한국조경학회지 45(2) : 51~59, 2017. 4.
J. KILA Vol. 45, No. 2, pp. 51~59, April, 2017

pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2017.45.2.051

건조스트레스에 따른 옥상녹화 식물의 생리적 반응

박성식* · 최재혁** · 박봉주**

*충북대학교 대학원 원예학전공 · **충북대학교 원예과학과

Physiological Responses of Green Roof Plants to Drought Stress

Park, Seong-Sik* · Choi, Jaehyuck** · Park, Bong-Ju**

*Major in Horticulture, Graduate School, Chungbuk National University
**Dept. of Horticultural Science, Chungbuk National University

ABSTRACT

This study evaluated the drought tolerance of *Liriope platyphylla* F.T.Wang & T.Tang, *Dendranthema zawadskii* var. *lucidum* (Nakai) J.H.Park, *Hosta longipes* (Franch. & Sav.) Matsum., *Sedum sarmentosum* Bunge and *Zoysia japonica* Steud. for an extensive green roof. In order to assess drought tolerance of green roof plants, several criteria were measured such as volumetric water content, leaf and soil moisture potential, chlorophyll a and b, chlorophyll fluorescence, photosynthesis, stomatal conductance, transpiration rate and antioxidants.

The results of the drought tolerance measurement of green roof plants focused on the gradually withering of plants from lack of volumetric water content. *D. zawadskii* was the first to show an initial wilting point, followed by *Z. japonica*, *H. longipes* and *L. platyphylla* in order while *S. sarmentosum* showed no withering. It was concluded that *H. longipes*, *L. platyphylla* and *S. sarmentosum* were highly drought tolerant plants able to survive over three weeks. Furthermore, chlorophyll a and b were divided into two types: Type Ⅰ, which kept regular content from the beginning to the middle of the period and suddenly declined, like *H. longipes* and *Z. japonica*; and Type Ⅱ, which showed low content at the beginning, sharply increased at the middle stage and decreased, like *D. zawadskii*, *L. platyphylla* and *S. sarmentosum*. Volumetric water content and the amount of evapotranspiration consistently declined in all plant species. The analysis of chlorophyll fluorescence results that *S. sarmentosum*, which had relatively high drought tolerance, was the last to decline, while *Z. japonica* and *S. sarmentosum* withered after rapid reduction. At first, photosynthesis, stomatal conductance and transpiration rate showed high activity, but they lowered as the plant body closed stomata owing to the decrease in volumetric water content. Measuring antioxidants showed that when drought stress increased, the amount of antioxidants grew as well. However, when high moisture stress was maintained, this compound was continuously consumed. Therefore, the variation of antioxidants was considered possible for use as one of the indicators of drought tolerance evaluation.

Key Words: Drought Tolerance, Photosynthesis, Chlorophyll Content, Chlorophyll Fluorescence, Antioxidant

Corresponding author: Bong-Ju Park, Dept. of Horticultural Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea, Tel.: +82-43-261-2528, E-mail: bjpak@chungbuk.ac.kr

국문초록

본 연구는 저관리 경량형 옥상녹화를 위해 맥문동, 울릉국화, 비비추, 돌나물, 잔디의 내건성을 평가하였다. 옥상녹화 식물의 내건성 평가를 위해 용적수분함량, 엽과 토양의 수분포텐셜, 엽록소 a와 b함량, 엽록소형광, 광합성율, 기공전도도, 증산속도, 항산화물질을 측정하였다.

옥상녹화 식물의 내건성 측정결과, 무관수 일수가 경과하면서 용적수분함량 부족에 따라 식물은 점차 고사하는 경향을 보였다. 울릉국화가 가장 먼저 고사하였으며, 그 다음으로 잔디, 비비추, 맥문동 순이었으며, 돌나물은 고사하지 않았다. 비비추, 맥문동, 돌나물은 3주 이상 생존하여 내건성이 높은 식물로 판단되었다. 엽록소 a와 b는 두 가지 유형이 나타났는데, 초기부터 중기까지 일정한 함량을 유지 후, 급격히 감소하는 Ⅰ유형에는 비비추, 잔디와 초기에는 낮은 함량을 보이다가 중기 때 급격히 증가 후, 감소하는 Ⅱ유형에는 울릉국화, 맥문동, 돌나물로 구분되었다. 용적수분함량과 증발산량은 모든 식물 종에서 지속적으로 감소하였으며, 엽록소형광 측정결과, 내건성이 상대적으로 높은 돌나물이 가장 늦게 감소하였고, 잔디와 돌나물은 급격한 감소가 나타난 후 고사하였다. 광합성, 기공전도도, 증산속도는 초기에 높은 활성도가 나타났으나, 용적수분함량의 감소로 인하여 식물체가 기공을 닫아 낮아지는 경향을 보였다. 항산화물질 측정결과, 건조스트레스가 증가하면 항산화물질의 양 또한 증가하나, 높은 스트레스가 유지되면 이러한 화합물이 지속적으로 소비되므로, 항산화물질의 증감은 내건성 평가 지표로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 내건성, 광합성능, 엽록소함량, 엽록소형광, 항산화물질

Ⅰ. 서론

대도시는 무분별한 개발과 더불어 고도의 인구집중으로 녹지면적이 감소하고, 불투수층 포장면적이 증가하여 다양한 환경문제가 발생하게 되었다(Yoon *et al.*, 2007). 이를 해결하기 위한 방안 중 하나인 옥상녹화는 옥상이라는 인공지반 위에 녹화를 하는 공법으로, 도시열섬현상 완화, 녹지공간 확보, 건물 수명연장, 냉·난방 에너지 감소 등 많은 장점을 지니고 있다(Emilsson and Rolf, 2005; Kim *et al.*, 2012; Nagase and Dunnett, 2010; Park *et al.*, 2015). 하지만, 기존 건축물은 노후화 되어 있으며, 옥상녹화 설치를 고려하지 않은 시공 때문에 옥상녹화 설치 시 건물에 미치는 하중은 고려되어야 할 대상 중 하나이다. 옥상녹화 유형 중 관리 중량형은 200mm 이상의 토심이 필요하며, 주기적인 관수, 전정, 시비 등 집중적인 관리가 필요한데 비하여, 저관리 경량형은 최소한의 관리로 녹화를 하는 방식이지만(Lee, 2013), 기존 건축물 중 적재물이 거의 없는 옥상의 경우, 하중이 100kg·m^{-2}이기 때문에, 깊은 토심의 옥상녹화 설치 시 하중의 부담이 커 관리 중량형 옥상녹화보다 저관리 경량형 옥상녹화가 요구된다(Huh *et al.*, 2003). 하지만 하중의 부담을 감소시키기 위해, 옥상녹화에 사용되는 토양은 일반적인 토양이 아닌 인공경량토양을 많이 이용하고 있기 때문에 식재 식물은 건조에 취약할 수 있다. 옥상은 열, 건조, 일사량, 자외선, 온도 등에 의한 외부 환경조건이 일반적인 대지와 다르기 때문에, 옥상에 식재된 식물의 스트레스는 매우 크며(Mori *et al.*, 2009), 특히 여름철 건조기간에 이러한 문제점이 크게 나타난다.

