

## Research Report

## 옥상 및 벽면녹화용 지피식물의 내한성 비교

류주현<sup>1</sup>, 이효범<sup>1</sup>, 김철민<sup>2</sup>, 정현환<sup>1</sup>, 김기선<sup>1,3\*</sup><sup>1</sup>서울대학교 농업생명과학대학 식물생산과학부<sup>2</sup>한국도시녹화(주)<sup>3</sup>서울대학교 농업생명과학연구원

## Cold Tolerance of Ground Cover Plants for Use as Green Roofs and Walls

Ju Hyun Ryu<sup>1</sup>, Hyo Beom Lee<sup>1</sup>, Cheol Min Kim<sup>2</sup>, Hyun Hwan Jung<sup>1</sup>, and Ki Sun Kim<sup>1,3\*</sup><sup>1</sup>Department of Horticultural Science & Biotechnology, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea<sup>2</sup>Korea Urban Forestation Co., Ltd, Gwacheon 427-070, Korea<sup>3</sup>Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

**Abstract:** This study was conducted to compare the cold tolerance of seven ground cover species, *Orostachys japonica*, *Sedum oryzifolium*, *S. kamschaticum* 'SG1', *S. reflexum*, *S. rupestre* 'Blue Spruce', *S. spurium* 'Green Mental', and *S. takesimense*, which have been used for green roof and wall systems in Korea. Plants were grown in 10-cm pots and 1 g of tissues at stem-end and crown of each species were kept under either light or dark condition, respectively. For cold tolerance tests, plants were initially left at 4°C and linearly cooled to 0, -4, -8, -12, -16, and -20°C at -2°C·h<sup>-1</sup> rate. Low temperature injury and regrowth rates were visually evaluated and assessed by image analysis, respectively. The lethal temperature (LT<sub>50</sub>) of plant species was determined using electrolyte leakage measurements. *S. reflexum* was the most cold tolerant, showing the most survival at -16°C, whereas *S. oryzifolium* and *S. takesimense* showed low temperature injury at -8°C. Similar results were found with electrolyte leakage measurements at the stem end. For each species, the crown (Mean LT<sub>50</sub>: -12.15°C) was more cold tolerant than the stem end (Mean LT<sub>50</sub>: -10.47°C). In conclusion, *S. reflexum* and *S. rupestre* 'Blue Spruce' are recommended for planting in the central region of Korea during late fall and early winter, as they were more cold tolerant and showed more vigorous regrowth than the other tested plant species.

**Additional key words:** electrolyte leakage, image analysis, lethal temperature, *Orostachys*, *Sedum*

## 서 언

옥상 및 벽면녹화는 도시녹화의 한 분야로 녹지공간의 부족에 따른 도심 내 생태적 불균형의 문제를 다양한 생물들의 서식공간을 제공함으로써 해결할 수 있는 방안으로 여겨지고 있으며, 기후조절과 같은 환경적 기능과 시민들의 휴식 및 레크리에이션 공간 제공이라는 이용적 측면에서 그 필요성과 관심이 증가하고 있다(Huh and Shim, 2000; Kim et al., 2010; VanWoert et al., 2005; Williams et al., 2010).

이러한 추세에 맞추어 서울을 비롯한 주요 도시에서는 도시 녹화사업의 일환으로 옥상 및 벽면녹화에 대한 지원사업이 시행되고 있으며, 서울시의 경우 2014년까지 공공 및 민간 건물 900개소에 424,102m<sup>2</sup>의 옥상녹화를 조성할 계획을 하고 있다(Green Seoul Bureau, 2011).

하지만 옥상 및 벽면녹화는 일반적인 녹화와는 달리 건물 옥상이나 건물 내외의 벽면 등 인공적인 지반 환경에 설치되기 때문에 시설물의 경량화와 조성 및 관리의 편리성 등에 대한 연구가 집중적으로 이루어져 왔다(Boivin et al.,

\*Corresponding author: kisun@snu.ac.kr

※ Received 27 February 2014; Revised 8 April 2014; Accepted 29 April 2014. 본 연구는 농림축산식품부 농림수산식품기술기획평가원 수출전략기술개발사업(과제번호: 109096-5)의 지원에 의해 이루어진 것임.

© 2014 Korean Society for Horticultural Science

2001; Kim et al., 2010; Monterusso et al., 2005; VanWoert et al., 2005). 이 중 저토심 경량형 녹화기술에 대한 연구와 기술개발이 많이 진행되었고(Huh et al., 2003a, 2003b; Kim, 2006; Kim and Huh, 2003;), 이와 더불어 저토심 경량형의 옥상 및 벽면녹화지 조성에 유지관리가 쉬운 식물소재로서 내한성, 내서성, 내건성 등의 환경내성이 강하고 척박한 토양에서 양호한 생육상태를 보이는 *Orostachys*속과 *Sedum*속 식물들이 많이 이용되고 있다(Kim, 2006; Lee et al., 2009).

하지만 옥상 및 벽면녹화의 목적이 도시생태 복원이나 열섬현상 완화와 같은 실용적인 면보다는 경관조성 등의 이용적 측면이 강한 우리나라의 여건에서 볼 때, *Sedum*속 식물들은 내환경성 차이에 따라 우점종이 달라지면서 경관적 측면에서 문제점으로 인식되고 있다. 특히, 2013년 12월 6일의 최저온도가  $-0.7^{\circ}\text{C}$ 를 기록한 반면에 그 이전해인 2012년 12월 6일에는  $-10.3^{\circ}\text{C}$ , 9일에는  $-13.2^{\circ}\text{C}$ 를 각각 기록하는 등 기온의 변화가 평년대비 큰 차이를 보일 수 있기 때문에 (Korea Meteorological Administration, 2013), 늦가을이나 초겨울에 옥상 및 벽면녹화를 조성하고자 할 때에는 식재하고자 하는 식물들의 저온에 대한 내성을 정확히 판단한 후에 식재하여야 한다. 하지만, 이렇게 옥상 및 벽면녹화에 이용되는 식물들의 환경변화에 대한 내성을 평가할 수 있는 객관적 지표가 없어 판단기준 마련을 위한 연구가 필요한 실정이다.

