



Monitoring of plant induced electrical signal of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) under changing light and CO₂ conditions

Jin Hee Park¹ · Han-Na Kim¹

광 및 CO₂ 변화 조건에서 브로콜리(*Brassica oleracea* var. *italica*)의 전기적 신호 모니터링

박진희¹ · 김한나¹

Received: 7 September 2021 / Accepted: 29 September 2021 / Published Online: 31 December 2021
© The Korean Society for Applied Biological Chemistry 2021

Abstract Changing environmental conditions can affect plant growth by influencing water and nutrient transport and photosynthesis. Plant physiological responses under changing environmental conditions can be non-destructively monitored using electrodes as plant induced electrical signal (PIES). Objective of the study was to monitor PIES in response to increased CO₂ and decreased photosynthetic photon flux density (PPFD). The PIES increased during day time when transpiration and photosynthesis occurs and monitored CO₂ concentration was negatively correlated to the PIES. Enhanced CO₂ concentration slightly reduced PIES, but the effect of increased CO₂ was limited by light intensity. The effect of reduced PPFD was not appeared immediately because water and nutrient transport was not promptly affected by the light. The study was conducted to evaluate short-term effect of increasing CO₂ and decreasing PPFD, hence proline content and chlorophyll fluorescence was not significantly affected by the conditions.

Keywords Chlorophyll · CO₂ · Photosynthetic photon flux density · Plant induced electrical signal · Proline

Jin Hee Park (✉)
E-mail: pjinh@chungbuk.ac.kr

¹Department of Agricultural Chemistry, Chungbuk University, Cheongju 28644, Republic of Korea

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

식물의 생육은 광, 온도, CO₂ 등의 다양한 환경 조건에 의해 영향을 받는다. 광은 식물의 생육에 가장 중요한 인자 중 하나로 광량뿐만 아니라 광의 질이 식물 생육과 생리적인 반응에 영향을 미친다. 일반적으로 광합성률은 광량이 높을수록 증가하지만 식물 종에 따라 광량이 높을 경우 광합성률이 감소하는 경우도 있다. 식물은 광량에 적응하기 위해 잎의 형태를 변화시키기도 한다[1]. 광의 변화에 따른 식물의 반응은 항산화효소의 활성에 영향을 미치기도 한다[2]. 따라서 광의 변화에 의한 식물의 반응을 이해할 필요가 있다.

대기중 CO₂ 농도는 계속해서 증가하고 있으며 그로 인해 작물의 생산성이 영향을 받을 것으로 예상되고 있다[3]. 광과 CO₂ 조건을 증가시키면 식물의 생육 지표가 향상되며 엽록소 형광이 변화된다[4]. 짧은 기간 CO₂가 증가하면 광합성률을 증가시켜 식물 생체량을 증가시키지만 오랜 기간 식물이 CO₂ 증가 조건에 노출되면 다양한 효과가 나타날 수 있다. 일반적으로 CO₂ 증가 조건에 장기간 노출되면 광합성률이 감소될 수 있다[5]. 식물의 전기적 신호는 식물의 생리적 반응을 실시간으로 모니터링할 수 있는 방법으로 식물 줄기의 양쪽에 전극을 삽입해 저항을 측정함으로써 생리적 반응을 평가한다[6]. 전기 저항은 전기전도도로 변환하여 계산하는데 이는 광, 온도, 습도 등 환경 조건의 변화에 따른 식물의 양수분 흡수 변화와 관련되어 있어 스트레스에 의한 식물의 반응을 평가하는 방법으로 제시되기도 하였다. 이전 연구에서는 식물의 전기적 신호를 전기전도도(ECps)로 명명하였으나 이는 토양의 전기전도도와 혼동되고 토양의 전기전도도와 달리 식물의 전기전도도는 식물의 이온 함량뿐만 아니라 도관 및 도관 주변의 수분 함량도 반영하는 지표이므로 본 연구에서는 식물유도 전기신호(plant induced

electrical signal; PIES)로 정의하였다. 이전 연구에서 브로콜리 생육 온도 조건을 변화시키면서 전기적 신호를 평가한 결과 단기적으로 온도 변화에 따른 PIES 변화가 나타났다. 고온 조건에서는 PIES가 대조구보다 높았으며 저온 조건에서 대조구와 비교해 PIES가 감소한 것을 확인하였다[7]. 그러나 광이나 CO₂가 변화하는 조건에서 식물의 생리적 반응이 어떻게 실시간 변화하는지 알려져 있지 않다. 기존의 연구에서는 식물의 변화를 실시간으로 측정할 수 없었기 때문에 식물을 광과 CO₂ 변화 조건에 노출시킨 후 잎의 클로로필 함량 변화나 엽록소 형광 변화, 광합성량 변화, 양분 함량 변화 등에 대해 연구하였다. 그러나 식물이 변화하는 환경에 노출될 때 나타나는 즉각적인 반응을 평가할 필요가 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 광의 감소와 CO₂ 증가 환경에서 환경 조건의 변화와 동시에 식물의 전기적 신호가 어떻게 변화하는지를 평가하는 것이다.