따라서 옥상녹화 식물 종의 선택은 다양한 환경조건에 생존이 가능한 식물 위주로 이루어지고 있으며, 일반적으로 많이 이용되고 있는 식물은 Sedum 종이다(Durhman *et al.*, 2007; Mori *et al.*, 2009). Sedum 종은 crassulacean acid metabolism (CAM)형 식물로 야간에 기공을 열어 CO_2를 흡수하며, 주간에 기공을 닫고 광합성을 하는 특성을 지녀 건조기간에 식물체내에 수분을 보유해 건조내성이 강한 특성을 지니고 있다(Thuring *et al.*, 2010). 하지만 CAM형 식물들은 증산량이 C_3, C_4식물보다 상대적으로 적기 때문에, 온열환경 개선, 열섬현상 완화의 효과가 부족하고(Durhman *et al.*, 2006; Kim and Park, 2013), 식재 식물의 단일화는 특정 식물과 관련된 병해충의 증가를 초래할 수 있어, 옥상녹화 식재 시 다양한 종의 혼합식재는 매우 중요하다(Wolf and Lundholm, 2008).

옥상녹화의 수분관리는 식물의 생존에 중요한 요인으로(Miller, 2003), 옥상녹화 식물의 수분스트레스 내성은 옥상녹화 성공을 위해서는 필수적이다(Bousselot *et al.*, 2011; Getter and Rowe, 2007). 이에 본 연구는 무관수 처리에 의한 건조스트레스가 저관리 경량형 옥상녹화용 식물의 생리적 반응에 미치는 영향을 구명하여, 향후 옥상녹화 조성 시 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

1. 실험구 조성

2014년 4월에 옥상녹화 식물로 많이 이용되고 있는 맥문동, 잔디, 비비추, 돌나물, 울릉국화(Jung, 2008) 5종을 선정하여 펄라이트(Paraso, Kyungdong One., Korea): 원예용 상토(Wonjomix, Nongkyung Agroindustrial, Korea)를 7:3(v:v)으로 배합하여, 258×190×90(L×W×H)mm의 플라스틱 사각 용기에 채운 다음 식재하였다. 맥문동은 이때 식물을 식재하지 않고 토양만을 채운 것을 대조구로 하였다. 모든 실험구는 10반복으로 조성하였다. 그 후, 옥상에서 주 2회 빈도로 두상 관수하였으며, 시비는 5월 중순 복합비료(12N-5P-9K, Dongbu Farm Hannong, Korea) 5g·m^{-2}를 실시하면서 3달간 양생하였다. 7월 28일 충북대학교 부속농장 안에 위치한 비닐온실로 옮긴 후, 8월 8일부터 9월 5일까지 무관수 처리에 의한 내건성 실험을 실시하였다. 실험실시 24시간 전 모든 실험구에 충분한 양을 관수를 하였으며, 이후 추가적인 관수는 실시하지 않았다. 실험기간 내 비닐온실 내 온·습도는 휴대용 온·습도계(SK-L200TH II, SATO, Japan)를 이용하여 측정하였다.

2. 용적수분함량 및 생리적 변화

건조스트레스에 따른 고사일을 측정하기 위하여 실험 식물들을 매일 육안으로 관찰하였으며, 시간 경과에 따른 용적수분함량 변화는 포트 가장자리에서 20mm 떨어진 지점을 FDR센서(ML2x, Delta-T Devices, UK)를 이용하여 용적수분함량이 0%에 도달하는 시점까지 매일 오전 11시에 3반복으로 측정하였다. 건조스트레스에 따른 엽과 토양의 수분포텐셜 변화를 살펴보기 위하여 주 2회 Dewpoint potentiometer(WP4, Decagon Devices, USA)를 이용하여 식물체가 완전히 고사한 날까지 3반복으로 측정하였다. 엽 수분포텐셜 측정은 식물의 정단부에서 2~3번째 엽 중앙에 직경 10mm 크기의 샘플을 채취하여 사용하였으며, 토양의 수분포텐셜은 사각 포트 표면에서 10mm를 파고 토양을 채취하여 측정하였다.

엽록소함량은 Lichtenthaler(1987)의 방법을 이용하여 주 1회 빈도로 식물의 상위 제 3엽 중간부위 생체조직을 0.05g씩 3반복 채취하여 80% acetone(Acetone, Junsei, Japan) 6mL를 침지시킨 후 냉암소에서 48시간 추출과정을 거쳤다. 그 후 분광광도계(Optizen Voltage, Mecasys Cl., Ltd, Korea)를 이용하여 엽록소 a와 엽록소 b를 각각 663.2nm, 646.8nm에서 측정하였다(식 1 참조).

$$\text{Chlorophyll a} = 12.25\times A_{663.2} - 2.798\times A_{646.8}$$
$$\text{Chlorophyll b} = 21.5\times A_{646.8} - 5.1\times A_{663.2} \quad \text{(식 1)}$$

엽록소형광은 주 1회 빈도로 식물의 정단부에서 2~3번째 엽의 중앙에 클립을 끼우고 20분간 암상태를 유지한 후, 엽록소형광측정기(PAM2000, Walz, Germany)를 이용하여 3반복 측정하였다. 광합성능, 기공전도도, 증산속도는 식물의 정단부에서 2~3번째 엽의 중앙에 휴대용 광합성측정기(Li-6400, Li-Cor, USA)를 이용하여 주 1회 3반복으로 측정하였다. 광합성능, 기공전도도, 증산속도는 측정일의 08:00~14:00 시간 내에 측정하였으며, 광도는 400μmol·m^2·s^{-1}, 온도는 25℃, CO_2농도는 400ppm, 유속은 400μmol·m^2·s^{-1}으로 고정 후 사용하였다.

