지피식물을 이용한 우수저장형 옥상녹화 시스템 및 식물 내건성 평가[†]

강태호* · 조홍하**

*동국대학교 경주캠퍼스 조경학과 · **中國聊城大學 農學院

Assessment of Roof-rainwater Utilization System and Drought Resistance of Ground Cover Plants

Kang, Tai-Ho* · Zhao, Hong-Xia**

*Dept. of Landscape Architecture, Gyeongju Campus, Dongguk University

**Agricultural College, Liaocheng University, China

ABSTRACT

In order to evaluate 2 extensive green roof systems(Sedum Box Roof System and Roof-rainwater Utilization System) for urban greening and select ground-cover plants, which can adapt well to the drought tolerance in an extensive green roof system on 12 species. This study was carried out in order to suggest an experimental base in assessment of the Green Roof-rainwater Utilization System and selecting the drought resistance of plants. Adopting the natural drought method, this paper studies the drought resistance of 12 kinds of ground cover plants. The drought-resistance of ground cover plants subjected to dry processing time were evaluated using relative water content on leaves, relative electric conductivity and chlorophyll content in 12 kinds of plants, and the relation between soil water content under drought stress. Drought resistance of the plants were subject to rooftop drought resistance treatments. The result showed that with the increase of stress time, the relative water content and chlorophyll content on leaves were in a downward trend while the relative electric conductivity was in an upward trend. Among the 12 species of ground cover plants, excluding *Pulsatilla koreana*, *Ainsliaea acerifolia* was selected for rooftop plants because they showed resistance to drought strongly and took adaptive ability. These results showed that drought tolerance of plants in Roof-rainwater Utilization System were stronger than the Sedum Box Roof System. Therefore, the Roof-rainwater Utilization System is good for plants. It helps them adapt well to the drought tolerance in rooftops and can be used for urban greening.

Key Words: Relative Water Content, Soil Temperature and Humidity, Rainwater Utilization, Electric Conductivity

국문초록

이 연구는 2종의 저관리 · 경량형 옥상녹화시스템(세덤박스과 우수저장형 옥상녹화시스템)을 대상으로 옥상녹화 효과를 평가하

[†]: 이 연구는 2010년 중소기업청 산학연 공동기술개발 사업 연구비 지원에 의해서 수행하였음.

Corresponding author: Hong-Xia Zhao, Agricultural College, Liaocheng University, China, Liaocheng, 252000, Tel.: +82-15763538338, E-mail: zhaohxia1314@163.com

기 위해 옥상의 건조한 조건에 잘 견딜 수 있는 내건성 식물 12종을 대상으로 실험을 실시하였다. 실험은 우수저장형 옥상녹화시스템의 기초 연구를 위해 식물의 내건성을 평가하였다. 식물의 내건성 평가를 위해 무관리 조건에서 12종 식물의 건조스트레스의 저항성을 평가하였다. 내건성 평가는 처리 시간에 따라 12종 식물의 상대수분함량의 변화, 전해질 용출 평가, 엽록소 함량의 변화, 토양수분과 건조 스트레스와의 관계를 연구하였다. 건조처리 시간이 길수록 식물들의 상대수분 함량과 엽록소 함량이 감소하면서, 전해질 용출이 증가하였다. 따라서 식물의 내건성 평가 결과, *Pulsatilla koreana*, *Ainsliaea acerifolia*를 제외한 10종이 내성이 강하여 옥상녹화에 적용 가능한 종으로 판단되며, 우수저장형 옥상녹화 시스템에서 식물들의 내건성은 식생박스의 식물들보다는 강한 것으로 나타났다. 따라서 우수저장형 옥상녹화 시스템이 식물의 생육과 건조조건에 대한 저항성 증진 효과가 있는 것이 증명되어 도시 옥상녹화에 이용할 수 있다.

주제어: 상대수분 함량, 토양 온습도, 우수저장량, 전해질 용출

1. 서론

급속한 도시화로 인해 도시환경이 악화되었고, 도심열섬화 현상이 증가되었다. 도시내 녹지면적이 감소하여 이를 해결할 수 있는 방안으로 옥상녹화에 대한 관심이 집중되고 있다.

옥상은 복사열에 의한 상층부의 고온화 현상과 폭우에 의한 식물의 생존능력이 저하된다. 또한 바람이 강하고 건조하여 항상 수분이 부족하며 증발로 인한 식물의 탈수를 가증시키는 등의 단점이 있다. 그러므로 식물의 생육을 건전하게 유지할 수 있는 저관리형 옥상녹화시스템의 연구가 필요하다.

최근 옥상녹화 공법에 대한 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 토양배합과 저토심에 관한 연구로는 이은희 등(2005)은 코코넛 섬유소와 더스트를 배합한 토심 10cm와 매트 3cm로 구성된 총 13cm의 낮은 생육기반에서도 식물의 생육이 가능한 것으로 평가하였다. 저토심 옥상녹화공법으로 최진우 등(2009)은 세립토양필터가 붙은 1cm 롤형 배수판 위에 7.5cm 두께의 암면매트를 설치, 그 위에 4.5cm의 상토층(발포세라믹:수피:감람석=6:3:1)을 조성하여 배수판을 포함한 전체 토심 13cm의 구조에서 기린초, 애기기린초, 돌나물 등이 양호한 생육을 보였으며, 저비용으로 옥상녹화가 가능하였다.

옥상녹화 시스템에 도입된 식물의 환경 저항성은 시스템 유지력에 있어 중요한 요소가 되며, 이는 도시의 생태 환경 개선 효과와 밀접한 관련이 있다. 특히 온도와 수분 환경은 시스템에 도입될 식물의 생육 가능 기간을 결정하므로, 시스템에 적용된 식물의 내건성 평가가 필요하다. 저관리에 대한 적합성을 평가하기 위해서는 건조스트레스 저항성에 대한 연구가 필요하다.