식물체에 온도 스트레스가 가해지면 세포막의 반투과성이 손실되어 식물 세포 내의 전해질이 용출된다(Sharom et al., 1994). 전해질 용출 평가는 특정 온도 조건에서 용출되는 전해질의 전기전도도를 측정하여 온도스트레스에 따른 세포의 피해 정도를 알아보는 평가 방식이며, 식물의 온도 내성에 대한 평가에 광범위하게 이용되고 있다(Iles and Agnew, 1995; Kim et al., 2010; Maier et al., 1994; Sharom et al., 1994). 또한 신뢰성 있는 자료 제시를 위해 온도 스트레스에 따른 저온피해 정도 및 온도 스트레스 피해를 받은 후 재생력을 알아보는 평가 역시 온도에 대한 내성을 알아보는 데 이용되고 있다(Iles and Agnew, 1995; Kim et al., 2010; Maier et al., 1994; Qian et al., 2001).

이 연구는 현재 옥상 및 벽면녹화에 많이 이용되고 있는 바위솔을 비롯한 6가지 세덤류들이 갑작스런 저온에 노출되었을 때 발생하는 피해 정도와 이후 재생되는 정도를 조사하여 각 초종 간의 내한성을 비교하고, 전해질 용출량의 변화를 측정하여 내한성을 비교할 수 있는 객관적 자료를 얻고자 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 식물재료

현재 옥상 및 벽면녹화에서 많이 이용되고 있거나 이용 가치가 높은 지피식물들 중에서 많이 사용되고 있는 *Orostachys japonica*(바위솔)와 *Sedum oryzifolium*(땅채송화), *S. reflexum*(세덤 리플렉섬), *S. rupestre* 'Blue Spruce'(블루솔), *S. spurium* 'Green Mental'(금강기린초), *S. takesimensense*(섬기린초)와 일본 도입 품종인 *S. kamtschaticum* 'SG1'(상록기린초) 등 7가지 품종을 과천시 소재한 한국도시녹화(주)에서 분양 받아 식물체재료로 사용하였다. 각 식물체는 삼목 후 2011년 10월부터 11월까지 2개월 동안 플라스틱 하우스에서 72공 트레이에 재배된 유묘를 직경 10cm, 높이 10cm의 포트에 이식하여 사용하였다.

### 저온처리

식물체는 2011년 11월 25일부터 3개월간 서울대학교 농업생명과학대학 실험농장의 유리온실에서  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 조건으로 재배되었으며 관수는 일주일에 한번씩 실시하였다. 이듬해인 2012년 2월 20일에 저온에 노출시키기 위하여 유리온실에서 재배된 식물체들을 growth chamber로 옮겨  $4^{\circ}\text{C}$ ,  $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  광조건에서 24시간 동안 순화시킨 후 서울대학교 실험농장에 위치한 저온저장실로 옮겨 저온에 노출시켰다. 저온처리에 따른 피해도 및 재생률 평가를 위한 식물체는 주간 기온의 변화를 고려하여 포트에 식재된 채로 광조건 하에서 저온처리를 하였고, 전해질 용출 측정을 위한 식물체는 Iles and Agnew(1995)의 방법에 따라 포트에서 꺼내어 식물체에 묻어 있는 흙과 잔여물을 물로 깨끗이 씻어낸 후 젖은 한랭사로 감싸고 다시 알루미늄 호일로 감싸서 암조건으로 저온처리를 받도록 하였다. 온도는 2011년 12월부터 2012년 1월까지 서울지역의 최저온도 및 일중 온도 변화(Fig. 2, Korea Meteorological Administration, 2013)를 고려하여 최저온도를  $-20^{\circ}\text{C}$ 로 정하고, Okeyo et al.(2011)의 방법을 수정하여  $4^{\circ}\text{C}$ 부터 1시간당  $2^{\circ}\text{C}$ 씩 낮추면서 0, -4, -8, -12, -16,  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 저온에 이르게 하였다. 다음 각 목표온도에 도달하였을 때 1시간 동안 저온에 노출시킨 후 저온저장실에서 꺼내어  $4^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 동안 암상태로 순화처리를 하였다.

### 전해질 용출 측정

저온에 노출되어 발생하는 지상부의 피해 정도와 피해

를 입은 식물체의 재생력을 알아보기 위해 식물체의 정단부와 지면과 맞닿은 관부로 나누어 각각 전해질 용출량을 측정하였다. 암조건에서 저온처리가 끝난 식물체는 24시간 순화처리 후 정단부와 관부로부터 조직을 1g씩 5반복으로 채취하였다. 채취한 조직들을 50mL 폴리프로필렌 튜브에 넣고 2차 증류수 30mL를 넣어 24시간 동안 실온에 두었다가 전기전도도 측정기(HI-9811-5, Hanna Instruments Inc., Woonsocket, RI, USA)를 이용하여 초기 전기전도도 (electrical conductivity, EC)값을 측정하였다. 초기 EC값을 측정한 샘플은 80°C의 항온수조(DS-23S, Dasol Scientific Co., Ltd., Suwon, Korea)에 넣어 4시간 동안 열처리를 하여 조직을 괴사시킨 후 수조에서 꺼내어 24시간 동안 실온에 두었다가 최종 EC값을 측정하였다.

전해질 용출(electrolyte Leakage, EL)과 처리온도와의 관계를 설명하기 위하여 비선형적 연속함수인 시그모이드 (sigmoid) 함수를 선택하였다. 저온처리 후 식물조직 침출액의 전해질 용출값을 초기값으로 하고, 괴사시킨 식물 조직 침출액의 전해질 용출값을 최대값으로 하여 이들의 비를 백분율로 산출하였다. 처리온도와 전해질 용출의 관계는 많은 선행 연구에서 S자 반응 곡선을 나타내었고, 이 곡선의 변곡점은 최대 전해질 용출량의 50%가 되는 온도로서 치사 온도(lethal temperature,  $LT_{50}$ )로 많이 표현되고 있다(Burr et al., 1990; Iles and Agnew, 1995; Kim et al., 2010; Maier et al., 1994; Sharom et al., 1994).  $LT_{50}$ 값을 예측하기 위해 S자 함수 기본식 Eq. 2(Burr et al., 1990; Kingsland, 1995;

