

포스터 3. OJIP분석을 이용한 식물의 환경스트레스 지표의 검색

오순자, 고석찬
제주대학교 생명과학과

Abstract

The OJIP transients were investigated from leaves of *Crinum asiaticum* var. *japonicum*, *Osmanthus insularis*, *Chloranthus glaber* and *Asplenium antiquum*, in order to screen the indicators for quantification of environmental stresses and to apply them to the plant vitality test. The obvious diurnal changes of OJIP transients were found in *Crinum asiaticum* var. *japonicum* and *Osmanthus insularis* growing in sunny habitats, showing lower Fp and higher Fo in day time. The values of SFIno and PI_{No} increased dramatically in day time in leaves of *Crinum asiaticum* var. *japonicum*, *Osmanthus insularis*, and *Asplenium antiquum*. Although the value of RC/CS decreased slightly in day time in leaves of 4 tropical/subtropical plants, the obvious diurnal changes of OJIP transients were not seen in winter, suggesting that tropical/subtropical plants used in this research seemed to be irreversibly damaged in winter. However, the values of ETo/RC and $\psi_o/(1-\psi_o)$ increased significantly in leaves of *Crinum asiaticum* var. *japonicum*, indicating that ETo/RC and $\psi_o/(1-\psi_o)$ were useful as indicator parameters for sensing of low temperature.

1. 서 론

식물의 생리상태를 비파괴적으로 분석할 수 있는 방법으로는 엽록소형광 분석(chlorophyll fluorescence analysis), 엽록소형광 이미지 분석(chlorophyll fluorescence imaging), 잎의 반사율 이미지 분석(reflectance imaging), 그리고 열 이미지 분석(thermal imaging) 등이 있으며, 이들 분석방법을 통해 환경스트레스에 의한 광합성효율, 구조, 수분상태의 변화 등을 정밀하게 분석할 수 있다(Nilsson, 1995; Lichtenthaler and Miehl, 1997; Peuelas and Filella, 1998). 특히, 엽록소형광 분석법은 여러 가지 환경스트레스가 식물의 광합성 기구에 미치는 영향을 빠르게 쉽게 분석할 수 있으며, 식물의 생리적 반응이나 내성 등과 관련하여 광합성 기구의 구조 및 기능의 변화를 정량적으로 제시할 수 있다. 특히, 광량(Krüger *et al.*, 1997), 온도(Srivastava *et al.*, 1999), 건조(Van Rensburg *et al.*, 1996), 화학물질(Ouzounidou *et al.*, 1997) 등의 환경 스트레스 하에서 OJIP곡선이 뚜렷하게 변화한다. 이러한 연유로 인하여 OJIP곡선의 분석은 여러 환경스트레스 하에서 광계II 반응의 연구를 위하여 광범위하게 사용되고 있다.

본 연구에서는 환경요인의 변화에 의한 식물의 환경스트레스에 대한 반응을 정량화하기 위한 지표를 선별하고자, 자연 환경요인과 식물 잎의 OJIP 패턴의 변화를 계절적 그리고 일주기적으로 분석하여 활용 가능한 지표를 선별하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 제주도에 자생하는 문주란(*Crinum asiaticum* var. *japonicum*), 박달목서(*Osmanthus insularis*), 죽절초(*Chloranthus glaber*), 파초일엽(*Asplenium antiquum*)을 사용하였다. 동령의 식물체를 선정하여 외부로 노출되어 자연광을 받는 잎 중에서 엽색이 비슷하고 성숙한 잎을 실험재료로 사용하였다.

엽록소형광은 Plant Efficiency Analyzer(PEA; Hansatech Instrument Ltd., UK)를 이용하여 측정하였으며, 15분간 광을 차단하여 암적응시킨 후 $1,500\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{sec}$ 의 광량을 1초간 조사하여, Strasser 등(2000)의 방법에 따라 $50\mu\text{s}$ (O-step), 2ms(J-step), 30ms(I-step), 300ms(P-step)에서 엽록소형광 밀도를 분석하였다. 조사지역의 환경요인으로는 엽록소형광 측정 당시의 온도, 상대습도, 광량을 조사하였다. 온도와 상대습도는 TR-72 Thermo Recorder(T&D Co. Ltd., Japan)를, 광량은 LI-250 Light Meter(LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

문주란을 포함한 4종의 아열대성 식물을 대상으로 여름철 OJIP곡선의 일변화적 양상을 나타내었다(Fig. 1A). 햇볕이 잘 드는 문주란과 박달목서에서는 새벽과 밤의 초기유도곡선은 거의 유사한 양상을 보이지만 낮에는 O-step을 제외한 전 단계에서 낮아졌다. 이러한 OJIP패턴은 광계II의 광합성효율, 즉 Fv/Fm의 감소를 야기하는 결과이다. 그리고 죽절초와 파초일엽의 OJIP곡선은 P-step에서의 엽록소형광이 다소 감소하였지만 일변화적 특징이 두드러지지 않아 Fv/Fm의 변화가 거의 없음을 나타내 주고 있다.

