

Changes in Electric Potentials of Leaf Surface Induced by Environmental Stimuli

Ki-Cheol Son* · Myung-Hwa Ryu · Mi-Jung Kil

Dept. of Hort. Sci., Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

Abstract

This study was conducted to investigate the changes of electric potentials of leaf surface induced by environmental stimuli in plant. The values of electric potentials varied with different intervals of light on and off, and light qualities and, moreover, their changes were also varied according to the time of a day. Additionally, stimuli such as candle light, wind, or 5°C cool water spray also evoked considerable changes in leaf surface electric potentials and their signal patterns varied with species of plants tested. In frequency analysis of electric potentials, the distribution values by FFT were highest in 1-10 Hz frequency zone by the majority of stimuli. These results suggested that changes in leaf surface electric potentials depended upon plant species even though stimulus was the same and vice versa.

Key words : FFT, *Schefflera*, *Ficus*, *Scindapsus*, *Dieffenbachia*

This study is supported by Korean Ministry of Education through research fund, 1997.

*Corresponding author

서 론

현재까지 알려진 바로는 식물체는 외부자극에 대해 체내 약 10~50 mV 범위의 약한 전류가 반응한다 (Spillane, 1991). 한편, 초본성 식물의 잎 또는 엽병의 주맥을 찌르거나, 핀셋 등의 도구로 짓눌러 부술 때 혹은 잎 끝에 열 손상이나 태우는 것과 같은 일부 상해를 줄 경우도 전기적 변화가 일어난다고 보고되었다 (Malone과 Stankovic, 1991; Roblin, 1985; Van Sambeek과 Pickard, 1976; Wildon 등, 1989). 그러나 이와 같은 전기적 반응은 자극을 주는 위치와 강도에 따라 매우 다르게 나타난다 (Malone과 Stankovic, 1991; Roblin과 Bonnemain, 1985; Roblin, 1985).

식물체의 전기적 반응에 대한 연구는 오래 전부터 행해져 왔으나 (Lund, 1947), 대부분이 세포수준이나 세포내 수준에서의 반응과 자극에 관한 것이었을 뿐 (Abe, 1981; Borgens 등, 1979; Miwa 등, 1987), 식물체 전체에 대한 자극과 반응 그리고 실시간 반응 (real time response)에 대한 연구는 별로 없는 실정이다 (Rathore과 Goldsworthy, 1985). 그러나 Miwa 등 (1987)은 식물의 엽표면의 생체전위변화가 세포내 전

위변화와 비슷하여 외부자극에 의해 일어나는 표면 전위변화는 식물의 생리적 상태와 밀접한 관계가 있다고 하였다. 또, 음악이 작물의 생육을 촉진시키고 동시에 체내의 특정성분을 증가시켜 병충해 발생억제에 효과적이라고 보고하였다 (Lee 등, 1997). 한편, 식물체의 감정을 측정할 수 있다거나 (Dogane, 1996), 식물에게 사랑하는 감정으로 대했을 때와 불에 태워지거나 뿌리째 뽑히게 될 것이라는 예감만 해도 격렬한 반응 보인다는 (Robert, 1989) 등의 과학적 객관성과 재현성이 없는 것으로 판단되는 사례들도 발표되어지고 있다.

그럼에도 불구하고, 외부자극에 대하여 식물체의 생체전위변화가 유발되는 것은 명확한 사실이기 때문에 자극에 따른 식물의 전기적 특성 변화를 정확히 조사할 수 있는 기구나 방법을 개발할 필요가 있다. 더욱이, 이러한 정보는 식물의 생리상태를 다른 차원에서 이해할 수 있을 뿐만 아니라, 차후 식물을 보다 다양하게 활용할 수도 있을 것이다. 본 연구는 자체 개발된 생체전위 측정방법을 이용하여 외부자극에 따른 식물의 전기적 특성에 관한 기초자료를 얻고자 다양한 자극에 대한 식물의 엽표면 전위포텐셜의 변화를 조사하였다.

