

## 전면적차광과 부분차광이 콩 엽록소 형광 반응에 미치는 영향

조유나<sup>1,2</sup>, 조은이<sup>1</sup>, 정재혁<sup>3</sup>, 윤창용<sup>4</sup>, 안규남<sup>4</sup>, 조재일<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 농업생명과학대학 응용식물학과, <sup>2</sup>전남대학교 IT-Bio 융합시스템농업교육연구단,

<sup>3</sup>국립식량과학원 작물재배생리과, <sup>4</sup>전남농업기술원 식량작물연구소

(2021년 9월 17일 접수; 2021년 9월 27일 수정; 2021년 9월 29일 수락)

## Effects of Overall Shading and Partial Shading on the Response of Chlorophyll Fluorescence of Soybean

Yuna Cho<sup>1,2</sup>, Euni Jo<sup>1</sup>, Jae-Hyeok Jeong<sup>3</sup>, Changyong Yoon<sup>4</sup>, Kyunam An<sup>4</sup>, Jaeil Cho<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Plant Science, Chonnam National University,  
77 Yongbong-ro, Gwangju 61186, Republic of Korea,

<sup>2</sup>Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Chonnam National University,  
Gwangju, Republic of Korea,

<sup>3</sup>National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 181, Hyeoksin-ro,  
Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea,

<sup>4</sup>Jeollanam-do Agricultural Research & Extension Services, Naju 58213, Republic of Korea  
(Received September 17, 2021; Revised September 27, 2021; Accepted September 29, 2021)

### ABSTRACT

The growth experiment under shading condition has been performed to understand the eco-physiological responses of crops to light in terms of photosynthesis. There are two types of shading: overall shading and partial shading. In this study, the chlorophyll fluorescence of soybean was observed under the overall shading of the box made by polyresin and the partial shading at agrivoltaic system. The overall shading condition during vegetative growth induced lower SPAD and Electron transport rate (ETR). These lower values recovered after removal of shading box. However, the Non-photochemical fluorescence quenching (NPQ) became lower under overall shading and higher under partial shading. Such increase in NPQ limited crop photosynthesis even though the ETR was almost same to the control without shading treatment. Under the condition of partial shading, the values of SPAD and ETR for soybean did not change. However, the NPQ was higher than control condition. This suggests that the crop photosynthesis under both types of shading would be decreased by different eco-physiological processes which are the lower ETR in overall shading and the higher NPQ in partial shading despite the reduced light under shading conditions.

**Key words:** Overall shading, Partial shading, Chlorophyll fluorescence, Agrivoltaic system, Soybean



\* Corresponding Author : Jaeil Cho  
(chojaeil@jnu.ac.kr)

## I. 서 언

광은 광합성을 위해 요구되는 에너지원으로써 작물의 생명 유지, 생장, 수량에 영향을 미치는 필수 환경 요소이다(Gardner *et al.*, 2017). 하지만 역설적이게도 대부분의 작물은 생육동안 강한 광으로 광합성이 위축되는 광저해(photoinhibition)를 빈번히 겪는다(SSSB, 2003). 선행연구들은 다양한 차광조건의 작물 생육 실험을 수행하였는데(e.g., Han and Ryoo, 1988; Kim *et al.*, 1991), 대부분의 연구목적은 일조 부족 환경이 야기하는 작물의 생리·생태적 영향을 이해하고자 한 것이다. Han and Ryoo (1988)에 따르면 옥수수과 수수에서 차광율의 25%, 50%, 75% 증가로 기공 열림이 선형적으로 감소하였고 그에 따른 증산과 광합성도 낮아졌다. Kim *et al.*(1991)은 벼의 감수분열기부터 출수 후 20일까지 50%와 75%로 차광하였는데, 높은 차광에서 간장은 길어지고 불임율이 높아졌으며 등숙율과 수량은 감소하는 모습을 보였다.

