

한라산 고산식물의 저지대 적응에 관한 연구

고정균¹⁾, 오순자, 고석찬

제주대학교 생물학과, ¹⁾한라산국립공원

Studies on the Adaptation of Alpine Plants to Low Altitude

Jung Goon Koh¹⁾, SoonJa Oh and Suck Chan Koh

Department of Biology, Cheju National University, Cheju, 690-756

¹⁾Mt. Halla National Park, San 220-1, Haeandong, Cheju, 690-200, Korea

ABSTRACT

The characteristics of growth and chlorophyll fluorescence was studied from three alpine plants (*Tofieldia fauriei*, *Adenophora taquetii*, *Chrysanthemum zawadskii* ssp. *coreanum*) from March, 1998 to August, 1999, in order to develop the adaptation of alpine plants to low altitudes. In the low altitude (150m a.s.l.), the growth patterns of alpine plants showed sigmoidal growth curves without lag phase. Flowering periods are shorter while seed development periods are longer, in contrast to them in alpine habitats (1,850~1,950m a.s.l.). The photochemical efficiency of PSII, Fv/Fm, was slightly depressed in midday (12:00~15:00) in low altitude. This midday depression resulted from decrease in Fm combined with increase in Fo, suggesting that alpine plants are chronically photoinhibited in low altitude. The Fv/Fm values of alpine plants under low altitude showed negative relationships with temperature and light intensity, with positive relationships with relative humidity. Therefore, in order to develop the adaptation of alpine plants to low altitudes, it seems to be important to screen the strong light and to keep the temperature low.

Key words: Alpine plants, Low altitude, Photochemical efficiency of PSII, Chronical photoinhibition.

서 론

식물의 생장은 유전적 요인 뿐만 아니라 그

식물이 자라고 있는 환경에 의하여 많은 영향을 받는다. 즉, 동일종이라 할지라도 그들이 처해있는 환경조건 - 온도, 수분, 광선, 토양, 고도, 바

람 등의 환경요인과 주변 식생 등의 생물학적 요인 - 에 의하여 성장상태가 크게 달라진다 (Beatty, 1974; Weaver and Clements, 1966). 더군다나 개체의 유지와 번식을 위해서 외적 환경요인에 적응할 수 있도록 형태적 변화는 물론 생리적 활성도 달라진다 (Mooney and Billings, 1965).

한편, 일반적으로 저지대 보다 고지대로 갈수록 식물의 분포상태가 달라지고 형태적인 변화도 일어난다 (Seifriz, 1935). 고산식물은 저지대 식물에 비하여 생장률이 낮으며 엽장이 감소하는데 반해 두께나 밀도가 증가하는 특성을 가지고 있다 (Atkin *et al.*, 1996). 또한 유형이나 양적인 면에서 저지대 식물과는 다른 cuticular wax를 가지고 있어 강한 광을 차단하고 수분 손실을 막을 수 있다 (Pilon *et al.*, 1999). 따라서, 고산식물은 낮은 온도, 가뭄, 강한 바람, 서리 등 극한 환경에 노출되어 있어 환경적 요인에 의해 영향을 많이 받는다고 볼 수 있지만, 일부 고산식물들은 저온이나 고광에 의한 광합성의 피해가 관찰되지 않는다. 또한, 고도가 높아짐에 따라 고산식물의 잎은 항산화물질을 더 많이 가지게 되어 활성산소로부터 보호되며 (Wildi and Lutz, 1996), 광계 II의 반응중심단백질인 D1의 분해가 저지대식물에 비하여 억제되어 광억제를 피할 수 있는 것으로 알려지고 있다 (Shang and Feirabend, 1998). 하지만, 이와 같은 현상이 대부분 고산식물에서 보편적으로 일어나는 현상인지는 의문이다.

한반도에 분포하는 고산식물은 383종류이며 (박, 1942), 그 중에서 남한에는 130종류가 분포하는 것으로 보고된 바 있다 (정, 1989). 고산식물의 자원화나 유전자원으로 활용하기 위한 선결 과제는 저지대 환경에 대한 적응성이라 할 수 있는데, 이들 고산식물의 저지대에서의 생장 특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 더욱이, 한라산에는 59종의 고산식물이 있고, 이중 75.3%가 관상용 또는 약용 등 유용식물로 알려져 있다. 더군다나 이들 고산식물 중에는 특산

식물이 많고 멸종위기에 처한 것도 다수 포함되어 있어 (고 등, 1999), 이들의 저지대 환경에 대한 적응성에 관한 연구가 필요하다. 그리고 자원적 가치가 높은 고유한 자생식물을 자원화할 수 있는 연구가 수반되어야 한다. 또한, 고산 식물들이 저지대에서 생육할 때 광억제 현상을 비롯한 생리적 반응이 어떠한지를 밝히는 것은 저지대의 환경적응성 여부 뿐만 아니라 종보전을 위하여 유용한 자료를 제공할 것이다.