재료 및 방법

측정기기 및 분석방법 : 엽표면 전위포텐셜(electric potential)은 신호분해능력이 16bit이며, 16개 입력채널이 있는 BIOPAC Systems (MP100WS)을 사용하여 측정하였다. 외부자극에 대한 식물 반응신호의 증폭과 필터를 위해 사용된 모듈은 접지전위에 대한 단일 입력신호 증폭기와 두 입력간의 차이만을 증폭하는 차등 증폭기(differential amplifier)로 DA100A (BIOPAC Systems, Inc.)를 사용하였다. 식물체 잎 뒷면에 AgCl 전극(3M Red Dot)을 붙이고, electronic lead (Shielded electrode lead assembly SS2, BIOPAC Systems, USA)로 식물과 DA100A에 연결하여 신호를 획득하였다.

1회 측정은 1,000Hz로 9분동안 신호를 획득하여, 이를 Acknowledge program (BIOPAC Systems, Inc.)과 Matlab program (The Mathworks, Inc. version 5.1.0.421)을 이용하여 시간경과에 따른 식물의 전위반응신호를 조사하고 주파수 분석을 실시하였다. 시간에 따른 식물의 전위포텐셜의 변화를 분석하기 위해서 1초당의 엽표면 전위포텐셜의 평균값(average)과 이것의 변이차(variance: 편방편차)를 살펴보고, 자극에 대한 식물의 전위포텐셜 차이를 주파수 영역에서 분석하기 위해서는 Fast Discrete Fourier Transform(FFT)을 이용하였다.

광 자극 형태와 시간에 따른 엽표면 전위포텐셜의 변화 : 실험은 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 광도 $16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (광주기 12시간), 습도 $60 \pm 2\%$ 인 환경제어실에서 실시되었다. 공시재료는 초장 140 cm 정도의 홍콩 셰프렐라(*Schefflera arboricola 'Hong Kong'*)를 사용하였으며, 측정전극의 위치는 기준전극을 줄기하부에 부착하였고, 측정전극은 Ag-AgCl 표면전극(Ag-AgCl surface electrode)을 이용하여 식물체 중간부분의 잎 하나를 임의로 선정하여 잎 뒷면에 부착하였다. 측정은 암상태에서 수행되어졌으며, 빛자극은 교류에 의한 전자기(electromagnetic) 간섭현상을 없애기 위해서 DC 6V '전등'에 녹색, 적색, 청색 셀로판지를 부착하여, 전극을 부착한 잎 앞부분에 1.5 cm 정도 떨어져서 비춰주었다. 자극의 형태는 암상태, 녹색, 청색, 적색광을 각각 3분 동안 주는 방법과 적색광을 5초 · 15초 · 30초 간격으로 각각 자극을 가하여 3분동안 주는 방법

으로 하였다. 시간에 따른 전위포텐셜의 변화를 살펴 보기 위해서 아침, 점심, 저녁에 측정하였다. 측정시간은 자극을 가하기 전 3분(pre-stimulus), 자극을 가하는 시간 3분(stimulus), 자극을 가한 후 3분(post-stimulus)으로 하여, 총 9분 동안 데이터를 수집하였다.

춧물, 바람, 수온 자극에 대한 엽표면 전위포텐셜의 변화 : 실험 1)과 동일한 환경제어실에서 초장이 각각 25 cm 크기의 인도고무나무(*Ficus elastica* Roxb. ex Hornem.), 디펜바키아(*Dieffenbachia amoena* Hort. et Bull. 'Topial Topaz'), 호야(*Hoya carnosia* R. Br. var. 'Tricolor')와 초장 140 cm의 신답서스(*Scindapsus aureus* Engl.)를 식물재료로 사용하였다. 전극의 위치는 앞선 실험과 동일하였다. 춧물대기는 약 60초 동안 측정전극에 가까이 접근시키는 방법으로 하였으며, 바람 자극은 선풍기 미풍을 이용하였고, 전극이 부착된 잎은 바람에 움직임이 없도록 하였다. 저온수 자극은 실내온도가 $40^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 2\%$ 인 상태에서 5°C 의 물을 기습기에 넣고, 식물주변에서 3분 동안 가해주는 방법으로 하였다.