건조스트레스에 따른 항산화물질 변화를 살펴보기 위하여 총 폴리페놀함량(total polyphenol content)과 총 플라보노이드 함량(total flavonoid content)을 측정하였다. 무관수 후 초기(4일째), 중기(15일째), 후기(22일째)로 나눈 후 샘플을 채취하였으며, 동결건조기(Bondiro, IlShin BioBase, Korea)를 이용하여 시료를 건조하였다. 추출을 위하여 분쇄한 동결건조 시료 1g과 용매인 80% 에탄올을 삼각플라스크에 넣어 혼합한 다음 초음파추출기(5510R-DTH, Branson Ultrasonics Corporation, USA)를 이용하여 상온에서 30분 간 추출하였다. 초음파추출 시 삼각플라스크가 움직이지 않게 고정한 다음, 초음파추출기 바닥에 닿지 않게 하였으며, 플라스크 내 추출물은 물에 완전히 잠기게 하였다. 그 후 여과된 추출물을 80% 에탄올로 희석하여 2% 추출물로 제조하여 최종농도를 50배로 정량하였다. 제조된 추출물은 −70℃의 초저온냉동고(JP/MDF-V73V, Sanyo, Japan)에 보관하면서 분석에 이용하였다. 총 폴리페놀 함량은 Folin-Denis의 방법을 응용하여 측정하였다(Velioglu *et al.*, 1998). 추출물을 80% 에탄올로 100배 희석한 샘플을 준비한 후, 시료 0.1mL를 시험관에 넣고 2% Na_2CO_3용액(Sodium carbonate, Sigma-Aldrich, USA)을 2mL 첨가한 다음 실온에서 3분 간 방치한 후 50% F-C시약(Folin-Ciacalteu's phenol reagent, Sigma-Aldrich, China) 0.1mL를 첨가한 후, vortexing한 후 실온에서 30분 간 방치하고, 흡광도측정기(Libra S22, Biochrom, England)를 이용하여 750nm에서 흡광도를 9반복 측정하였다. 표준검량곡선 작성은 tannic acid(Tannic acid, Sigma-Aldrich, China)를 표준물질로 사용하고, 20, 50, 100, 200, 500ppm으로 희석한 다음, 각각의 희석액을 시험관에 0.1mL씩 넣은 후 2% Na_2CO_3용액을 2mL씩 첨가한다. 실온에 3분 간 방치한 후 50% F-C시약을 0.1mL 첨가한 뒤 vortexing하고, 실온에서 30분 간 방치한 뒤 750nm에서 흡광도를 측정하였다. 그 후 농도와 흡광도 사이의 그래프를 작성하고, 수식을 통하여 기울기와 R^2값을 구하였다.

총 플라보노이드 함량은 diethylene glycol 비색법을 이용하여 측정하였다(NFRI, 1990). 추출물을 80% 에탄올을 이용하여 200배 희석한 샘플을 준비한 뒤, 시료 0.2mL에 DEG (Diethylene glycol, Sigma-Aldrich, USA) 2mL, 1N-NaOH(Sodium hydroxide solution, OCI Comapay Ltd., Korea) 0.2mL를 첨가한 뒤, 37℃로 맞춰진 항온수조(WiseBath, Daihan Scientific,

Korea)에서 1시간 동안 방치하였다. 그 후 흡광도측정기를 이용하여 420nm에서 흡광도를 9반복 측정하였다. 표준검량곡선 작성은 naringin(Naringin, Sigma-Aldrich, USA)을 표준물질로 사용하였으며, 10, 25, 50, 100, 200ppm으로 희석한 다음 각각의 희석액을 시험관에 0.2mL를 넣었다. 그 뒤 DEG 2mL, 1N- NaOH 0.2mL를 각각 첨가한 뒤 37℃에서 1시간 동안 방치한 후 420nm에서 흡광도를 측정하였다. 그 후 naringin 표준용액의 농도와 흡광도 간의 검정선을 작성하고, 수식을 통해 기울기와 R^2값을 구하였다.

3. 통계처리

통계분석용 프로그램인 SAS package(Statistical analysis system, version 9.3, SAS Institute Inc., USA)를 이용하여 ANOVA(Analysis of variance) 분석을 실시한 후, 처리 평균 간 차이는 Duncan' multiple range test(DMRT)로 5% 유의수준에서 실시하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

실험기간동안 비닐온실 내 온도는 최고 48.2℃, 최저 15.3℃, 평균 25.3℃이었으며, 습도는 최고 98.1%, 최저 10.0%, 평균 57.4%, 일사량은 최고 781.7W · m^{-2}, 평균 123.8W · m^{-2}이었다. 식물의 고사일은 울릉국화가 15일로 가장 빨랐으며, 그 다음으로 잔디 17일, 비비추 22일, 맥문동 27일로 나타나, 초본류 중 비비추와 맥문동의 내건성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 돌나물의 경우, 무관수 29일까지 선단부의 엽 말림현상은 나타났지만, 하부 엽은 아무런 변화를 보이지 않았다. Sedum 종은 다른 초본 식물과 비교하여 높은 내건성을 지니며, 내건성이 강한 종은 강수량이 부족한 여름철 건조기간에 더욱 효과적이다(Bousselot *et al.*, 2011).

용적수분함량은 모든 실험구에서 무관수 이후 지속적으로 감소하였으며, 0%에 도달한 시간은 비비추가 10일로 가장 빨랐으며, 그 다음으로 울릉국화 12일, 잔디 13일, 돌나물과 맥문동이 각각 17일, 대조구 22일의 순으로 나타났다(Figure 1 참조). 대조구인 토양이 가장 늦게 0%에 도달한 이유는 식물에 의한 증산이 없고, 기온과 습도에 의한 증발만 이루어졌기 때문으로 판단된다(Park *et al.*, 2016). 비비추와 울릉국화는 다른 식물과 비교하여 상대적으로 높은 광합성율, 증산속도를 보였기 때문에(Figure 4 참조), 가장 빨리 0%에 도달한 것으로 판단된다. 무게변화에 따른 증발산 변화는 용적수분함량이 0%에 도달한 이후 완만한 감소폭이 나타났으며, 이후 초기위조점이 발생하고 고사하는 시점까지 지속적으로 완만하게 감소하였다. 토양수분의 감소는 식물과 토양에 의한 증발산으로 인한 감소이며(Million *et al.*, 2007), 무관수 처리 후, 용적수분함량의 감소는 실험조건, 방법에 따라 달라지며, 이는 식물 종, 생장단계, 토심, 일사, 포트크기, 토양성분 등에 의해서 발생한다(Bousselt *et al.*, 2011; VanWoert *et al.*, 2005). Egert and Tevini(2002)는 9일 이상 토양에 수분공급이 이루어지지 않으면, 90% 이상의 수분이 증발되고, 엽수분은 3.6% 이상 감소한다고 보고하고 있어, 무강우기간 적절한 관수는 식물의 스트레스와 고사율을 줄일 수 있다(Kramer and Boyer, 1995).