따라서 본 연구에서는 한라산 자생지에서, 그리고 저지대 온실에서 자라고 있는 고산식물의 생육 및 엽록소형광 특성을 조사하여, 환경요인의 변화에 대한 고산식물의 적응능력을 밝히고자 하였다.

재료 및 방법

실험 재료

본 연구는 백록담 일대에서 자라는 한라돌창포 (*Tofieldia fauriei*), 섬잔대 (*Adenophora taquetii*), 한라구절초 (*Chrysanthemum zawadskii* ssp. *coreanum*)를 중심으로 자생지 (1,850~1,950m a.s.l.)와 저지대 (150m a.s.l.)에서 실시하였다. 저지대에서의 생육 및 엽록소형광 특성은 제주도 수목시험소 내의 온실에서 생육하고 있는 식물을 대상으로 조사·분석하였다. 엽록소형광을 조사할 때에는 외부로 노출되어 자연광을 받는 잎 중에서 엽색이 비슷하고 성숙한 잎을 실험 재료로 사용하였다.

환경요인 조사

조사지역의 환경요인으로는 온도, 상대습도, 광량을 조사하였다. 온도와 상대습도는 TR-72 Thermo Recorder (T&D Co. Ltd., Japan)와 전자식자기온습도계 (Sigma II, SATO KEIRYOKI MFG. Co. Ltd., Japan)를, 광량은 LI-250 Light Meter (LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 이들 조사용 센서는 측정 대상 잎의 높이에 위치하도록 하여 3회 반복으로 측정하였다.

엽록소형광 측정 및 분석

엽록소형광은 Plant Efficiency Analyzer (Hansatech Instrument Ltd., UK)를 이용하였으며, 15~20분간 광을 차단하여 암적응시킨 후 1.500 $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{sec}$ 의 광량을 5초간 조사하여 F_v/F_m , F_o , F_m 등의 엽록소형광 변수를 측정하였다. Nonphotochemical fluorescence quenching (NPQ) 산출을 위한 F_m' 은 자연광에 적응된 잎을 이용하여 암적응과정 없이 상기한 방법으로 측정한 F_m 을 이용하였고, NPQ는 Stern-Volmer equation ($F_m/F_m' - 1$)으로 산출하였다 (Krause and Weis, 1991).

엽록소형광의 일변화는 1999년 7월 9~12일과 8월 10~13일에 2시간 간격으로 24시간 동안 측정하였다. 엽록소형광 (F_v/F_m , F_o , F_m)과 환경요인 (온도, 상대습도, 광량)과의 상관관계는 일변화 측정치를 대상으로 SPSS program (SPSS Inc., Release 7.5, 1996)으로 분석하였다.

생장 조사 및 분석

생장 조사는 1997년에 각 식물이 생육하는 자생지와 저지대 온실에서 생육중인 고산식물 중 비교적 생장량이 균등한 식물들 5~10개체씩 선택하여 표지한 뒤, 표지된 식물체를 중심으로 1998년 3월부터 1999년 8월까지 생육상황을 조사하였다.

잎의 생장은 최초의 잎이 출현하는 시점부터 생장이 완료되는 시기까지를 15~20일 간격으로 엽장, 엽폭, 엽두께, 엽병의 길이 등을 vernier calipers (1/100mm)를 이용하여 측정하였다. 개화주기는 화아에 대한 개화수를 조사한 뒤 개화율이 80% 이상일 때를 만개시기로 보았고, 종자결실주기는 수정 후 열매가 열개 또는 종자가 흑색으로 변환되는 시점까지를 종자발달로, 그 이후는 성숙단계로 규정하여 조사하였다.

결 과

환경요인의 계절적 변화

고산식물 자생지 (1,920m a.s.l.)와 저지대 온

실 (150m a.s.l.)의 환경요인을 조사하였다(Fig. 1). 기온은 저지대 온실에서는 연평균 20.6°C로 자생지의 3.7°C보다 17°C나 높게 유지되며, 상대습도는 평균 74.1%로 자생지의 67.9%보다 조금 높지만 두 지역 모두 비교적 높은 상대습도를 유지하였다.

