425±0.015ab	0.470±0.034bc	0.760±0.034b	0.88±0.030c	0.972±0.001ab	1.121±0.027bc
<i>D. macropodum</i>	0.429±0.020ab	1.158±0.042a	1.709±0.064a	1.787±0.037a	1.834±0.200a	1.954±0.152a
<i>Q. glauca</i>	0.213±0.039d	0.234±0.054de	0.269±0.004c	0.302±0.003d	0.310±0.002b	0.338±0.019d
<i>R. indica</i>	0.273±0.039cd	0.297±0.054cd	0.301±0.004c	0.418±0.003d	0.424±0.002b	0.445±0.019d

<sup>y</sup> Different letters within the columns indicate statistical differences at the 5% levels by Dunan's multiple range test.

처리 시에는 0.234~1.158 mg/0.05gfw의 범위로 나타났다. 10일 후 굴거리나무의 proline 함량이 1.158 mg/0.05gfw으로 가장 높아 단기간 건조처리에서 상당한 피해가 발생하였으며, 다음으로 녹나무에서 0.587 mg/0.05gfw, 황칠나무에서 0.470 mg/0.05gfw로 proline 함량이 높게 나타났다. Proline 함량은 15일 후부터 증가하는 경향을 보였으며, 15일 후 proline 함량은 10일 보다 1.6~38.2%의 피해가 증가하여 굴거리나무의 proline 함량이 1.709 mg/0.05gfw로 가장 높았으며, 황칠나무 0.760 mg/0.05gfw, 녹나무 0.725 mg/0.05gfw 순으로 높게 나타났다. 그 밖의 식물들에서는 0.269~0.382 mg/0.05gfw의 범위로 나타났다. 25일 동안 건조처리 후 proline 함량은 굴거리나무에서 1.834 mg/0.05gfw로 가장 높았으며, 다음으로 녹나무 1.253 mg/0.05gfw, 황칠나무 0.972 mg/0.05gfw로 높게 나타났다. 이에 반면 건조저항성이 높았던 동백나무의 경우 0.494 mg/0.05gfw, 후박나무 0.490 mg/0.05gfw, 종가시나무 0.310 mg/0.05gfw, 다정큼나무 0.424 mg/0.05gfw로 건조 스트레스에 따른 내성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. Proline은 자연계에서 아주 흔한 아미노산이며, 삼투압 조절의 기능을 가지며, 플라즈마 세포막의 보호, 탄소와 질소 원, 활성산소종 제거 등에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. Proline은 식물체 내의 K<sup>+</sup>이온의 흡수와 이동을 조절함으로써 스트레스의 정도를 나타내는 지표물질로 사용되고 있으며(Liu and Zhu, 1997), 수분 스트레스 하에서 뚜렷한 증가가 관찰되므로 식물의 수분포텐셜을 조절하는 osmoticum으로써 작용한다고 알려져 있다(Binzel et al., 1985). 결과적으로 건조에 내성이 강한 식물들은 건조저항성이 길고 proline함량의 증가량이 작아졌으며, 식물종에 따른 차이가 많은 것으로 나타났다. 이와 같은 proline함량의 증가는 수분스트레스로 인한 탈수로부터 식물을 보호하고, 삼투 포텐셜을 낮추는 삼투 조정 메커니즘(Xial et al., 2008)과 관련된 것으로 보인다.