결과 및 고찰

광 자극 형태에 따른 전위포텐셜의 변화 : 측정 전극을 부착한 잎에서 적색 혹은 녹색광의 자극시 경과 시간에 따라 전위포텐셜이 처리전과는 다른 완만한 증가곡선을 보였고(Fig. 1-B for green light, data not shown for red light), 청색광에는 자극을 가하기 전 · 중 · 후의 전위변화의 차이가 없었다(Fig. 2). 특히 적 · 녹색광의 자극에 따른 엽표면 전위포텐셜의 변화는 3분 동안 고정하여 비추어 주는 것보다는 5초 간격, 15초 간격, 30초 간격으로 줄 때 시간에 따른 반응곡선 주기의 폭이 더 크게 나타났으며, 15초 간격과 30초 간격은 광의 점멸에 주기적인 반응곡선을 나타내었다(Fig. 1-C, D, E). 한편, FFT로 1~500Hz 사이에서 분석된 주파수 성분에서는 대부분이 10Hz 부근이 다른 주파수 성분보다는 높은 값을 나타내었으며, 자극 전 · 중 · 후의 분포에는 별다른 차이가 없었다(Fig. 3).

시간경과에 따른 전위포텐셜의 변화 : 같은 자극이라 할지라도 시간경과에 따른 녹색, 적색광의 전위포텐셜의 변화를 관찰한 결과, 3분동안 주는 방법, 5초 간격, 15초 간격, 30초 간격으로 빛을 주는 방법 모

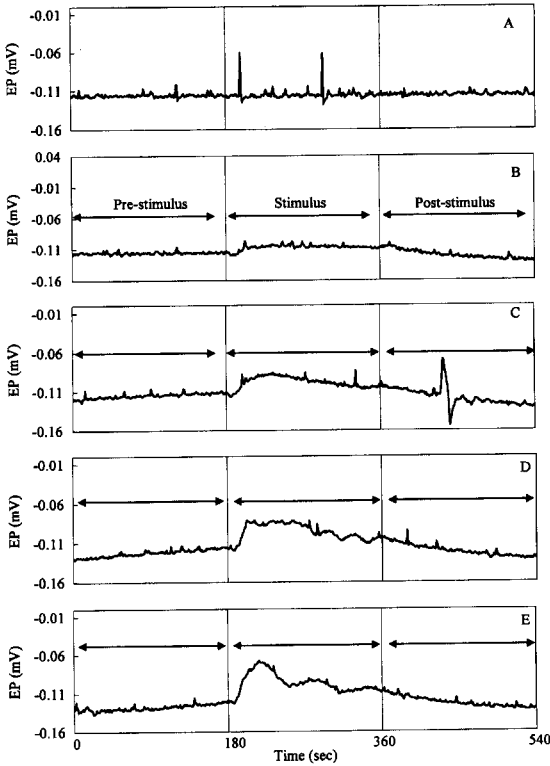


Fig. 1. Changes in leaf-surface electric potentials of *Schefflera aboricora* on different green light stimuli in the adaxial side of the leaf where electrode was attached (A : no stimulus, B : stimulus of light for 3 min., C : stimuli of light on and off with 5 sec intervals, D : stimuli of light on and off with 15 sec intervals, E : stimuli of light on and off with 30 sec intervals, EP : mean of electric potential.

두가 아침보다는 저녁때 반응이 크게 나타났으며, 반응곡선의 주기가 증가하였다. 대표적으로 15초 간격의 적색광 자극시 옆표면 전위포텐셜 변화는 Fig. 4와 같다.

춧불 자극에 대한 엽표면 전위포텐셜의 변화 : 춧불에 대한 반응은 디펜바키아와 인도고무나무에서 서로 다르게 나타났다(Fig. 5, 6). 디펜바키아의 경우는 자극 60초후에 완전한 전위포텐셜 곡선을 보인 반면 인도고무나무의 경우는 자극직후 급격한 반응을 보였다. 이러한 반응은 전위포텐셜의 변이차(variance)에 있어서도 마찬가지로 었다(Fig. 5-B, 6-B). 주파수 분석 결과에 따르면, 디펜바키아의 경우는 10Hz, 400Hz 대역에서 다른 대역에 비해 분포가 약간 많았으며, 자극 전·중·후에 따른 반응에는 일정한 경향이 나타나지 않았다. 한편, 인도고무나무 경우에는 10Hz 대역에서