최근 차광 생육실험을 다시 주목해야 하는 이유는 두 가지가 있다. 첫째, 극단적 양상의 기상이변 현실에서 2020년 한반도의 기록적 최장 장마와 같은 사례는 작물의 심각한 일조량 부족을 초래할 수 있다. 또한, 증가한 먼지·분진, 에어로졸, 수증기에 의해 태양복사광이 차단되는 음압화(Dimming) 현상에 대한 농업적 대응이 필요하게 되었다. 둘째, 인공 구조물에 의한 차광으로써, 도시농업과 영농형 태양광 시설이 대표적인 예이다. 주로 건물 그림자의 영향을 받는 도시 내 광 환경은 일반적인 농장과는 다르다. 영농형 태양광은 실제 작물을 재배하는 농지 위에 태양광 패널을 농기계보다 높이 일정한 간격을 두고 설치하여 작물에 어느 정도의 광이 침투할 수 있도록 설계한 것이다. 이는 전력 생산을 병행하는 장점이 있지만 필연적으로 차광에 비례해 수확량이 감소된다(Kim *et al.*, 2020; An *et al.*, 2021).

차광의 형태를 구분하지 않았던 선행연구와는 달리 본고에서는 차광을 전면적차광과 부분차광으로 구분하였다. 전면적차광(overall shading)은 주간동안 모든 식생 표면에 도달하는 광이 일정 비율로 소멸되는 것이다. 이것은 지면에 도달하는 태양복사가 100% 소멸을 의미하는 완전차광(completely shading)과는 다르며, 모든 대상 면적이 같은 비율로 차광되는 것을 뜻한다. 한편, 부분차광(partial shading)은 건물, 태양광 패널 등에 의해 식생 표면에 직달광이 비춰지거나 일부

면적은 차단된 그림자가 생기는 형태이다. 부분차광 조건에서는 그림자의 위치가 하루 중 변하므로, 차광율은 전천일사량에 대해 차광 하부의 복수 위치에서 관측한 주간 누적 일사량 비율의 평균값으로 나타낸다(Yoon *et al.*, 2019).

부분차광 하의 작물들은 시공간적으로 불균일한 광 조건에 놓여 있으므로 차광을 값만으로는 작물이 처한 광 환경을 이해하기 어렵다. 예를 들어, 부분차광 환경의 식물은 차광과 수광을 하루 동안 반복적으로 겪게 된다. 강한 광에 노출된 잎은 비광화학적 형광소멸(NPQ, Non-Photochemical fluorescence Quenching)을 통해 과도한 광 에너지를 열로 소산하여 광저해를 낮추고 엽록소를 보호한다(Murchie and Niyogi, 2011). 하지만, 강한 광에서 약한 광으로 조건이 바뀌어도 NPQ 활성은 빠르게 떨어지지 않으므로, 잎이 흡수한 광 에너지가 높은 비율로 열 소산되어 결국 광합성량은 낮아진다. 물론 약한 광이 수 시간 지속되면 NPQ 활성은 낮아져서 저하되었던 광합성량도 회복되지만, 이러한 일련의 과정은 부분차광과 같은 빈번한 광 변화 환경에서의 광합성은 단순히 누적 광량의 개념 접근할 수 없다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 합성수지제 차광막을 이용한 전면적 차광 조건과 영농형 태양광 하부의 부분차광 조건에서 생육한 콩의 광합성능을 영양생장이 한창일 때에 엽록소 형광 기법으로 관측하여 비교하였다. 또한, 전면차광을 제거한 후의 생육이 광합성능에 어떠한 영향을 끼쳤는지도 살펴보았다.

## II. 재료 및 방법

전면적차광 실험은 전남대학교 광주캠퍼스 전작실 습포에서 수행되었다. 재식밀도 70×15 cm로 대풍콩을 파종 후 10일째인 2021년 6월 21일에 약 83% 차광율의 합성수지제 흑색 차광막으로 제작된 85×50×110 cm 크기의 차광 박스를 3곳에 설치했다. 그로부터 33일 후인 8월 3일에 차광 박스를 제거하고 각 지점에서 엽면이 남쪽을 향하고 있는 상위 2~4번째 잎 중에서 하나를 선택하여 엽록소 형광 매개변수인 전자전달효율(ETR, Electron Transport Rate)과 NPQ를 야간에 측정하였다(n=3). 광저해 스트레스가 없고 암적용 상태인 야간에 엽록소 형광을 관측함으로써 생육 환경에 응답하는 작물의 광합성능과 보호기작 차이를 알아보았다(Cho *et al.*, 2021). 대조 실험군으로써 차광 박스

각 설치 지점에서 남쪽으로 약 1 m 거리의 차광 그림자가 전혀 드리워지지 않는 잎을 대상으로 ETR과 NPQ를 측정했다. 또한, 차광 박스 제거한지 17일 후에 ETR과 NPQ를 다시 측정하였고, 마찬가지로 대조 실험군도 동일한 관측을 진행했다.