자생지의 기온은 1월이 평균 -9.0°C로 가장 낮았으며, 8월이 평균 14.5°C로 가장 높았다. 또한 연 최저기온은 -16.5°C, 최고기온은 21.0°C로 나타났다. 그리고, 자생지에서 월평균온도가 0°C 이하인 기간이 4개월 (1~3월, 12월)이나 되었다. 특히, 이 기간에는 바람이 심하게 부는 날이 대부분이므로 겨울철에 실질적으로 식물체에 가해지는 온도는 실제 온도보다 더 낮을 것으로 판단된다. 또한 여름철 강한 광선하에서 식물체가 받는 위치의 온도는 백엽상내 측정치와 상당히 달라 최고 35°C에 이르기기도 하였다. 상대습도는 8월이 79.8%로 가장 높았는데 대부분이 65% 이상의 비교적 높은 습도를 유지하였다. 그러나 하루에도 날씨의 변화가 심하게 나타나서 습도의 변화 폭이 크게 나타나는 특성을 보였다 (Fig. 1A). 한편, 저지대 온실의 기온은 밤낮의 차이는 있지만 전반적으로 자생지 기온보다 높게 유지되었으며, 7월이 평균 28°C로 가장 높았고, 이 때의 최고기온과 최저기온 간의 온도차는 10°C미만이였다. 상대습도도 밤낮에 따라 차이가 있지만 70% 이상이 유지되는 비교적 높은 상대습도를 나타내었다 (Fig. 1B).

두 지역의 환경 특성을 비교하여 보면, 자생지에서는 계절에 따라 온도의 변화폭이 크며, 저지대 온실에 비해 조금 낮기는 하지만 전반적으로 높은 상대습도를 보였으며, 안개 등에 의해서 식물체에 가해지는 상대습도가 90% 이상 지속되는 일수도 실질적으로 많은 것으로 사료되었다. 그러나 저지대 온실에서는 월별에 관계없이 비교적 높은 온도와 상대습도를 유지하였다. 따라서 저지대 온실의 환경 조건은 자생지와 비교할 때 습도는 유사한 반면 온도는 높게 유지되어, 저지대에서 고온에 의한 고산식물의

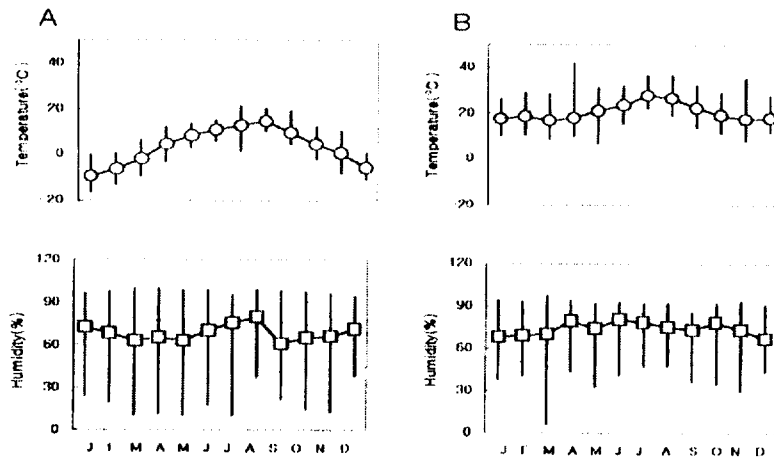


Fig. 1. Monthly fluctuations of air temperature (○) and relative humidity (□) of alpine habitats (1,920m a.s.l., A) and the greenhouse in low altitudes (150m a.s.l., B). Data are expressed as monthly means (from 1997 to 1998), and the upper and lower bars represent maximal and minimal values, respectively.

적응성을 알아보는데 효과적인 조건인 것으로 판단되었다.

잎 성장과 생식 주기

저지대 환경에서의 적응성을 알아보기 위하여 해발 150m에 위치한 온실에서 자라는 고산식물을 대상으로 잎의 성장특성과 개화, 종자결실 등의 생식과 관련된 특성을 조사하여 자생지에서 자라는 식물과 비교하였다 (Table 1과 2).

고산식물 잎의 성장특성을 조사한 결과 (Table 1), 성장패턴은 자생지에서는 유도기, 지수성장기, 노화기 등 3단계의 구분이 뚜렷한데 반하여 저지대 온실에서는 유도기가 없이 곧바로 지수성장기를 거쳐 노화기에 이르는 성장특성을 보였다. 자생지에서는 식물생장이 전체적으로 4월 중순부터 시작되어 8월 중순까지 이루어지며, 잎의 주요 성장시기는 종에 따라 다소 차이가 있으나 6월에 집중적으로 이루어졌다. 즉, 한라돌창포는 정상 부근의 바위틈에 주로 분포하는데, 4월 중순부터 신초가 출현하여서 7월 초순까지 잎의 생장이 이루어졌다. 섬잔