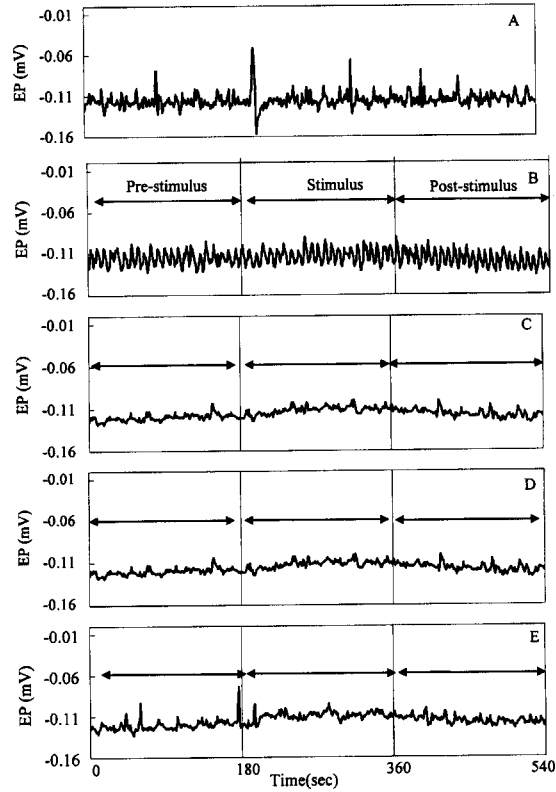


Fig. 2. Changes in leaf-surface electric potentials of *Schefflera aboricora* on different blue light stimuli in the adaxial side of the leaf where electrode was attached (A : no stimulus, B : stimulus of light for 3 min., C : stimuli of light on and off with 5 sec intervals, D : stimuli of light on and off with 15 sec intervals, E : stimuli of light on and off with 30 sec intervals, EP : mean of electric potential.

자극전후보다 자극을 줄 때 약 2배정도 증가하였고, 30~110Hz에서는 경미한 변화만 나타내었다.

바람자극에 대한 엽표면 전위포텐셜의 변화 : 디펜바키아는 자극을 주는 동안에 전위포텐셜이 감소하는 완만한 곡선을 그리다가 자극전의 형태로 되돌아가는 경향을 나타내었다. 이러한 사실은 전위포텐셜의 변이차에서도 볼 수 있는데 자극기간 동안에는 날카로운 형태의 pulse가 나타내고, 자극후에는 다시 자극전의 형태로 되돌아가는 경향을 나타내었다(Fig. 7). 주파수 분석에 따르면, 10Hz 대역에서 자극전·후보다 자극시 주파수분포가 증가하는 것으로 나타났다.

저온수 자극에 대한 엽표면 전위포텐셜의 변화 : 5°C의 물을 분무하였을 때, 신답서스는 전위포텐셜이 급격히 하강을 하였다가 약 30초후에 다시 상승하는 곡

환경자극에 따른 식물의 엽표면 전위포텐셜의 변화

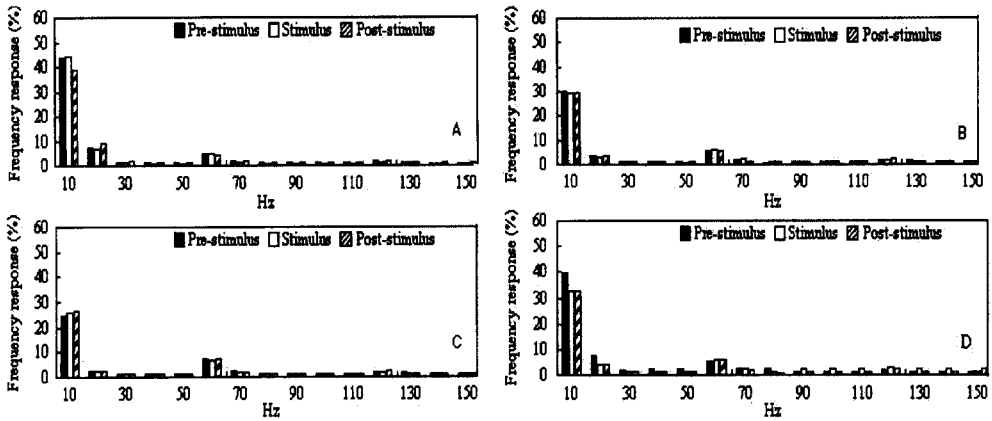


Fig. 3. Frequency distributions by FFT of *Schefflera aboriora* on different blue light stimuli in the adaxial side of the leaf where electrode was attached (A : no stimulus, B : stimulus of light on and off with 5 sec intervals, C : stimuli of light on and off with 15 sec intervals, D : stimuli of light on and off with 30 sec intervals).