5. 건조처리기간에 따른 전해질용출량의 변화

건조처리에 따른 식물의 세포손상 정도를 알아보기 위하여 전해질 용출을 측정된 결과 처리기간이 길어질수록 수종별 전해질 용출량은 증가하였다(Table 4). 무관수 처리 5일 후의 식물들의 전해질 용출은 15.9~19.7%의 범위로 나타났으며, 10일 동안 처리 시 녹나무의 용출이 24.4±7.6%, 황칠나무 27.0±3.9%로 가장 높아 비교적 단기간 건조처리에서 피해가 높은 것으로 나타났다. 15일 후 수종별 전해질 용출은 10일보다 1.8~14.0%의 피해가 증가하였으며, 굴거리나무의 경우 14.0%로 단기간의 건조처리에서 상당한 피해를 보였으며, 다음으로 녹나무가 13.9%로 높게 나타났다. 전해질 용출은 20일 후부터 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였으며, 무관수 처리 2일째와 비교해보면 각 수종별 상대 전해질 용출 증가량은 녹나무 37.4%, 동백나무 19.4%, 후박나무 21.1%, 황칠나무 26.2%, 굴거리나무 35.4%, 종가시나무 12.0%, 다정큼나무 10.6%로 나타났다. 25일 동안 건조처리 후 전해질 용출은 굴거리나무에서 69.1±8.2%로 가장 높았으며, 다음으로 황칠나무 62.6±2.3%, 녹나무 60.6±9.6% 순으로 나타났다. 다른 공시수종들에서는 50% 미만으로 건조스트레스에 따른 내건성이 상대적으로 높게 나타났다. 무관수 처리 30일부턴 수종별 전해질 용출량은 굴거리나무 89.1±8.2%, 녹나무 85.6±9.6%, 황칠나무 72.6±2.3% 순으로 다른 수종들에 비해 고사율 또한 높았으며, 동백나무, 후박나무, 종가시나무, 다정큼나무의 전해질 용출은 각각 39.4~50.1%의 범위로 높은 내건성이 확인되었다. 식물 생육환경이 불량해져 세포가 파괴되면 전해질 용출 값은 증가하게 된다. 즉 식물의 전해질 용출 값이 상대적으로 작을수록 식물세포막은 덜 손상되었다고 판단할 수 있고 이는 내건성이 상대적으로 더 강하다는 것을 의미한다. 반면에 전해질 용출 값이 상대적으로 클수록 식물세포막은 더 많이 손상되었다고 볼 수 있으며, 상대적으로 내건

Table 4. Variation of the relative conductivity in the condition of non-irrigation.

Species	Electrolyte leakage <sup>y</sup> (%)					
	5day	10day	15day	20day	25day	30day
<i>C. camphora</i>	16.5±2.9d <sup>y</sup>	24.4±7.6d	38.3±3.4c	51.6±8.7b	60.6±9.6a	85.6±9.6a
<i>C. japonica</i>	15.9±3.5d	18.2±2.4d	26.3±3.0c	31.4±7.3bc	34.9±7.3ab	39.4±7.7a
<i>M. thunbergii</i>	19.5±6.6e	23.7±2.2de	25.6±5.1d	31.0±4.5c	40.8±8.3b	50.1±4.7a
<i>D. morbifera</i>	19.7±2.4f	27.0±3.9e	36.3±5.2d	45.8±6.5c	62.6±2.3a	72.6±2.3a
<i>D. macropodum</i>	18.3±4.7d	23.3±4.1d	37.3±3.1c	50.5±9.9b	69.1±8.2b	89.1±8.2a
<i>Q. glauca</i>	19.2±1.8e	21.3±4.8d	30.0±6.7cd	33.6±5.8bc	38.3±3.6ab	42.2±9.3a
<i>R. indica</i>	15.9±7.2d	18.9±2.6c	20.7±4.9c	22.9±3.9c	35.3±5.9b	40.2±5.2a

<sup>y</sup> Different letters within the columns indicate statistical differences at the 5% levels by Dunan's multiple range test.

성이 약하다고 판단할 수 있다(Chen et al., 2007). 결과적으로 20일 이상의 건조처리 후 대부분 공시수종들은 30% 이상의 전해질이 용출되었으며, 전해질 용출이 50% 이상으로 나타났던 녹나무, 굴거리나무는 건조에 대한 저항성이 낮았다. 25일 이상의 건조처리 후 녹나무, 황칠나무, 굴거리나무의 전해질 용출이 60% 이상으로 나타났으며, 25일동안 건조스트레스를 받더라도 전해질 용출이 50% 미만으로 나타났던 동백나무, 후박나무, 종가시나무, 다정큼나무는 건조에 대한 저항성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 잎의 상대함수량 비교 결과와 같이 동백나무, 후박나무, 종가시나무, 다정큼나무에 비하여 녹나무, 황칠나무, 굴거리나무의 내건성 약한 것으로 나타났으며, 30일 동안 건조처리 후 전해질 용출이 50% 미만으로 나타났던 동백나무, 종가시나무, 다정큼나무는 상대적으로 건조에 대한 저항성이 높은 것으로 분석되었다. Zhao(2013)의 연구중에서 내건성이 강한 세덤들을 대상으로 건조처리 기간에 따른 전해질유출량을 분석한 결과 39.7~48.5% 범위로 내건성이 높게 나타난 동백나무와 다정큼나무의 경향과 유사하게 나타났다. 전해질 용출정도에 따른 공시재료인 7수종의 내건성은 동백나무 > 다정큼나무 > 종가시나무 > 후박나무 > 황칠나무 > 녹나무 > 굴거리나무 순으로 나타났다.