대는 백록담 서북정상 주변 등 나지에 주로 분포하는데 4월 하순에 신초가 출현하면서 7월 하순까지 성장하였다. 그리고 한라구절초는 백록담 서북정상 주변 등 나지에 주로 분포하는데 6월 초순에 신초가 출현하면서 8월 중순까지 생장이 이루어졌다. 이에 반해 저지대 온실에서는 한라돌창포가 3월 중순부터 신초가 형성되기 시작하였고, 4월 초순에 섬잔대의 신초가 출현하였다. 섬잔대 잎의 생장은 4월 초순부터 6월 중순까지 길이생장이 이루어졌는데, 엽폭은 5월 초순에 길이생장이 완료되었다. 한라구절초 잎의 생장은 4월 하순부터 시작하여 7월 하순까지 지속적으로 성장하였으며, 5월 중순에서 7월 초순까지 주로 생장이 이루어졌다. 이들 중 이외에도 저지대 온실에서 자라는 고산식물 대부분은 자생지에 비해 30~50일 정도 신초가 일찍 발생하고 성장속도도 빨랐다. 그리고, 잎의 변이폭이 아주 크게 나타났다. 이처럼 변이폭이 큰 것은 온실내의 온도가 지속적으로 높게 유지됨으로서 신초가 계속 발생하는데서 초래된 것으로 판단된다.

Table 1. Phenological diagrams for leaf growth of alpine plants in high (1,850~1,950m a.s.l.) and low altitudes (150m a.s.l.), 1998~1999.

Plant Name	Altitude	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug
		E M L	E M L	E M L	E M L	E M L	E M L
<i>Tofieldia fauriei</i>	High						
	Low						
<i>Adenophora taquetii</i>	High						
	Low						
<i>Chrysanthemum zawadskii</i> ssp. <i>coreanum</i>	High						
	Low						

E, early; M, middle; L, late.

□, lag phase; □, exponential growth phase; ■, senescence phase.

저지대 온실에서 고산식물의 개화 및 종자결실을 조사하여 자생지와 비교하였다 (Table 2).

이루어져 자생지 보다 일찍 이루어졌다. 반면에, 한라구절초는 10월 하순부터 12월 초순까지 발

Table 2. Phenological diagrams for flowering, seed developing and ripening of alpine plants in high (1,850~1,950m a.s.l.) and low altitudes (150m a.s.l.), 1998~1999.

Plant Name	Altitude	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
		E M L	E M L	E M L	E M L	E M L	E M L
<i>Tofieldia fauriei</i>	High						
	Low						
<i>Adenophora taquetii</i>	High						
	Low						
<i>Chrysanthemum zawadskii</i> ssp. <i>coreanum</i>	High						
	Low						

E, early; M, middle; L, late.

□, flowering periods; □, full blooming periods.

□, seed developing periods; ■, seed ripening periods.

그 결과, 한라돌창포는 자생지에서 처럼 7~8월에 꽃이 피었고 섬잔대는 자생지 보다 일찍 개화하였다. 그러나 한라구절초는 자생지에서 보다 개화시기가 늦어서 9월 이후에 꽃이 피었다. 그리고, 저지대 온실에서는 개화기간이 짧았다. 더욱이 저지대에서는 꽃의 밀도도 낮은 것으로 조사되었는데, 이는 고산식물이 저지대로 옮겨올 때 나타나는 특성인 것으로 판단된다 (Stenstrom *et al.*, 1997). 저지대 온실에서의 종자발달은 한라돌창포가 8월 중순부터 9월 중순까지, 섬잔대는 7월 하순부터 8월 하순까지

달하여 자생지 보다 종자발달이 늦게 이루어졌다. 그리고, 종자발달 기간이 저지대 온실에서는 자생지에서 보다 긴 것으로 조사되었다.

엽록소 형광의 일변화

저지대 환경에서의 적응성을 알아보기 위하여 해발 150m에 위치한 온실에서 생육하고 있는 고산식물을 대상으로 엽록소형광의 일변화를 조사하고 자생지에서 자라는 식물과 비교하였다 (Fig. 2).