Lee et al., 1991; Von Seggern, 1993)에 최소 전해질 용출값 (z)과 변곡점에서의 기울기(k), 온도( $T_m$ ) 매개변수로 하고, 처리 온도를 독립 변수로 대응시킨 변형식을 이용하였다 (Kim et al., 2010).

$$\text{Electrolyte Leakage (\%)} = \frac{\text{Initial electrical conductivity}}{\text{Final electrical conductivity}} \times 100 \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

$$EL_p = z + \frac{(100 - z)}{1 + e^{-k(T - T_m)}} \quad (3)$$

$EL_p$  = predicted EL value (%)

$z$  = baseline level of electrolyte leakage (%)

$T_m$  = temperature at the inflection point (°C)

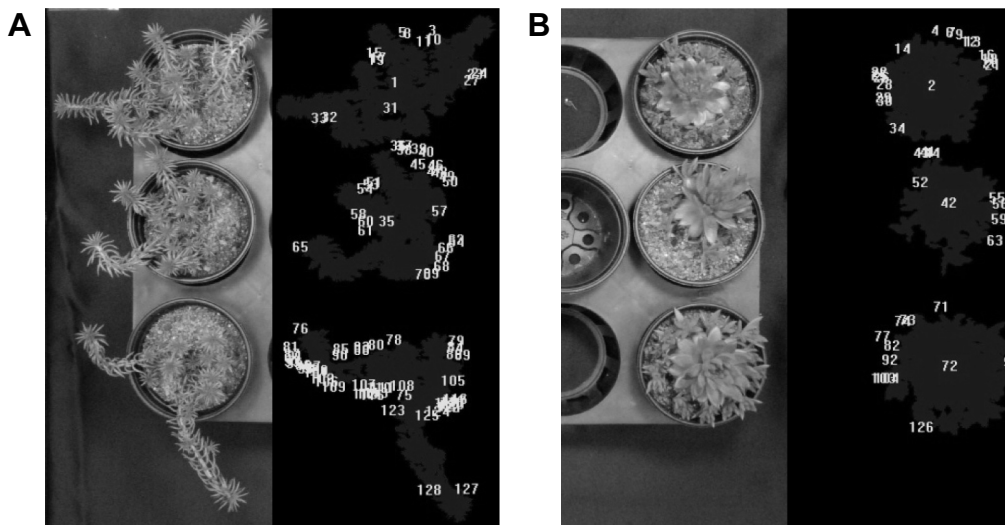
$k$  = function of slope at the inflection point

$T$  = treatment temperature (°C)

$e$  = 2.718

### 저온피해도 및 재생률

광조건 하에서 온도별로 저온처리한 식물체를 growth chamber로 옮겨 4°C에서 24시간 동안 암상태에서 순화시켰다. 이후 식물체를 유리온실로 옮겨 3주간 관리한 다음 저온



**Fig. 1.** Ground coverage of plant canopies on the field (left) and digital images (right). The area highlighted in blue in the right of the figure was used to calculate the total area of the field of view values. A, *Sedum reflexum*; B, *Orostachys japonica*.

피해도를 조사하였다. 저온피해도는 정단부의 생육상태를 시각적으로 판단하여 9점 시각 척도(1 = 피해 없음, 녹색 잎 100% 유지, 9 = 매우 피해 심함, 녹색 잎 0%)를 이용하여 3반복으로 나타내었다.

재생물은 온실에서 약 2개월 정도 관리한 후 2012년 4월 27일에 생육 및 피복정도를 조사하였다. 피복정도를 알아보기 위해 각 화분별로 디지털카메라(D80, Nikon Inc., Tokyo, Japan)를 이용하여 삼각대에 고정시켜 화분과 수직으로 1m의 높이에서 촬영을 하였다. 촬영한 사진은 Okeyo et al. (2011)의 방법에 따라 SigmaScan-Pro(v5.0, Jandel Scientific, Chicago, IL, USA) 이미지분석 프로그램을 이용하여 분석하였고, 색의 임계값을 본 실험의 재료에 맞춰 Hue값은 43에서 103, 채도값은 25에서 100까지로 설정하여 분석한 면적의 픽셀 수를 계산하였다(Fig. 1). 재생물은 화분의 상단부 면적을 100으로 산정한 픽셀 수를 처리구들의 픽셀 수와 비교한 상대값으로 나타내었다.

### 자료의 분석

측정을 통해 얻은 결과의 유의성 분석은 통계프로그램(SAS 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 최소유의차 검정(Least Significant Different test; LSD test)과 General linear model(GLM)을 적용하여 Duncan의 multiple range test에 의하여 유의차( $p < 0.05$ )를 검정하였다.

## 결과 및 고찰

### 정단부 저온피해도

저온처리 3주 후 피해 정도를 조사한 결과 *Sedum takesimense*는 -4°C에서도 일부 조직의 피해가 나타나 실험에 사용한 식물 소재 중에서 온도변화에 가장 민감한 것으로 나타났고, *S. reflexum*의 경우에는 -20°C 처리구에서도 일부 조직만 생존하여 내한성이 가장 강한 것으로 조사되었다(Fig. 2).

저온피해도를 가지고 판단한 결과 *S. reflexum*, *S. rupestre* 'Blue Spruce', *Orostachys japonica*, *S. spurium* 'Green Mental', *S. kamschaticum* 'SG1', *S. oryzifolium*, *S. takesimense* 순으로 내한성이 강한 것으로 나타났다. 따라서 다른 초종들에 비해 상대적으로 내한성이 강한 *S. rupestre* 'Blue Spruce'와 *S. reflexum*이 옥상 및 벽면 녹화에 좀 더 적합한 식물이라고 판단되며, 이는 피해 정도에는 차이가 있지만 Kim et al.(2010)의 연구에서도 *S. reflexum*과 *S. rupestre*가 -20°C 처리구에

서 91.7%의 생존율을 보여 내한성이 강한 것으로 보고한 것과 일치하였다. 하지만 Zhao et al.(2012)의 연구에서는 *S. reflexum*뿐만 아니라 *S. spurium*과 *S. takesimense*의 생존율 모두 -20°C, 2시간 처리구에서 100%를 나타내 본 연구와는 다른 결과를 보여주었는데, 이러한 차이들은 선행연구들과는 달리 저온피해도 조사를 위해 포트에 식재된 채로 광조건 하에서 저온처리를 받았기 때문에 저온에 의한 피해가 증가하여 나타난 것으로 생각된다. 이외에도 공시재료의 재배환경에 따른 생리적인 차이나, 저온노출 및 해동방법이나 시간 등의 변수들로 인한 차이들도 고려할 수 있다(Cardona et al., 1997).