## 6. 비선형 회귀분석에 의한 치사기간 예측

Logistic 비선형 회귀분석을 통하여 7종 식물에 대한 건조기간과 전해질 용출의 관계를 분석한 결과 측정치에 대응되는 치사온도  $LT_{50} = \ln(a)/b$ 는 Table 5와 같다. 또한 본 연구에서는 *S. reflexum* 사례로 Logistic equation을 제시하였다(Figure 2). Logistic 회귀분석은 반응곡선의 중심점인 변곡점에 해당하는 온도(T)는 최대 전해질 용출량의 50% 이상이 용출되기 시작하는 날짜이며 내건성 측정에 가장 민감하고 결정적인 부분이 된다. 아울러 식물간의 내건성을 비교하는 데에 적합한 척도가 되므로 예측 치사기간으로 평가되었다. 건조 처리기간에 따른

식물들의 예측치사기간은 22.7일에서 37.6일 사이로 나타났다. 수종별 건조처리 시 치사기간은 녹나무 22.7일, 굴거리나무 22.8일로 내건성이 가장 약하게 나타났으며, 동백나무가 37.6일로 공시수종 중 내건성이 가장 강한 것으로 나타났다. 치사기간을 통해 각 수종들의 내건성을 비교해 본 결과 동백나무(37.6일), 종가시나무(36.8일), 다정큼나무(35.3일), 후박나무(31.0일), 황칠나무(27.5일), 굴거리나무(22.8일), 녹나무(22.7일)순으로 나타났다. 이를 건조저항성으로 정리한 수종간 내건성을 비교해 보았을 때 대부분 유사하게 나타났으나, 녹나무의 치사기간(22.7일)이 관찰값(15일)보다 낮게 나타났으며, 후박나무 또한 치사기간(31.0일)이 관찰값(20일)보다 낮게 나타났다. 이러한 이유는 건조저항일 특정 시와 전해질 용출값 측정 시의 미세한 환경조건에 따라 차이가 있을 것으로 추정된다. Ryu 등(2014)도 옥상 및 벽면녹화용 지피식물의 내한성 비교연구에서 치사온도와 관찰값의 차이를 보고하였는데 재배조건에 따른 실험적 차이에 의한 원인이라고 보고한바 있다. 그러나 일련의 실험환경에 대한 정확한 구명 등의 추후연구가 요망된다. 건조기간이 길어질수록 전해질 용출량이 증가한 것은 세포막의 반투과성에 손실이 일어났기 때문이며(Sharom et al., 1994), 수종간의 내건성의 차이는 이러한 반투과성의 손실 정도에 따른 차이임을 추정할 수 있다. 또한 녹나무과의 20일 건조처리 처리구에서 전해질 용출량을 비교해 보면 후박나무의 경우 50% 미만임에 비하여 녹나무는 50% 이상의 값으로 차이를 보였다. 이러한 차나무과의 두 수종간의 형태적 차이를 보면 녹나무는 잎이 좁은 침상이나 작은 형태이고, 후박나무는 상대적으로 잎이 넓은 광엽형으로 형태적 특성에 따른 내건성의 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서 내건성에 대한 추가실험에서는 형태적 특성에 따른 비교연구 또한 필요할 것으로 판단된다. 결론적으로 동백나무, 종가시나무, 다정큼나무가 다른 수종들에 비해 상대적으로 내건성이 강하여 건조지역에 가로수 및 조경수로 적합할 것으로 판단된다. 전해질 용출량 측

Table 5. Variation of the relative conductivity in the condition of non-irrigation.