부분차광 실험은 전라남도 나주시 산포면 전남농업기술원 영농형 태양광 시설에서 진행되었다(Cho *et al.*, 2021). 작물은 재식밀도 60×25 cm의 대원콩을 대상으로 했고, 2021년 6월 17일에 파종되어 33일째에 ETR과 NPQ를 야간 측정하였다. 약 25% 차광율로 설계된 영농형 태양광 하부와 노지에서 남쪽을 향한 잎을 각각 6개 선택하여 엽록소 형광을 관측했다(n=6). ETR 관측은 7단계의 조사광(irradiating light)으로 구성된 RLC (Rapid light curve) 프로토콜을 사용하였고, NPQ 프로토콜은 명과 암 단계로 구성되어 암 회복(Dark recovery)을 확인할 수 있다.

엽록소 형광 관측 기기는 야외 관측에 용이한 모니터링펜(Monitoring Pen MP 100-A, PSI)을 이용하였다. 잎의 엽록소 농도 차이는 SPAD (SPAD-502Plus, MINOLTA) 기기로 잎 당 10회 측정한 평균값을 이용했다.

실험이 진행된 2021년은 기상청 집계에 따르면 평년보다 장마는 평년보다 2주 짧았으며 7월 폭염 일수는 역대 5위로써 차광 효과를 실험하기에 매우 적절한

기후였다. 재배관리는 두 실험 포장 모두 농촌진흥청의 관행농법 표준시비로 이루어졌다.

### III. 결과 및 토의

#### 3.1. SPAD

파종 후 33일 동안 전면적차광 조건에서 생육한 콩은 Shin *et al.*(2019)과 마찬가지로 경장이 길고 잎의 크기는 작아졌다. SPAD값은 대조구 약 41에 비해 차광 박스에서는 약 31로 크게 감소하였다(Fig. 1). 반면, 전면차광이 제거되자 SPAD값은 대조구와 유사하게 회복되었다. 그리고, 부분차광인 영농형 태양광 하부에서 영양생장기 한참일 때의 SPAD값은 대조구와 거의 같았다. Cho *et al.*(2021)에서도 콩 영양생장기 마지막 무렵에 확인한 SPAD가 부분차광 조건과 대조구에서 다르지 않았던 것과 유사한 결과이다.

차광에 따른 잎의 엽록소 농도 변화는 두 가지 과정으로 해석될 수 있다. 첫째, 비용-혜택 가설(Hirose and Werger, 1987)이 설명하는 것처럼 광량이 많은 조건의 잎은 보다 큰 질소를 요구하게 되고, 이에 상응하는 질소를 뿌리에서 흡수해 잎으로 전류한다. 반대로 수광량이 적은 잎은 질소 요구도가 낮기 때문에 SPAD값이 낮아진다. 둘째, Xiong *et al.*(2015) 등이 보고하는 것처럼 약한 광의 식물은 잎까지 전류 되어진 질소를

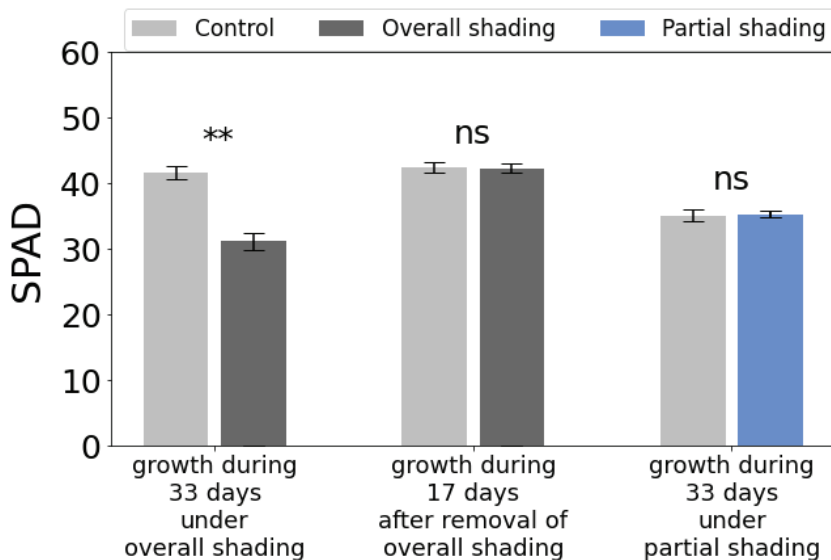


Fig. 1. Comparison of the soybean SPAD under/after overall shading and under partial shading. Bars are the means of sample (n=6, 6, 12). Error bars represent standard deviation.