특히 저관리형 옥상녹화 식물은 고온 및 건조에 의한 식물의 생존능력 저하 현상이 나타나고 있어, 적용 식물에 대한 실증연구가 필요하다. 특히 이들 옥상녹화 시스템에 도입된 식물중에 대하여 여름철 고온과 건조를 거친 후 생육평가가 요구된다. 내건성 및 옥상녹화와 관련하여 이정식 등(2003)은 저관리·

경량형 옥상녹화 피복용 지피식물로 *S. sarmentosum*, *S. aryzifolium*, *S. polytrichoides* Hemsl., *S. spectabile* Boreau, *S. kamtschaticum* 등을 선발하였는데, 이 식물들은 대부분 다육식물로 내건성이 강한 식물로도 선발되어 옥상녹화에 적합한 종으로 나타났다. 옥상녹화에 많이 이용되고 있는 *S. lineare*, *S. sarmentosum* 강한 저항성을 보였고, 관상 가치도 높았으며, 옥상에서 광범위로 이용되고 있었다(Zhao *et al.*, 2011). Huang *et al.*(2007)은 5종 세덤들을 대상으로 건조, 고온, 저온 등 저항 실험을 실시하였으며, *S. lineare*, *S. sarmentosum*, *S. emarginatum* 등이 안전하게 적응할 수 있었다.

기존 식물의 내건성 평가는 세덤류 위주로 연구하였고, 건조스트레스를 받아 토양의 수분함량, 상대습수량(RWC), 전해질 용출, SOD와 엽록소 함량 등의 변화 측정을 통하여 식물의 내건성을 종합적으로 평가하였다(Zhang *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2011). 그 결과, SOD와 엽록소 함량은 건조스트레스에 대한 중요한 역할을 가지고 있는 것으로 밝혀졌다. 건조처리시간이 길어지면서 세덤 식물의 전해질 용출은 증가하였다. Lu *et al.*(2011)의 연구에서는 인공 수분스트레스를 모의하여 세덤류 식물들을 위주로 분석하였으며, 내건성은 *S. spectabile* Borea>*S. spurium* cv. *coccineum*>*S. sp.*>*S. hybridum*>*S. nicaeense*의 순으로 나타났다.

기존의 연구에서 우수이용과 관련된 내용은 있으나, 우수활용의 효과와 관련된 연구는 없다. 본 연구에서는 자연 에너지를 절약하기 위한 저수형 옥상녹화 시스템을 개발하기 위하여 수행하였다. 기존의 저관리형 옥상녹화 시스템과 대비하며, 식물의 저항성 평가를 통하여 무관리 조건에서 적용 가능한 식물 선발 및 우수저장형 옥상녹화 시스템의 종합적 평가로 구성된다. 옥상녹화 식물소재는 관상 가치와 내건성이 높은 세덤류 6종과 초화류 6종을 대상으로 하였다. 무관리 옥상녹화에서 식물생육을 평가하기 위하여 세덤박스 옥상녹화시스템과 우수저장형 녹화시스템을 비교하여 각 시스템의 우수저장능력, 토양 온습도, 피복률, 식물의 내건성 위주로 평가를 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 장소 및 재료

연구는 2011년 4월부터 동국대학교 경주캠퍼스 자연과학관 옥상에 실험구를 설치하여 진행하였다. 연구 대상지는 연평균 기온은 12.5℃, 강우량은 1,157mm이며, 여름에는 태풍의 영향을 4차례 받았다.

2. 실험용 옥상녹화시스템

연구를 위한 식재기반은 저관리경량형 세덤박스((주)이텍)와 저관리 옥상녹화를 위해 개발된 우수저장형 녹화시스템을 이용하여 실험을 실시하였다. 연구결과를 통하여 국내 도시 환경에 적용 가능한 최적의 저관리 옥상녹화시스템을 제안하고자 한다.

개발된 우수저장형 시스템 구성요소는 배수 및 저수판, 부직포, 토양층으로 이루어졌다. 우수저장형 옥상녹화시스템은 500×500×500mm의 크기로 저수와 배수 일체화된 옥상녹화시스템으로 하단에 28cm 높이의 빗물 저류판이 있어 이로 인해 빗물에만 의존하여 식물생육에 필요한 수분공급이 가능하므로 별도 관수가 필요 없다(Figure 1 참조).

3. 육성토양 및 식재

인공토양의 배합비는 토양의 보수성과 배수성을 고려하고 식물 성장에 적합한 유기물 요소를 기준으로 만들었다. 옥상녹화용 토양은 시장성이 좋은 펄라이트와 원예용 상토 배합으로 대비하여 실험용 토양을 만들었다. 토양배합은 저관리 옥상녹