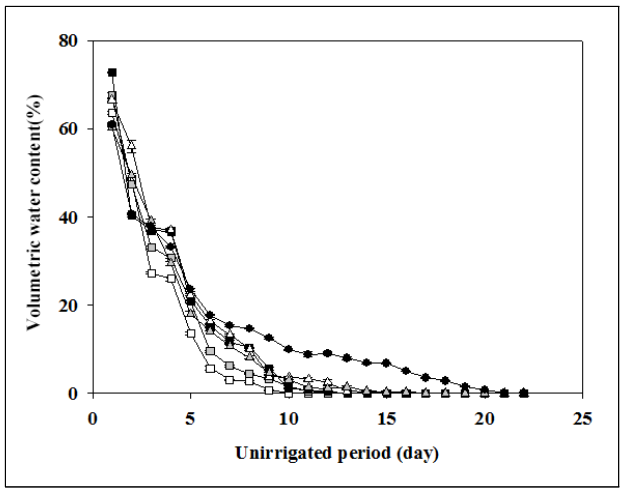

Figure 1. Changes of volumetric water content according to unirrigated period. Vertical bar means standard error(n=3).
Legend: *H. longipes* *D. zawadskii* *Z. japonica* *S. sarmentosum* *L. platyphylla* Media only

증발산에 의한 엽 수분포텐셜 측정결과, 무관수 처리 후, 모든 실험구에서 지속적으로 감소하는 경향을 보였다(Table 1 참조). 초기 엽 수분포텐셜은 돌나물이 −6.2±0.42Mpa로 가장 높았으며, 그 다음으로 울릉국화, 맥문동, 비비추 순이었으며, 잔디가 −20.3±0.68Mpa로 가장 낮았다. 맥문동 −10.2±0.12Mpa과 비비추 −10.5±0.24Mpa은 큰 차이가 나타나지 않았지만, 잔디의 경우, 다른 식물과 비교했을 때 큰 폭의 차이가 나타났다. 이후 모든 식물은 지속적으로 엽 수분포텐셜이 감소하였으며, 고사 직전 비비추, 울릉국화, 잔디는 −32.1 ~ −36.4Mpa의 범위를 나타내다가 고사하였다. 맥문동은 고사직전 −78.5±1.36Mpa를 기록하였으며, 이는 대부분의 지상부가 고사하였기 때문으로 판단된다. 돌나물의 경우, 초기 이후 지속적으로 감소하였으나, 다른 식물들과 비교하여 크게 감소하지는 않은 것으로 나타났다.

토양 수분포텐셜 측정결과, 초기에는 모든 실험구에서 0.0±0.00Mpa로 나타났으나, 무관수 8일째가 경과되면서 대조구를 제외한 나머지 실험구에서 감소하는 경향이 나타났다(Table 2 참조). 가장 많은 감소폭을 보인 식물은 비비추였으며, 고사직전 각 식물의 토양 수분포텐셜은 울릉국화와 잔디는

Table 1. Change of leaf moisture potential according to unirrigated period(Mpa)

Day[z]	Plants				
	H. longipes	*D. zawadskii*	*Z. japonica*	*S. sarmentosum*	*L. platyphylla*
1	−10.5±0.24[y]c[x]	−8.0±0.17b	−20.3±0.68d	−6.2±0.42a	−10.2±0.12c
4	−10.6±0.20b	−8.8±0.05a	−21.5±0.47d	−8.3±0.60a	−11.8±0.12c
8	−11.9±0.35b	−11.3±0.29b	−22.1±0.66d	−8.7±0.18a	−13.6±0.09c
11	−12.9±0.26b	−15.6±0.46c	−25.2±0.72d	−9.4±0.17a	−15.4±0.56c
15	−14.8±0.35b	−36.4±0.48e	−32.1±0.64d	−9.5±0.15a	−16.3±0.19c
18	−21.6±0.13b	-	-	−10.5±0.23a	−22.6±0.17c
22	−35.0±2.60b	-	-	−10.4±0.24a	−33.2±0.23b
25	-	-	-	−10.6±0.18a	−78.5±1.36b
29	-	-	-	−10.3±0.03a	-
Significance	***	***	***	***	***

[z] Measure the number of days.
[y] Values are mean±S.E.(n=3).
[x] Lowercase-letter are significantly different at $p<0.05$(DMRT).
ns, *, **, *** Non-significant or significant at $p<0.05$, 0.01, or 0.001, respectively.

Table 2. Change of volumetric water content potential according to unirrigated period(Mpa)

Day[z]	Plants					Media only
	H. longipes	*D. zawadskii*	*Z. japonica*	*S. sarmentosum*	*L. platyphylla*	
1	0.0±0.00[y]a[x]	0.0±0.00a	0.0±0.00a	0.0±0.00a	0.0±0.00a	0.0±0.00a
4	0.0±0.00a	0.0±0.00a	0.0±0.00a	0.0±0.00a	0.0±0.00a	0.0±0.00a
8	−1.4±0.12c	−0.2±0.05ab	−0.1±0.66d	−0.1±0.03ab	−0.3±0.16b	0.0±0.00a
11	−8.6±0.21f	−3.5±0.16e	−2.7±0.03d	−1.2±0.05b	−1.7±0.11c	0.0±0.00a
15	−24.6±0.57e	−22.7±0.66e	−21.8±0.83d	−8.7±0.10b	−17.7±0.41c	−0.0±0.03a
18	−34.7±0.26d	-	-	−19.0±0.41b	−27.9±0.38c	−1.0±0.40a
22	−54.1±1.48c	-	-	−21.7±1.16a	−61.3±0.59d	−26.7±1.54b
25	-	-	-	−43.5±1.04b	−67.1±1.47c	−36.0±1.11a
29	-	-	-	−89.0±1.68b	-	−52.2±1.95a
Significance	***	***	***	***	***	***

[z] Measure the number of days.
[y] Values are mean±S.E.(n=3).
[x] Lowercase-letter are significantly different at $p<0.05$(DMRT).
ns, *, **, *** Non-significant or significant at $p<0.05$, 0.01, or 0.001, respectively.

유의적인 차이가 나타나지 않았으나, 나머지 식물들은 유의적으로 큰 차이가 발생하였다($p<0.05$). 돌나물의 경우, 무관수 29일 째에 −89.0±1.68Mpa의 가장 낮은 토양 수분포텐셜이 측정되었지만, 엽 수분포텐셜은 −10.3±0.03Mpa로 엽 수분포텐셜이 우수한 것으로 판단된다. 대조구는 무관수 15일 이후 지속적으로 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 식물에 의한 증산이 없었기 때문에 식물을 식재한 실험구와 비교하였을 때 상대적으로 늦게 감소가 시작된 것으로 판단된다.