Species	logistic equation	$LT_{50}$	$R^2$
<i>C. camphora</i>	$y=100/(1+6.895e^{-0.085x})$	22.7	0.849
<i>C. japonica</i>	$y=100/(1+6.460e^{-0.050x})$	37.6	0.815
<i>M. thunbergi</i>	$y=100/(1+6.223e^{-0.059x})$	31.0	0.765
<i>D. moribifera</i>	$y=100/(1+4.631e^{-0.056x})$	27.5	0.866
<i>D. macropodum</i>	$y=100/(1+5.877e^{-0.078x})$	22.8	0.812
<i>Q. glauca</i>	$y=100/(1+4.523e^{-0.041x})$	36.8	0.648
<i>R. indica</i>	$y=100/(1+10.296e^{-0.066x})$	35.3	0.768



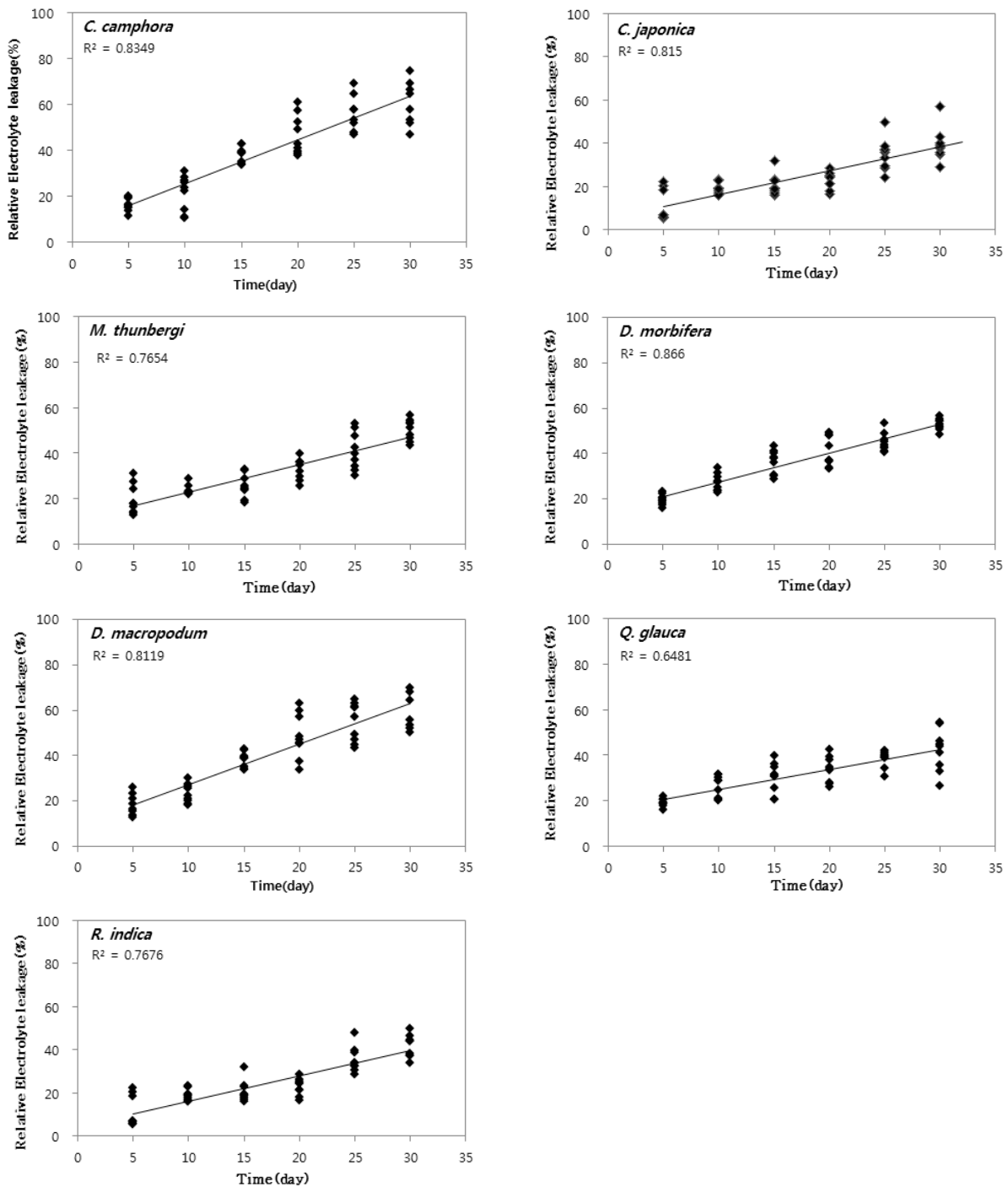


Figure 2. Logistic analysis electrolyte leakage curve for the relationship between measurements and estimates following drought treatments.