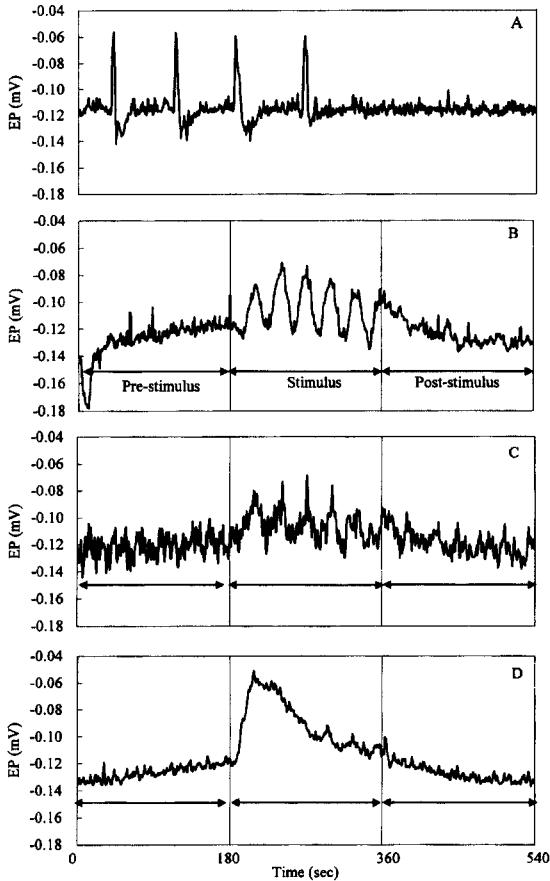


Fig. 4. Changes in leaf-surface electric potentials of *Schefflera aboriora* on different red light on and off with 15 sec intervals according to the time of day (A : no stimulus, B : response at 9 A.M., C : response at 1 P.M., D : response at 5 P.M., EP : mean of electric potential).

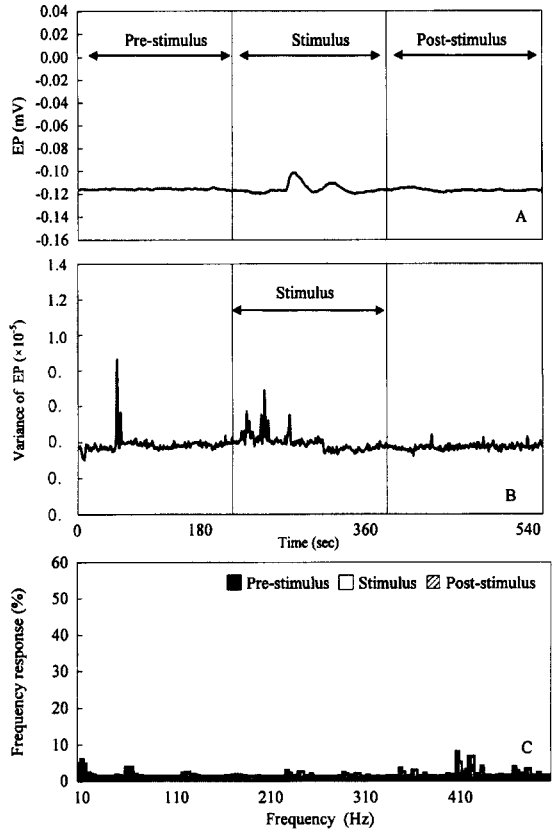


Fig. 5. Changes in leaf-surface electric potentials of *Dieffenbachia amoena* in response to the stimulus of candle light (A : mean of electric potentials according to time course, B : variance of electric potentials according to time course, C : frequency response according to FFT, FFT : fast discrete fourier transform, EP : mean of electric potential).

