

저관리 · 경량형 옥상녹화를 위한 세덤류의 내서성 평가

조홍하* · 손희준* · 강태호**

*동국대학교 대학원 조경학과 · **동국대학교 조경학과

Hot Tolerance Assessment of *Sedum* spp. for Extensive Green Roof System

Zhao, Hong-Xia* · Son, Hee-Jun* · Kang, Tai-Ho**

*Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Dongguk University

**Dept. of Landscape Architecture, Dongguk University

ABSTRACT

This study was carried out to suggest an experiment based for selecting *Sedum*, which can adapt well with heat tolerance in extensive green roof system. The heat tolerance of *Sedum* subject to laboratory high temperature treatment and heat processing time were evaluated using electrolyte leakage, chlorophyll content and regrowth test, and the relation between soil water content and heat tolerance were researched. Logistic model of nonlinear regression analysis was used to evaluate the lethal temperatures that were predicted with the range of 45.0~48.1°C (soil water content 5%), 47.5~49.3°C (10%), 48.6~52.8°C (15%) in 6-hours high-temperature treatment. The higher the soil water content, the stronger the heat resistance property of *Sedum* there is. The higher the treatment temperature, the lower the chlorophyll content, and the less the soil water content, the faster the chlorophyll decomposition. The order of hot-temperature resistance was *S. reflexum* > *S. takevimensis* > *S. middendorffianum* > *S. album* > *S. sieboldii* > *S. spurium* when soil water content was 5%. The order of hot-temperature resistance was *S. album* > *S. reflexum* > *S. spurium* > *S. takevimensis* > *S. middendorffianum* > *S. sieboldii* when soil water content was 15%. The more of soil water content, *S. album*, *S. reflexum*, *S. spurium* had stronger tolerant of hot temperature. These results were consistent with those from the regrowth test and the heat tolerance tested by electrolyte leakage evaluation.

Key Words: Electrolyte Leakage, Logistic-Nonlinear Regression Analysis, Lethal Temperature, Regrowth Test, Soil Water Content, Chlorophyll Content

국문초록

이 연구는 저관리 · 경량형 옥상녹화시스템을 위한 내서성 식물 선발을 목적으로 6종 세덤식물을 대상으로 처리 시간과 온도에 따라 전해질 용출, 엽록소 함량 변화 및 재생 실험을 실시하였으며, 토양수분과 고온스트레스와의 관계를 연구하였다. Logistic비선형 회귀분석을 이용하여 6시간의 고온 처리 후 5%의 토양 함수량의 치사 온도는 45.1~48.0°C, 토양 함수량 10%, 15%의 경우 각각 47.5~49.3°C, 48.6~52.8°C의 범위로 측정되었다. 고온스트레스는 처리 시 토양 수분이

Corresponding author: Tai-Ho Kang, Dept. of Landscape Architecture, Dongguk University, Gyeongju 780-714, Korea, Tel.: +82-54-770-2232, E-mail: kth@dongguk.ac.kr

높을수록 세덤류의 내서성이 높아졌다. 엽록소 함량은 처리 온도가 높을수록 함량이 낮아졌고, 토양 수분 함량이 낮을수록 분해 속도가 높아졌다. 토양 함수량 5% 시 고온에 대한 저항성은 *S. reflexum* > *S. takevimense* > *S. middendorffianum* > *S. album* > *S. sieboldii* > *S. spurium*의 순으로 나타났으며, 토양 함수량이 15%의 경우는 *S. album* > *S. reflexum* > *S. spurium* > *S. takevimense* > *S. middendorffianum* > *S. sieboldii*의 순으로 나타났다. 토양의 수분 함량이 높을수록 *S. album*, *S. reflexum*, *S. spurium*의 내서성이 높아졌다. 이러한 결과는 재생 검사의 결과와 전해질 용출 평가에 일관성이 있는 것으로 증명되었다.

주제어: 전해질 용출 평가, Logistic 비선형 회귀분석, 치사 온도, 재생 검사, 토양 함수량, 엽록소 함량 변화

1. 서론

현대 도시내 대부분의 건물은 콘크리트 인공지반으로 형성되어 있으므로 관리가 용이하고 적은 비용으로 넓은 면적을 녹화할 수 있어야 한다. 이를 위한 옥상녹화시스템인 저관리·경량형 옥상녹화는 식물 생육에 있어 상대적으로 불리하다. 따라서 저토심 식재지반에서 최소한의 유지관리만으로도 생육할 수 있는 식물 소재의 선발은 옥상녹화에 있어서 중요한 기술적 요소가 되고 있다.

옥상녹화 시스템에 도입된 식물의 환경 저항성은 시스템 유지력에 있어 중요한 요소가 되며 이는 도시의 생태 환경 개선 효과와 밀접한 관련이 있다. 옥상녹화 식물은 고온 및 폭우, 강풍, 건조에 의한 식물의 생존능력 저하 현상이 나타나고 있어 적용 식물에 대한 실증 연구가 필요하다.

내서성의 연구에서는 고온스트레스 시 세포막의 구성 및 구조가 변형되어 전해질의 누출을 유발하게 되어 있다(Taiz and Zeiger, 1991). 전해질 용출법은 고온 노출 후 열에 의해 피해를 입은 조직에 대한 전해질 용출의 양을 전기전도도로 측정하여 세포의 열 안전성을 평가하는 기술이다(Martineau et al., 1979). 국내에서 식물의 내서성 연구에서 김인혜(2006)는 전해질 용출 평가와 재생평가를 통하여 4시간의 고온 처리 후 11종 세덤류 식물의 내서성을 평가하였다.

국외에서의 식물의 내서성 평가는 고온스트레스를 받아 식물의 잎이나 가지의 외부 형태, 상대함수량, 전해질 용출 MDA, POD, SOD와 CAT 등의 함량 변화 측정을 통하여 식물의 생리적 반응을 연구하였다. 그 결과 온도가 높아지면서 식물의 상대함수량은 내려갔고, 전해질 용출 변화의 추세와 폭의 차이가 뚜렷하게 나타났다(Sun Zhen et al., 2007; Feng Ligu et al., 2009; Huang Jinwen et al., 2009; Zhou Zhibin et al., 2005; Mo Jianbin et al., 2007; Liu Yinglan et al., 2009). 그중에서 전해질 용출 평가가 가장 쉽고 반응 민감성이 높았으며, 내서성을 비교 검증을 위해 적절한 방법으로 이용되어 왔다. 또한 MA Jin et al.(2009)에서는 5종 세덤을 대상으로 내서성 연구를 위해 전해질 용출 평가 및 Logistic 비선형 회귀분석을 통해 식물의 고온 저항성을 평가하였고 치사온도 LT₃₀을 계산하였다. 이

상의 실험 방법은 CMT¹⁾를 이용한 식물들의 내서성에 대한 평가이다. 현존 내서성 평가 연구들은 이체된 식물의 잎을 이용하여 내서성평가하였다. 식물은 고온스트레스를 받을 때 자체의 응급 반응이 있어 벗겨낸 식물의 전해질의 용출과 분해에 심겨진 식물의 전해질 용출에 차이가 있다. 따라서 이 연구에서는 벗겨낸 식물의 잎을 고온 처리하지 않고 분해에 심겨진 식물을 이용하여 고온 처리를 통하여 내서성 평가하였다.