Table 1. Growth characteristics of plants in this experiment

식물	일반적 생육 특성
리플렉섬 <i>S. reflexum</i>	초장 10cm, 개화 7월, 노란색, 원산지: 산지
흰꽃세덤 <i>S. album</i>	초장 2~10cm, 개화 7월, 흰색, 원산지: 옥상녹화나 암석원 녹화
섬기린초 <i>S. takevimensae</i>	초장 50cm, 개화 7월, 황색, 원산지: 울릉도
애기기린초 <i>S. middendorffianum</i>	초장 약 20cm, 개화 6~8월, 노란색, 원산지: 강원도·함경도, 평안도 고산지대
분홍세덤 <i>S. spurium</i>	초장 5~10cm, 원산지: 남부지방이나 중부지방
층층이평의비름 <i>S. sieboldii</i>	초장 15cm, 개화 8~9월, 분홍색, 원산지: 일본, 용도: 실내 및 옥상녹화
상록패랭이 <i>Dianthus chinensis</i>	초장 30cm, 개화 7~8월, 상록식물, 지성, 식물이고 건조에도 강한
소엽맥문동 <i>Ophiopogon japonicus</i>	초장 7~12cm, 개화 5월, 연한 자주색, 남부지방의 산에서 자라는 다년생 초본
흰제비꽃 <i>Viola patrinii</i>	초장 약 10cm, 개화 4월, 흰색, 자주색, 다년생 초본으로 원산지는 한국
할미꽃 <i>Pulsatilla koreana</i>	초장 30~40cm, 개화 4월, 자주색, 양지바른 곳의 토양이 중성화된 곳임
단풍취 <i>Ainsliaea acerifolia</i>	초장 35~80cm, 개화 7~9월, 흰색, 산에서 흔히 자람
김의털 <i>Festuca ovina</i>	초장 30~50cm, 개화 6~8월, 건조한 곳에서 자람

화에 주로 활용되는 펄라이트, 피트모스, 버미큘라이트를 부피 비율에 따라 펄라이트:피트모스:버미큘라이트=2:1:1(v/v/v)을 혼합하여 사용하였다.

옥상녹화용 식물재료는 키가 너무 크지 않으며, 치밀하게 표면을 덮고, 토심의 제약을 받으므로 내건성이 우수한 식물이어야 한다(조용현과 한규희, 2009). 따라서 본 연구에서 건조에 잘 견딜 수 있는 지피식물로 리플렉섬, 섬기린초, 애기기린초, 흰꽃세덤, 분홍세덤, 층층이평의비름, 상록패랭이, 소엽맥문동, 흰제비꽃, 할미꽃, 단풍취, 김의털 등 비교적 건조에 강한 12종을 선정하여 실험하였다. 이들은 모두 자생종으로 국내 환경에서 안정적인 생육을 기대할 수 있고, 다양한 생육 형태를 지니고 있어 비교적 정확한 시스템 평가가 가능할 것으로 예측되어 선정하였다. 2011년 4월 20일에 두 가지 옥상녹화시스템에서 3차 포트에 심겨진 묘를 구입하여, 이들 중에 균일한 식물체를 선발하여 6주 4반복으로 식재하였다. 식재 후 충분히 관개하였고 이후부터는 자연 강우로 관리하였다(Table 1 참조).

4. 시스템에 따른 식물생육 평가

식물생육 측정은 2011년 4월부터 2012년 10월까지 피복률과 엽록소함량, 지상부 생육을 지속적으로 모니터링을 실시하여 식물의 내건성을 평가하였다.

Figure 1. Structural model of rainwater collection system used in the experiment

피복률의 측정은 각 처리구의 크기로 설치된 조사구 위에서 등비율로 사진촬영을 하고, AutoCAD 2009(Autodesk, 2008)를 이용하여 그 면적을 산출하였다. 산출방법은 시스템별 식재구역 위에서 등비율로 사진촬영한 후, 식재구역 내외의 해당식물 피복면을 선으로 표시하고, 피복면적과 피복률을 산출하였다. 엽록소 함량 측정은 휴대용 엽록소 측정기(SPAD-502, Minolta)로 2개월마다 1회씩, 식물체의 생장점에서 2~3번째 완전히 전개된 잎의 중앙부위 부근을 10회 반복하여 측정한 값의 평균치로 하였다. 측정기간 중 강우가 내릴 경우 한 주 뒤에 측정하였다.

토양수분 및 온도는 디지털 토양 수분측정기(GMK-770S, GMK, 2011)를 이용하여 토양의 온도 및 건조수분을 측정하였다. 식물의 내건성을 평가하기 위하여 옥상에 계속 무강우가 기록되었던 날인 6월 8일(25일 무강우), 8월 2일(15일 무강우) 오전 10시에 식물의 상대함수량은 식물체의 생장점 주변 3~4번째 잎을 0.5g 채취하여 비커에 증류수와 함께 넣었다가 약 24시간 정지 처리한 다음, 잎의 포함함수량을 측정한 후 120℃의 건조기에서 4시간 동안 열처리를 하였다(Eq. 1 참조).

$$RWC(\%) = (FW - DW) / (SFW - FW) \quad (\text{Eq. 1})$$

FW = Fresh weight(0.5g)

SFW = Saturated fresh weight

DW = Dry weight

자연환경에 고온과 건조를 견딘 식물을 취하여 잎을 증류수로 3번 씻어 물을 흡수시킨 후, 0.5g의 표본 조직을 취하여 30mL 용량의 마개가 있는 시험관에 15mL의 증류수와 함께 넣었다. 이 시험관을 약 12시간 동안 처리하고, 전기전도도측정기(Conductivity Meter CM-40S, TOA Electronics Ltd, Japan, 2001)를 사용하여 침출액의 초기 전기전도도를 측정 후, 80℃의 열수욕에서 1시간 동안 열처리를 하였다. 열수욕에서 꺼낸 후에는 4시간 두었다가 다시 침출액의 최종 전기전도도를 측정하였다(Eq. 2 참조) 열처리로 고사시킨 식물 조직은 침출액의 전기전도도에 대한 건조처리 후 식물 조직 침출액 전기전도도의 비를 백분율로 산출하였으며, 산출식은 다음과 같다.

$$REC(\%) = (R_c - R_o) / (R_b - R_o) \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

R_c = Initial electrolyte leakage

R_b = Final electrolyte leakage

R_o = Baseline level of electrolyte leakage

측정된 자료에 대한 통계분석은 SPSS Ver.11.5를 이용해 Duncan의 다중범위검정(Multiple range test)을 실시하여 유의성을 검증하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우량 및 우수 저장량의 변화

2011년 7월 4일부터 11월 4일까지 강우량과 우수저장형 시스템의 우수저장량을 조사한 결과(Figure 2 참조), 7월의 강우량은 237.7mm로 나타났으며, 8월에는 115.7mm, 9월에는 39.2mm, 10월에는 99.0mm로 측정되었다. 7월 31일에 우수저장형 시스템의 우수저장량은 155.6mm로 나타났으며, 8월 31일 144.2mm, 9월 30일 112.1mm, 10월 31일 126.7mm로 측정되었다. 그 동안 최대 우수저장량은 235.7mm에 달하였으며, 평균 우수저장량은 153.7mm로 측정되었다.