재료 및 방법

브로콜리의 생육 및 CO₂, 광 처리

브로콜리를 전기적 신호(PIES) 모니터링 조건에 노출시키기 전 온실에서 충분한 생육이 이루어지도록 하였다. 브로콜리 식재용 토양은 밭에서 채취한 토양에서 자갈을 골라내고 상업용 상토와 1:1 (v/v)로 혼합하였다. 브로콜리 모종을 3kg의 혼합 토양이 포함된 화분에 심은 후 광 및 CO₂ 변화 조건에 노출시키기 전 꽃봉오리가 생길 때까지 6주간 온실 조건에서 생육시켰으며, 생육 기간 동안 포장용수량 상태로 점적 관수하였다.

브로콜리가 다양한 환경 조건에 노출될 때 PIES가 어떻게 반응하는지 평가하기 위해 환경 조건의 제어가 가능한 식물생장실에서 실험을 수행하였다. 대조구 조건으로 식물생장상의 온도를 낮 20도 16시간, 밤 15도 8시간으로 설정하였으며 상대습도는 60%로 유지시키면서 7일간 노출시켰다. 대조구 조건에서 CO₂의 농도는 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 로 설정하였으나 실제 성장상 내부에서 CO₂를 측정할 결과 700-900 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 수준으로 밤과 낮의 차이가 나타났다. CO₂ 증가 조건의 경우 대조구와 같은 조건에서 브로콜리를 4일간 노출시킨 후 CO₂를 1000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 수준으로 증가시키고 다시 4일간 노출시켰다. CO₂ 수준은 온실가스 농도 변화 시나리오에 따른 2100년 예측 수준인 800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 로 설정하였으나 실제 측정값은 1000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 수준이었으며 낮에 광합성에 의한 CO₂ 감소 효과가 나타나지 않았다. CO₂를 더 증가시킨 처리구에서는 대조구 조건에서 4일간 생육 후 CO₂를 1400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 수준으로 증가시키고 다시 4일간 생육시키면서 PIES를 모니터링하였다. CO₂ 증가 조건의 온도, 광주기, 상대습도, 광량은 모두 대조구 조건과 같았다.

광 조건을 변화시킨 처리의 경우도 CO₂ 변화 조건과 마찬가지로 4일간 대조구와 같은 조건에서 브로콜리를 성장상 환경에 적응시킨 후, 4일 동안 120 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광합성 광량속도(photosynthetic photon flux density; PPF)에 노출시켰으며 나머지 처리 조건은 대조구와 동일하였다. 광을 더 낮춘 조건의 경우 4일간 대조구 조건과 마찬가지로 성장상에서 브로콜리를 노출시킨 후, 50 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 PPF에 노출시켰다.

식물 성장상 환경 조건 모니터링

브로콜리를 CO₂ 및 광 변화 조건에 노출시키면서 브로콜리의 반응을 PIES로 모니터링하였으며 온도, 상대습도, PPF와 CO₂를 실험 기간 동안 모니터링하였다. PIES는 브로콜리 지체부 상단의 줄기 양쪽에 3개의 스테인리스 침이 달린 전극을 각각 5 mm씩 삽입하여 모니터링하였으며 Junsmeter II (Prumbio, Suwon, Korea)를 사용하여 저항을 측정하고 전기전도도로 변환하였다[6]. 실험을 수행하는 동안 PPF (LightScout, Spectrum Technologies, Aurora, IL, USA)와 CO₂ (Korea Digital, Seoul, Korea)를 모니터링하였다.

잎의 엽록소 형광, 엽록소, 프롤린 함량, 분석

생육 환경 변화에 의한 엽록소 형광(Fv/Fm)은 브로콜리를 각각의 환경에 노출시켜 PIES를 모니터링한 후 마지막 날 잎의 여러 부위에 대해 엽록소 형광분석기(PAM 2000, Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Germany)를 이용하여 측정하고 평균을 계산하였다. 브로콜리 잎을 암조건에서 30분간 적응시킨 후 최대 형광(Fm)과 최소 형광(Fo) 정도를 측정하여 $Fv/Fm = (Fm - Fo)/Fm$ 으로 계산하였다[7]. 엽록소 및 프롤린 함량을 평가하기 위해, 각각의 환경 조건에 노출시킨 브로콜리의 잎을 무작위로 채취하여 증류수로 세척한 후 작게 분쇄하였다. 엽록소 분석을 위해 잎 0.5 g에 25 mL의 80% 아세톤을 첨가하여 혼합하고 24 시간 동안 암조건에 두었다. 시간이 경과하고 용액을 0.45 μm 필터로 여과한 후, UV/Vis 분광 광도계(Orion AquaMate 7000, Thermo-Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)로 80% 아세톤을 blank로 하여 645 및 665 nm에서의 흡광도를 측정하여 식물 잎의 엽록소 a 및 b 함량을 계산하였다[8].