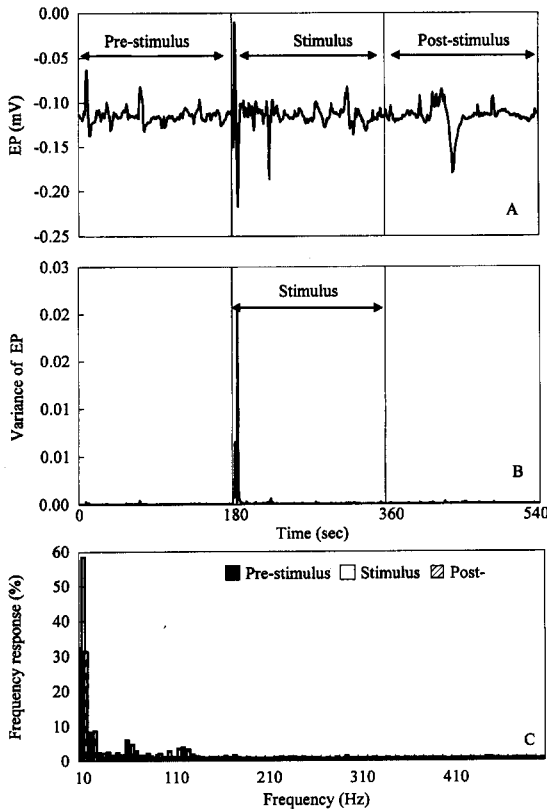


Fig. 6. Changes in leaf-surface electric potentials of *Ficus elastica* in response to the stimulus of candle light (A : mean of electric potentials according to time course, B : variance of electric potentials according to time course, C : frequency response according to FFT, FFT : fast discrete fourier transform, EP : mean of electric potential).

선을 나타냈다(Fig. 8). 한편, 변이치는 촛불이나 바람 자극과는 달리 자극의 시작과 종결과 더불어 급격한 차이를 나타내었다. 주파수 분석에 따르면, 촛불대기·바람자극과 비슷하게 10Hz~20Hz와 50Hz대역에서 출현량이 가장 많이 나타났으며, 자극 전·중·후에 따른 주파수 분포에는 50Hz에서 자극시 증가하는 경향을 보였다.

이전 연구에 따르면, 초본성 식물의 일부조직에 상해를 줄 때 전기적 변화가 일어난다고 하였다(Van Sambeek과 Pickard, 1976a; Roblin과 Bonnemain, 1985; Roblin, 1985; Wildon 등, 1989; Malone 등, 1991). 특히 토마토(*Lycopersicon esculentum* L. cv. Marmande)의 엽병에 전극을 삽입하고 잎끝에 열자극을 줄 경우에도 전기적 변화가 일어났으며(Van Sam-

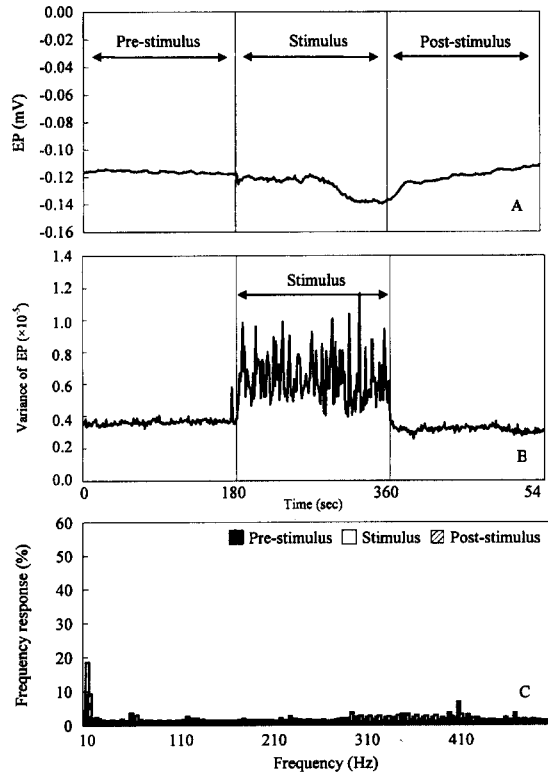


Fig. 7. Changes in leaf-surface electric potentials of *Dieffenbachia amoena* in response to the stimulus of candle light (A : mean of electric potentials according to time course, B : variance of electric potentials according to time course, C : frequency response according to FFT, FFT : fast discrete fourier transform, EP : mean of electric potential).