엽록소 함량은 식물의 식물생육과 밀접한 관계가 있다. 국화와 식물의 경우 엽록소 함량이 온도가 높을수록 분해속도가 높아졌고, 식물의 내서성이 낮을수록 분해 속도가 높았다(Chen Fadi et al., 2001). 또한 신뢰성 있는 온도 저항성 평가와 평가 간의 적합성을 비교하기 위하여 온도 스트레스 후 식물 생존 및 회복을 평가하는 재생 검사 방법이 전해질 용출 평가와 병행되어 왔다(Zhu Genhai et al., 1986; Dunn et al., 1999). 따라서 고온스트레스를 받았을 때의 엽록소 함량의 변화를 통해 식물의 내서성을 평가할 수 있다.

종합적으로 식물의 내서성 평가는 식물의 외부형태, 전해질 용출, 상대수분함량, 엽록소 함량 등 생리적 지표를 많이 이용하고 있어 재생능력검사 실험은 신뢰성이 있다. 기존연구에서는 내서성의 평가 지표가 많이 있지만 토양 수분함량에 따른 고온스트레스 저항성에 관한 연구는 거의 전무한 현실이다. 특히 온도와 수분 환경은 시스템에 도입될 식물의 생육 가능 기간을 결정하므로 내서성 평가가 필요하며, 저관리형 옥상녹화에 대한 적합성을 평가하기 위해서는 토양 수분함량에 따른 고온스트레스 저항성에 대한 보다 심층적인 내서성 평가가 이루어져야 한다.

따라서 이 연구는 옥상녹화상용 세덤류 식물의 내서성 평가를 통하여 저관리·경량형 옥상녹화시스템에 적합한 식물 선발을 위한 기초 자료 제시를 목적으로 수행되었다. 여름철 고온에 잘 견딜 수 있는 식물 선발을 위해 고온 처리 시간과 온도에 따라 전해질 용출 평가, 엽록소 함량 변화 및 재생 실험을 수행하였다. 또한 고온 피해 예방 방안을 연구하기 위하여 토양 함수량과 식물의 내서성에 미치는 영향을 같이 연구하였다. Logistic 비선형 회귀분석을 통하여 치사온도를 계산하였고, 여름철 국내 옥상녹화시스템에서 안정적으로 적용 할 수 있는 식

물증과 고온 피해 해결 방안을 연구하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 장소 및 재료

이 연구는 2010년 12월부터 동국대학교 경주캠퍼스 자연과 학관 옥상에 실험구를 설치하여 진행하였다(그림 1 참조). 연구 대상지는 연평균 기온은 12.5°C, 강우량은 1,157mm이며, 여름에는 태풍의 영향을 4차례 받았다.

옥상녹화용 식물재료는 키가 너무 크지 않고, 치밀하게 표면을 덮는 것이 좋으며, 토심의 제약을 받으므로 내건성이 우수한 식물이어야 한다(조용현과 한규희, 2009). 세덤 식물들은 내건성이 강하여 저토심에서도 잘 살 수 있다. 따라서 본 연구에서 건조에 잘 견딜 수 있는 세덤류를 위주로 리플렉섬, 흰꽃세덤, 섬기린초, 애기기린초, 분홍세덤, 층층이평의비름 등 6종 세덤 식물들을 이용하여 실험을 진행하였다(표 1 참조).

고온스트레스 처리 시간이나 온도 그리고 토양의 수분 함량에 따른 식물의 내서성을 알아보기 위하여 국내 옥상녹화에서



그림 1. 실험 대상지 위치도

표 1. 옥상녹화 실험에 사용된 식물의 특성

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. takevimensis</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

많이 사용되고 있는 세덤류 6종을 대상으로 실험을 실시하였다. 2011년 6월 2차 포트에 심겨진 묘를 구입하여 4차 포트에 옮겨 심었다. 포트의 인공토양은 펄라이트:피트모스:버미큘라이트=2:1:1(v/v/v)을 혼합하여 사용하였다. 5층 건물 옥상에 조성된 저관리·경량형 옥상녹화시스템에 식재 후 충분히 관계한 다음에 별도의 관리를 실시하지 않았다.

2. 실험 방법

저관리·경량형 옥상녹화시스템을 위한 내서성 식물 선발을 목적으로 6종 세덤류 식물을 대상으로 실험하였다. 내서성 평가는 처리 시간과 온도에 따라 전해질 용출 평가(실내 실험), 엽록소 함량 변화(실내 실험) 및 재생 검사(실외 실험)가 이용되었으며, 토양수분과 고온스트레스(실내 실험)의 관계, 또한 저관리·경량형 옥상녹화시스템에 적용 시 내서성 평가(실내 실험) 실험을 통하여 연구하였다(표 2 참조).

1) 인공 고온 처리에 따른 내서성 평가 실험

2003년부터 2012년까지 10년 간 국내 대도시와 실험지의 최고 온도(표 3 참조) 및 2011년 실험지의 예비 온도 조사 결과

표 2 실험의 시간 및 방법

실험 항목	실험 방법	실험기간	실험내용
인공고온 처리 (실내)	-3개 토양 함수량 (5%, 10%, 15%) -6개 온도처리 (30~55°C) -3개 시간 처리 (2h, 4h, 6h)	2012. 6.14~7.24	-처리 전후 토양 온도 및 엽록소 함량 변화 -처리 항목별 전해질 용출
녹화시스템 적용 처리 (실외)	-온도에 따른 전해질 용출	2012. 7월 4, 24, 29	-옥상 온도에 따른 전해질 용출
재생능력 검사 (실외)	-온도와 습도에 따른 생존현황	2012.8.10	-생존율 계산

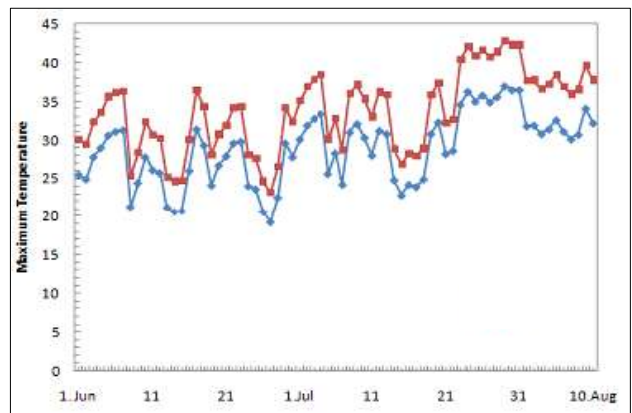


그림 2. 2011년 6월부터 10월까지 대기 최고 온도변화
범례: — Ground — Rooftop

표 3. 국내 주요 대도시 10년간 최고 기온(2003~2012)

연도	최고 온도(°C)							
	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경주
2003	32.2	30.0	34.7	30.4	31.9	32.2	35.4	35.4
2004	36.2	33.2	35.3	33.9	33.9	34.3	35.9	37.9
2005	35.0	32.8	35.6	33.8	35.2	33.5	36.9	35.7
2006	34.7	34.5	36.7	32.5	34.2	34.2	35.7	35.4
2007	33.0	32.6	36.4	31.8	34.0	33.4	35.7	35.2
2008	35.4	31.2	35.9	33.6	33.9	33.4	35.1	35.7
2009	34.4	32.5	33.2	31.1	33.8	32.7	33.2	36.1
2010	32.9	33.2	36.5	33.9	34.6	33.9	35.4	36.8
2011	32.8	32.3	35.1	34.1	35.3	33.3	34.6	33.8
2012	36.7	34.5	37.2	35.3	37.3	36.9	35.4	37.0
평균	34.3	32.7	35.7	33.0	34.4	33.8	35.3	36.0

자료: <http://www.kma.go.kr/index.jsp>

(그림 2 참조)를 토대로 처리 온도는 30, 35, 40, 45, 50, 55°C 등으로 실시하였다. 2012년 6월 14일부터 7월 24일까지 옥상에서 정상적으로 생육하고 있는 균일한 식물체를 선발하여 실험하였다. 토양 수분함량에 따른 세덤들의 고온스트레스에 대한 저항성을 연구하기 위하여 생육상에서 4차 포트묘를 3반복으로 5%, 10%, 15%의 토양 함수량으로 2, 4, 6시간 동안 고온 처리한 후 토양의 온도 변화, 식물들의 전해질 용출 및 엽록소 함량을 측정하였다.