프롤린 함량을 분석하기 위해 0.5 g의 브로콜리 잎에 10 mL 3% sulfosalicylic acid를 첨가하고 초음파분산기에서 30분간 반응시켰다. 추출된 용액을 25 °C에서 10분간 4000 rpm으로 원심 분리하고 0.45 μm 필터로 여과하였다. 여과액 2 mL를 2 mL의 acid-ninhydrin reagent (2.5 g ninhydrin, 60 mL glacial acetic acid 및 40 mL 6 M phosphoric acid) 및 2 mL의 glacial acetic acid와 혼합하고 100 °C에서 1시간 동안 가열하였다[9]. 가열한 시료를 냉각시킨 후, 4 mL의 톨루엔을 첨가하고 20 초간 교반하여 발색단을 함유하는 톨루엔을 수성상으로부터 분리하고 톨루엔을 blank로 하여 520 nm에서 흡광도를 측정하여 신선한 잎 중량을 기준으로 프롤린 함량을 계산하였다.

통계처리

데이터의 통계 분석은 SPSS 소프트웨어(IBM, Armonk, NY, USA)를 사용하여 수행하였다. PIES 데이터는 3개의 식물체를 모니터링하여 얻은 데이터를 평균하여 평균값으로 나타내었다. PIES와 온도, 습도, PPF, CO₂의 상관관계는 1시간 간격으로 측정해서 얻은 총 133개 데이터로 분석하였으며 각 인자들을 이용해 PIES에 대한 회귀분석을 실시하였다. 엽록소, 프롤린 함량은 평균과 표준 편차로 표시하였으며 처리구별 차이를 일원 배치 분산분석(One-way ANOVA Analysis)을 이용하여 비교하였고 사후 분석은 Duncan's multiple range test로 시행하였으며 유의 수준은 0.05로 하였다.

Table 1 Correlation coefficient matrix for PIES, temperature, relative humidity, PPF and CO₂

	PIES	Temperature	Relative humidity	PPFD	CO ₂
Temperature	0.61**	1			
Relative humidity	-0.40**	-0.61**	1		
PPFD	0.63**	0.92**	-0.49**	1	
CO ₂	-0.72**	-0.76**	0.32**	-0.74**	1

***p* < 0.01

결과 및 고찰

생육환경과 브로콜리의 전기적 신호와의 관계

식물 줄기의 전기적 신호인 PIES는 식물이 양수분을 흡수할 때 저항의 변화를 측정하여 전극의 접촉면과 전극 사이의 거리를 이용하여 전기전도도로 계산함으로써 양수분 이동을 보여주는 지표이다[6]. 따라서 PIES는 생육 환경과 밀접한 관계를 가지고 있으며 파프리카를 이용해 줄기의 전기전도도를 측정한 이전 연구에서 PIES는 광량 및 온도와 양의 상관관계가 있으며 상대습도와의 음의 상관관계가 있음을 보였다[6]. 브로콜리를 이용한 본 연구에서도 PIES는 온도, PPF와 양의 상관관계가 있었으며 상대습도와의 음의 상관관계가 있었으나 상관계수는 높지 않았다(Table 1). 이전 연구에서는 CO₂는 모니터링하지 않아 CO₂와의 상관관계는 평가하지 않았으나 본 연구에서는 PIES와 상관관계가 가장 큰 것으로 나타났으며 음의 상관관계를 보였다(Table 1).