### 정단부 전해질 용출 반응

정단부 전해질 용출량의 변화를 보면 -4°C까지는 모든 초종에서 큰 변화가 나타나지 않았으나, -8°C와 -12°C 처리구 간에서 대부분의 초종에서 뚜렷한 변화가 나타나(Table 1), 이를 통해 온도가 -8°C에서 -12°C로 변하는 시점에 식물체들의 저온에 대한 내성의 한계점이 있을 것으로 추정하였다. 그 중에서도 *S. kamschaticum* 'SG1'과 *S. reflexum*, *S. rupestre* 'Blue Spruce'는 -12°C와 -16°C 처리구 간에서 가장 큰 용출량의 변화를 보여 다른 초종에 비해 낮은 온도에서 영향을 받는 것으로 조사되었다. 반면 *S. spurium* 'Green Mental'과 *S. takesimense*의 경우에는 -4°C와 -8°C 처리구 간에서도 통

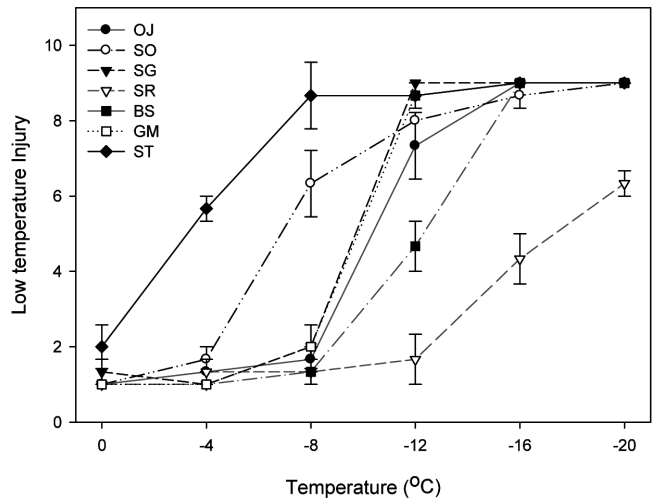


Fig. 2. Low temperature injury of ground cover plants at 3 weeks after temperature treatment. Low temperature injury expressed on a scale of 1 to 9 with 1 = leaves 100% green (no damage); 9 = leaves 0% green (100% damage symptoms, plant dead).

**Table 1.** Effects of low temperature on the electrolyte leakage from stem-end tissues of ground cover plants.

Species	Treatment temperature (°C)						LSD
	0	-4	-8	-12	-16	-20	
	Electrolyte leakage (%) <sup>z</sup>						
<i>Orostachys japonica</i>	2.4	1.7	13.6	63.3	86.7	90.2	11.57 <sup>y</sup>
<i>Sedum oryzifolium</i>	2.6	7.7	16.0	34.2	45.8	39.5	10.93
<i>Sedum kamtschaticum</i> 'SG1'	0.5	1.0	2.0	32.0	75.2	74.6	11.67
<i>Sedum reflexum</i>	2.3	3.8	2.3	45.7	59.0	59.8	8.53
<i>Sedum rupestre</i> 'Blue Spruce'	0.0	0.5	0.0	23.1	51.9	54.3	14.61
<i>Sedum spurium</i> 'Green Mental'	3.9	5.6	17.4	83.7	73.2	74.5	7.06
<i>Sedum takesimense</i>	2.7	1.7	11.1	67.4	70.6	65.1	8.49

<sup>z</sup>Electrolyte leakage (EL) was expressed as the percentage of solution conductivity after temperature treatment compared to conductivity after heat-killing.

<sup>y</sup>Least significant difference value for percent stem EL ( $p \leq 0.05$ ,  $n = 5$ ).

계적으로 유의한 증가세를 나타내 상대적으로 낮은 온도에서 민감하게 반응하는 것으로 관찰되었다. 또한 두 초종은 -12°C 처리구에서 최대 전해질 용출량과 비교하였을 때 90% 이상의 값을 나타내 식물체에 피해가 크게 발생하였을 것으로 판단하였다.

각 초종들의 전해질 용출량을 선행 연구들과 비교하여 보면, -20°C에서 *S. reflexum*의 전해질 용출량을 Kim et al. (2010)은 45.7%, Zhao et al.(2012)은 39.6%로 보고하였는데, 본 실험에서는 같은 온도에서 *S. reflexum*의 정단부 전해질 용출량은 59.8%로 앞서 보고된 수치보다 높게 나타났다. 이러한 차이는 식물재료를 외부환경에서 생육시키면서 발생한 저온순화 정도의 차이로 판단되었다.