전해질의 용출은 고온 처리한 잎을 증류수로 3번 씻어 물을 흡수시킨 후 0.5g의 표본 조직을 취하여 30mL 용량의 마개가 있는 시험관에 15mL의 증류수와 함께 넣었다. 이 시험관을 약 16시간 동안 처리하고 전도도 측정기(Conductivity Meter CM-40S, TOA Electronics Ltd, Ja, 2001)를 사용하여 침출액의 초기 전기전도도를 측정 후 80°C의 열수욕에서 1시간 동안 열처리를 하였다. 열수욕에서 꺼낸 후에는 5시간 두었다가 다시 침출액의 최종 전기전도도를 측정하였다. 고온 처리 전후 디지털 토양 수분측정기(GMK-770S, GMK, 2011)를 이용하여 토양의 건토수분과 온도를 구하였다. 휴대용 엽록소 측정기(SPAD502, Konica Minolta Sensing, Inc. Japan, 2011)를 이용하여 고온 처리 전후에 1회씩, 식물체의 성장점에서 2~3번째 완전히 전개된 잎의 중앙부위 부근을 5번 반복하여 측정된 값의 평균치로 계산하였다.

고온 처리 시 전해질이 용출(MA Jin *et al.*, 2009)되었으며, 각 처리에 대한 전해질 용출은 Eq. 1과 같다. Eq. 1은 열처리로 고사시킨 식물 조직은 침출액의 전기전도도에 대한 고온 처리 후 식물 조직 침출액 전기전도도의 비를 백분율로 산출하였으며 산출식은 다음과 같다.

$$REC(\%) = (Rc - Ro) / (Rb - Ro) \times 100 \quad (Eq. 1)$$

Rc = initial electrolyte leakage

Rb = final electrolyte leakage

Ro = baseline level of electrolyte leakage

처리 온도와 전해질 용출과의 관계는 많은 선행 연구에서 비선형 회귀분석 중 Logistic 모형으로 식물의 치사온도를 정확하게 예측할 수 있다. Ma Jin *et al.*(2009)의 연구에 의하면 고온스트레스 세포 상태의 전해질 용출율과 온도와의 관계는 S자 반응곡선의 형식으로 나타났으며, Logistic 모형(Eq. 2) 결정계수(R²)의 정확성과 유의성이 높았다. Logistic 모형의 2계도함수를 구하면 변곡점을 얻을 수 있어 X=ln(a)/b, 즉 치사온도(LT₅₀)에서 고온 처리 후 전해질의 증가가 높게 나타났다(XU Jingping *et al.*, 2011). Eq. 2는 고온 처리 후 전해질의 용출율과 처리온도의 관계를 계산할 수 있다. 계산식은 다음과 같다.

$$Y = k / (1 + ae^{-bX}) \quad (Eq. 2)$$

Y = REC(%)

a = gradual curve

b = curve slope

k = equation coefficient

X = treatment temperature(°C)

2) 옥상녹화시스템 적용에 따른 내서성 평가 실험

옥상녹화시스템 적용 시 고온기를 거친 식물의 내서성을 평가하기 위하여 2010년 12월 20일에 식물 재료를 5주 4반복 실시하였다. 옥상녹화시스템은 H사의 세덤블럭을 이용하여 실험구를 조성하였다(그림 3 참조). 세덤블럭 내부에 인공화산석을 8cm 채우고 그 위에 부직포를 다시 포설한 후 8cm의 인공토양을 펄라이트:피트모스:버미큘라이트=2:1:1(v/v/v)로 배합하여 식재하였으며, 위에 화산석을 2cm로 덮었다. 식재 후 관개하였고 정상 활착을 확인한 후에는 관리를 실시하지 않았다. 평균 기온이 가장 높은 7월부터 8월 사이에 급격한 온도 변화를 보이는 날 저녁 5시를 조사시기로 정하였다. 실험 기간 중 측정된

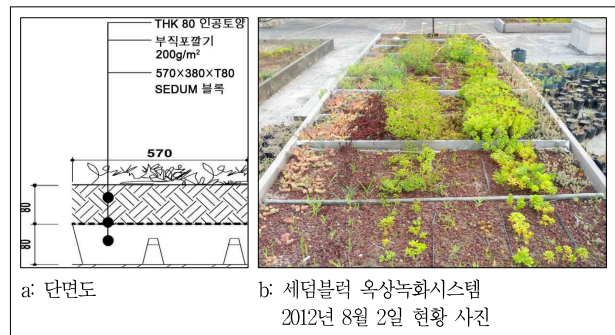


그림 3. 세덤블럭옥상녹화시스템 단면도, 2012년 8월 식물생육현황

온도는 2012년 7월 4일에 33.4℃로서 최초로 고온을 기록하였고, 7월 24일에 36.3℃, 7월 29일에 37℃로서 최고 온도를 기록하였으므로, 당일 식물의 잎을 채집하여 전해질 용출 평가를 수행하였다.

3) 고온 처리에 따른 식물 재생능력 실험

재생 검사는 위에서 인공고온 처리한 식물들을 그대로 옥상으로 옮겨 약 2주 후인 2012년 8월 10일에 처리별 식물의 생존율을 평가하였다. 생존율 평가는 식물이 녹색으로 살아있는 조직을 나타내거나 적어도 1개의 싹이 다시 자라게 되면 생존한 것으로 기록하였으며, 생존율은 총 실험용 식물수량에 대한 살아있는 식물체 수의 비를 백분율로 나타내었다.

자료의 분석은 측정된 자료에 대하여 SPSS Ver.18.0(SPSS Inc. 2009)을 이용한 Duncan의 다중범위검정(Multiple range test) 방법으로 평균 간 차이의 유의성을 분석하였고 유의 수준은 5%로 하였다. 또한 Logistic 회귀분석 모형을 이용하여 처리 온도나 시간 그리고 토양 함수량에 대한 전해질 용출의 적합한 반응 곡선을 구하였으며 반응 곡선에 대한 결정계수(R²)와 함께 치사온도(LT₅₀)를 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 인공 고온 처리에 따른 내서성 평가

1) 토양 온도의 변화

고온스트레스 처리 시간에 따른 토양 온도 변화를 측정된 결과 전반적으로 처리 시간이 길수록 토양 온도가 증가한 경향이 뚜렷하게 나타났다(표 4 참조). 또한 토양 함수량이 낮을수록 토양의 온도가 높게 나타났다. 50℃ 6시간의 고온 처리 후의 토양 함수량은 5%이며 토양 온도는 46.9℃로 나타났다. 토양 함수량이 10%, 15%의 경우에는 각각 45.6℃, 44.3℃로 나타났다. 측정 결과에 의하면 토양의 수분 함량이 높을수록 토양의 온도

표 4. 인공고온 처리 후 토양 온도의 변화

처리 온도	처리 전	처리 후 토양의 온도								
		5% 토양수분			10% 토양수분			15% 토양수분		
		2h	4h	6h	2h	4h	6h	2h	4h	6h
30	26.4	28.2	28.9	29.6	27.9	28.5	29.4	27.6	28.2	29.2
35	26.7	31.6	33.5	34.7	31.2	32.8	34.3	30.5	32.5	33.7
40	27.4	36.5	38.7	39.3	35.9	38.2	39.6	35.1	37.3	38.7
45	27.6	38.3	41.6	43.9	37.6	41.5	43.4	35.4	39.9	42.7
50	28.3	42.0	45.1	46.9	41.4	44.2	45.6	40.2	43.2	44.3
55	28.8	45.6	48.9	51.6	44.1	46.2	49.5	42.1	45.5	48.6

가 낮았다. 여름철 옥상이 상대적 저온을 유지하려면 적당한 토양 함수량을 유지해야 한다.