PIES에 대해 환경 모니터링 정보를 이용해 회귀 모델을 구한 결과 모형의 R값이 0.756이었으며 설명력은 57.1%였다(*p* < 0.001). 모델에 의해 예측한 PIES를 Fig. 1에 실제 측정된 PIES와 도시한 결과 모델이 PIES를 비교적 잘 예측한 것으로 판단된다. 그러나, 단계적회귀분석을 실시하였을 때 CO₂만 인자로 하여도 R값이 0.72였으며 51.9%의 설명력을 보여 다른 인자들보다 CO₂에 의해 PIES가 가장 잘 설명되었다. 이는 PIES가 CO₂에 의해 영향을 받았기 보다 광합성의 결과 CO₂가 낮아지는 소모되고 밤에는 호흡으로 CO₂가 증가하여 결과적으로 PIES와 반대의 경향을 보였기 때문인 것으로 판단된다. Closed system에서 하루 동안(diurnal) CO₂의 패턴을 보면 낮에는 감소하고 밤에는 증가하는 패턴을 보이는데 이를 통해 광합성 정도를 평가할 수 있다[10]. PIES는 낮에는 증가하고 밤에는 감소하였는데 이는 양분의 흡수와 관련되어 있으며 일반적으로 양분과 수분의 흡수는 밤보다 낮에 더 많이 일어나기 때문에 낮에 PIES가 증가하였다. 토마토를 대상으로 밤과 낮의 양수분 흡수를 평가한 실험에서 수분의 흡수는 밤보다 낮에 4배 정도 높았으며 양분의 경우도 질소, 인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등의 양분 흡수가 낮에 더 높게 나타났다[11]. 따라서 낮에 EC가 높은 것은 양수분의 이동이 많기 때문이며 광합성이 활발하게 일어나기 때문에 결과적으로 PIES는 CO₂와 밀접한 상관관계를 보였다.

CO₂ 증가가 식물의 전기적 신호에 미치는 영향

CO₂를 1000 μmol mol⁻¹ 수준으로 증가시키고 CO₂를 모니터링한 결과 밤과 낮의 CO₂ 함량이 크게 차이 나지 않아 광합성에 의한 낮의 CO₂ 소모 효과가 나타나지 않았다. 따라서 CO₂가 식물의 전기적 신호에 미치는 영향을 평가하였으며 CO₂가 증

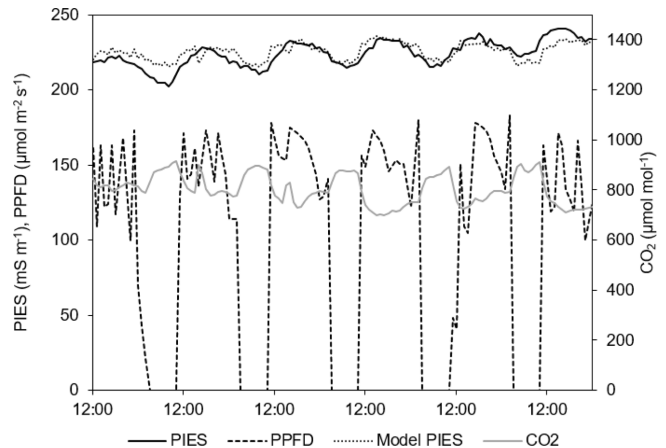


Fig. 1 Plant induced electrical signal (PIES), PIES modelled by multiple regression (Model PIES), photosynthetic photon flux density (PPFD), and CO₂ concentration monitored under the controlled condition

가하였을 때 PIES가 약간 감소하는 경향을 보였다. CO₂ 함량이 1400 μmol mol⁻¹ 수준으로 증가했을 때 PIES가 약간 감소하였으나 전체적인 패턴에 큰 변화를 보이지는 않았다. PIES의 값이 Fig. 1의 대조구와 비교해 높은 이유는 브로콜리의 직경이 평균 13-14 mm로 대조구의 평균 직경인 11 mm 보다 컸기 때문이다. 식물의 직경이 커지면 수체 내부의 전기전도도가 커지기 때문에 전기전도도는 식물의 직경에 영향을 받는다[6]. 일반적으로 CO₂가 증가하면 광합성이 증가하여 식물 생육을 증진시키는 것으로 여겨진다. 그러나 Jayawardena 등[12]의 연구 결과에서는 CO₂와 온도가 같이 증가했을 때 토마토의 질소 흡수와 동화가 저해를 받았다.

CO₂가 증가한 환경에 식물이 노출되면 물이 부족한 환경이 식물에 미치는 악영향을 완화시킬 수 있다고 알려져 있다. CO₂가 증가한 환경에서 잎은 높은 수분 퍼텐셜을 갖게 되는데 이에 대한 정확한 메커니즘은 알려져 있지 않으나 CO₂에 의한 기공 전도도의 감소와 식물 전체의 수리전도도 증가, 삼투 조절이 중요한 것으로 여겨진다[13]. 이는 대기의 CO₂ 함량에 의해 양수분의 흡수가 영향을 받을 수 있음을 보여준다. PIES는 양수분의 이동이 감소되면 감소하는 경향을 보이기 때문에 본 연구에서 CO₂의 증가에 의해 양수분의 흡수가 약간 감소하였으나 큰 변화를 보이지는 않은 것으로 판단된다(Fig. 2). 이는 광이 제한 요인으로 작용하여 CO₂의 증가 조건이 생육을 증진시키거나 이온의 이동에 크게 영향을 미치지 않았기 때문이다. CO₂가 100 μmol mol⁻¹ 증가할 때 광 포화 광합성량은 15.5% 증가하였다[14]. CO₂가 400에서 700 μmol mol⁻¹로 증가할 때