### 정단부 치사 온도

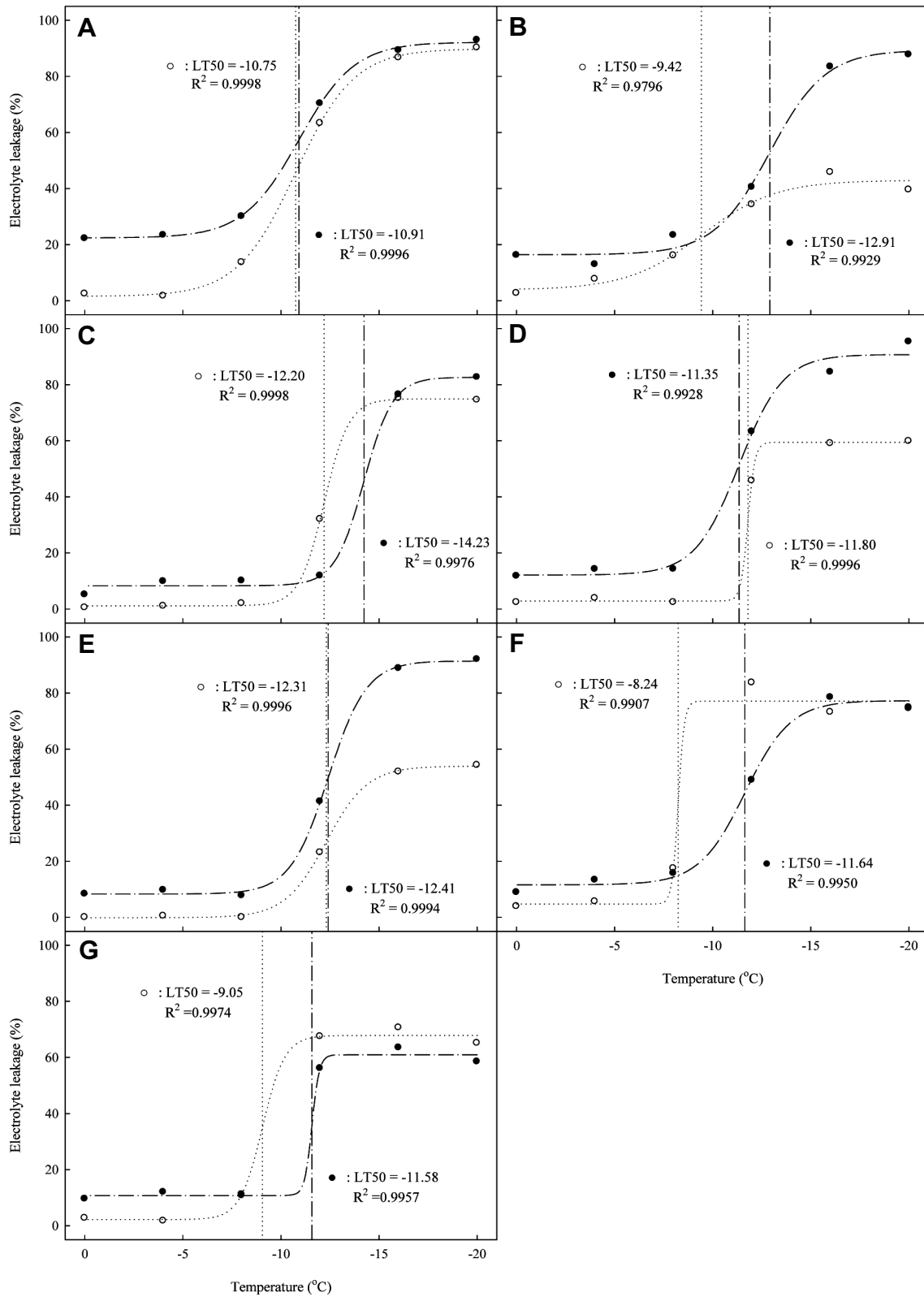
비선형회귀분석을 통하여 7종 식물에 대한 처리 온도와 전해질 용출의 관계를 그래프로 나타내었다(Fig. 3). 최대 전해질 용출량의 50%가 용출된 온도를 치사 온도로 산정하여 예측해본 결과 식물들의 정단부 치사 온도는 -8°C에서 -13°C 사이로 나타났다. 정단부 치사 온도는 *S. spurium* 'Green Mental'이 -8.25°C로 내한성이 가장 약한 것으로 나타났으며, *S. rupestre* 'Blue Spruce'가 -12.39°C로 대상 초종 중에서 내한성이 가장 강한 것으로 나타났다. 치사 온도를 통해 각 초종 정단부의 내한성을 비교해 본 결과 *S. rupestre* 'Blue Spruce'(-12.31°C), *S. kamtschaticum* 'SG1'(-12.20°C), *S. reflexum*(-11.35°C), *O. japonica*(-10.75°C), *S. oryzifolium*(-9.42°C), *S. takesimense*(-9.05°C), *S. spurium* 'Green Mental'

(-8.24°C) 순으로 내한성이 강한 것으로 판단되었다.

이를 정단부 저온피해도를 가지고 판단한 초종간 내한성 순위와 비교해 보았을 때 대부분 비슷하게 나타났다. 하지만, *S. kamtschaticum* 'SG1'과 *S. spurium* 'Green Mental'은 관찰값으로는 -10°C 정도일 것으로 판단되었으나, 각각의 치사온도는 -12.20°C와 -8.24°C로 산출되어 예상보다 낮거나 높게 산출되어 차이가 나타나 두 초종에 대한 추가 연구가 필요하다고 생각한다. 반면, Kim et al.(2010)과 Zhao et al.(2012)의 연구에서 *S. oryzifolium*과 *S. reflexum*, *S. spurium*, *S. rupestre* 모두 치사 온도 값이 -20°C 전후로 본 실험의 결과보다 낮은 값을 보이고 있는 것은 온도처리 전 저온에 노출된 정도에 의한 차이로 생각된다.

### 저온처리 후 재생률

저온처리 약 10주 후에 식물들의 생존과 피복정도를 조사하였다(Table 2). 0°C에서 -8°C 처리구까지는 모두 생존하여 50% 이상의 피복률을 나타내었으며, -12°C 처리구에서는 *S. oryzifolium*과 *S. reflexum*, *S. takesimens*는 20% 이상의 피복률을 보였다. -16°C 처리구에서는 *S. oryzifolium*과 *S. reflexum*이 생존하였고, -20°C 처리구에서는 유일하게 *S. reflexum*이 생존하였다. 하지만 *S. reflexum*의 -20°C 처리구와 *S. oryzifolium*의 -16°C 처리구, *O. japonica*과 *S. spurium* 'Green Mental'의 -12°C 처리구의 피복률은 각각 5.7%, 3.4%, 1.4%, 0.6%로 상당히 낮은 값을 보여 품질이 좋지 않았는데, 다른 온도 범위에서 식물들이 회복되는 속도와 비교해 보면 생육이 천천히 이루어지는 것을 볼 수 있었다. 이러한 현상



**Fig. 3.** Electrolyte leakage (EL) curves with a four-parametric sigmoid function from stem (○) and crown (●) tissues of ground cover plants following low temperature treatments. A, *Orostachys japonica*; B, *Sedum oryzifolium*; C, *S. kamtschaticum* 'SG1'; D, *S. reflexum*; E, *S. rupestre* 'Blue Spruce'; F, *S. spurium* 'Green Mental'; G, *S. takesimensis*.