2) 처리 항목별 전해질 용출 반응

인공 고온스트레스 처리에 따른 식물들의 전해질 용출을 측정한 결과 전반적으로 처리 온도가 높아질수록 전해질 용출량이 증가하였고, 또한 토양의 수분 함량이 낮아질수록 전해질 용출량이 증가하였으며, 처리 시간이 길수록 전해질이 증가하는 경향을 보였다. 이 연구에서는 *S. reflexum* 사례로 고온스트레스 처리 시 전해질 용출을 제시하였다(표 5 참조).

30℃ 고온 처리 시 *S. reflexum*은 토양 수분에 따라 전해질의 용출량이 차이가 있지만 유의성의 차이는 없었다. 35℃같은 경우는 전해질 용출이 유의하게 나타났고, 처리 시간이 길수록 전해질 용출이 높아졌다. 40℃, 2시간에서 5%의 토양 함수량 중의 *S. reflexum*의 용출이 34.6%로 가장 높아 비교적 낮은 온도 처리에서 상당한 피해가 나타났다. 다음으로 10%의 토양 함수량 시 29.9%로 나타났고, 15%의 토양 함수량 시 *S. reflexum*은 25.2%로 전해질 용출량이 가장 낮았다. 40℃의 고온 4시간에서의 전해질 용출은 2시간 처리 시 보다 약 2.2~3.4%의 피해가 증가하는 것으로 나타났다. 6시간에서 토양 함수량 5%의 *S. reflexum*은 38.7%로 가장 높았고, 15%의 토양 함수량 중의 *S. reflexum*은 32.7%로 전해질 용출량이 낮았다.

45℃에서의 전해질 용출은 계속 증가하는 경향을 보였다. 토양 함수량 5% 시 고온 처리 후 *S. reflexum*의 전해질 용출이 모두 41.7% 이상으로 나타나 비교적 낮은 온도 처리에서 상당

표 5. 인공 고온스트레스 처리에 따른 식물들의 전해질 용출

항목	처리 (h)	Electrolyte leakage ^z (%)						
		30℃	35℃	40℃	45℃	50℃	55℃	
<i>S. reflexum</i>	5%	2	24.7a	29.9b	34.6c	41.7d	49.7e	57.6f
		4	25.2a	30.7b	36.7c	43.2d	51.9e	60.4f
		6	25.8a	32.4b	38.7c	47.2d	55.3e	65.8f
	10%	2	20.2a	24.7a	29.9b	34.6c	41.7d	49.7e
		4	22.9a	25.8a	32.4b	37.7c	45.2d	54.3e
		6	23.5a ^y	27.1a	34.3c	40.1c	49.2e	63.4f
	15%	2	16.4a	21.3a	25.5a	30.7b	35.7c	42.9d
		4	17.3a	22.3a	28.9b	32.4b	40.9d	48.9e
		6	17.6a	23.9a	32.7b	37.7c	46.3d	59.2f

^z Electrolyte leakage was expressed as the percentage of solution conductivity after temperature treatment compared to conductivity after heat-killing.

^y 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<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.

한 피해가 나타났다. 토양 함수량 10% 시 *S. reflexum*은 6시간 고온 처리 후 용출이 40.1%로 나타났으며, 토양 함수량 15% 시 37.7%의 전해질 용출을 나타냈다. 50°C에서의 전해질 용출은 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 5%의 토양 함수량에서 2시간의 고온 처리 후 *S. reflexum*의 전해질 용출은 49.7%로 나타났으며 4시간 이상 처리하면 전해질의 용출이 51.9% 이상으로 나타났다. 10%의 토양 함수량에서 6시간의 고온 처리 후 *S. reflexum*의 전해질 용출은 49.2%로 나타났으며, 15%의 토양 함수량 같은 경우에는 전해질 용출은 46.3%로 나타났다.

55°C의 고온 처리 후 토양 함수량이 5%, 10%, 15%이었으며 *S. reflexum*의 전해질 용출량은 각각 57.6~65.8%, 49.7~63.4%, 42.9~59.2%의 범위로 측정되었다. 결과적으로 45°C에서 6시간의 고온 처리 후 토양 함수량에 따라 *S. reflexum*이 각각 47.2%, 40.1%, 37.7%의 전해질이 용출되었고, 50°C에서는 6시간의 고온 처리 후 토양 함수량에 따라 각각 55.3%, 49.2%, 46.3%의 전해질이 용출되었다. 55°C 6시간 처리 시 전해질 용출이 59.2% 이상으로 나타났으며, *S. reflexum*은 고온스트레스에 대한 저항성이 토양 함수량에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났고 토양 함수량이 높아지면 *S. reflexum*은 고온에 대한 저항성이 높아진다.

3) 엽록소 함량의 변화

고온스트레스 처리에 따른 세덤류의 엽록소 함량을 측정된 결과 전반적으로 처리 온도가 높아질수록 엽록소 함량이 감소하였다. 또한 토양 함수량이 낮아질수록 엽록소 함량이 감소하였으며, 처리 시간이 길수록 엽록소 함량이 감소하는 경향을 보였다. 이 연구에서는 *S. reflexum* 사례로 고온스트레스 처리 시 엽록소 함량의 변화를 측정하였다(표 6 참조).

30°C 고온 처리 시 *S. reflexum*은 토양 수분 함량에 따라 엽록소 함량의 변화가 있어, 35°C 경우에서는 엽록소 함량이 감소하는 경향을 보였다. 40°C부터 엽록소 함량의 처리 시간에 미치는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 토양 수분 함량에 따라 고온 처리 전 엽록소 함량에 차이가 있었지만 고온 처리 시간이 길수록 엽록소 함량이 낮아졌다. 45°C 고온 처리 시 5%, 10%의 토양수분 함량 중의 *S. reflexum*은 2시간 처리 후 0.1, 4시간 후 0.3, 6시간 후 0.8의 값으로 감소하였다. 15%의 토양 수분 함량에서는 2시간 후 0.1, 4시간 후 0.2, 6시간 후 0.6으로 감소하였다. 50°C이상의 고온 처리 후 토양 수분 함량이 적을수록 엽록소의 감소량이 많아졌다.