정을 통해 식물의 내건성을 용이하게 평가할 수 있었으며, 다양한 환경에서의 조사가 이루어질 필요가 있다고 생각된다. 앞으로 내건성과 고온을 받은 이후 재생률 등을 고려하여 식재계획을 수립한다면 조금 더 다양한 식생의 안정적인 경관조성이 가능할 것으로 생각된다.

## 결론

본 연구는 최근 지구온난화가 심화되면서 건조에 의한 환경스트레스에 적합한 기초 실험으로 식물 7종에 대한 내건성 평가를 시행하였다. 측정항목으로는 건조처리기간

에 따른 건조저항일, 건물생산량, 상대수분함량, Proline 함량, 전해질 용출, 수종별 치사기간 등을 분석하였다. 식물이 완전 고사하는데까지 걸린 시간은 녹나무, 황칠나무, 굴거리나무가 18일로 가장 빨랐으며, 다음으로 후박나무 20일, 종가시나무 27일, 다정큼나무 28일, 동백나무 29일순이었으나 동백나무, 다정큼나무는 실험종료일까지 고사율이 10% 이하로 나타났으며, 이와 같은 결과는 수종별 물질생산량과 유사한 경향을 보였다. 무관수에 따른 엽 수분함량은 고사일과 정(+)의 상관관계를 보였는데, 고사율이 낮았던 동백나무와 다정큼나무는 무관수 30일 째에도 실험초기와 비슷한 값을 보인 반면 나머지 식물들은 고사직전에 급격히 증가되는 경향을 보였다. Proline 함량과 전해질 유출 또한 엽 수분함량과 유사한 경향으로 나타났다. 무관수 처리에 따른 수종별 치사기간을 예측한 결과 녹나무와 굴거리나무가 22일로 가장 짧게 나타났으며, 다음으로 황칠나무 27일, 후박나무 31일, 다정큼나무 35일, 종가시나무 36일, 동백나무 37일 순으로 나타났다. 이상의 결과를 종합해 보면 엽 수분함량, Proline 함량, 전해질 유출 등 생리적 반응은 내건성 식물선정 시 평가지표로 이용할 수 있으며, 동백나무, 다정큼나무, 종가시나무는 수분스트레스에 저항하는 적응력을 보여 식재 시 이용성이 높을 것으로 판단된다.