**Table 2.** Effects of low temperature on the ground coverage of plants at 10 weeks after treatment.

Species	Treatment temperature (°C)						LSD
	0	-4	-8	-12	-16	-20	
	Ground coverage (%) <sup>z</sup>						
<i>Orostachys japonica</i>	69.3 c <sup>y</sup>	60.6 d	32.4 b	1.4 c	0.0 b	0.0 b	28.9 <sup>x</sup>
<i>Sedum oryzifolium</i>	149.5 a	127.1 ab	63.2 b	24.6 b	3.4 b	0.0 b	27.5
<i>Sedum kamtschaticum</i> 'SG1'	116.9 b	153.2 a	146.5 a	0.0 c	0.0 b	0.0 b	40.3
<i>Sedum reflexum</i>	83.7 c	57.3 d	46.0 b	83.6 a	35.5 a	5.7 a	28.3
<i>Sedum rupestre</i> 'Blue Spruce'	60.7 c	72.4 cd	56.7 b	16.2 bc	0.0 b	0.0 b	21.3
<i>Sedum spurium</i> 'Green Mental'	82.0 c	109.7 bc	61.9 b	0.6 c	0.0 b	0.0 b	39.3
<i>Sedum takesimense</i>	127.1 ab	130.9 ab	72.0 b	20.4 b	0.0 b	0.0 b	19.8
Significance	***	***	**	****	**	***	

<sup>z</sup>Ground coverage was expressed by percentage of the area covered by leaves (canopy coverage) compare with pot surface area (100%).

<sup>y</sup>Mean separation within columns for each ground coverage by Duncan's multiple range test at  $p = 0.05$ .

<sup>x</sup>Least significant difference value for percent ground coverage ( $p \leq 0.05$ ,  $n = 3$ ).

\*\*\*, \*\*, \*\*\*\* Significant at  $p = 0.01$ ,  $0.001$ , or  $0.0001$ , respectively.

**Table 3.** Effects of low temperature on the electrolyte leakage from crown tissues of ground cover plants.

Species	Treatment temperature (°C)						LSD
	0	-4	-8	-12	-16	-20	
	Electrolyte leakage (%) <sup>z</sup>						
<i>Orostachys japonica</i>	22.2	23.3	30.0	70.3	89.3	93.0	8.89 <sup>y</sup>
<i>Sedum oryzifolium</i>	16.1	12.9	23.3	40.5	83.4	87.8	8.38
<i>Sedum kamtschaticum</i> 'SG1'	5.1	9.8	10.0	11.8	76.5	82.6	6.74
<i>Sedum reflexum</i>	11.7	14.2	14.2	63.2	84.5	95.3	4.50
<i>Sedum rupestre</i> 'Blue Spruce'	8.3	9.7	7.7	41.3	88.8	92.0	2.49
<i>Sedum spurium</i> 'Green Mental'	8.8	13.3	15.7	48.9	78.4	74.8	8.25
<i>Sedum takesimense</i>	9.5	11.9	10.7	56.1	63.4	58.4	8.35

<sup>z</sup>Electrolyte leakage (EL) was expressed as the percentage of solution conductivity after temperature treatment compared to conductivity after heat-killing.

<sup>y</sup>Least significant difference value for percent stem EL ( $p \leq 0.05$ ,  $n = 5$ ).

은 *S. spectabile* 'Autumn Joy'와 'Brilliant'에서도 볼 수 있었는데, Iles and Agnew(1995)는 저온 처리를 받은 이후에는 휴면을 타파할 수 있는 충분한 시간의 저온이 요구되는데 이를 충족시키지 못하여 나타난 것으로 설명하였다.

### 관부 전해질 용출반응

지표면과 맞닿아 있는 관부의 용출량 변화를 보면 정단부의 변화와는 달리 모든 초종의 0°C 처리구에서도 전해질 용출이 나타나기 시작했고, 모든 온도처리구에서 전해질 용출이 정단부 처리구보다 많게 나타나 식물체에서 분리된 관부

는 정단부보다 온도변화에 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다(Table 3). 하지만 -8°C와 -12°C 처리구간에서 큰 변화를 보였던 정단부에 비해 관부에서는 -12°C와 -16°C 처리구간에서 변화량이 큰 것으로 나타나, 관부가 정단부보다는 더 낮은 온도에 반응하는 것으로 판단할 수 있었다. 그 중에서도 *S. kamtschaticum* 'SG1'과 *S. rupestre* 'Blue Spruce'는 -12°C와 -16°C 처리구간에서 가장 큰 용출량의 변화를 보여 다른 초종에 비해 낮은 온도에서 영향을 받는 것으로 관찰되었다. *S. oryzifolium*은 -4°C와 -8°C 처리구간에서도 통계적으로 유의한 증가세를 나타내 상대적으로 낮은 온도에서

민감하게 반응하는 것으로 조사되었지만,  $-12^{\circ}\text{C}$ 와  $-16^{\circ}\text{C}$  처리구간에서 가장 급격한 변화량을 나타내 온도변화에는 민감하게 반응하지만 더 낮은 온도까지 견딜 수 있는 것으로 판단되었다.

본 실험에서 *S. reflexum*은  $-16^{\circ}\text{C}$  처리구에서 관부의 전해질 용출량이 84.5%였는데, Iles and Agnew(1995)의 연구에서 *Sedum* 'Autumn Joy'을 11월에 채취하였을 때  $-18^{\circ}\text{C}$  처리구의 관부 전해질 용출량이 83%로 비슷한 경향을 나타내었다. 또한 같은 보고서에서 이듬 해 1월에 같은 초종을 채취하여 측정하였을 때 전해질 용출량이 28%로 감소하는 것으로 밝힌 것처럼 본 연구에 사용된 *S. reflexum*도 외부에서 저온에 노출되었다면 좀 더 적은 전해질 용출량을 보였을 것으로 생각한다.