4) 종합분석

Logistic 비선형 회귀분석을 통하여 6종 식물에 대한 토양 함수량에 따른 처리 온도 및 시간과 전해질 용출의 관계를 분석한 결과, 측정치에 대응되는 치사온도 $LT_{50} = \ln(a)/b$ 는 표 7

표 6. 고온스트레스 처리 전 후 *S. reflexum*의 엽록소 함량의 변화

처리온도	토양 함수량 5%			
	전	2h 후	4h 후	6h 후
30°C	15.6	15.6	15.5	15.4
35°C	15.5	15.4	15.2	15.0
40°C	15.2	15.1	14.9	14.5
45°C	14.9	14.8	14.5	14.1
50°C	15.8	15.6	15.2	14.5
55°C	15.1	14.8	14.4	13.7
처리온도	토양 함수량 10%			
	전	2h 후	4h 후	6h 후
30°C	16.7	16.7	16.6	16.5
35°C	16.9	16.9	16.7	16.5
40°C	16.5	16.4	16.2	15.9
45°C	16.3	16.2	16.0	15.7
50°C	15.9	15.7	15.4	15.0
55°C	15.7	15.5	15.1	14.6
처리온도	토양 함수량 15%			
	전	2h 후	4h 후	6h 후
30°C	17.8	17.8	17.7	17.6
35°C	17.4	17.4	17.3	17.1
40°C	17.6	17.5	17.4	17.2
45°C	17.5	17.4	17.2	16.9
50°C	16.7	16.5	16.3	16.0
55°C	17.1	16.9	16.5	16.1

표 7. 처리 항목별 치사온도 및 결정계수(R²)

항목	처리 (h)	함수량 5%		함수량 10%		함수량 15%	
		LT ₅₀	R ²	LT ₅₀	R ²	LT ₅₀	R ²
<i>S. reflexum</i>	2	53.6	0.977	56.1	0.996	61.5	0.960
	4	49.1	0.996	52.8	0.991	56.3	0.990
	6	48.0	0.995	49.3	0.972	50.8	0.990
<i>S. album</i>	2	48.9	0.979	53.1	0.991	59.9	0.994
	4	46.9	0.996	50.6	0.996	57.6	0.989
	6	45.2	0.995	47.6	0.979	52.8	0.948
<i>S. takevimensis</i>	2	49.3	0.992	52.4	0.978	56.2	0.994
	4	48.6	0.981	49.3	0.988	51.1	0.992
	6	46.7	0.985	47.7	0.984	48.7	0.992
<i>S. middendorffianum</i>	2	51.1	0.993	52.8	0.981	56.6	0.992
	4	48.3	0.998	49.8	0.988	50.8	0.998
	6	45.3	0.994	47.7	0.983	48.6	0.969
<i>S. spurium</i>	2	49.5	0.994	52.6	0.996	53.2	0.997
	4	47.2	0.965	49.4	0.958	54.1	0.979
	6	44.2	0.957	48.8	0.978	49.5	0.997
<i>S. sieboldii</i>	2	47.8	0.974	52.2	0.987	54.7	0.991
	4	46.5	0.987	49.7	0.985	50.1	0.983
	6	45.1	0.983	47.5	0.969	48.4	0.973

Indicate the significance of R² at P<0.01 respectively.

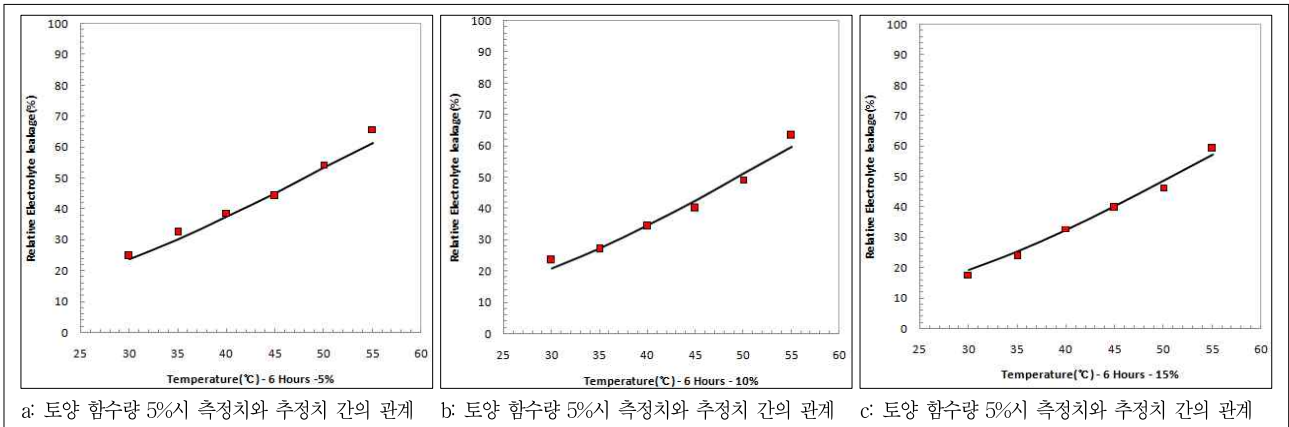


그림 4. 6시간의 고온 처리 시 토양 함수량에 따른 Logistic 분석 측정치와 추정치 간의 관계(*S. reflexum*)

과 같다. Logistic 회귀분석은 반응 곡선의 중심점인 변곡점에 해당하는 온도(T)는 최대 전해질 용출량의 50% 이상이 용출되기 시작하는 온도이며 내서성 측정에 가장 민감하고 결정적인 부분이 된다. 아울러 식물간의 내서성을 비교하는데 적합한 척도가 되므로 예측 치사 온도로 평가되었다(XU Jingping *et al.*, 2011). 이 연구에서는 *S. reflexum* 사례로 6시간의 고온 처리에 따른 Logistic equation을 제시하였다(그림 4 참조).

토양 함수량 5%시, 식물들에서 예측된 치사 온도는 고온 처리 시간에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 2시간의 고온 처리에서 치사 온도는 *S. reflexum* 53.6°C, *S. album* 48.9°C, *S. takevimense* 49.3°C, *S. middendorffianum* 51.1°C, *S. spurium* 49.5°C, *S. sieboldii* 47.8°C로 측정되었다. 4시간의 고온 처리에서의 치사 온도는 *S. reflexum* 49.1°C, *S. album* 46.9°C, *S. takevimense* 48.6°C, *S. middendorffianum* 48.3°C, *S. spurium* 47.2°C, *S. sieboldii* 46.5°C이었다. 6시간의 고온 처리 시 치사 온도가 많이 떨어졌으며, *S. reflexum* 48.0°C, *S. takevimense* 46.7°C로 상대적으로 강한 내서성을 보였다. 그러나 *S. spurium*, *S. album*, *S. middendorffianum*, *S. sieboldii*, 46°C 이하의 치사 온도가 예측되어 내서성이 약하였다. 토양 함수량 5% 시, 6시간의 고온스트레스 처리 시 식물간 내서성의 순위는 *S. reflexum* > *S. takevimense* > *S. middendorffianum* > *S. album* > *S. sieboldii* > *S. spurium*의 순으로 나타났다. 고온 처리 시간이 길수록 *S. reflexum*과 *S. takevimense*의 내서성이 강하게 나타났고, *S. album*과 *S. sieboldii*의 내서성은 낮았다. Logistic 회귀분석 모형의 적합성을 평가하기 위하여 고온 처리 시간과 온도에 따른 Logistic 모형의 결정계수(R²)를 분석하였다. 토양 함수량은 5%이고, Logistic 모형의 결정계수(R²)값은 0.957~0.998의 범위로 나타났으며, 모형의 적합성은 높은 것으로 확인되었다.