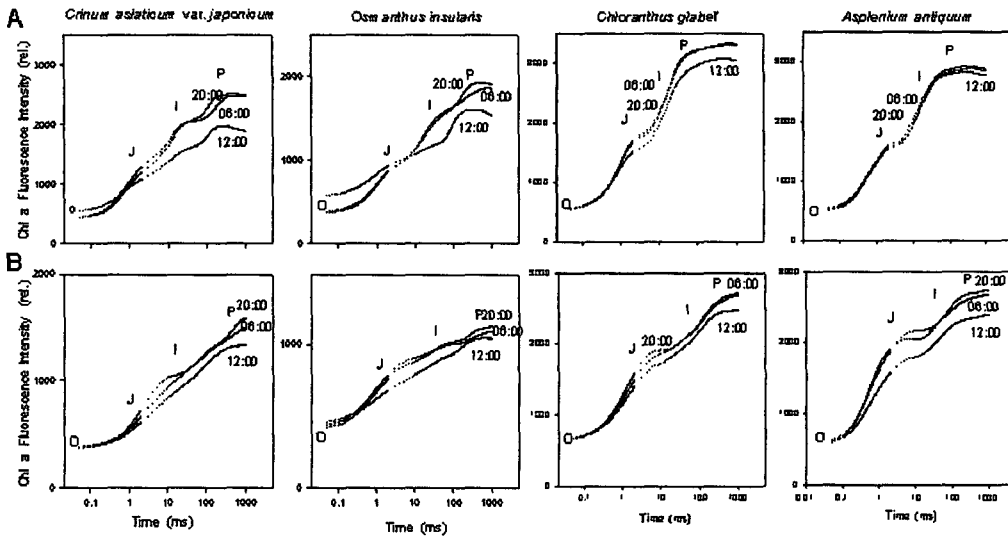


Fig. 1. The fluorescence transients recorded in leaves of *Crinum asiaticum* var. *japonicum*, *Osmanthus insularis*, *Chloranthus glaber* and *Asplenium antiquum* under the natural conditions in summer (A) and winter (B). The presented transients were measured at dawn (06:00), mid-day (12:00) and night (20:00).

이들 OJIP곡선으로부터 여러 가지 구조적·기능적 변수들을 산출하여 spider-plot을 작성하고 분석하였다 (자료 미제시). 그 결과, 문주란과 박달목서는 여름철 낮시간에 F_0 가 증가하고 F_m , F_v/F_0 가 감소하여 식물체가 스트레스 상태에 놓여 있음을 나타내 주고 있다. 그리고 파초일엽은 낮시간에 N과 Sm의 일변화가 특징적이다. 엽면적 당 광계 II활성(activities/CS)을 살펴보면, 문주란과 박달목서의 ABS/CS, TRo/CS와 ETo/CS는 낮시간에 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 여름철 강한 광선에 의해 엽면적 당 불활성 상태의 반응중심의 수가 많아짐으로써 나타나는 현상이라고 할 수 있다. 그리고 박달목서는 ABS/RC가 낮에 증가하는 경향을 보였다. 그리고 파초일엽에서는 낮시간에 ETo/RC와 ETo/CS가 감소하는데 죽절초에서는 새벽 때 보다도 오히려 증가하는 양상을 보여주었다. 활력도(vitality indexes)를 나타내는 변수들 중에는 문주란과 박달목서의 PI_{NO} 와 SFI_{NO} 가 낮시간에 증가하였는데, 이들 변수의 증가는 파초일엽에서도 관찰할 수 있었다. 그리고 죽절초와 파초일엽에서는 $\psi_o/(1-\psi_o)$ 의 일변화가 나타나지만 그 변화양상이 서로 달랐다. 그리고 파초일엽에서는 SFI_{Po} 의 일변화도 관찰되는데 밤에 더 높은 것으로 나타났다.