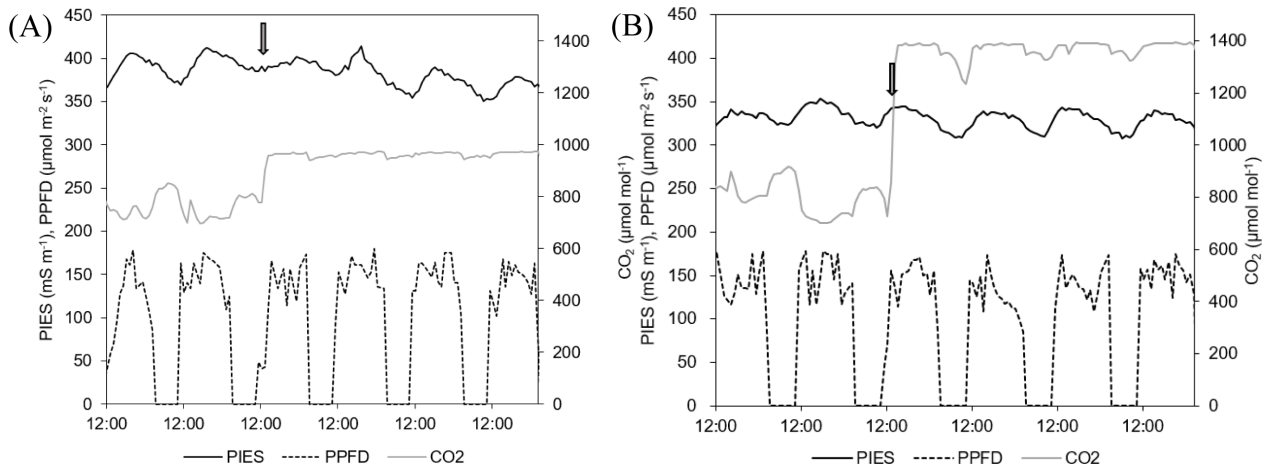


Fig. 2 Plant induced electrical signal (PIES), photosynthetic photon flux density (PPFD), and CO₂ concentration monitored under the increasing CO₂ conditions (A: CO₂ 1000 μmol mol⁻¹, B: CO₂ 1400 μmol mol⁻¹). Arrow indicates the time when CO₂ condition has been changed

Table 2 Chlorophyll a and b, and proline concentrations and chlorophyll fluorescence (Fv/Fm) of broccoli leaves exposed to elevated CO₂ and reduced PPFD

Samples	Chlorophyll a (mg g ⁻¹ FW)	Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW)	Proline (μmol g ⁻¹)	Fv/Fm
Control	0.063±0.008 ^b	0.023±0.001 ^{ab}	5.96±5.26 ^{ab}	0.82±0.0085 ^b
CO ₂ -1000	0.108±0.037 ^a	0.040±0.015 ^a	6.68±1.67 ^{ab}	0.85±0.0043 ^a
CO ₂ -1400	0.021±0.009 ^c	0.0081±0.0032 ^b	2.88±0.29 ^b	0.83±0.0098 ^{ab}
PPFD-120	0.0076±0.0033 ^c	0.0066±0.0038 ^b	6.69±4.18 ^{ab}	0.81±0.011 ^b
PPFD-50	0.0050±0.0011 ^c	0.0140±0.0097 ^b	10.02±3.05 ^a	Not available

Data are presented as mean±standard deviation and different letters in the same column indicate significant differences among treatment by one-way ANOVA followed by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$)

PPFD를 100에서 400 μmol m⁻² s⁻¹로 증가시키면서 콩과 피복 식물의 광합성을 측정 한 결과 작물에 따라 다르지만 일반적으로 CO₂ 증가 조건에서 광합성이 증가하였으며 광이 증가할수록 광합성이 증가하여 CO₂가 증가하더라도 광이 증가하지 않으면 CO₂ 증가에 의한 생육 증대 효과가 크지 않았다[15]. 식물의 양분 유입도 CO₂보다는 광의 증가에 의해 더 증가하였으며 CO₂가 증가할 때 질소와 마그네슘의 유입이 영향을 받았다. 식물의 양분 흡수의 경우 CO₂가 증가했을 때 질소, 칼륨, 망간 등은 감소하였으나 다른 양분의 흡수는 증가하였다[15]. CO₂ 처리에 의한 생육 증대 효과는 질소나 인산과 같은 주요 영양분에 의해 제한을 받을 수 있다[14]. 따라서 CO₂ 처리에 의한 생육의 변화는 다른 환경 조건이 식물 생육에 최적화된 상태에서 평가할 필요가 있다.