토양 함수량 10% 시, 식물들에서 예측된 치사 온도는 고온 처리 시간에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 2시간의 고온 처리에서 치사 온도는 6종 식물 모두 52°C 이상으로 예측되었

다. 4시간의 고온 처리에서의 치사 온도는 49.3~52.8°C의 범위로 나타났다. 6시간의 고온 처리 시 치사 온도가 많이 떨어졌으며, *S. reflexum* 49.3°C, *S. spurium*은 48.8°C로 강한 내서성을 보였으며, *S. middendorffianum* 47.7°C, *S. takevimense* 47.7°C, *S. album* 47.6°C, *S. sieboldii* 47.5°C로 상대적으로 내서성이 약하였다. 토양수분함량 10%, 6시간의 고온 처리 시 식물간 내서성의 순위 *S. reflexum* > *S. spurium* > *S. middendorffianum* > *S. takevimense* > *S. album* > *S. sieboldii*의 순으로 나타났다. 고온 처리 시간이 길수록 *S. reflexum*의 내서성이 강하게 나타났고, *S. album*과 *S. sieboldii*의 내서성은 낮았다. 인공 고온 처리 시 Logistic 회귀분석모형의 결정계수(R²)값은 0.969~0.999의 범위로 나타나는 것으로 보면 모형의 적합성은 높은 것으로 확인되었다.

토양 함수량 15% 시, 식물들에서 예측된 치사 온도의 결과는 표 8과 같다. 2시간 고온 처리에서 치사 온도는 61.5~53.2°C의 범위로, 4시간의 고온 처리에서의 치사 온도는 50.1~57.6°C로 예측되었다. 6시간의 고온 처리 시 치사 온도는 많이 떨어졌다. *S. album* 52.8°C로 강한 내서성을 보였으며, *S. reflexum* 50.8°C, *S. spurium* 49.5°C로 상대적으로 강한 내서성을 보였다. *S. middendorffianum* 48.6°C, *S. takevimense* 48.7°C, *S. sieboldii* 48.4°C로 내서성이 약하였다.

토양 함수량 15%, 6시간의 고온 처리 시 식물간 내서성의 순위는 *S. album* > *S. reflexum* > *S. spurium* > *S. takevimense* > *S. middendorffianum* > *S. sieboldii*의 순으로 나타났다. 고온 처리 시간이 길수록 *S. album*의 내서성이 강하게 나타났고, *S. sieboldii*의 내서성은 낮았다. 고온 처리 시 Logistic 모형의 결정계수(R²)값은 0.948~0.999의 범위로 나타나는 것으로 보면 모형의 적합성은 높은 것으로 확인되었다.

2. 옥상녹화시스템 적용처리에 따른 내서성 평가

세덤블럭 옥상녹화시스템에서 식물들의 내서성을 평가하기

위하여 2012년 6월부터 8월 사이에 실험지의 지면과 옥상 기온의 변화를 조사한 결과는 그림 5와 같다. 최고 기온의 분포는 지표면에서 19.2°C에서 37°C까지로 17.8°C의 변화폭을 보였으며, 옥상에서는 23.2°C에서 42.8°C까지로 19.6°C의 변화폭이 나타났다. 7월 4일 옥상의 최고 기온은 33.4°C로 실험 기간 중 최초로 높은 온도를 기록하였고, 7월 24일에 36.3°C, 7월 29에는 37°C로 실험 기간 중 가장 높은 기온을 기록하였다.

급격한 온도 변화가 기록되었던 날의 저녁에 7월 4일, 24일, 29일의 전해질 용출을 측정 한 결과는 표 8과 같다. 전해질 용출은 *S. reflexum*에서 3개 기간에 각각 17.9%, 18.3%, 28.6%로

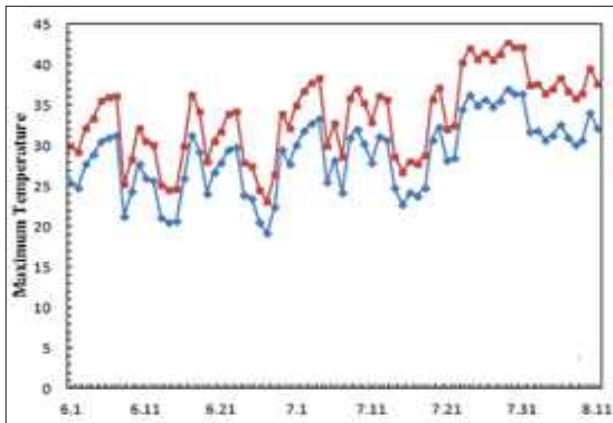


그림 5. 옥상 기온 레벨에서 측정된 최저 기온 변화
범례: — Ground — Rooftop

표 8. 옥상녹화시스템에 적용된 식물의 전해질 용출

항목	Electrolyte leakage ^w (%)		
	33.4 ^x	36.3 ^y	37 ^z
<i>S. reflexum</i>	17.9a ^k	18.3a	28.6b
<i>S. album</i>	27.4b	29.6b	35.1c
<i>S. takevimensense</i>	28.4b	29.6b	39.9c
<i>S. middendorffianum</i>	24.6ab	43.7d	61.3e
<i>S. spurium</i>	17.2a	39.7c	49.3d
<i>S. sieboldii</i>	38.2c	51.7	71.2e

^w Electrolyte leakage was expressed as the percentage of solution conductivity after sudden changes in the maximum temperature compared to conductivity after heat-killing.

^x The maximum temperature of rooftop surface on 4 Jul. 2012, which was the first highest temperature recorded from Jul. 2012.

^y The maximum temperature of rooftop surface on 24 Jul. 2012, which was higher temperature recorded from Jul. 2012.

^z The maximum temperature of rooftop surface on 29 Jul. 2012, which was the highest temperature recorded from Jul. 2012.

^{a-c} 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 lever according to DMRT.

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

가장 낮았고, 다음으로 *S. album*에서 각각 27.4%, 29.6%, 35.1%로 낮았으며, *S. sieboldii*에서 각각 38.2%, 51.7%, 71.2%로 가장 높은 피해를 보였다. *S. reflexum*과 *S. album*은 인공 고온 처리 후의 전해질 용출 평가에서도 내서성 순위가 높아 일관성 있는 결과를 보였다. *S. sieboldii*와 *S. middendorffianum*은 고온 처리 후의 전해질 용출 평가에서는 내서성 순위가 상대적으로 높게 평가되었으나, 5%의 토양 함수량에서 6시간의 고온 처리 시 치사온도는 각각 45.3°C, 45.1°C로 높게 나타났다(표 6 참조). *S. reflexum*, *S. album*, *S. takevimensense* 등은 3회의 조사 시점에서 모두 전해질 용출이 적어 강한 내서성을 나타냈으며, 인공적인 고온 처리 후의 평가와 유사한 경향을 보였다.

3. 고온 처리에 따른 식물 재생평가

고온 처리 2주 후 식물들의 생존율과 회복 상태를 조사한 결과(표 8 참조), 30°C부터 45°C까지의 온도와 시간 처리에 대하여 대부분의 식물은 100% 생존율을 보였다. 50°C부터 토양 함수량에 따라 생존율의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 토양 함수량 5%, 온도 50°C일 때, 2시간의 고온 처리 후 *S. album*, *S. spurium*, *S. sieboldii*의 생존율이 88.9%로 나타났고, 다른 3종 식물에서 100%의 생존율을 나타냈다. 4시간 처리 후 *S. sieboldii*를 제외한 모든 식물의 생존율은 88.9%로 나타났으며, 6시간 처리 후 생존율은 77.8%로 떨어졌다. 55°C 고온스트레스를 받을 때 식물들의 생존율은 많이 떨어졌고, 2시간 처리 시 *S. album*, *S. spurium*, *S. sieboldii*의 생존율은 77.8%로 나타났으며, 6시간 처리한 후 *S. spurium*과 *S. sieboldii*는 55.6%로 조사되었고 *S. takevimensense*와 *S. middendorffianum*은 66.7%로 나타났다.