## References

- Beadle, C.L. 1993. Grotth analysis. Photosynthesis and production in a changing environment, a field and laboratory manual. D.O. Hall, J.M.O. Scurlock. H.R. Bolhar-Nordenkamp, R. C. Leegood, and S. P. Long(Eds.), Chapman Hall, London, 36-46.
- Binzel, M.L., Hasegawa, P.M., Handa, A.K. and Bressan, R.A. 1985. Adaptation of tobacco cells to NaCl, *Plant Physiol* 79: 118-125.
- Chen, S.G. and Ding, Y. F. 2011. Measurement of drought tolerance based on rec and the logistic equation in 5 spiece of sedum. *Jiangsu Agricultural Sciences* 3: 227-230.
- Chen, J., Chen, Q., Pan, Y. and Huang, X. 2007. A study of he drought resistance of six wild bushes. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology* 28(5): 50-54.
- Choi, S.M. 2013. The study on evaluation of environmental tolerance and propagation for broad-leaved evergreen species.
- Delauney, A.J. and Verma, D.P.S. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal* 4(2): 215-223.
- Guo, Y.Q., Tang, S.M., Zhang, Y.H., Wang, K.M. and Xu, J.C. 2008. Study on drought resistance of some greening plants grown on roofs. *Chinese Journal of Tropical Acriculture*. 28(3) : 29-31.
- Hare, P.D., Cress, W.A. and Staden, J.V. 1998. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant, Cell and Environment*, 21: 535-553.
- Hong, Y.N. 2009. Introduction of Plant Physiology (4th) (eds. Hopkins, W. G., Hüner, N. P. A.), pp. 230, 244, 246-248. World Science Publishing, Seoul, Korea.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress, *Annual Review of Plant Physiology*. 24: 519-570.
- Ihm, B.S. 1993. Water Status and Photosynthetic Activities of Evergreen Broad-leaved Trees in Dadohae National Marine Park. *Korean Journal Ecology and Environment*. 16(3): 353-364.
- Kozłowski, T.T. and Pallardy, S.G. 2002. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *The Botanical Review* 68(2): 270-334.
- Kramer, P.J. and Boyer, J.S. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press.
- Lee, E.H. 2004. An analysis of research trends regarding rooftop greening in korea. *Journal Korean Environment Restoration & Revegetation Technology* 7(4): 44-51. (in Korean with English abstract)
- Leiva, M.J. and Fernandez-Ales, R. 1998. Variability in seedling water status during drought within a *Quercus ilex* subsp. *ballota* population, and its relation to seedling morphology. *Forest Ecology and Management*. 111(2-3): 147-156.
- Liu, J. and Zhu, J.K. 1997. Proline accumulation and salt-stress-induced gene expression in a salt hypersensitive mutant of *Arabidopsis*. *Plant Physiol* 114: 591-596.
- Oh, C.Y., Han, S.H., Kim, Y.Y. and Lee, J.C. 2005. Changes of drought tolerance and photosynthetic characteristics of *Populus davidiana* dode according to REG concentration. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 7(4): 296-302.
- Ritchie, G.A. 1984. Assessing seedling quality, in: Duryea, M.L., Landis, T.D. (Eds), *Forest Nursery MANUAL 1 : Production of Bareroot Seedlings*, Martinus Nijhoff Publishers, Netherlands, pp. 243-259.
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M. Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C. and Gurevitch, J. 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126: 543-562.
- Ryu, J.H., Lee, H.B., Kim, C.M., Jung, H.H. and Kim, K.S. 2014. Cold tolerance of ground cover plants for use as green roofs and walls. *Korean Journal of Horticultural*

- Science and Technology. 32(5): 590-599.
- Seki, M., Umezawa, T., Urano, K. and Shinozaki, K. 2007. Regulatory metabolic networks in drought stress responses. *Current Opinion in Plant Biology*, 10: 296-302.
- Shin, C.S. 2011. Cold tolerance assessment of *Lagerstromia indica* and *Pyracantha angustifolia* with dormant branches. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 39(6): 118-125. (in Korean with English abstract)
- Suh, J.T., Yoo, D.L., Lee, H.S., Lee, H.K., Nam, C.W., Ryn, S.Y. and Song, J.S. 2006. Selection of Drought Tolerance Wild-flowers Using of Flowerpot and Rooftop Plant. *Korean Society for People, Plants and Environment* 9(3): 1-5.
- Switzer, G.L., and Nelson, L.E. 1963. Effects of nursery fertility and density on seedling characteristics yield, and field performance of loblolly pine (*Pinus taeda* L.), *Soil Science Society of America, Proceedings*. 27: 461-464.
- Turner, N.C. 1980. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrigation. Science*. 9: 289-308.
- Xial, X., Xu, X. and Yang, F. 2008. Adaptive responses to progressive drought stress in two *Populus cathayana* populations. *Silva Fennica* 42(5): 705-179.
- Xu, Z., Liu, J., Xu, J., Zhi, T. and Yin, X. 2012. The study on drought resistance of roof greening woody plants. *Chinese Agricultural Science Bulletin* 28(1): 311-316.
- Yin, H.J., Liu, Q. and Lai, T. 2008. Warming effects on growth and physiology in the seedlings of the two conifers *Picea asperata* and *Abies faxoniana* under two contrasting light conditions. *Ecological Research* 23: 459-469.
- Zhao, H.S.H. 2013. Drought resistance assessment of ground cover plants for low management and light weight green root system. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 16(1): 83-97.

---

(Received: July 24, 2017; Accepted: December 8, 2017)