2012년 4월 1일부터 8월 4일까지 강우량과 우수저장형 옥상녹화 시스템의 우수저장량을 조사한 결과(Figure 3 참조), 4월의 강우량이 115.6mm로 나타났으며, 5월은 45.8mm, 6월은 73.7mm, 7월은 165.4mm로 측정되었다. 4월 30일에 우수저장형 옥상녹화 시스템의 우수저장량은 91.3mm로 나타났으며, 5월 31일은 105.0mm, 6월 31일은 114.8mm, 7월 30일은 144.6mm로 측정되었다. 그 동안 최대 우수저장량은 162.1mm에 달하였으며, 평균 우수저장량은 106.1mm로 측정되었다.

2. 녹화 시스템의 토양 온도 및 습도의 변화

식재된 식물의 종류와 녹화 시스템에 따른 토양의 온습도변화는 *S. album*이 식재된 시스템별 토양의 온도 변화를 조사한 결과(Figure 4, 5 참조), 4월부터 5월말까지 토양의 온도는 우수저장형이 16.1~36.3℃, 세덤박스가 15.6~33.6℃의 범위로 측정되었다. 날씨가 가장 더운 시기인 7월부터 8월까지 시스템별 토양 온도의 변화는 우수저장형이 24.8~43.5℃, 세덤박스가 24.0~42.0℃의 범위로 측정되었다. 김기형(2008)은 한국건설기술연구원 실험 자료를 통해서 여름철의 경우 주간 시간대의 외기 온도보다, 옥상녹화시스템이 8℃ 정도 낮은 온도 분포를 보이고, 콘크리트 표면은 15℃ 정도 높은 온도를 보여주고

Figure 2. Water storage capacity and the amount of rainfall from July to October 2011

Figure 3. Water storage capacity and the amount of rainfall from April to August 2012

Figure 4. Effects of different systems on soil temperatures with *S. album* from April to May 2012

Figure 5. Effects of different systems on soil temperatures with *S. album* from July to August 2012

Figure 6. Effects of different systems on soil temperatures with *S. takevimensense* from April to May 2012

Figure 7. Effects of different systems on soil temperatures with *S. takevimensense* from July to August 2012

있다고 하였다.

4~5월의 토양 평균온도는 우수저장형이 26.5°C, 세덤박스에서는 25.2°C로 나타났다. 7~8월에 대기온도가 가장 높은 시절에 토양 평균온도는 우수저장형이 36.7°C, 세덤박스가 35.3°C로 측정되었다. 결과적으로 *S. album* 같은 식물들을 적용한 우수저장형 옥상녹화 시스템의 토양온도가 세덤박스의 온도보다 더 높은 것으로 나타났다.

*S. takevimensense*가 식재된 시스템별 토양온도 변화를 조사한 결과(Figure 6, 7 참조), 4월부터 5월 말까지 토양온도는 우수저장형이 16.1~34.8°C의 범위로 나타났고, 세덤박스가 15.6~32.8°C의 범위로 측정되었다. 7월부터 8월까지 옥상녹화시스템별로 토양온도의 변화를 조사한 결과, 우수저장형이 26.0~

41.5°C의 범위로 나타났고, 세덤박스가 25.0~39.3°C의 범위로 측정되었다.

4~5월의 토양 평균온도는 우수저장형이 25.5°C, 세덤박스에서는 25.2°C로 측정되었다. 7~8월에 대기온도가 가장 높은 시절에 토양 평균온도는 우수저장형에서는 34.9°C, 세덤박스에서는 35.3°C로 측정되었다. 결과적으로 *S. takevimensense*의 우수저장형에서 토양온도는 세덤박스의 온도보다 더 낮은 것으로 측정되었다. 전체적으로 *S. takevimensense*의 토양 평균온도가 더 낮았으며, 옥상녹화 시 생태적 효과가 더 뚜렷하게 나타났다. 이춘우 등(2011)에서는 혼합초를 식재한 실험구의 평균온도가 28.4°C로 가장 낮게 측정되었으며, 플랜트(화분)로 식재했던 실험구의 온도가 28.7°C로 가장 높게 측정되었다. 옥상녹화는 미기후완화, 온도저감과 함께 단열재의 역할을 함으로써 건물 내부의 온도까지 낮추어 줄 수 있다.