단백질 합성 보다는 엽록소 생성에 분배하여 SPAD값이 증가한다. 두 과정은 각각 SPAD를 감소시키고 증가시키는데, 반응이 동시에 일어나면 반대되는 결과가 서로를 상쇄하여 결국에는 반응량이 큰 과정이 표현형으로 드러날 것이다.

그러므로 전면차광 하의 SPAD값 감소는 뿌리에서 잎으로의 질소 전류량이 감소한 영향이 보다 컸고, 이렇게 위축된 질소 흡수 및 전류량은 차광 박스 제거 뒤에 증가한 것으로 보인다. 부분차광에서는 엽록소 농도의 변화가 없었다고 해석하기 보다는 반대 성향의 두 정도가 유사하여 서로 상쇄되었다고 볼 수 있다.

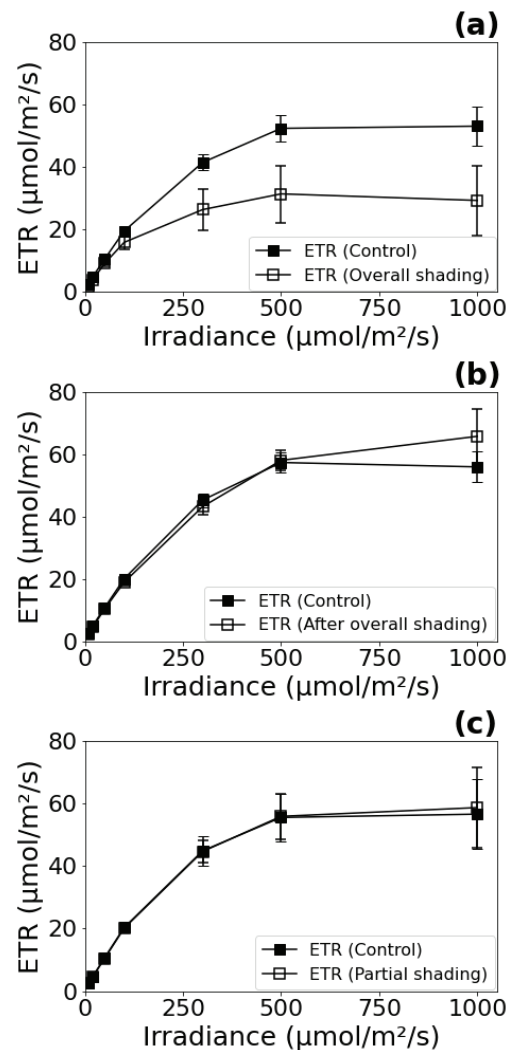
### 3.2. ETR과 NPQ

ETR은 SPAD와 유사한 모습을 보였다. 전면차광에서 생육한 잎의 ETR은 대조구에 비해 현격히 낮았으며(Fig. 2a), 이는 엽록소 농도가 낮아진 것과 직접적인 관련이 있어 보인다. 그리고, 차광 박스 제거 후에 SPAD값이 회복된 것과 같이, ETR도 대조구와 거의 유사해졌다(Fig. 2b). 부분차광에서도 SPAD의 차이가 없었던 것처럼 ETR도 마찬가지로였다(Fig. 2c).

강한 광으로부터 광화학계 손상을 보호하는 열 소산 기작인 NPQ는 SPAD와 ETR는 다른 모습을 보였다. 전면차광에서 생육한 콩은 낮은 NPQ를 보였다(Fig. 3a). 이는 강한 광 스트레스가 없었던 전면차광에서 열 소산의 이용 가치가 낮았을 것이다. 또한, 광합성의 핵심 과정 중 하나인 광인산화(Photophosphorylation) 반응을 위축시킬 수 있는 NPQ 기작을 발달시키지 않아 약한 광 조건에서 광합성 효율을 높이고자 한 것으로도 보인다.