CO₂가 1000 μmol mol⁻¹로 증가하는 조건에서 엽록소 a와 b 함량은 대조구에 비해 높았으며 CO₂가 1400 μmol mol⁻¹로 증가하는 조건에서는 엽록소 함량이 감소하였다. Song 등[16]은 CO₂가 800 μmol mol⁻¹인 조건에 노출된 오이의 엽록소 함량이 증가하여 광합성이 증가했다고 보고하였다. 그러나 Cave 등[17]의 연구에서는 CO₂가 1000 μmol mol⁻¹로 증가했을 때 토끼풀 잎의 엽록소 함량이 감소하였다고 보고했는데 이는 비정상적 형태의 녹말 입자가 증가하였기 때문인 것으로 판단하였다. 따라서 CO₂ 농도 증가가 엽록소 함량에 미치는 영향은 식물 종에 따라 다르겠지만 농도가 크게 증가할 경우 오히려 엽록소 함량을 감소시키는 것으로 판단된다. 프롤린은 환경적 스트레스에

반응해 식물에 축적되는 아미노산으로 식물이 가뭄, 염, 광, 중금속, 생물학적 스트레스 등에 노출되면 함량이 증가하는 것으로 알려져 있다[18]. CO₂ 증가 조건에서 프롤린은 대조구와 유사하였고 엽록소 형광 값은 높아 브로콜리가 스트레스를 받지 않은 것으로 판단된다(Table 2). 다른 연구에서도 수분 스트레스와 UV는 총 엽록소 함량에 부정적인 영향을 미쳤으며 프롤린 함량을 증가시켰으나 CO₂ 농도 증가는 유의한 영향을 미치지 않았다고 보고하였으며 Fv/Fm은 CO₂가 증가하는 조건에서 증가하였다[15].

광의 감소 조건이 식물의 전기적 신호에 미치는 영향

광이 감소하는 조건에서 PIES를 모니터링한 결과 120 μmol m⁻² s⁻¹ 수준으로 PPFD를 낮췄을 때 PIES의 큰 변화는 관찰되지 않았으며 PPFD를 50 μmol m⁻² s⁻¹로 낮췄을 때 광의 감소에 의한 즉각적인 PIES의 감소는 나타나지 않았으나 시간이 지나면서 약간 감소하는 결과를 보였다(Fig. 3). Baligar 등[19]은 PPFD가 200 μmol m⁻² s⁻¹과 400 μmol m⁻² s⁻¹인 상태에서 콩과 피복식물의 생육과 양분 흡수를 비교한 결과 식물 종류에 따라 차이는 있지만 PPFD가 높은 조건에서 양분의 흡수가 더 높게 나타났다고 보고하였다. 따라서 광의 감소 조건에서 PIES의 감소는 양분 흡수의 감소와 관련이 있을 수 있으나 광이 감소하면서 양분의 흡수가 즉각적으로 감소하지 않기 때문에 반응이 광의 감소와 동시에 나타나지 않는 것으로 판단된다. 빛은 광합성률과 기공전도도에 영향을 미치는데 식물의 반응은 PPFD