beek과 Pickard, 1976a; Roblin, 1985; Wildon 등, 1989), 이러한 결과는 *Vicia faba*에서도 비슷한 경향을 보였다고 한다(Roblin과 Bonnemain, 1985; Roblin, 1985). 또, 밑잎에 전극을 부착한 후 잎 끝에 열 자극을 준 경우에도 엽표면 전위포텐셜의 변화가 나타났으며, 자극을 준 후에 전위포텐셜의 변화가 이전의 상태로 되돌아가는 현상이 나타났다(Malone 등, 1991). 이러한 사실은 외부자극에 의해 식물은 어떤 형태이든 전기적 변화가 일어나며, 자극을 준 후에는 전위포텐셜이 자극이전 상태로 되돌아가는 경향을 보인다는 것을 의미하여, 본 실험의 결과와도 일치하였다(Fig. 1-8). 한편, 뽕나무의 잎에 선풍기 바람을 준 경우 자극을 주는 동안 격렬한 반응을 나타낸다는 것이 등, 1997)과 비슷하게 디펜바키아의 경우도 자극을 받는

환경자극에 따른 식물의 엽표면 전위포텐셜의 변화

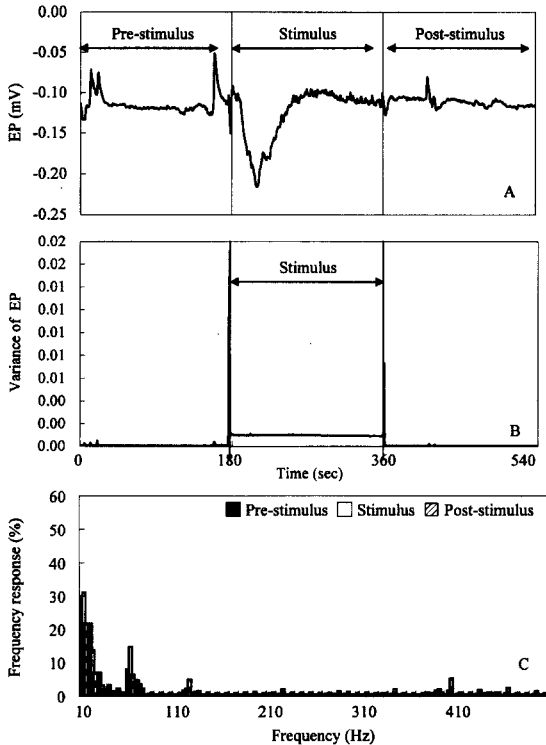


Fig. 8. Changes in leaf-surface electric potentials of *Scindapsus aureus* in response to cooled water (A : mean of electric potentials according to time course, B : variance of electric potentials according to time course, C : frequency response according to FFT, FFT : fast discrete fourier transform, EP : mean of electric potential).

동안 전위포텐셜의 전체적 변화는 약 2분 경과후 감소하는 느린 반응을 보여 주었으나, 변이치는 자극 직후부터 매우 심한 것으로 나타났다(Fig. 6). 한편, 저온수의 경우는 바람과는 다른 양상을 보여, 전위포텐셜의 변화는 자극직후에 일어났으며, 변이치는 자극시작 및 자극끝에서 극명하게 나타났다(Fig. 8).

또한, 특이한 사실은 현재 사용된 식물재료 대부분이 생체전위변화 측정을 위한 주파수 분석시 자극유무와 상관없이 1-10Hz 대역에서 주파수 분포가 높았으며, 식물에 따라 자극전후에 상당한 차이를 보였다는 것이다. 현재까지 조사된 바로는 이러한 결과를 이전에 보고한 예가 없었던 것으로 판단되며, 인간의 대뇌 피질에서 발생하는 뇌파(δ , θ , α wave)도 이 대역에 속한다는 점에서 매우 흥미롭다(Son 등, 1998). 그러나 이러한 현상이 어떤 의미가 있는 지에 대해서는 밝혀진 바 없는 실정이다.

본 실험의 결과에 따르면, 1) 외부자극에 대한 식물체의 전위포텐셜 변화가 분명히 발생하는 것을 볼 수 있었으며, 2) 중요한 사실은 자극뿐만아니라 식물체의 종류 및 시간에 따라서도 다양하게 반응하며, 이러한 사실은 일반적인 전위차 변화뿐만아니라 변이차 및 주파수 분석을 통해서도 확인할 수 있었다. 그러나 현재로서는 이러한 반응패턴이 무엇을 의미하는지에 대해서는 알 수 없으나, 현재 알고 있는 다양한 생리적 반응들과의 상관관계를 구명해 보는 것이 필요하다. 그럼에도 불구하고, 본 실험의 결과는 식물체 표면의 전위포텐셜 변화를 정확히 측정할 수 있는 구체적인 방법 및 반응패턴을 제시함으로써, 차후 식물의 다양한 생리변화와 상관된 실험을 수행할 수 있는 기초적 근거를 마련하였다고 판단된다.