겨울철의 경우(Fig. 1B), 4종 모두 전 단계에서 엽록소형광이 큰 폭으로 감소하여 겨울철 저온에 의한 영향을 받고 있음을 나타내주고 있다. 그리고 문주란과 박

달목서에서는 새벽, 낮, 밤에 따라 큰 변화를 보이지 않아, 이들 식물이 겨울철의 저온 스트레스에 의해 비가역적인 손상을 입은 결과로 보인다. 반면에 죽절초와 파초일엽은 낮시간에 P-step에서의 엽록소형광이 다소 감소하였다. 이들 OJIP곡선에서 산출된 변수들을 이용하여 spider-plot을 작성하고 이를 분석하였다 (자료 미제시). 그 결과, 겨울철 일변화에 있어서 의미있는 변화를 보이는 형광변수들은 몇 가지에 불과하였으며, 종에 따라서도 차이를 보였다. 그러나 박달목서와 죽절초에서 낮시간에 Sm과 N의 뚜렷한 감소를 관찰할 수 있었다. 그리고 문주란에서는 낮시간에 V_j 와 V_i 의 미약한 감소, ETo/RC의 증가를 관찰할 수 있었다. 엽면적 당 광계II 활성(activities/CS)를 나타내는 변수 중에는 RC/CS가 4종 모두에서 낮시간에 감소하는 경향을 보여, 겨울철 낮시간의 광량이 Fv/Fm에 직접적으로 영향을 미치지 않으나, 엽면적 당 불활성 상태의 반응중심의 수가 많아져 식물체에 미약하지만 영향을 미치는 것으로 사료된다. 그리고, 활력도(vitality indexes)를 나타내는 변수에서는 문주란과 파초일엽에서 $\psi_o/(1-\psi_o)$ 가 낮시간에 다소 증가하는 경향을 보였다. 그리고 문주란과 박달목서에서 PI_{NO}와 PI_{PO}의 일변화가 관찰되는데 그 변화양상은 서로 달라서, 저온에 대한 민감도의 차이 또는 측정 당시의 환경조건의 차이 등으로부터 기인한 결과로 해석된다.

4. 결 론

OJIP패턴이 식물종이나 계절에 따라 또는 식물의 생태적 입지에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있었다. OJIP분석을 통해 산출된 형광변수들 중 SFIno나 PI_{NO}는 여름철 낮시간에 문주란, 박달목서, 파초일엽 등에서 뚜렷하게 증가하였으며, 겨울철에는 뚜렷한 변화를 보이는 형광변수가 적었다. 다만, RC/CS가 낮시간에 모든 종에서 다소 감소하며, 문주란의 경우에는 ETo/RC나 $\psi_o/(1-\psi_o)$ 가 낮시간에 뚜렷하게 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같이 식물종, 계절, 생태적 입지에 따라 또는 일주기적으로 뚜렷하게 변화하는 형광변수들은 여름철 낮시간의 고광이나 겨울철 저온 등의 영향을 정량화 할 수 있는 스트레스 지표로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- Krüger, G.H.J., M. Tsimilli-Michael, and R.J. Strasser. 1997. Light stress provokes plastic and elastic modifications in structure and function of photosystem II in camellia leaves. *Physiol. Plant.* 101:265-277.
- Lichtenthaler, H.K. and J.A. Miehl. 1997. Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress. *Trends Plant Sci.* 2, 316-320.
- Nilsson, H.E. (1995) Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Annu. Rev. Phytopathol.* 33: 489-527.

- Ouzounidou, G., M. Moustakas, R.J. Strasser. 1997. Sites of action of copper in the photosynthetic apparatus of maize leaves: kinetic analysis of chlorophyll fluorescence, oxygen evolution, absorption changes and thermal dissipation as monitored by photoacoustic signals. *Aust. J. Plant Physiol.* 24:81-90.
- Peuelas, J. and I. Filella. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends Plant Sci.* 3:151-156.
- Srivastava, A., R.J. Strasser, and Govindjee. 1999. Greening of peas: parallel measurements on 77K emission spectra, OJIP chlorophyll a fluorescence transient, period four oscillation of the initial fluorescence level, delayed light emission, and P700. *Photosynthetica* 37:365-392.
- Strasser R.J., A. Srivastava, and M. Tsimilli-Michael. 2000. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: *Probing Photosynthesis: Mechanism, regulation and adaptation*(M. Yunus, U. Pathre and P. Mohanty, eds.), Taylor and Francis, London and New York, chapter 25, pp. 445-483.
- Van Rensburg, L., G.H.J. Krüger, P. Eggenberg, R.J. Strasser. 1996. Can screening criteria for drought resistance in *Nicotiana tabacum* L. be derived from the polyphasic rise of the chlorophyll a fluorescence transient(OJIP)? *S. Afr. J. Bot.* 62:337-341.

- 이 연구는 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었음.
(KRF-2001-043-E00002) -