2012년 4월 1일부터 5월 31일까지 토양수분함량을 조사한 결과(Figure 8 참조), 평균 토양수분함량은 우수저장형에서 18.8%, 세덤박스에서는 9.6%로 측정되었다. 토양의 최대 수분함량은 우수저장형에서는 36.5%, 최소 토양수분함량이 9.7%로 나타났다. 세덤박스 같은 경우는 최대 토양수분함량이 15.6%, 최소 토양 수분함량은 5%로 나타났다. 우수저장형 옥상녹화 시스템

Table 2. Vegetation coverage by different systems(2011~2012)

Species	Vegetation coverage(cm ²)						
	Rainwater storage system			Sedum box			
	16. Apr.	15. Jun.	15. Aug.	16. Apr.	15. Jun.	15. Aug.	
<i>S. reflexum</i>	7.2b	9.3c	10.5d	6.5a	8.2c	9.0c	
<i>S. takevimensense</i>	10.5d	19.6e	23.5e	6.5a	12.5	14.1d	
<i>S. middendorffianum</i>	8.9c	12.1d	13.5d	5.9a	10.5d	11.3d	
<i>S. album</i>	10.5d	12.1d	13.2d	8.9c	9.1c	9.2c	
<i>S. spurium</i>	5.6a	6.2a	6.8b	9.6d	10.1d	10d	
<i>S. sieboldii</i>	6.8b	8.5c	-	6.9b	11.3d	-	
<i>Dianthus chinensis</i>	10.5d	13.2d	13.5d	5.9a	10.2d	11.5d	
<i>Ophiopogon japonicus</i>	6.5a	7.6b	8.2c	6.7b	7.2b	8.1c	
<i>Viola patrinii</i>	6.2az	7.6b	9.1c	4.2a	5.1a	-	
<i>Pulsatilla koreana</i>	5.9a	6.8b	-	5.6a	8.9c	-	
<i>Ainsliaea acerifolia</i>	6.1a	7.0b	-	6.6b	7.9c	-	
<i>Festuca ovina</i>	5.6a	6.5a	7.1b	4.6a	5.2a	5.6a	

^z Means followed by different letters within columns are significantly different at $P=0.05$ by Duncan's multiple range test.

^{a-c} Means in a row by different superscripts are significantly different at the $P\leq 0.05$ by Duncan's multiple range test. Numbers in the same range followed by the same letter were data indistinctly different at $P=0.05$ lever according to DMRT.

Figure 8. Effects of different systems on soil humidity with *S. takevimensense* from April 1, 2012 to May 31, 2012

Figure 9. Effects of different systems on soil humidity with *S. takevimensense* from July 1, 2012 to August 31, 2012

에서 토양의 수분함량은 9% 이상으로 유지하여 식물들의 생육에 필요한 수분이 유지될 수 있는 것으로 판단된다.

2012년 7월 1일부터 8월 31일까지 토양수분함량을 조사한 결과(Figure 9 참조), 평균토양수분함량은 우수저장형에서는 24.4%, 세덤박스에서는 11.1%로 측정되었다. 우수저장형에서는 토양의 최대 수분함량은 38.7%, 최소 수분함량은 11.0%로 나타났다. 세덤박스에서는 최대 토양수분함량은 14.6%, 최소 토양수분함량은 5.6%로 나타났다. 7월부터 8월까지의 우수저장형에서는 토양수분함량을 11% 이상으로 유지되었다.

3. 식물의 생육 평가

1) 시스템에 따른 피복율의 변화

식재 1년 후인 2012년 4월 17일부터 8월 15일까지에 12종 식물체 피복율을 측정한 결과(Table 2 참조), 통계적 유의성에서 차이가 나타났지만, 7월 이후에는 시스템에 따른 상호 유의차를 보였다. 우수저장형에서 *S. takevimense*가 23.5cm²로 가장 큰 값이 나타났으며, 세덤박스에서는 14.1cm²로 나타났고, 통계적 유의성 차이가 뚜렷하게 나타났다. *S. middendorffianum* 같은 경우는 우수저장형에서는 13.5cm²로 나타났고, 세덤박스에서는 11.3cm²로 측정되었다. *S. album*과 *S. spurium*의 초폭은 두 개 시스템에서는 비슷한 수치를 보였다. *S. sieboldii*는 7월에 고온과 건조를 거쳐 8월에 고사되었다. *Dianthus chinensis*에서는 우수저장형에서는 더 양호한 생육상태를 보였으며, 초폭은 13.5cm²에 달하였고, 세덤박스에서는 11.5cm²로 측정되었다. *Ophiopogon japonicus*는 우수저장형에서 번식 능력이 강하게 나타났으며, 식물의 생육상태가 아주 양호하게 보였고, 8.2cm²로 나타났다. *Viola patrinii*는 세덤박스에서는 생육상태가 좋지 않고 8월에 고사되었지만, 우수저장형에서는 생육상태가 양호한 것으로 나타났다. *Pulsatilla koreana*, *Ainsliaea acerifolia*, *Farfugium japonicum*은 7월과 8월 사이의 고온과 건조를 견디지 못하였고, 8월초 다 고사되었지만 털머위는 8월에 우수저장형에서는 다시 살아났다. 전반적으로 우수저장형 옥상녹화 시스템에서의 식물들의 성장량이 실험기간 동안 지속적으로 높은 값을 나타냈고, 양호한 생육상태를 보였다.

2) 엽록소 함량

엽록소 함량은 식물의 식물생육과 밀접한 관계가 있다. 시스템에 따른 식물의 엽록소 함량 측정값을 평균으로 계산한 결과(Table 3 참조), 2012년 6월 15일에 우수저장형에서는 *S. reflexum*이 16.5로 가장 높은 값으로 측정되었으며, 세덤박스에서는 10.6~15.4로 나타났다. 6월 15일에 두 가지 시스템에서 엽록소 함량이 증가하였다. 우수저장형에서는 *S. takevimense*의 엽록소 함량은 35.4로 가장 높게 측정되었고, 세덤박스에서

Table 3. Effects of green roof systems on chlorophyll content of 13 species of plants from 2011 to 2012