자생지의 환경은 수시로 변하기 때문에 자생

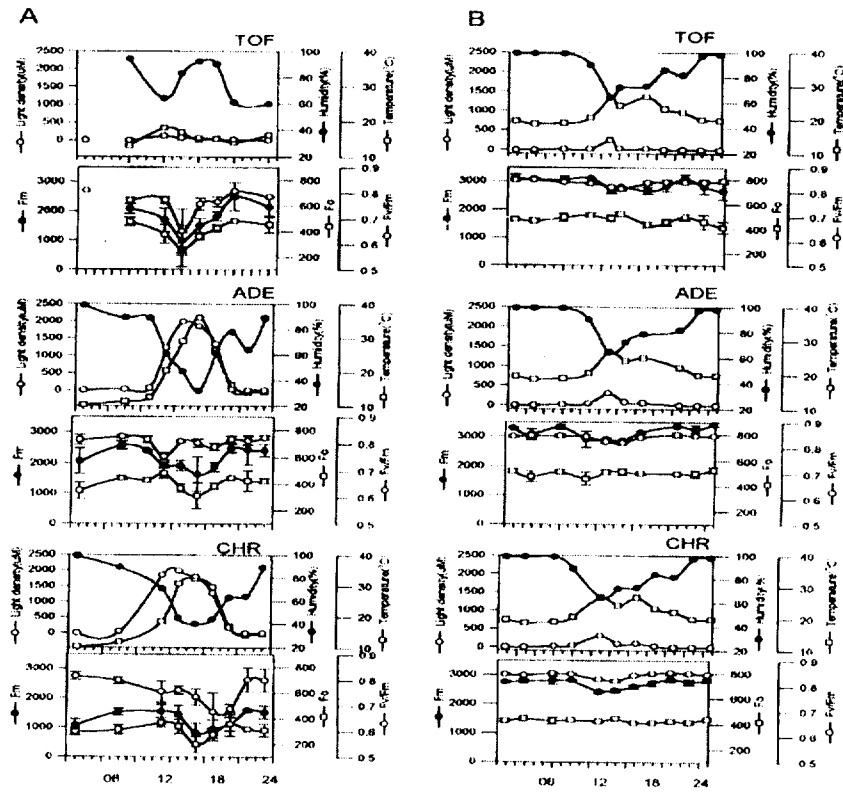


Fig. 2. Diurnal changes of environmental factors and chlorophyll fluorescence parameters from the leaves of three alpine plants in high (1,850~1,950m a.s.l., A) and low altitudes (150m a.s.l., B). TOF: *Tofieldia faurei*, ADO: *Adenophora taquetii*, CHR: *Chrysanthemum zawadskii* ssp. *coreanum*.

지에서 온도와 상대습도, 광량의 일변화 경향성을 설명하기가 쉽지 않다. 더욱이 식물이 자라는 위치에서의 환경요인의 변이는 매우 심한 것으로 나타났다. 엽록소형광 측정 당시인 7~8월에 한라구절초와 섬잔대가 자라는 빛이 잘 드는 나지 또는 암석지에서 식물체가 받는 온도는 16~33°C, 습도는 40~98%로 일교차가 크게 나타났다. 그리고 한라돌창포가 자라는 음지에서는 양지에 비해 온도가 15~20°C로 낮았고, 습도의 변화폭은 작았으며, 광량은 최대 200 $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{sec}$ 정도를 나타냈다. 그러나 일반적으로 온도와 광량은 12~15시까지 증가하다가 이후 감소하는 경향이었고, 상대습도는 광량이나 온

도와는 반대 경향을 나타냈다.

자생지에서 고산식물 잎의 엽록소형광의 일변화를 조사한 결과 (Fig. 2A), F_v/F_m 는 모든 식물에서 12~15시 사이에 낮아지는 경향을 보였다. 환경요인과 F_v/F_m 의 일변화를 비교하면 모든 식물에서 광량과 온도의 변화와는 반대현상을 나타냈다. 그리고 섬잔대와 한라구절초의 F_v/F_m 일변화는 상대습도의 일변화와 유사하였으나, 한라돌창포의 F_v/F_m 일변화는 상대습도의 변화와 일정한 경향을 보이지 않아 생태적 위치에 따라 F_v/F_m 의 일변화 양상이 다르게 나타나는 것으로 보인다. 그러나 광량이 높아지는 오후에 F_v/F_m 이 감소되어 광억제가 일어나는 것으로 보이며, 광량의 변화뿐만 아니라 온

도와 습도와도 관계가 있는 것으로 판단된다. 그리고, Fv/Fm의 감소시 한라돌창포, 섬잔대와 한라구절초 모두 Fo와 Fm도 감소하여 나타나는 일시적인 광억제가 일어나는 것으로 보인다 (Krause, 1988; Osmond, 1994).

저지대 온실에서의 환경요인은 비교적 일정한 변화를 보여 엽록소형광의 변화와의 관계를 보다 뚜렷하게 볼 수 있었다 (Fig. 2B). 더욱이 측정 당시 온도는 19~28°C, 습도는 65~98%이고, 광량은 최대 500 μmole/m²/sec로 나타났는데, 이러한 환경조건은 온실내 환경조건을 인위적으로 조절함으로써 7~8월에 지속적으로 유지되었다. 이들 저지대 온실에서 엽록소형광의 일 변화는 모든 식물에서 Fv/Fm이 12~14시에 다소 낮아지기는 했지만 전반적으로 0.8의 범위를 유지하였다. Fv/Fm의 변화는 상대습도의 일 변화와 유사하고 광량과 온도의 변화와는 반대현상이다. 그리고 저지대 온실에서 Fv/Fm의 감소는 Fm의 감소와 Fo의 증가에 의해 초래되었다. 이와 같은 결과는 Fv/Fm의 감소가 자생지에서는 Fo와 Fm의 감소에 의해 초래한데 비하여 저지대 온실에서는 Fo의 증가와 Fm의 감소

에 의해 초래되는 다른 특성을 보여 식물이 자라는 환경적 위치에 따라 동일 종이라 할지라도 광억제 기작이 다르게 나타나는 것으로 보인다.