수분함량은 식물의 생존기간을 결정하는 중요한 요인이며(von Willert *et al.*, 1990), 엽과 토양 수분포텐셜의 저하는 식물의 생장을 저해하고, 기공을 닫게하여 광합성 속도를 저하시키는데(Park, 2013), 이는 각 식물의 생리작용 및 특성에 따라 민감도는 달라지게 된다(Hsiao, 1973).

엽록소함량 분석결과, chlorophyll a의 초기 함량은 비비추가 7.69±0.05μg・mL^{-1}로 가장 높았으며, 그 다음으로 울릉국화 2.95±0.16μg・mL^{-1}, 잔디 2.67±0.09μg・mL^{-1}, 맥문동 1.14±0.07 μg・mL^{-1}, 돌나물 1.07±0.01μg・mL^{-1} 순이었다(Figure 2 참조). 무관수 8일 째는 대부분의 식물에서 실험초기와 유사하였으나, 울릉국화가 6.34±0.17μg・m^{-1}로 가장 크게 증가하였으며, 돌나물도 2.02±0.03μg・mL^{-1}로 증가하는 경향을 보였다. 15일 째에는 모든 식물에서 감소되는 경향이 나타났으나, 비비추와 울릉국화가 상대적으로 큰 폭으로 감소하였다. Chlorophyll b의

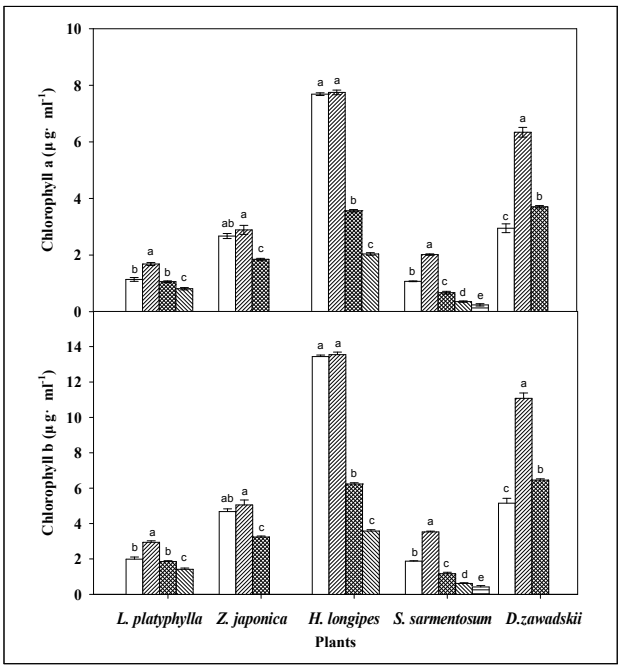

Figure 2. Chlorophyll a, b content change according to unirrigated period. Vertical bars indicate±S.E.(n=3). Bars with different lower case-letter within each plant are significantly different at $p<0.05$(DMRT)

Legend: 1 day 8 days 15 days 22 days 29 days

초기 함량은 비비추가 13.44±0.08μg · mL^{-1}로 가장 높았으며, 그 다음으로 울릉국화 5.15±0.27μg · mL^{-1}, 잔디 4.32±0.20μg · mL^{-1}, 돌나물 3.52±0.05μg · mL^{-1}, 맥문동 2.94±0.09μg · mL^{-1} 순이었다(Figure 2 참조). 이후 변화는 chlorophyll a와 유사한 경향을 보였다. 이상을 종합해 보면 건조스트레스에 따른 엽록소 a와 b함량 변화는 초기부터 중기까지는 일정하게 유지하다 급격히 감소하는 유형(Ⅰ)과 초기에는 낮은 함량을 보이다가 중기에 급격히 증가한 후 다시 감소하는 유형(Ⅱ)으로 구분되었는데, Ⅰ유형에는 비비추와 잔디가 해당되었으며, Ⅱ유형에는 울릉국화, 돌나물, 맥문동이었다. Chlorophyll 함량의 감소는 산화적 스트레스에 대한 반응으로, 건조스트레스의 증가는 엽록소함량의 감소와 관련성이 높기 때문에(Seel *et al.*, 1992; Moran *et al.*,1994; Chen *et al.*, 2001), 옥상녹화 내건성 식물선정 시 엽록소함량은 하나의 평가지표로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

엽록소형광 측정결과, 건조스트레스 초기에는 모든 식물들은 스트레스를 받지 않았으나, 시간이 경과하면서 울릉국화, 맥문동, 비비추, 잔디, 돌나물은 무관수 8일 이후 감소하였다(Figure 3 참조). 그 중 생존기간이 상대적으로 짧았던 울릉국화와 잔디는 무관수 8일째부터 다른 식물과 비교하여 상대적으로 크게 감소하였으나, 돌나물은 감소율이 가장 낮은 것으로 나타났다. 수분스트레스에 의한 호흡량 감소는 세포의 탈수가

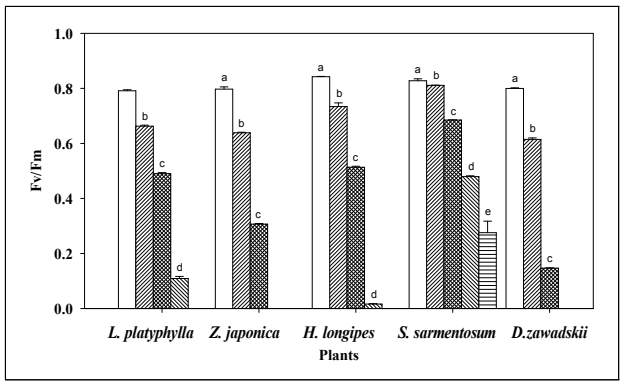

Figure 3. Change of chlorophyll fluorescence (Fv/Fm) according to unirrigated period. Vertical bars with different lower case-letter within each plant are significantly different at $p<0.05$ (DMRT)

Legend: 1 day 8 days 15 days 22 days 29 days

심하게 발생할 때이며(Park, 2013), 이는 엽록소형광 수치의 감소를 초래하므로, 울릉국화와 잔디는 건조스트레스에 민감한 종으로 판단된다. 엽록소형광의 변화는 광합성의 변화와 상관성이 있으며(Lim, 2012), 제1, 2광계의 전자수송의 상대적인 효율성과 틸라코이드(thylakoid) 막의 보존을 나타내고(Johnson *et al.*, 2002), 무강우 기간의 증가는 식물의 세포막에 큰 피해나 상처를 입히고 그 결과, 전해질 누출을 일으키기도 한다(Zhang and Li, 2012).