Species	Chlorophyll (SPAD)					
	Rainwater storage system			Sedum box		
	16. Apr.	15. Jun.	15. Aug.	16. Apr.	15. Jun.	15. Aug.
<i>S. reflexum</i>	15.2a	16.5az	14.2a	14.5a	15.4a	10.6a
<i>S. takevimense</i>	28.5d	35.4e	33.2e	26.5d	32.6e	30.5e
<i>S. middendorffianum</i>	30.1d	32.2e	31.5e	24.3c	33.6e	26.8d
<i>S. album</i>	15.6a	18.4b	15.6a	14.7a	17.2b	9.4a
<i>S. spurium</i>	30.1d	32.2e	33.1e	25.6d	35.6f	30.1e
<i>S. sieboldii</i>	26.6d	34.5e	-	25.7d	33.5e	-
<i>Dianthus chinensis</i>	23.6c	25.5d	20.3c	21.6c	27.5d	24.6c
<i>Ophiopogon japonicus</i>	20.4c	25.6d	16.5a	19.8b	24.9c	19.3b
<i>Viola patrinii</i>	23.6c	28.5d	20.6c	20.1c	25.6d	-
<i>Pulsatilla koreana</i>	28.6d	34.6e	-	26.4d	32.9e	-
<i>Ainsliaea acerifolia</i>	30.2d	33.6e	-	28.5d	35.6f	-
<i>Festuca ovina</i>	21.3c	25.4d	22.3c	20.3c	24.5c	21.2c

^z Means followed by different letters within columns are significantly different at $P=0.05$ by Duncan's multiple range test.

^{a-e} Means in a row by different superscripts are significantly different at the $P<0.05$ by Duncan's multiple range test. Numbers in the same range followed by the same letter were data indistinctly different at $P=0.05$ level according to DMRT.

는 32.6로 측정되었다. *S. middendorffianum*, *S. spurium* 등 10종 식물들도 비슷한 경향을 보였다. 2012년 4월에서 8월 사이의 엽록소 함량은 시스템에 따라 차이가 많이 나타났으며, 우수저장형에서의 수치가 가장 높았고, 세덤박스에서의 엽록소 함량이 상대적으로 낮게 나타났다. 국화와 식물의 경우 엽록소 함량이 온도가 높을수록 분해속도가 높아졌고, 식물의 내서성이 낮을수록 분해 속도가 높았다(Chen *et al.*, 2001).

3) 내건성 평가

2012년 4월부터 8월 10일 사이에 실험지의 최고기온 분포는 지표면에서 11.1℃에서 37℃까지로 25.9℃의 변화폭을 조사하였으며, 옥상에서는 15.1℃에서 42.8℃까지로 27.7℃의 변화폭이 나타났다. 실험기가 완료된 후 실험 실시 기간의 강우량은 총 400.5mm를 나타냈다. 그 중에서 5월 15일부터 6월 8일까지 25일 동안 무강우, 7월 19일부터 8월 2일까지 옥상에 15일 동안 고온과 무강우를 기록하였다. 우수저장형 옥상녹화 시스템의 내건성 평가는 옥상에 계속 무강우가 기록되었던 날인 6월 8일(25일 무강우), 8월 2일(15일 무강우) 오전 10시에 상대수분함량, 전해질 용출을 측정한 결과는 다음과 같다.

우수저장형에서 식물들의 전해질 용출은 *Ophiopogon japonicus*에서 두 기간에 각각 15.9%, 25.0%로 가장 낮고, *S. reflexum*에서 각각 20.4%, 18.0%로 낮았으며, 다음으로 *S. album*에서 각각 30.9%, 41.3%였으며, *Festuca ovina*에서 각각 46.1%, 88.6%

Table 4. Effects of drought stress on electrolyte leakage percentage of 12 species grown in green roof system

Species	Electrolyte leakage ² (%)			
	25 ^x		15 ^y	
	Rainwater storage system	Sedum box	Rainwater storage system	Sedum box
<i>S. reflexum</i>	20.4	21.6a	18.0	28.6b
<i>S. takevimense</i>	13.9	24.9a ^w	48.3	42.5d
<i>S. middendorffianum</i>	31.6	28.4b	28.3	47.0e
<i>S. album</i>	22.7	30.9b	35.9	41.3d
<i>S. spurium</i>	20.5	25.6a	36.8	48.3e
<i>S. sieboldii</i>	26.7	29.8b	54.6	62.2f
<i>Dianthus chinensis</i>	20.1	39.4d	23.5	68.9f
<i>Ophiopogon japonicus</i>	15.9	28.9b	25.0	57.1f
<i>Viola patrinii</i>	27.3	35.9c	56.2	64.9f
<i>Pulsatilla koreana</i>	38.9	45.5e	64.3	79.5f
<i>Ainsliaea acerifolia</i>	29.8	42.3d	67.5	85.9f
<i>Festuca ovina</i>	32.4	46.1e	66.6	88.6f

^w Electrolyte leakage was expressed as the percentage of solution conductivity after no rainfall for a long time, compared to conductivity after heat-killing.

^x There was no rainfall from 15 May, 2012 to 8 Jun, 2012, which was the first longest no rainfall recorded from 8 Jul, 2012.

^y The no rainfall from 19 July, 2 Aug, 2012, which was the higher temperature and no rainfall recorded from 2 Jun, 2012.

^z Means followed by different letters within columns are significantly different at $P=0.05$ by Duncan's multiple range test.

^{a-f} Means in a row by different superscripts are significantly different at the $P\leq 0.05$ by Duncan's multiple range test. Numbers in the same range followed by the same letter were data indistinctively different at $P=0.05$ lever according to DMRT.