토양 함수량 10%의 경우에는 50°C에서 2, 4시간의 고온 처리된 식물들은 100%의 생존율을 나타냈으며, 6시간 처리 시에는 *S. reflexum*을 제외한 모든 식물의 생존율은 88.9%로 나타났으며, 55°C 고온을 받은 식물들의 생존율은 현저하게 떨어졌다. 2시간 처리 시에는 *S. reflexum*과 *S. takevimensense*의 생존율이 100%로 나타났으며, 다른 식물들의 생존율은 88.9% 이하로 나타났다. 처리 시간이 길수록 생존율을 떨어져 6시간 처리 후 모든 식물의 생존율은 77.8%로 조사되었다.

토양 함수량 15% 시, 50°C의 고온 처리 후 식물들의 생존율은 많이 올라갔다. 6시간의 고온 처리 후 *S. spurium*과 *S. sieboldii*를 제외한 모든 식물들은 100%의 생존율을 나타냈으며, 55°C 고온일 경우 식물들의 생존율은 현저하게 떨어졌다. 2시간 처리 시 *S. reflexum*과 *S. takevimensense*의 생존율은 100%로 나타났고, 다른 식물들의 생존율은 88.9%로 나타났다. 6시간 처리 후 *S. reflexum* 77.8%, *S. album* 88.9%, *S. middendorffianum* 77.8%, *S. spurium* 77.8%, *S. takevimensense* 77.8%, *S. sieboldii* 66.7%로 나타났다.

표 9. 저온 처리 후 재생력 검사

실험식물	처리(h)	생존율 ^z (%)						실험식물	처리(h)	생존율 ^z (%)							
		30℃	35℃	40℃	45℃	50℃	55℃			30℃	35℃	40℃	45℃	50℃	55℃		
<i>S. reflexum</i>	5%	2	100	100	100	100	100	88.9	<i>S. album</i>	5%	2	100	100	100	100	88.9	77.8
		4	100	100	100	100	88.9	77.8			4	100	100	100	100	88.9	77.8
		6	100	100	100	100	77.8	77.8			6	100	100	100	100	77.8	77.8
	10%	2	100	100	100	100	100	100		10%	2	100	100	100	100	100	88.9
		4	100	100	100	100	100	88.9			4	100	100	100	100	100	88.9
		6	100	100	100	100	100	77.8			6	100	100	100	100	88.9	77.8
	15%	2	100	100	100	100	100	100		15%	2	100	100	100	100	100	100
		4	100	100	100	100	100	88.9			4	100	100	100	100	100	100
		6	100	100	100	100	100	77.8			6	100	100	100	100	100	88.9
<i>S. takevimensse</i>	5%	2	100	100	100	100	100	88.9	<i>S. middendorffianum</i>	5%	2	100	100	100	100	100	88.9
		4	100	100	100	100	88.9	77.9			4	100	100	100	100	88.9	77.9
		6	100	100	100	100	77.9	66.7			6	100	100	100	100	77.9	66.7
	10%	2	100	100	100	100	100	100		10%	2	100	100	100	100	100	88.9
		4	100	100	100	100	100	88.9			4	100	100	100	100	100	88.9
		6	100	100	100	100	88.9	77.8			6	100	100	100	100	88.9	77.8
	15%	2	100	100	100	100	100	88.9		15%	2	100	100	100	100	100	100
		4	100	100	100	100	100	88.9			4	100	100	100	100	100	88.9
		6	100	100	100	100	100	77.8			6	100	100	100	100	88.9	77.8
<i>S. spurium</i>	5%	2	100	100	100	100	88.9	77.8	<i>S. sieboldii</i>	5%	2	100	100	100	100	88.9	77.8
		4	100	100	100	100	88.9	66.7			4	100	100	100	100	77.8	66.7
		6	100	100	100	100	77.8	55.5			6	100	100	100	100	66.7	55.6
	10%	2	100	100	100	100	100	88.9		10%	2	100	100	100	100	100	88.9
		4	100	100	100	100	100	88.9			4	100	100	100	100	100	88.9
		6	100	100	100	100	88.9	77.8			6	100	100	100	100	88.9	77.8
	15%	2	100	100	100	100	100	88.9		15%	2	100	100	100	100	100	88.9
		4	100	100	100	100	100	88.9			4	100	100	100	100	100	77.8
		6	100	100	100	100	88.9	77.8			6	100	100	100	100	88.9	66.7

^z Percentage of test plants surviving calculated by (no. of plants that survived/total no. of plants)×100.

결과적으로 45℃까지는 토양 함수량과 상관 없이 세덤들 모두 100%의 생존율을 보였다. 토양 함수량 5% 시 50℃에서 4시간 이상의 고온 처리 후 *S. sieboldii*를 제외한 모든 식물들이 77.8%의 생존율을 보여 내서성이 상대적으로 낮았다. 토양 함수량 10% 시, 50℃에서 4시간 이상의 고온 처리를 통해 모든 식물들이 88.9%의 생존율을 보여 내서성이 상대적으로 높았다. 토양 함수량이 높을수록 세덤들은 고온스트레스에 대한 저항성을 강하게 보였다. 이와 같은 결과는 치사 온도 평가 결과(표 6 참조)와 비교했을 때, 식물 간의 내서성 순위는 일관적인 경향을 보였다.

IV. 결론

이 연구에서는 저관리·경량형 옥상녹화시스템에 적합한 식물 선별을 위한 기초 실험으로 세덤 6종에 대한 내서성 평가를 수

행하였다. 토양 함수량과 온도에 따른 내서성 평가는 전해질 용출 평가, 엽록소 함량 변화와 재생 검사가 이용되었으며, 옥상녹화시스템에 있어 식물들의 전해질 용출 반응과 비교·분석하였다.

인공 고온스트레스 처리 시 온도와 처리 시간이 높을수록 전해질 용출량이 증가하였고, 또한 토양의 수분 함량이 낮아질수록 전해질 용출량이 높았다. *S. reflexum*의 사례로 보면 고온스트레스에 대한 저항성은 토양 함수량이 높으면 저항성도 높아졌다. 35℃ 이하의 고온 처리 시 엽록소 함량이 약간 감소한 경향을 보였다. 40℃부터 엽록소 함량이 처리 시간에 따라 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 토양 함수량에 따라 고온 처리 전 엽록소 함량이 차이가 있었지만 고온 처리 시간이 길수록 엽록소 함량이 낮았다. 45℃ 고온 처리 시 5%, 10%의 토양 함수량 중 *S. reflexum*은 6시간 후 0.8의 값으로 감소하였으며, 15%의 토양 함수량에서는 6시간 후 0.6의 값으로 감소하였다.

50°C 이상의 고온 처리 후는 토양 함수량이 적을수록 엽록소의 감소량이 많아 졌다.