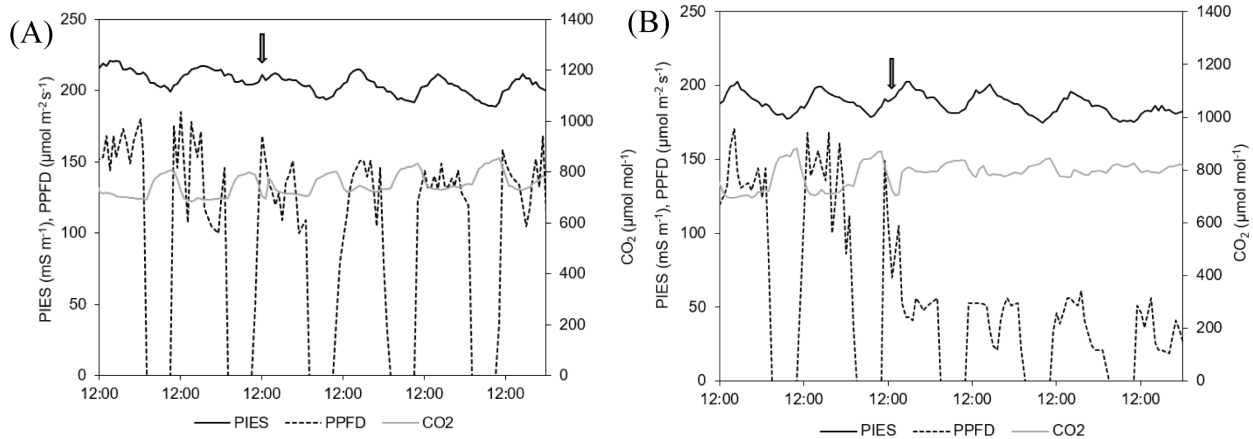


Fig. 3 Plant induced electrical signal (PIES), photosynthetic photon flux density (PPFD), and CO₂ concentration monitored under the decreasing PPFD conditions (A: PPFD 120 μmol m⁻² s⁻¹, B: 50 μmol m⁻² s⁻¹). Arrow indicates the time when PPFD condition has been changed.

가 달라지는 것과 동시에 일어나지 않으며 광합성률은 빠르게 변화하는 반면 기공전도도는 시간이 더 걸려 기공전도도의 반응 속도가 광합성률과 수분이용 효율에 영향을 미쳐 식물의 생산성이 달라지게 된다[20]. 기공 전도도에 따라 물의 이동도 달라지게 되기 때문에 광의 영향에 의한 양수분의 흡수 변화가 나타나 PIES의 변화와 연계되는데 시간이 걸리는 것으로 판단된다.

PPFD가 낮은 조건에서는 엽록소 a, b 함량은 감소하였으며 프롤린 함량이 대조구에 비해 증가하였으나 브로콜리가 스트레스를 받은 수준은 아닌 것으로 판단된다(Table 2). 이는 낮은 광조건에 노출된 시간이 비교적 짧아 스트레스로 작용할 정도는 아니었기 때문인 것으로 판단된다. 식물의 종류에 따라 광이 증가한다고 해서 엽록소 a, b의 함량이 증가하는 것은 아니며 최적 광조건에서 광합성률이 높게 나타난다. *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg를 재배할 때 PPFD가 200 μmol m⁻² s⁻¹ 까지는 광합성률이 증가하였으나 그 이상에서는 감소하였고 최적 광조건에서 엽록소 a, b 함량이 증가하였다. 그러나 광이 낮은 조건에서는 탄소 동화가 제한을 받았으며 식물의 생육이 감소하였다[21]. 따라서 낮은 광조건에 장기간 노출될 경우 식물의 생육 감소 현상이 나타날 수 있으며 그에 따라 PIES도 더 감소할 것으로 판단되어 향후 스트레스 지속 조건에서 장기간 PIES의 모니터링을 통한 식물의 반응을 평가할 필요가 있다.

초 록

환경 조건의 변화는 식물의 물과 양분 흡수 및 광합성 정도를 변화시켜 결과적으로 식물 생육에 영향을 미친다. 변화하는 환경 조건에서 식물의 생리적 반응은 식물 줄기에 전극을 삽입해 식물유도 전기신호(PIES)로 비파괴적으로 모니터링할 수 있다. 본 연구의 목적은 CO₂ 증가와 광합성 광량속밀도 PPFD 감소에 따른 식물의 반응으로 PIES를 모니터링하는 것이다. PIES는 증산과 광합성이 일어나는 낮에 증가하였고 식물 생육 기간 동안 모니터링한 CO₂ 농도는 PIES와 음의 상관관계를 보였다.

CO₂ 농도 증가는 PIES를 약간 감소시켰으나 PIES에 큰 영향을 미치지 않았으며 이는 CO₂ 증가의 효과가 낮은 PPFD에 의해 제한되었기 때문으로 판단된다. PPFD 감소의 효과는 물과 양분 흡수가 광에 의해 즉각적으로 영향을 받지 않았기 때문에 즉시 나타나지는 않았다. 본 연구는 CO₂ 증가와 PPFD 감소에 의한 식물의 단기적 반응을 평가하고자 한 것이며 프롤린 함량 및 엽록소 형광은 환경 변화에 따라 유의하게 변화하지는 않았다.

Keywords 광합성 광량속밀도 · 식물 유도 전기적 신호 · 엽록소 · 이산화탄소 · 프롤린

감사의 글 본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ015050012021)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