### 관부 치사 온도

전해질 용출량의 변화로 치사 온도를 예측한 결과 관부의 치사 온도는 정단부보다 낮은  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서  $-15^{\circ}\text{C}$  사이로 나타나 내한성은 정단부보다는 관부가 더 강한 것으로 조사되었다(Fig. 3). 관부의 치사 온도는 *O. japonica*가  $-10.88^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타났고, *S. kamtschaticum* 'SG1'이  $-14.24^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮게 나타났다. 관부의 치사 온도를 통해 각 초종의 내한성을 비교해 보면 *S. kamtschaticum* 'SG1'( $-14.23^{\circ}\text{C}$ ), *S. oryzifolium*( $-12.91^{\circ}\text{C}$ ), *S. rupestre* 'Blue Spruce'( $-12.41^{\circ}\text{C}$ ), *S. spurium* 'Green Mental'( $-11.64^{\circ}\text{C}$ ), *S. reflexum*( $-11.35^{\circ}\text{C}$ ), *S. takesimense*( $-11.58^{\circ}\text{C}$ ), *O. japonica*( $-10.91^{\circ}\text{C}$ ) 순으로 강한 것으로 조사되었다.

이를 관부의 재생률로 정리한 초종간 내한성 순위와 비교해 보았을 때 대부분 비슷하게 나타났으나, *S. kamtschaticum* 'SG1'의 치사 온도( $-14.23^{\circ}\text{C}$ )가 관찰값( $-12^{\circ}\text{C}$  이상)보다 낮게 나타났고, *S. reflexum*의 치사 온도( $-11.35^{\circ}\text{C}$ )는 관찰값( $-16^{\circ}\text{C}$  이하)보다 높게 나타났다. 다른 문헌들과 비교 검토해보았을 때 재배조건에 따른 실험적인 차이인 것으로 보이며 다양한 환경조건에 따른 추가적인 연구가 필요하다고 생각한다.

또한, 저온피해 후 식물체의 재생 정도는 식물체의 정단부보다는 관부의 치사온도 값을 이용하여 예측하는 것이 좀 더 정확할 것으로 판단되며, 이상기후의 증가에 따른 기온 변화에 의한 식물체의 피해 정도는 정단부의 치사온도 값을 이용하여 예측하는 것이 나올 것으로 생각된다.

온도가 낮아짐에 따라 전해질 용출량이 증가한 것은 세포막의 반투과성에 손실이 일어났기 때문이며(Sharom et al.,

1994), 초종들간의 내한성의 차이는 이러한 반투과성의 손실 정도에 따른 차이임을 추정할 수 있었다. 전해질 용출량을 통해 예측한 치사 온도는 Iles and Agnew(1995), Kim et al.(2010)과 Maier et al.(1994) 등의 지피식물 내한성 연구에서 나타난 값과 다르게 나타났는데, 이는 저온 처리 방법과 저온 순화도, 초종 및 품종, 식물체의 생육 정도 등의 차이 때문인 것으로 생각하고 있다. 그러므로 이용하는 식물체의 생육환경에 대한 환경조건을 명확하게 명시하는 것이 중요하다고 생각되며, 이번 연구와 같은 경우에는 저온 순화를 위해 설정한 온도가 늦가를 및 겨울철 온도이기 때문에, 늦가를 및 겨울철에 조성되는 옥상 및 벽면 녹화에 사용되는 초종들에 대한 기초자료로써 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

또한, *Sedum*류의  $-20^{\circ}\text{C}$  처리구에서 부위별 전해질 용출량을 비교해 보면 *S. oryzifolium*, *S. reflexum*, *S. rupestre* 'Blue Spruce'는 모두 60% 미만임에 비하여, *S. kamtschaticum* 'SG1', *S. spurium* 'Green Mental', *S. takesimense*는 모두 60% 이상의 값을 나타내었고, 관부의 경우에는 반대로 전자의 경우에는 모두 88% 이상의 많은 용출량을 보인데 비하여 후자의 경우에는 평균 72%로 상대적으로 낮은 용출량을 나타내어 확연하게 구분되는 차이를 나타내었다. 이러한 *Sedum*류 두 그룹간의 형태적 차이를 보면 전자는 잎이 좁은 침상이나 작은 형태이고, 후자는 상대적으로 잎이 넓은 광엽형이고 줄기와 잎의 구분이 뚜렷한 형태로 *Sedum*류의 형태적 특성에 따른 내한성의 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서 *Sedum*류의 내한성에 대한 추가실험에서는 형태적 특성에 따른 비교연구가 필요하다고 할 수 있다.

결론적으로 *S. reflexum*과 *S. rupestre* 'Blue Spruce'가 다른 초종들에 비해 상대적으로 내한성이 강하며, 옥상 및 벽면 녹화에 좀 더 적합한 식물이라고 판단된다. *S. oryzifolium*은 저온 노출에는 민감하게 반응하여 초기 피해는 많이 나타났지만, 이후 생존하여 재생되는 능력은 우수한 것으로 판단된다. 한편, *O. japonica*, *S. kamtschaticum* 'SG1', *S. spurium* 'Green Mental', *S. takesimense*처럼 갑작스런 저온에 민감한 초종들은 좀 더 이른 시기에 식재하여 저온에 충분히 순화가 되도록 계획을 세워야 할 것으로 생각한다. 전해질 용출량 측정을 통해 식물의 내한성을 좀 더 용이하게 평가할 수 있었으며, 다양한 환경에서의 조사가 이루어질 필요가 있다고 생각된다. 앞으로 내한성과 저온을 받은 이후 재생률 등을 고려하여 옥상 및 벽면녹화 식재계획을 수립한다면 좀 더 다양한 식생의 안정적인 경관조성이 가능할 것으로 생각한다.