Literature cited

1. Abe, S. 1981. Electrophysiological studies on cytoplasmic membrane of plant cells and protoplasts. PhD Diss., Kyoto University.
2. Borgens, B., W. Vanable, Jr., and F. Jaffe. 1979. Bioelectricity and regeneration. *BioScience* 29:468-474.
3. Dogane, Y. 1996. You'll listen to plant's voice. PLANT RON is used to measure a plant's emotion during human/orchid communication. Preceedings of NIOC '96, Nagoya.
4. Lee, W.J., K.Y. Lee, S.J. Yoon, D.W. Lee, and H.S. Bang. 1997. Stimulation of plant growth and changes in the contents of endogenous compounds by music. *J. of the Korean Jungshin Science Society* 1 (2):31-36.
5. Lund, E.J. 1947. *Bioelectric Fields and Growth*. p.56-57. The University of Texas Press, Austin.
6. Malone, M. and B. Stankovic. 1991. Surface potentials and hydraulic signals in wheat leaves following localized wounding by heat. *Plant, Cell and Environment* 14:431-436.
7. Miwa, Y., Y. Kushihashi, and H. Machida. 1987. The Biological potential change on the leaf surface of *Schefflera arboricola*. *Environ. Control in Biol.* 25(3) :123-125.
8. Rathore, K.S. and A. Goldsworthy. 1985. Electrical control of shoot regeneration in plant tissue culture. *Bio/Technology (Nature)* 3:1107-1109.
9. Robert, B. 1989. *The Secret Life of Your Cells*. p.13-14. Whitford Press, PA
10. Roblin, G. 1985. Analysis of the variation potential induced by wounding in plants. *Plant and Cell Physiology* 26:455-461.

11. Roblin, G. and J.L. Bonnemain. 1985. Propagation in *Vicia faba* stem of a potential variation induced by wounding. *Plant and Cell Physiology* 26:1273-1283.
12. Son, K.C., J.S. Lee, J.E. Song. 1998. Effect of visual recognition of indoor plants on changes of human brain electroencephalography. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 39:858-862.
13. Spillane, M. 1991. Good vibrations, a sound diet for plants. *The growing edge magazine*, Spring. p. 225.
14. Van Sambeek, J.W. and B.G. Pickard. 1976. Mediation of rapid electrical, metabolic, transpirational and photosynthetic changes by factors released from wounds. I. Variation potentials and putative action potentials in intact plants. *Can. J. Bot.* 54:2642-2650.
15. Wildon, D.C., H.M. Doherty, G. Eagles, D.J. Bowles, and J.F. Thain. 1989. Systemic responses arising from localized heat stimuli in tomato plants. *Annals of Botany* 64:691-695.

환경자극에 따른 식물의 엽표면 전위포텐셜의 변화

손기철 · 류명화 · 김미정

건국대학교 원예과학과

적 요

자극 종류(광질, 촉발, 바람, 수온)에 따른 식물의 엽표면 전위포텐셜의 변화가 조사되었다. 광자극시 광질 및 점·멸간격(5초·15초·30초)에 따른 전위포텐셜의 변화는 다르게 나타났으며, 동일한 자극일지라도 아침, 점심, 저녁시간에 따라 그 반응이 달랐다. 또한, 촉발대기, 바람, 5°C의 저온수 분무 등의 자극도 엽표면 전위포텐셜의 변화를 발생시켰으며, 식물에 따라 반응 패턴이 서로 다르게 나타났다. 결국 같은 자극일지라도 식물종에 따라 엽표면 전위포텐셜의 변화가 다르게 나타났으며, 동일한 식물일지라도 자극의 종류에 따라 서로 다른 반응패턴을 보였다. 한편, 전위포텐셜의 주파수 분석에 따르면, 대부분의 자극에 대해서 10Hz 대역이 다른 주파수 대역보다 높은 값을 나타내었다.

주제어 : 주파수 분석, 웨프렐라, 인도고무나무, 신답서스, 디펜바키아