엽록소형광과 환경요인의 상관관계

환경요인의 변화와 고산식물 생육상태와의 관계를 알아보기 위하여, 환경요인과 엽록소형광과의 상관관계를 분석하였다 (Table 3).

자생지에서 섬잔대와 한라구절초의 Fv/Fm은 온도와는 5% 수준에서 음의 상관관계를, 상대 습도와는 1% 수준에서 정의 상관관계가 인정되었다. 더군다나 한라구절초의 Fv/Fm은 광량과도 5% 수준에서 음의 상관관계가 인정되었다. 그러나 한라돌창포의 Fv/Fm은 온도와 상대습도와는 유의성이 없는 것으로 나타났으며, 광량과는 5% 수준에서 정의 상관관계가 인정되었다. 그리고 3종 모두 Fo는 환경요인과 유의성이 없는 것으로 나타났으며, Fm은 전반적으로 Fv/Fm과 환경요인과의 상관관계와 유사한 특성을 보였다. 따라서, 이러한 결과를 토대로 Fig. 2A에서 보는 바와 같이 자생지에서는 온도와 광량이 높아지는 오후에 Fv/Fm의 감소를

Table 3. Correlation of environmental factors and chlorophyll fluorescence parameters of alpine plants growing in high (1,850~1,950m a.s.l.) and low altitudes (150m a.s.l.)

Plant Name	Factors ¹⁾	High Altitude			Low Altitude		
		Fo	Fm	Fv/Fm	Fo	Fm	Fv/Fm
<i>Tofieldia fauriei</i>	T	-.138	.187	.316	-.196	-.527**	-.553**
	H	-.150	-.223	-.110	-.050	.391*	.695**
	L	-.141	.171	.390*	.146	-.168	-.480**
<i>Adenophora taquetii</i>	T	-.243	-.403**	-.291*	-.169	-.641**	-.795**
	H	.150	.341**	.338**	.241	.652**	.682**
	L	-.082	-.201	-.191	-.167	-.627**	-.790**
<i>Chrysanthemum zawadskii</i> ssp. <i>coreanum</i>	T	-.245	-.449**	-.436*	-.278*	-.813**	-.810**
	H	.163	.542**	.588**	.283*	.803**	.786**
	L	-.092	-.313	-.363*	-.220	-.780**	-.799**

** Significant at the 0.01 level (2-tailed). * Significant at the 0.05 level (2-tailed).

¹⁾ T, air temperature; H, relative humidity; L, light intensity.

동반하는 것으로 해석된다.

한편, 저지대 온실에 자라는 고산식물의 엽록소형광과 환경요인과의 상관관계를 분석한 결과, 자생지에서와는 달리 3종 모두 Fv/Fm이 1% 수준에서 온도와 광량과는 음의 상관을 보이고, 상대습도와는 정의 상관을 보였다. 이는 Fig. 2B에서 보는 바와 같이 온도, 광량의 증가와 상대습도의 감소를 동반하는 오후에 미약하지만 Fv/Fm이 감소하는 것으로 알 수 있다. 그리고, Fo는 환경요인과 유의성이 없는 것으로 나타났으며, Fm은 전반적으로 Fv/Fm과 환경요인과의 상관관계와 유사한 특성을 보였다.

고찰

한라산 정상부는 척박한 토질로 이루어져 있고, Fig. 1A에서 처럼 연평균 기온이 3.7°C로 매우 낮아 식물이 생육하기에는 열악한 조건이라 할 수 있다. 고산식물은 이러한 극한 환경에 대한 적응 또는 회피 전략을 발달시키면서 생존해왔다. 한라산에는 59종의 고산식물이 분포하고 있으며 (고 등, 1999), 이 중 한라둘창포를 포함한 24종 (초본류 17종, 목본류 5종)의 식물을 대상으로 한라산 자생지와 저지대에서 잎의 성장 특성과 개화, 종자결실 등의 생식과 관련된 특성을 조사하였다 (데이터 미제시). 그 결과, 자생지에서 고산식물의 생장은 전체적으로 4월 초순부터 시작되어 8월 중순까지 이루어졌다. 그러나 주요 성장시기는 6월에 집중적으로 이루어지며, 종에 따라 다소 차이는 있으나 잎의 주요 성장일수는 30~60일 사이로 나타나 비교적 짧은 성장시기를 갖고 있었다 (고, 1999). 한라산 고산식물은 3월 하순 시로미를 시작으로 8월 중순에 마지막으로 한라구절초, 한라돌쩌귀 등이 개화가 이루어지는데, 대부분 7~8월에 집중적으로 개화하는 것으로 보고된 바가 있다 (오 등, 2001a). 그리고, 초본성 고산식물은 대부분 종자가 성숙하는데 30일 정도의 기간이 소

요되어 짧은 기간 동안에 종자가 발달하는 것으로 나타났다 (고, 1999; 오 등, 2001a).