## 초 록

본 연구는 현재 한국에서 옥상 및 벽면 녹화에 이용되고 있는 *Orostachys japonica*와 *Sedum oryzifolium*, *S. kamtschaticum* 'SG1', *S. reflexum*, *S. rupestre* 'Blue Spruce', *S. spurium* 'Green Mental', *S. takesimense* 등 일곱 가지 지피식물의 내한성을 비교하기 위해 진행되었다. 각 식물체의 내한성을 알아보기 위해서 10cm 포트에 심은 식물체와 정단부, 관부의 1g 단편 조직을 준비하였고, 10cm 포트 식물체는 명 상태에서, 1g 단편 조직은 암 상태에서 저온 처리를 하였다. 초겨울의 온도변화를 산정하여 처리온도는 0, -4, -8, -12, -16, -20°C로 정하였고, 0°C부터 시간당 2°C씩 낮추는 방식으로 진행되었다. 내한성 비교는 저온피해도 조사와 재생평가, 치사온도 예측값으로 시행하였다. 저온피해도 조사와 재생률은 생육 정도를 평가하는 방식으로 진행하였고, 치사온도는 전해질 용출량의 변화를 통해 예측하였다. 정단부의 치사온도 범위는 -8.24°C~-12.31°C로 산출되었고, 관부의 치사온도 범위는 -10.91°C~-14.23°C로 산출되어 정단부보다 관부가 내한성이 더 강한 것으로 나타났다. 정단부의 내한성은 *S. reflexum*이 가장 높은 것으로 조사되었고, *S. oryzifolium*과 *S. takesimense*는 온도변화에 민감한 것으로 나타났다. 재생률 또한 *S. reflexum*이 -20°C에서도 생존하여 내한성이 가장 강한 것으로 나타났고, 정단부의 내한성과는 다르게 *S. oryzifolium*도 -16°C에서 생존하여 높은 재생률을 보였다. 늦가을이나 초겨울에 옥상 및 벽면녹화를 할 경우에는 이러한 결과들을 참고하여 식물을 선정하거나 시기를 조정하여 식재하면 안정적인 조성이 가능할 것으로 생각한다.

**추가 주요어 :** 전해질 용출, 화상분석, 치사 온도, *Orostachys*, *Sedum*

## 인용문헌

- Boivin, M.A., M.P. Lamy, A. Gosselin, and B. Dansereau. 2001. Effect of artificial substrate depth on freezing injury of six herbaceous perennials grown in a green roof system. *HortTechnology* 11:409-411.
- Burr, K.E., R.W. Tinus, S.J. Wallner, and R.M. King. 1990. Comparison of three cold hardiness tests for conifer seedlings. *Tree Physiol.* 6:351-369.
- Cardona, C.A., R.R. Duncan, and O. Lindstrom. 1997. Low temperature tolerance assessment in *Paspalum*. *Crop Sci.* 37: 1283-1291.
- Green Seoul Bureau. 2011. 2011 policy materials - Green roof project. Seoul Metropolitan Government, Seoul, Korea.
- Huh, K.Y. and K.K. Shim. 2000. Characteristics of artificial soils used alone or in a blend with field soil for the greening of artificial ground. *J. Kor. Inst. Landscape Arch.* 28:28-38.
- Huh, K.Y., I.H. Kim, and H.C. Kang. 2003a. Effects of artificial substrate type, soil depth, and drainage type on the growth of *Sedum sarmentosum* grown in a shallow green rooftop system. *J. Kor. Inst. Landscape Arch.* 31:102-112.
- Huh, K.Y., I.H. Kim, and N.H. Ryu. 2003b. Effects of substrate type, soil depth, and drainage type on the growth of *Sedum kamtschaticum* in extensive green roof systems. *J. Kor. Inst. Landscape Arch.* 31:90-100.
- Iles, J.K. and N.H. Agnew. 1995. Seasonal cold-acclimation patterns of *Sedum spectabile* × *S. telephium* L. 'Autumn Joy' and *Sedum spectabile* Boreau. 'Brilliant'. *HortScience* 30:1221-1224.
- Kim, I.H. 2006. Development of shallow-extensive green roof system for urban greening. PhD Thesis, Gyeongsang National Univ., Jinju, Korea.
- Kim, I.H. and K.Y. Huh. 2003. Growth characteristics of *Sedum oryzifolium* in extensive green roof systems. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 21:346-352.
- Kim, I.H., K.Y. Huh, and M.R. Huh. 2010. Cold tolerance assessment of *Sedum* species for shallow-extensive green roof system. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 28:22-30.
- Kingsland, S.E. 1995. Modeling nature. University of Chicago Press, Chicago, IL, USA.
- Lee, S.A., Y.M. Ha, and I.S. Han. 2009. A selection of Korean native *Sedum* spp. For evergreen ground covers of the central districts of Korea. *J. Kor. Inst. Landscape Arch.* 37:90-97.
- Lee, S.H., S.G. Yun, S.B. Back, and H.G. Park. 1991. Comparison of germination characteristics, and of logistic and eibull functions to predict cumulative germination of grasses under osmotic water stress. *J. Korean Grassl. Sci.* 11:209-214.
- Maier, F.P., N.S. Lang, and J.D. Fry. 1994. Evaluation of an electrolyte leakage technique to predict St. Augustinegrass freezing tolerance. *HortScience* 29:316-318.
- Monterusso, M.A., D.B. Rowe, and C.L. Rugh. 2005. Establishment and persistence of *Sedum* spp. And native taxa for green roof applications. *HortScience* 40:391-396.
- Okeyo, D.O., J.D. Fry, D. Bremer, C.B. Rajashekar, M. Kennelly, A. Chandra, D.A. Genovesi, and M.C. Engelke. 2011. Freezing

- tolerance and seasonal color of experimental zoysiagrasses. *Crop Sci.* 51:2858-2863.
- Qian, Y.L., S. Ball, Z. Tan, A.J. Koski, and S.J. Wilhelm. 2001. Freezing tolerance of six cultivars of buffalograss. *Crop Sci.* 41:1174-1178.
- Sharom, M., C. Willemot, and J.E. Thompson. 1994. Chilling injury induces lipid phase changes in membranes of tomato fruit. *Plant Physiol.* 105:305-308.
- VanWoert, N.D., D.B. Rowe, J.A. Anderson, C.L. Rugh, and L. Xiao. 2005. Watering regime and green roof substrate design affect *Sedum* plant growth. *HortScience* 40:659-664.
- Von Seggern, D. 1993. *Standard curves and surfaces: A mathematical notebook: User's Guide.* CRC Press, Boca Raton, FL.
- Williams, N.S.G., R.E. Hughes, N.M. Jones, D.A. Bradbury and J.P. Rayner. 2010. The performance of native and exotic species for extensive green roofs in Melbourne, Australia. *Acta Hort.* 811:689-696.
- Zhao, H.X., H. Li, H.J. Son, and T.H. Kang. 2012. Cold tolerance assessment of ever ground-cover plants for extensive green roof system. *J. Kor. Inst. Landscape Arch.* 40:127-134.
- Korea Meteorological Administration. 2013. Monthly weather report. [http://www.kma.go.kr/weather/-climate/data\\_monthly.jsp](http://www.kma.go.kr/weather/-climate/data_monthly.jsp)