1. Fan XX, Xu ZG, Liu XY, Tang CM, Wang LW, Han XL (2013) Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Sci Hortic* 153: 50–55. doi: 10.1016/j.scienta.2013.01.017
2. Gechev T, Willekens H, Van Montagu M, Inzé D, Van Camp WIM, Toneva V, Minkov I (2003) Different responses of tobacco antioxidant enzymes to light and chilling stress. *J Plant Physiol* 160(5): 509–515. doi: 10.1078/0176-1617-00753
3. Avola G, Cavallaro V, Patanè C, Riggi E (2008) Gas exchange and photosynthetic water use efficiency in response to light, CO₂ concentration and temperature in *Vicia faba*. *J Plant Physiol* 165(8): 796–804. doi: 10.1016/j.jplph.2007.09.004
4. Naing AH, Jeon SM, Park JS, Kim CK (2016) Combined effects of supplementary light and CO₂ on rose growth and the production of good quality cut flowers. *Can J Plant Sci* 96(3): 503–510. doi: 10.1139/cjps-2015-0304
5. Makino A, Mae T (1999) Photosynthesis and plant growth at elevated levels of CO₂. *Plant Cell Physiol* 40(10): 999–1006. doi: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a029493
6. Park HJ, Park JH, Park KS, Ahn TI, Son JE (2018) Nondestructive measurement of paprika (*Capsicum annuum* L.) internal electrical conductivity and its relation to environmental factors. *hortic Sci Technol* 36(5): 691–701. doi: 10.12972/kjst.20180069

7. Cha SJ, Park HJ, Lee JK, Kwon SJ, Jee HK, Baek H, Park JH (2020) Multi-sensor monitoring for temperature stress evaluation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *J Appl Biol Chem* 63(4): 347–355. doi: 10.3839/jabc.2020.046
8. Maclachlan S, Zalick S (1963) Plastid structure, chlorophyll concentration, and free amino acid composition of a chlorophyll mutant of barley. *Can J Bot* 41(7): 1053–1062. doi: 10.1139/b63-088
9. Bates LS, Waldren RP, Teare ID (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil* 39(1): 205–207. doi: 10.1007/BF00018060
10. Wheeler RM (1992) Gas-exchange measurements using a large, closed plant growth chamber. *HortScience* 27(7): 777–780. doi: 10.21273/HORTSCI.27.7.777
11. Terabayashi S, Takii K, Namiki T (1991) Variation in diurnal uptake of water and nutrients by tomato plants of different growth stages grown in water culture. *J Jpn Soc Hortic Sci* 59(4): 751–755. doi: 10.2503/jjshs.59.751
12. Jayawardena DM, Heckathorn SA, Bista DR, Mishra S, Boldt JK, Krause CR (2017) Elevated CO₂ plus chronic warming reduce nitrogen uptake and levels or activities of nitrogen-uptake and-assimilatory proteins in tomato roots. *Physiol Plant* 159(3): 354–365. doi: 10.1111/ppl.12532
13. Wullschlegel SD, Tschaplinski TJ, Norby RJ (2002) Plant water relations at elevated CO₂—implications for water-limited environments. *Plant Cell Environ* 25(2): 319–331. doi: 10.1046/j.1365-3040.2002.00796.x
14. Wang S, Zhang Y, Ju W, Chen JM, Ciais P, Cescatti A, Peñuelas J (2020) Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science* 370(6522): 1295–1300. doi: 10.1126/science.abb7772
15. Baligar VC, Elson MK, He Z, Li Y, Paiva ADQ, Almeida AAF, Ahnert D (2021) Impact of Ambient and Elevated [CO₂] in Low Light Levels on Growth, Physiology and Nutrient Uptake of Tropical Perennial Legume Cover Crops. *Plants* 10(2): 193
16. Song H, Li Y, Xu X, Zhang J, Zheng S, Hou L, Xing G, Li M (2020) Analysis of genes related to chlorophyll metabolism under elevated CO₂ in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Sci Hortic* 261, 108988 doi: 10.1016/j.scienta.2019.108988
17. Cave G, Tolley LC, Strain BR (1981). Effect of carbon dioxide enrichment on chlorophyll content, starch content and starch grain structure in *Trifolium subterraneum* leaves. *Physiol Plant* 51(2), 171–174. doi: 10.1111/j.1399-3054.1981.tb02694.x
18. Szabados L, Savouré A (2010) Proline: a multifunctional amino acid. *Trends Plant Sci* 15(2) 89–97. doi: 10.1016/j.tplants.2009.11.009
19. Baligar VC, Fageria NK, Paiva AQ, Silveira A, Pomella AWV, Machado RCR (2006) Light intensity effects on growth and micronutrient uptake by tropical legume cover crops. *J Plant Nutr* 29(11): 1959–1974. doi: 10.1080/01904160600927633
20. Lawson T, Vialet-Chabrand S (2019) Speedy stomata, photosynthesis and plant water use efficiency. *New Phytol* 221(1): 93–98. doi: 10.1111/nph.15330
21. Dai Y, Shen Z, Liu Y, Wang L, Hannaway D, Lu H (2009) Effects of shade treatments on the photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and chlorophyll content of *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg. *Environ Exp Bot* 65(2-3): 177–182. doi: 10.1016/j.envexpbot.2008.12.008