한편, 엽록소형광 분석은 식물의 성장 (Long *et al.*, 1994), 생태적 유동성 (Kamaluddin and Grace, 1992), 자연조건에서의 환경스트레스 (Lee *et al.*, 1995; 오 등, 2001b) 등과의 관계를 알아보는데 이용되고 있다. 본 연구에서는 24종의 고산식물을 대상으로 자생지에서 엽록소형광을 조사·분석하였다 (데이터 미제시). 그 결과, 광합성 효율을 나타내는 Fv/Fm은 한라부추 등 5종의 초본류와 눈향나무 등 5종의 목본류가 0.70~0.79로 낮았으며, 섬잔대 등 14종의 초본류와 들매화나무는 0.80~0.84의 범위에 존재하는 것으로 나타났다. 그리고 비광화학적 인형광소멸 능력, 즉 NPQ는 한라구절초와 같이 양지에 자라는 식물이 한라부추나 한라장구채와 같은 습지나 음지에 자라는 식물에 비해 상대적으로 높아 광계 II의 보호기구가 발달한 것으로 나타났다 (고, 1999).

고산식물의 저지대 환경에서의 적응성을 알아보기 위하여 해발 150 m에 위치한 온실에서 24종의 고산식물의 생육상황을 조사하였다. 그 결과, 설앵초, 큰앵초, 들매화나무 등 일부 고산식물은 유식물 생장이 잘 이루어지지 않았다. 그리고, 생육이 이루어지더라도 대부분의 고산식물은 자생지에서의 생육상황과는 다소 달라서 자생지에 비해 30~50일 정도 일찍 신초가 발생하였으며 상대적으로 높은 변이폭을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 꽃이 달리는 기간이 짧을 뿐만 아니라 꽃의 밀도도 낮게 나타났다. 따라서, 고산식물의 저지대 환경에서의 적응성을 규명하기 위하여 저지대 온실에서 비교적 적응이 잘 되는 한라둘창포, 섬잔대, 한라구절초 3종을 선정하여 엽록소형광 특성을 조사·분석하였다. 저지대에서의 엽록소형광 일변화는 Fig. 2B에서 처럼 낮시간의 Fv/Fm의 감소는 Fo의 증가와 Fm의 감소를 동반하여 만성적인 광억제 (chronic photoinhibition)에 의하여 광합성 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 만성적

인 광억제는 광계 II의 반응중심이 비활성화 또는 손상 때문에 초래되는 현상으로 (Anderson *et al.*, 1997), 식물체의 광합성 기능을 크게 약화시키는 것을 볼 수 있다.

종에 따라 빛을 이용할 수 있는 잠재적인 능력은 유전적인 차이에서 기인하기도 하지만 (Ball *et al.*, 1994), Fig. 2에서 처럼 환경요인이 광합성 효율에 영향을 주는 것으로 보아, 기상 등 환경요인이 광합성 능력에 주요한 결정변수로 작용하는 것으로 판단된다. 환경요인이 엽록소형광에 어떠한 영향을 주는지 살펴보면, Table 3과 같이 전체적으로 Fv/Fm은 상대습도와 정의 상관율, 온도와 광량과는 역의 상관율을 나타냈다. 더욱이, 저지대에서는 Fv/Fm과 광량과는 1% 수준에서 역의 상관율을 보여 광량이 증가할수록 광억제가 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 온도가 높고 광량이 많을수록 전자를 전달할 수 있는 능력, 즉 광합성 능력은 작아지고, 상대습도가 높을수록 광합성 능력이 커짐을 나타내주고 있다. 그 중 가장 중요하게 작용하는 환경요인은 기온인 것으로 판단되는데, 이는 Fig. 2B에서와 같이 27°C에서 300 $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{sec}$ 정도의 낮은 광량에서도 광억제가 발생하는 것으로부터 알 수 있다. 이로부터 고산식물을 저지대에서 생육시킬 때 여름철의 고온과 강한 광선에 의한 광억제는 더욱 증가할 것으로 판단된다. 따라서, 저지대에서 고산식물의 적응력을 높이기 위해서는 강한 광선을 차단시키는 것도 중요하지만 성장기간 동안 낮은 온도를 유지시키는 것이 중요한 것으로 판단된다.