로 가장 높은 피해를 보였다. *Farfugium japonicum* 경우에는 6월 8일에 전해질 용출은 49.3%로 나타났으며, 8월 2일에 고온과 건조를 거쳐 식물이 고사되었다. 6월 8일 측정 결과, *S. reflexum*, *S. takevimense*, *Dianthus chinensis*, *Pulsatilla koreana*, *Ainsliaea acerifolia* 등의 전해질 용출은 온실에서의 건조 처리 후의 전해질 용출 평가에서도 내건성 순위가 높아 일관성 있는 결과를 보였다. *S. sieboldii*, *S. album*의 전해질 용출과 온실에서 내건성 평가 순위가 상대적으로 높게 평가되었다. 8월 2일에 측정한 결과 *S. sieboldii*, *Viola patrinii*, *Pulsatilla koreana*, *Ainsliaea acerifolia*, *Festuca ovina* 등의 전해질 용출은 50% 이상으로 측정되었다. *S. reflexum*, *S. album*, *S. takevimense*, *S. spurium* 등의 전해질 용출은 온실에서의 건조 처리 후의 전해질 용출 평가에서도 내건성 순위가 높아 일관성 있는 결과를 보였다(조홍하와 강태호, 2013). *Ophiopogon japonicus*, *S. middendorffianum*의 전해질 용출과 옥상에 내건성평가 순위가 상대적으로 낮게 평가하였으며, *S. album*, *S. sieboldii*같은 경우는 높게 평가되었다. 우수저장형에서는 식물들의 전해질 용출은 식생박

스의 식물들보다는 용출이 낮은 것으로 나타났다(Table 4 참조).

우수저장형 옥상녹화 시스템의 내건성 평가하기 위하여 옥상에서 계속 무강우가 기록되었던 날인 6월 8일, 8월 2일 오전 10시에 식물들의 상대수분함량을 측정한 결과는 Table 5와 같다. 상대수분함량은 저장형 옥상녹화 시스템에서는 *S. album*은 93.5%, 94.6%로 가장 높았으며, 세덤박스에서는 각각 91.4%, 90.4%로 나타났다. 다음으로 *S. reflexum*에서 두 기간에 93.0% 이상으로 나타났고, 세덤박스에서는 90.3% 이상으로 나타났다. *Ainsliaea acerifolia*에서는 각각 78.9%, 58.9%로 가장 낮았으며, *Dianthus chinensis*에서는 두 기간에 각각 84.3%, 79.4%로 높은 피해를 보였다. 6월 15일에 저장형 옥상녹화 시스템에 식물들의 상대수분함량은 76.5% 이상으로 측정되었고, 세덤박스에서는 70.3% 이상으로 측정되었다. 8월 2일에 저장형 옥상녹화 시스템에서 식물들의 상대수분함량은 43.1% 이상으로 나타났으며, 세덤박스에서는 21.9% 이상으로 측정되어 세덤박스에서

Table 5. Effects of drought stress on relative water content of plants grown in green roof system

Species	WRC ² (%)			
	25 ^x		15 ^y	
	Rainwater storage system	Sedum box	Rainwater storage system	Sedum box
<i>S. reflexum</i>	94.2e	92.4e	93.0e	90.3e
<i>S. takevimense</i>	91.1e	89.6d	87.6d	87.0d
<i>S. middendorffianum</i>	92.3e	90.2e	89.5d	83.1d
<i>S. album</i>	93.5e	91.4e	94.6e	90.4
<i>S. spurium</i>	88.7d	85.6d	86.5d	83.3d
<i>S. sieboldii</i>	91.4e	88.7d	92.3e	90.5e
<i>Dianthus chinensis</i>	84.3d	80.3d	79.4c	63.2b
<i>Ophiopogon japonicus</i>	87.8d	84.8d	65.4b	72.2c
<i>Viola patrinii</i>	79.3c	72.3c	64.6b	49.6a
<i>Pulsatilla koreana</i>	81.6d	76.5c	81.4d	66.7b
<i>Ainsliaea acerifolia</i>	78.9c	70.3c	58.9a ^w	21.9a
<i>Festuca ovina</i>	86.4d	81.4d	43.1a	33.1a
<i>Farfugium japonicum</i>	76.5c	71.6c	0	0

^w Relative water content was expressed as the percentage of solution conductivity after no rainfall for a long time, compared to conductivity after heat-killing.

^x There was no rainfall from 15 May, 2012 to 8 Jun, 2012, which was the first longest no rainfall recorded from 8 Jul, 2012.

^y The no rainfall from 19 July, 2 Aug, 2012, which was the higher temperature and no rainfall recorded from Jun, 2012.

^z Means followed by different letters within columns are significantly different at $P=0.05$ by Duncan's multiple range test.

^{a-f} Means in a row by different superscripts are significantly different at the $P\leq 0.05$ by Duncan's multiple range test. Numbers in the same range followed by the same letter were data indistinctively different at $P=0.05$ lever according to DMRT.

의 식물들을 비해 함량이 더 많았고, 식물의 생육 상태가 양호한 것으로 나타났다.

IV. 결론

우수저장형 옥상녹화 시스템의 강우에 따른 우수저장량의 변화를 살펴보면, 2011년 7월 강우량 237.7mm, 저수량 155.6mm, 8월 강우량 115.7mm, 저수량 144.2mm로 측정되었다. 그 동안 최대 우수저장량은 235.7mm에 달하였으며, 시스템에 평균 우수저장량은 153.7mm로 측정되었다. 2012년 4월은 강우량 115.6mm, 저수량 91.3mm, 5월은 강우량 45.8mm, 저수량 105.0mm로 측정되었으며, 그 동안 최대 우수저장량은 162.1mm에 달하였고, 평균 우수저장량은 106.1mm로 측정되었다.