광합성율 측정결과, 무관수 1일 째에는 비비추가 9.1±0.04μmol · CO_2 · m^{-2} · s^{-1}로 가장 높았으며, 그 다음으로 울릉국화 7.7±0.12μmol · CO_2 · mm^{-2} · s^{-1}, 잔디 3.1±0.06μmol · CO_2 · m^{-2} · s^{-1}, 맥문동 2.6±0.07μmol · CO_2 · m^{-2} · s^{-1}, 돌나물 1.9±0.04 μmol · CO_2 · m^{-2} · s^{-1} 순이었다(Figure 4 참조). 용적수분함량이 10% 미만으로 측정되었던 무관수 8일째에는 돌나물을 제외하고는 모든 식물에서 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였는데, 비비추가 가장 크게 감소하였으며, 그 다음으로 울릉국화, 잔디, 맥문동 순으로 나타났다. 무관수 11일 이후에는 모든 식물에서 1.0μmol · CO_2 · m^{-2} · sec^{-1} 이하의 낮은 광합성율을 유지하다가 점차 감소한 뒤 고사하였다. 이러한 이유는 식물이 세포 내 함수량을 유지하기 위해 기공을 닫기 때문으로(Price *et al.*, 2002), 각 식물별 광합성능, 기공전도도, 증산속도 등의 차이는 생육, 엽, 생리학적 특성에 의한 기공 수, 엽록소 등의 차이에 의해 발생한다(Cooper and Qualls, 1967; Shearman and Beard, 1972).

광합성율은 기공 개폐와 관련성이 매우 높기 때문에, 기공전도도와 광합성율은 정(+)의 상관관계를 가진다(Lim *et al.*, 2006). 기공전도도 측정결과, 초기 기공전도도는 울릉국화가 가장 높았으며, 그 다음으로 비비추, 맥문동, 돌나물, 잔디 순이었으며, 무관수 8일째 접어들면서 모든 식물에서 급격히 감소하였다. 증산속도도 무관수 1일째에는 높게 유지되다가 8일째

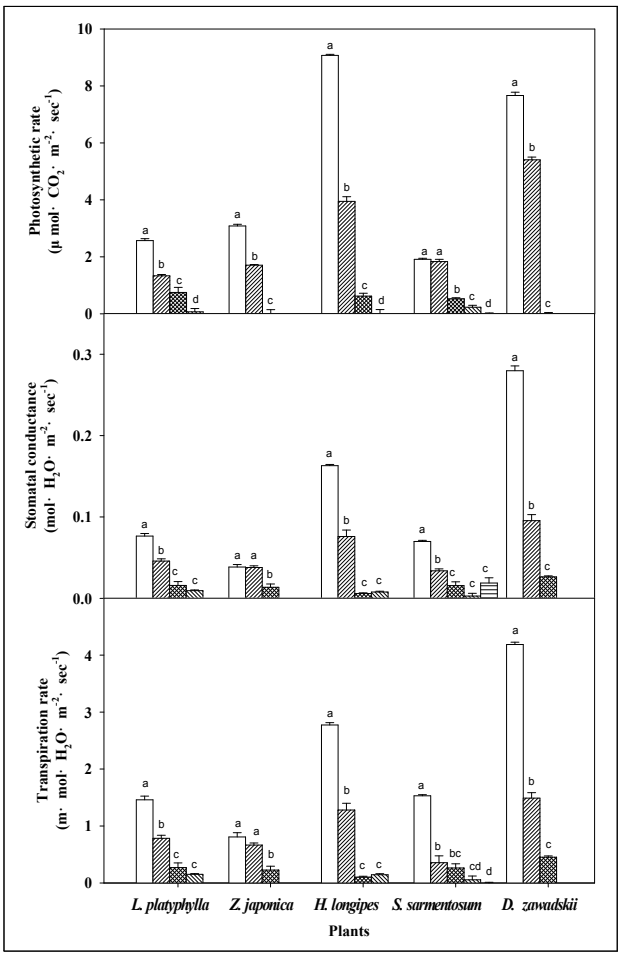

Figure 4. Change of photosynthesis, stomatal conductance and transpiration rate according to unirrigated period. Vertical bars with different lowercase-letter within each plant are significantly different at $p<0.05$(DMRT)
Legend: 1 day 8 days 15 days 22 days 29 days

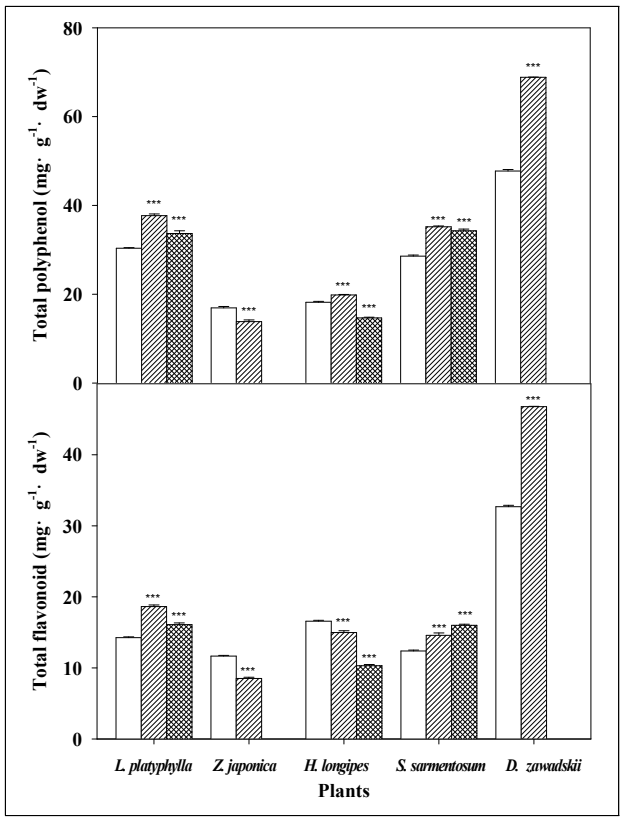

Figure 5. Total polyphenol and total flavonoid contents after 4, 15 and 22 days. Vertical bars indicate±S.E.(n=9).
*** Significant at $p<0.001$, by t-test
Legend: 4 day 15 days 22 days

에는 급격하게 감소하였다. 증산율의 감소는 수분손실에 따른 엽 수분량 부족이나 엽의 노화로 설명될 수 있으며(An *et al.*, 2008), 기공전도도와 증산속도의 감소는 토양 및 엽의 수분부족으로 인한 스트레스가 지속되면 세포 내 함수량이 줄어들기 때문이며(Price *et al.*, 2002), 식물별 기공전도도 및 증산속도 차이는 생육차이, 엽 부위의 차이, 생리학적 차이 등에 의해서 기공수가 다르고, 외부환경에 의한 차이 때문에 나타난다(Cooper and Qualls, 1967; Shearman and Beard, 1972).