요 약

고산식물의 저지대 환경에 대한 적응성을 조사하기 위해 저지대 온실 (150m a.s.l.)에서 고산식물의 생육 및 엽록소형광 특성을 조사하여 자생지 (1,850~1,950m a.s.l.)와 비교하였다. 저지대에서 고산식물의 생장패턴은 유도기가 없이

지수생장기를 거쳐 노화기에 이르렀다. 그리고, 개화기간이 짧고 꽃의 밀도도 낮았으며, 종자발달 기간이 길었다. 광계II의 광화학적 효율, 즉 Fv/Fm은 저지대 온실에서 3종 모두 낮시간 (12:00~15:00)에 다소 낮아졌으며, Fo의 증가와 Fm의 감소를 동반하여 만성적인 광억제를 야기하는 것으로 판단되었다. 그리고, Fv/Fm은 저지대의 온도와 광량과는 음의 상관율, 상대습도와는 정의 상관율을 보였다. 따라서, 저지대 환경에서 고산식물의 적응력을 높이기 위해서는 강한 광선을 차단시키는 것은 물론 성장기간 동안 낮은 온도를 유지시키는 것이 중요한 것으로 해석되었다.

참고문헌

- Anderson, J. M., Y. I. Park and W. S. Chow. 1997. Photoinactivation and photoprotection of photosystem II in nature. *Physiologia Plantarum* 100: 214-223.
- Atkin, O. K., B. Botman and H. Lambers. 1996. The cause of inherently slow growth in alpine plants: An analysis based on the underlying carbon economies of alpine and lowland *Poa* species. *Functional Ecology* 10(6): 698-707.
- Ball, M. C., J. A. Butterworth, J. S. Roden, R. Christian and J. G. Egerton. 1994. Applications of chlorophyll fluorescence to forest ecology. *Australian Journal of Plant Physiology* 22:211-319.
- Beatly, J. C. 1974. Effects of rainfall and temperature on the distribution and behavior of *Larrea tridentata* in the Mojave desert of Nevada. *Ecology* 55:245-261.

- Kamaluddin, M. and J. Grace. 1992. Photoinhibition and light acclimation in seedlings of *Bischofia javanica*, a tropical forest tree from Asia. *Annals Botany* 69:47-52.
- Krause, G. H. 1988. Photoinhibition of photosynthesis. An evaluation of damaging and protective mechanisms. *Physiologia Plantarum* 74:566-574.
- Krause, G. H. and E. Weis. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42:313-349.
- Lee C. B., C. H. Lee, H. S. Chang and S. B. Ha. 1995. Mercury-induced light dependent alterations of chlorophyll a fluorescence kinetics in barley leaves. *Journal of Plant Biology* 38(1):11-18.
- Long S. P., S. Humpries and P. G. Falkowski. 1994. Photoinhibition of photosynthesis in nature. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 45:633-662.
- Moony, H. A. and W. D. Billings. 1965. Effects of altitude on carbohydrate content of mountain plants. *Ecology* 46(5):750-751.
- Osmond, C. B. 1994. What is photoinhibition? Some insights from comparisons of sun and shade plants. *In: Photoinhibition of photosynthesis: From molecular mechanisms to the field*(Eds. Baker, N. R. and J. R. Bowyer), Bios Scientific Publications, Oxford, pp.1-24.
- Pilon, J. J., H. Lamber, W. Baas, M. Tosserams, J. Rosema and O. K. Atkin. 1999. Leaf waxes of slow-growing alpine and fast-growing loland *Poa* species: Inherent differences and responses to UV-B radiation. *Phytochemistry* 50(4): 571-580.
- Seifriz, W. 1935. The altitudinal distribution of lichens and mosses on Mt. Gedeh. *Java. Journal of Ecology* 7:307-313.
- Shang, W. and J. Feirabend. 1998. Slow turnover of the D1 reaction center protein of photosystem II in leaves of high mountain plants. *FEBS Letters* 425(1):97-100.
- Stenstrom, M., F. Gugerli and G. H. R. Henry. 1997. Response of *Saxifraga oppositifolia* L. to simulated climate change at three contrasting latitudes. *Global Change Biology* 3(1):44-54.
- Weaver, J. E. and F. E. Clements. 1966. Plant ecology. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, pp.1-601.
- Wildi, B. and C. Lutz. 1996. Antioxidant composition of selected high alpine species from different altitudes. *Plant, Cell and Environment* 19:138-146.
- 고정균. 1999. 한라산 고산식물의 생태생리학적 연구. 이학박사학위 논문, 제주대학교. pp. 1~97.
- 고정균, 문명욱, 고석찬. 1999. 한라산 백록담 분화구내의 식생과 식물자원. *한국자원식물학회지* 12(3):221-233.
- 박만규. 1942. 조선 고산식물 목록. *조선박물학회지* 9(33):1-12.
- 오순자, 고정균, 고석찬. 2001a. 한라산 고산식물의 개화시기 및 화색에 관한 연구. *한국자원식물학회지* 14(1):1-7.
- 오순자, 고정균, 김응식, 오문유, 고석찬. 2001b. 한라산 구상나무 잎의 엽록소형광의 일변화와 계절적 변화. *한국환경생물학회지* 19(1):43-48.
- 정영호. 1989. 우리 나라 고산식물의 분포 특성. *자연보존* 66:29-38.