또한 토양 수분과 고온스트레스의 관계를 연구한 결과 Logistic 비선형 회귀분석을 통하여 6시간의 고온 처리 후 5%의 토양 함수량의 치사 온도가 45.1~48.0°C, 토양 함수량이 10%, 15% 같은 경우는 치사 온도가 각각 47.5~49.3°C, 48.6~52.8°C의 범위로 측정되었다. 고온 처리 시 토양 수분이 높을수록 세덤류의 내서성은 높아졌다. 토양 함수량을 5% 시 고온에 대한 저항성은 *S. reflexum* > *S. takevimensis* > *S. middendorffianum* > *S. album* > *S. sieboldii* > *S. spurium*의 순으로 나타났고, 토양 함수량 10%의 경우는 *S. reflexum* > *S. spurium* > *S. takevimensis* > *S. middendorffianum* > *S. album* > *S. sieboldii*의 순으로 나타났다. 토양 함수량 15%의 경우는 *S. album* > *S. reflexum* > *S. spurium* > *S. takevimensis* > *S. middendorffianum* > *S. sieboldii*의 순으로 나타났다. 토양 수분함량이 높을수록 *S. album*, *S. reflexum*, *S. spurium*의 내서성이 강하게 나타났는데 *S. sieboldii*의 내서성은 낮았다. 이러한 결과는 재생 검사 결과 및 전해질 용출 평가와 일관성이 있음을 증명한다.

2012년 6월부터 8월까지 현장에서 기록된 최고 온도인 33.4°C에 모든 식물의 전해질 용출은 40% 미만으로 나타났지만, 7월 19일부터 8월 9일까지 강우가 없었으며 7월 23일부터 29일까지 40°C 이상의 지속적인 고온인 경우 *S. sieboldii*, *S. middendorffianum*의 전해질 용출은 61.3% 이상이였다. 세덤들의 옥상 월동은 가능하지만 여름에 안전하게 생장하려면 적당한 수분 유지가 필요하다.

본 연구의 실험식물인 세덤류 6종 식물 중 *S. album*, *S. reflexum*, *S. takevimensis*는 여름철 국내 최고온도가 37°C이하의 지역에 안전하게 적용될 수 있지만 *S. sieboldii*는 국내 옥상 녹화시스템에서 안정적으로 적용하려면 수분 관리가 필요하다고 판단된다. *S. takevimensis*는 토양 함수량 5~15% 시 6시간의 고온 처리 후 치사온도 46.7~48.7°C의 범위로 나타났고, *S. middendorffianum*의 경우에는 치사온도 45.3~48.6°C의 범위로 나타났다. 또한 *S. takevimensis*와 *S. middendorffianum*은 키가 크고 피복면적이 커서 관상 가치가 높고 옥상녹화에 적용 시 강온효과가 뚜렷하여 내서성 평가 결과를 보면 옥상녹화에 광범위하게 활용될 수 있다.

세덤블럭 옥상녹화시스템은 옥상녹화에 세덤을 이용한 저관리·경량형 녹화시스템으로서 도시내 대면적 녹화에 기여할 수 있는 우수한 시스템으로 판단된다. 향후 토양매합에 따른 토양수분의 변화 및 토양별 식물의 내서성에 미치는 영향과 관련된 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구의 한계점은 실험 식물의 내서성에 관한 MDA, POD, SOD와 CAT 등 지표를 측정하지 않았으므로 향후, 후속연구의 진행을 통해 더욱 논리적인 검증자료 구축이 필요하다.

주 1. 세포막의 안전성(CMT)은 벗겨낸 식물의 잎을 일정한 온도 범위에서 전해질의 용출을 측정하는 방법이다. 전해질 용출 평가는 쉽고 반응 민감도가 높았으며 내서성 비교 검증에 많이 이용하는 방법이다(Ye D M and Lin H F, 2003).

인용문헌

1. 김인혜(2006) 옥상녹화를 위한 저토심·저관리형 시스템 개발. 경상대학교 대학원 석사학위논문. pp.57-61.
2. 조용현, 한규희(2009) (알아야 할)옥상녹화의 Q&A. 서울: 기문당. pp. 75-80.
3. Chen Fadi, Chen Sumei and Fang Wwimin(2001) Determining heat tolerance for *Chrysanthemum vestitum* and four *Ch. morifolium* cultivars with small flowers. Acta Agriculture Shanghai 17(3): 80-82.
4. Dunn, J. H., S. S. Bughara, M. R. Wamund and B. F. Fresenbug (1999) Low temperature tolerance of zoysiagrasses. HortScience 34: 96-99.
5. Feng Ligu, Yu Jul, Tao Jun, Su Jiale, Zhang Caihong(2009) Effects of high temperature stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Euphorbia pulcherrima*. Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition 30(3): 71-74.
6. Huang Jinwen, Chen Dongmei, Zheng Hongyan, Luo Juan, Lin Zheng Chun and Lin Wenxiong(2009) Physiological response of warm-season turf-grass to high temperature stress. Chinese Journal of Eco. Agriculture, Sept. 17(5): 964-967.
7. Kim, P. G., Y. B. Koo, J. C. Lee, S. W. Bae, Y. S. Yi and Y. M. Cheong (2001) Chlorophyll content and genetic variation of *Ginkgo biloba* planted on the street in Seoul. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 3(2): 114-120.
8. Liu Lanying, Zhang Junmin and Li Chunling(2009) A study on heat tolerance of three garden plants. Chinese Agricultural Science Bulletin 25(23): 354-357.
9. Ma Jin, Gengguo and Zheng Gang(2009) Measurement of heat resistance of five *Sedum* spp. under the condition of green roof. China Forestry Science and Technology 23(3):36-38.
10. Martineau, J. R., J. E. Specht, J. H. Williams and C. Y. Sullivan(1979) Temperature tolerance in soybeans. I. Evaluation of a technique for assessing cellular membrane thermostability. Crop Sci. 19: 75-78.
11. Mo Jianbin, Chen Bisheng, Huang Mei, Hu Yonghong, Jiang Changhua and Zhu Huafang(2007) Study on effects of the high temperature on cultivars of hosta. Seed 26(5): 48-51.
12. Sun Zhen, Dong Li and Gao Dawei(2007) The study of heat-resistance of four species of groundcover plants. Chinese Landscape Architecture 8: 24-27.
13. Taiz, and E. Zeiger(1991) Plant Physiology. Benjamin/Cummings Pub. Co.Redwood City, Calif.
14. Xu Jingping, Xu Zhenhua and Du Kejiu(2011) Comparison of heat resistance of hight kinds of roof greening woody plant. Chinese Agricultural Science Bulletin 27(6): 1-5.
15. Ye D. M. and H. F. Lin(2003) Thermostability of cell membranes as a measure of heat tolerance and relationship to flowering delay in *Chrysanthemum*. American Society for Horticultural Science 128: 656-660.
16. Zhou Zhibin, Xu Xinwen and Yang Lanying(2005) Physiological response and high-temperature resistance of three species of psammophytes under high-temperature stress. Arid Land Geography 28(6): 824-830.
17. Zhu, Genhai, Liu, Zuqi and Zhu, Peiren(1986) A study on determination of lethal temperature with logistic function. Journal of Nanning Agricultural University September(3): 11-16.
18. <http://www.kma.go.kr/index.jsp>

원 고 접 수 일: 2012년 8월 23일
 심 사 일: 2012년 10월 13일(1차)
 2012년 12월 20일(2차)
 계 재 확 정 일: 2012년 12월 20일
 3 인 익 명 심 사 필