항산화물질 측정결과, 총 폴리페놀은 건조스트레스가 증가함에 따라 변화하는 것으로 나타났다(Figure 5 참조). 무관수 4일 째와 비교하여 15일 째에는 울릉국화가 144.2%로 가장 많이 증가하였으며, 그 다음으로 맥문동 124.2%, 돌나물 123.2%, 비비추 109.1%, 잔디 81.7% 순으로 나타났다. 총 플라보노이드는 울릉국화, 잔디, 맥문동은 총 폴리페놀과 비슷한 결과가 나타났으나, 비비추는 지속적인 감소가 나타난 반면에, 돌나물을 증가하는 경향을 보였다. 총 폴리페놀과 총 플라보노이드는 활성산소족(reactive oxygen species)을 감소시키는 2차 대사산물 중 하나로(Lee *et al.*, 2000; Tevini *et al.*, 1983; Zhang and Kirkham, 1996), 이러한 활성산소족의 증가는 식물체의 생존에 악영향을 끼치므로, 활성산소족의 감소는 매우 중요하다(Chandra *et al.*, 1998). 항산화물질은 식물의 산화적 피해를 방어하기 위한 기작 중 하나이므로(Egert and Tevini, 2002), 항산화물질의 증감은 식물의 내건성 평가에 대한 지표로 이용 가능할 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결론

최근 도시 내 도시열섬현상, 생태계 단절 등 여러 환경문제가 심화되면서 이를 해결하기 위한 하나의 방안으로 녹지공간을 확보하려는 다양한 시도들이 시행되고 있다. 그중 하나인 건축물 옥상을 녹화하는 옥상녹화는 버려진 공간으로 인식되던 공간을 활용함으로써 대규모 토지공간 확보에 필요한 경제적 부담을 줄일 수 있고, 도시경관을 살리고, 녹지율을 확보하여 복사열 감소, 대기오염 물질 흡수, 도시홍수 예방 등 다양한

효과를 얻을 수 있다. 하지만 건축물 옥상녹화의 가장 큰 제한요인은 하중문제로 지상녹화와는 달리 토심이 낮고 경량화를 위해 인공경량토양을 많이 사용하고 있기 때문에, 식물선정 시 내건성이 강한 초종을 선정하는 것은 매우 중요한 일이다. 본 연구는 옥상녹화에 많이 이용되고 있는 맥문동, 잔디, 비비추, 돌나물, 울릉국화 5종을 이용하여 무관수에 따른 건조스트레스가 생육 및 생리적 반응에 미치는 영향을 구명하여, 향후 저관리 경량형 옥상녹화를 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다. 측정항목으로는 고사일, 용적수분함량, 엽과 토양 수분포텐셜, 엽록소 a와 b, 엽록소형광, 광합성능, 총 폴리페놀, 총 플라보노이드함량 등을 분석하였다.

완전 고사하는데까지 걸린 시간은 울릉국화가 15일로 가장 빨랐고, 그 다음으로 잔디 17일, 비비추 22일, 맥문동 27일 순이었으나, 돌나물을 실험종료일까지 전혀 고사하지 않았다. 용적수분함량이 0%에 도달할 시간은 비비추가 10일로 가장 빨랐으며, 그 다음으로 울릉국화 12일, 잔디 13일, 돌나물과 맥문동이 각각 17일, 대조구 22일 순으로 나타났다. 무관수에 따른 엽 수분포텐셜은 고사일과 정(+)의 상관관계를 보였는데, 전혀 고사하지 않았던 돌나물은 무관수 29일 째에도 실험초기와 비슷한 값을 보인 반면에, 다른 식물들은 고사 직전에 급격히 증가되는 경향을 보였다. 토양 수분포텐셜도 대조구를 제외한 나머지 실험구에서는 엽 수분포텐셜과 비슷한 경향을 보였다. 엽록소함량 분석결과, chlorophyll a와 b는 비비추가 가장 높았으며, 그 다음으로 울릉국화, 잔디, 맥문동, 돌나물 순이었다. 비비추와 잔디는 초기부터 중기까지는 일정하게 유지하다 급격히 감소하는 경향을 보였고, 울릉국화, 돌나물, 맥문동은 초기에는 낮은 함량을 보이다가 중기에 급격히 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보였다. 광합성율은 실험 초기에는 비비추가 그 다음으로 울릉국화, 잔디, 맥문동, 돌나물 순이었다. 광합성율은 기공개폐와 관련성이 매우 높기 때문에, 기공전도도와 광합성율은 정(+)의 상관관계를 보였다. 총 폴리페놀과 총 플라보노이드는 울릉국화, 잔디, 맥문동에서는 비슷한 경향을 보였다.

이상의 결과를 종합해 보면, 엽록소함량, 엽록소형광, 총 폴리페놀, 총 플라보노이드 등 생리적 반응은 옥상녹화 내건성 식물선정 시 평가지표로 이용할 수 있으며, 저관리 경량형 옥상녹화 시 세덤류인 돌나물를 포함하여 잔디, 비비추, 맥문동은 이용성이 매우 높을 것으로 판단된다. 하지만 식재기반의 종류, 혼합비, 토심 등에 따른 내건성 평가와 함께 현재 다양한 식물들이 옥상녹화에 이용되고 있기 때문에, 다양한 초본식물과 더불어 관목류 등 목본식물에 대해서도 추가적인 실험이 필요하다.