우수저장형 옥상녹화 시스템에서 토양의 온도와 습도 변화 결과, 4월부터 5월 말까지 *S. album*이 식재된 토양의 온도는 16.1~36.3℃의 범위로 나타났으며, 날씨가 가장 더운 시기는 7월부터 8월까지 토양온도는 24.81~43.5℃의 범위로 나타났다. 4월부터 5월 말까지 *S. takevimensae*가 식재된 토양온도는 16.1~34.8℃의 범위로 나타났고, 7월부터 8월까지 토양온도는 26.0~41.5℃의 범위로 나타났다. 전체적으로 *S. takevimensae*가 식재 구역에 토양온도는 더 낮았으며, 옥상녹화에 적용 시 강온 효과가 뛰어났다.

우수저장형 옥상녹화 시스템에서 식물들의 피폭률 증가량은 실험 기간 지속적으로 높은 값을 나타냈고, 양호한 생육상태를 보였다. 2012년 4월에서 8월 사이의 엽록소 함량은 우수저장형에서의 수치가 가장 높았고, 세덤박스에서의 엽록소 함량이 상대적으로 낮게 나타났다.

옥상녹화 시스템별 식물의 내건성 평가는 2012년 6월 8일의 고온에서 측정한 결과, *S. reflexum*, *S. takevimensae*, *Dianthus chinensis*, *Pulsatilla koreana*, *Ainsliaea acerifolia* 등의 전해질 용출은 온실에서 건조 처리 후의 전해질 용출 평가에서도 내건성 순위가 높아 일관성 있는 결과를 보였다. *S. sieboldii*, *S. album*의 전해질 용출과 온실에서 내건성 평가 순위가 상대적으로 높게 평가되었다. 8월 2일에 측정한 결과, *S. sieboldii*, *Viola patrini*, *Pulsatilla koreana*, *Ainsliaea acerifolia*, *Festuca ovina* 등의 전해질 용출이 50% 이상으로 측정되었다. *S. reflexum*, *S. album*, *S. takevimensae*, *S. spurium* 등의 전해질 용출은 옥상에 건조 처리 후의 전해질 용출 평가의 내건성 순위가 높아 일관성 있는 결과를 보였다. *Ophiopogon japonicus*, *S. middendorffianum*

의 전해질 용출과 내건성평가 순위가 상대적으로 낮게 나타났으며, *S. album*, *S. sieboldii* 같은 경우에는 높게 평가되었다. 우수저장형에서 식물들의 전해질 용출은 세덤박스에서의 식물들보다 용출량이 많이 감소하였다.

본 연구는 옥상녹화용 식물 종들을 옥상녹화시스템에서의 생육 특성과 적합성을 검토하였고, 저관리경량형 옥상녹화시스템 개발의 다양화 및 보급에 활용하기 위해 수행하였다. 연구에서 평가를 위한 시스템의 구성, 식재 재료, 환경 변수를 고려하여 실험을 실시하였지만, 전국에 걸친 현장 적용 실험이 이루어지지 못하였다. 향후 도시 환경에 광범위하게 적용될 수 있는 옥상녹화시스템에 관한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 토양배합에 따른 토양수분의 변화 및 토양별 식물의 내성에 미치는 영향과 관련된 추가적인 연구가 수행되어야 한다.

인용문헌

- 김기형(2008) 대도시의 옥상조경실태와 개선방안에 관한 연구. 영남대학교 대학원 석사학위논문.
- 이은희, 강규이, 신상희, 남미아, 이광우(2005) 옥상녹화용 식생매트에 적합한 토양과 토심 선정. 한국환경복원기술학회지 8(4): 12-22.
- 이정식, 김유선, 정가영, 인영립(2003) 저관리 경량형 옥상녹화 표준모델 피복용 지피식물 선별. 한국원예학회 춘계학술논문발표회초록집. p. 102.
- 이춘우, 김수봉, 문혜식(2011) 옥상녹화의 녹화유형별 기온저감효과. Journal of the Korean Housing Association 22(3): 25-33.
- 조용현, 한규희(2009) (알아야 할) 옥상녹화의 Q&A. 서울: 기문당. pp. 75-80.
- 최진우, 김학기, 이정재, 강현경(2009) 저토심 인공지반 녹화공법의 경제성 및 도입 가능한 지피식물의 생육특성. 한국조경학회지 37(5): 98-108.
- Fadi, Chen, Chen Sumei and Fang Wwimin(2001) Determining heat tolerance for *Chrysanthemum vestitum* and four chmorifolium cultivars with small flowers. Acta, Agriculturae Shanghai 17(3): 80-82.
- Huang, Weichang, Jun Qin, Yonghong Hu and Yuting Zhao(2007) Study on the application of sedums on roof garden in Shanghai. Journal of Anhui Agri. Sci. 33(6): 1041-1043.
- Jie, Lu, Peng Li, Ni Xilu and Shen Xiaodong(2011) Comprehensive evaluation of five landscape plants in sedum on drought resistance. Chinese Agricultural Science Bulletin 27(4): 108-114.
- Zhang, Jie, Yonghong Hu and Haiying Li(2007) Study on drought resistance of 9 sedums for light roof greening. Chinese Agricultural Science Bulletin 1: 122-124.
- Zhao, Ge, Hongyan Yuan, Lingzhi Wei, Ruixie Tang, Xiaofeng Zhaang and Xiaoping Lu(2011) A study of stress tolerance of a candidate plant- *Sedum aizoon* L. for green roof. Acta, Agriculturae Universitatis Jiangxiensis 33(2): 335-339.
- Zhou, Weiwei, Yan Wang and Jing Du(2009) Influences of drought stress on the physical characteristics of sedums species. Forest Research 22(6): 829-834.

원 고 접 수 일: 2013년 7월 16일
심 사 일: 2013년 8월 17일(1차)
2013년 9월 14일(2차)
게 재 확 정 일: 2013년 10월 11일
3 인 의 명 심 사 필