References

1. An, D. H., Y. T. Kim, D. J. Kim and J. S. Lee(2008) The effects of water stress on C_3 plant and CAM plant. Korean J. Environ. Biol. 26: 271-278.
2. Bousselot, J. M., J. E. Klett and R. D. Koski(2011) Moisture content of extensive green roof substrate and growth response of 15 temperate plant species during dry down. HortScience 46: 518-522.
3. Chandra, A., R. K. Bhatt and L. P. Misra(1998) Effect of water stress on biochemical and physiological characteristics of oat genotypes. J. Agron. Crop Sci. 181: 45-48.
4. Chen, F., S. Chen, W. Fang and J. Liu(2001) Determining heat tolerance for *Chrysanthemum vestitum* and four *Ch. morifolium* cultivars with small flowers. Acta Agric. Shanghai 17:80-82.
5. Cooper, C. S. and M. Qualls(1967) Morphology and chlorophyll content of shade and sun leaves of two legumes. Crop Sci. 7: 672-673.
6. Durhman, A. K., D. B. Rowe and C. L. Rugh(2006) Effect of watering regimen on chlorophyll fluorescence and growth of selected green roof plant taxa. HortScience 41: 1623-1628.
7. Durhman, A. K., D. B. Rowe and C. L. Rugh(2007) Effect of substrate depth on initial growth, coverage, and survival of 25 succulent green roof plant taxa. HortScience 42: 588-595.
8. Egert, M. and M. Tevini(2002) Influence of drought on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress in leaves of chives (*Allium schoenoprasum*). Environ. Exp. Bot. 48: 43-49.
9. Emilsson, T. U. and K. Rolf(2005) Comparison of establishment methods for extensive green roofs in southern Sweden. Urban For. Urban Greening 3: 103-111.
10. Getter, K. L. and D. B. Rowe(2007) Effect of substrate depth and planting season on *Sedum* plug survival on green roofs. J. Environ. Hortic. 25: 95-99.
11. Huh, K. Y., I. H. Kim and H. C. Kang(2003) Effects of artificial substrate type, soil depth, and drainage type on the growth of *Sedum sarmentosum* grown in a shallow green rooftop system. J. Korean Inst. Inter. Landscape Archit. 31(2): 102-112.
12. Hsiao, T. C.(1973) Plant responses to water stress, Annu. Rev. Plant Physiol. 24: 519-570.
13. Johnson, J. D., R. Tognetti and P. Paris(2002) Water relations and gas exchange in poplar and willow under water stress and elevated atmospheric CO_2. Physiol. Plant. 115: 93-100.
14. Jung, H. S.(2008) Plant-growth and Weed Occurrence in an Extensive Green Rooftop System. Master's Thesis, Sungkunkwan University, Seoul, Korea.
15. Kim, S. C., H. J. Lee and B. J. Park(2012) Heat budget analysis of light thin layer green roof planted with *Zoysia japonica*. J. Korean Inst. Landscape Archit. 40(6): 190-197.
16. Kim, S. C. and B. J. Park(2013) Assessment of temperature reduction and heat budget of extensive modular green roof system. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 31: 503-511.
17. Kramer, P. J. and J. S. Boyer(1995) Water Relations of Plants and Soils. Academic Press.
18. Lee, S. T., J. M. Park, H. K. Lee, M. B. Kim, J. S. Cho and J. S. Heo(2000) Component comparison in different growth stages and organ of *Saururus chinensis* Baill. Korean J. Med. Crop Sci. 8(4): 312-318.
19. Lee, Y. M.(2013) Analyzing the Centrality of Korean Cities using Land Price. Master's Thesis. Kungpook Natl. University, Daegu, Korea.
20. Lichtenthaler, H. K.(1987) Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods Enzymol. 148: 350-382.
21. 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. J. Korean For. Soc. 95: 705-710.
22. Lim, Y. J.(2012) Photosynthesis and Photoprotective Mechanisms of Environmental Stressed Plant. Ph.D. Dissertation, Kyungpook Natl. University, Daegu, Korea.
23. Miller, C.(2003) Moisture management in green roofs. Proc. 1st Greening Rooftops Sustainable Communities Conf. 1: 177-182.
24. Million, J., T. Yeager and C. Larsen(2007) Water use and fertilizer response of azalea using several no-leach irrigation methods. Hort-Technology 17: 21-25.
25. Moran, M. S., T. R. Clarke, Y. Inoue and A. Vidal(1994) Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sens. Environ. 49: 246-263.
26. Mori, I. C., S. Utsugi, S. Tanakamaru, A. Tani, T. Enomoto and M. Katsuhara(2009) Biomarkers of green roof vegetation: Anthocyanin and chlorophyll as stress marker pigments for plant stresses of roof environments. Sustainable Environ. Res. 19: 21-27.
27. Nagase, A and N. Dunnett(2010) Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. Landscape Urban Plann. 97: 318-327.
28. NFRI.(1990) Manuals of quality characteristic analysis for food quality evaluation. Natl. Food Res. Inst.
29. Park, S. S., S. C. Kim, S. Y. Hwang and B. J. Park(2015) Effect of temperature reduction of extensive green roofs. Flower Res. J. 23: 19-24.
30. Park, S. S., J. H. Choi and B. J. Park(2016) Assessment of plant drought tolerance for extensive green roof. Korea J. Org. Agric. 24: 789-795.
31. Park, Y. M.(2013) Characteristic of matter allocation of *Calystegia soldanella* under water stress. J. Environ. Sci. Int. 22(2): 187-193.
32. Price, A. H., J. E. Cairns, P. Horton, H. G. Jones and H. Griffiths (2002) Linking drought-resistance mechanisms to drought avoidance in upland rice using a QTL approach: Progress and new opportunities to integrate stomatal and mesophyll responses. J. Exp. Bot. 53: 989-1004.
33. Seel, W. E., G. A. F. Hendry and J. A. Lee(1992) Effect of desiccation on some activated oxygen processing enzymes and anti-oxidants in mosses. J. Exp. Bot. 43: 1031-1037.
34. Shearman, R. C. and J. B. Beard(1972) Stomatal density and distribution in *Agrostis* as influenced by species, cultivar, and leaf blade surface and position. Crop Sci. 12: 822-823.
35. Tevini, M., W. Iwanzik and A. H. Teramura(1983) Effects of UV-B radiation on plants during mild water stress II. Effects on growth, protein and flavonoid content. Z. Pflanzenphysiol. 110: 459-467.
36. Thuring, C. E., R. D. Berghage, and D. J. Beattie(2010) Green roof plant responses to different substrate types and depths under various drought conditions. HortTechnology 20: 395-401.
37. VanWoert, N. D., D. B. Rowe, J. A. Andresen, C. L. Rugh and L. Xiao(2005) Watering regime and green roof substrate design affect *Sedum* plant growth. HortScience 40: 659-664.
38. Velioglu, Y. S., G. Mazza, L. Gao and B. D. Oomah(1998) Anti-oxidant activity and total phenolics in selected fruits, vegetables, and grain products. J. Agric. Food Chem. 46: 4113-4117.
39. von Willert, D. J., B. M. Eller, M. J. A. Werger and E. Brinckmann (1990) Desert succulents and their life strategies. Vegetatio 90: 133-143.
40. Wolf, D. and J. T. Lundholm(2008) Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. Ecol. Eng. 33: 179-186.
41. Yoon, P. S., J. H. Lee and B. Y. Ryu(2007) Study on the plants adaptation of rooftop garden. J. Korean Soc. People Plants Environ. 10(2): 1-7.
42. Zhang J. and H. Y. Li(2012) Study on drought resistance of *Sedum* in extensive green roofs. World Automation Congr. p.1-3.
43. Zhang, J. and M. B. Kirkham(1996) Enzymatic responses of the ascorbate-glutathione cycle to drought in sorghum and sunflower plants. Plant Sci. 113: 139-147.

Received : 17 February, 2017
Revised : 06 March, 2017 (1st)
15 March, 2017 (2nd)
Accepted : 15 March, 2017
3인익명 심사필