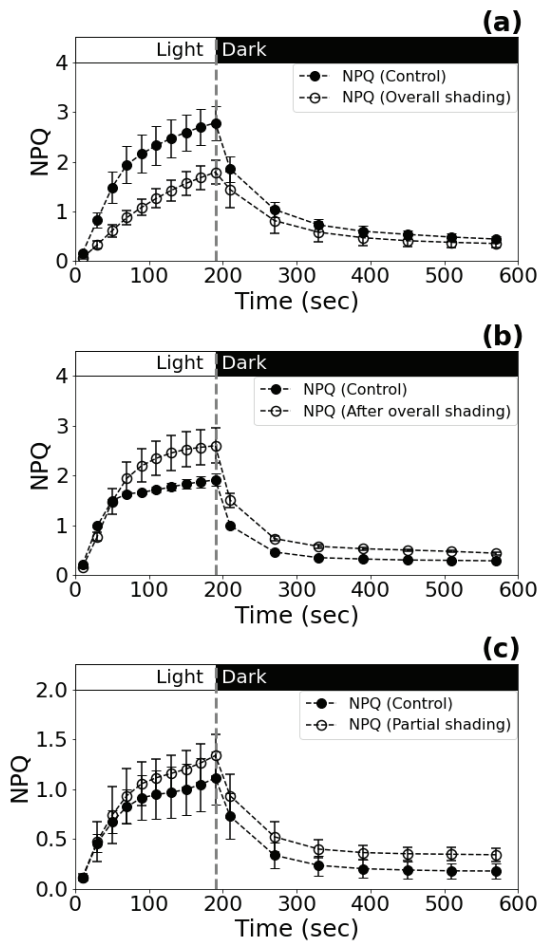
차광 박스 제거 후의 생육 과정에서 NPQ는 대조구보다 더 커졌는데(Fig. 3b), 이는 SPAD와 ETR이 거의 차이가 없었던 것과는 상이한 모습이다. 전면차광을 겪었던 잎이 보호 기작을 보다 강화했기 때문인데, 이 상태에서 노지의 강한 광에 처하게 되면 필요 이상으로 NPQ가 활성화 되어 과도한 열 에너지 손실을 가져온다. 따라서, 비록 ETR은 회복되었지만, 광합성량은 떨어질 것으로 예상된다. 더욱이 활성화된 NPQ 기작은 약한 광이 되어도 곧바로 비활성화되지 않고 수 시간 지속될 수도 있어 실제 광합성량은 더 낮을 수 있다(Murchie and Niyogi, 2011).

부분차광에서도 NPQ가 높아진 모습을 볼 수 있는데(Fig. 3c), 이는 부분차광 조건의 식물은 약한 광뿐만



**Fig. 2.** Rapid light response curve of ETR measured in (a) growth during 33 days under overall shading, (b) growth during 17 days after the removal of overall shading, and (c) growth during 33 days under partial shading. Error bars represent deviation and data are the means of value ( $n=3, 3, 6$ ).

아니라 강한 광을 겪으므로 대조구보다 NPQ가 낮아지 않았으며, 오히려 강한 광과 약한 광이 빈번히 교차되는 환경에서 열 소산 보호 기작을 보다 발달시킨 것으로 보인다. 따라서 NPQ를 고려한다면, 영농형 태양광과 같은 부분차광에서 ETR과 차광을 기반 누적 수광량으로 추정된 광합성량은 과대평가될 수 있음을 의미한다.



**Fig. 3.** NPQ induction curve measured in (a) growth during 33 days under overall shading, (b) growth during 17 days after the removal of overall shading, (c) growth during 33 days under partial shading. Error bars represent deviation and data are the means of value (n=3, 3, 6).

#### IV. 제 언

전면차광에서는 질소 흡수와 이용이 위축되어 잎의 엽록소 농도가 떨어지고 광합성의 핵심과정인 광인산화 효율이 낮아졌다. 비록, 전면차광이 제거된 후 광이용효율(light use efficiency)은 회복되지만 높아진 열소산으로 인하여 노지 광합성량은 낮아질 것으로 보인다. 마찬가지로 부분차광과 같이 빈번한 광 환경 변화는 광화학계 보호를 위한 열 소산 기능을 발달시켜 광합성 효율을 떨어뜨릴 것이다.

이러한 결과는 앞으로 차광 생육실험을 설계할 때, 전면차광과 부분차광으로 구분해야 하며 광이용효율 뿐만 아니라 광 보호 기작도 주목해야 함을 의미한다. 본 연구에서는 전면차광과 부분차광의 차광율을 다양하게 설정하여 실험하지 못하였는데, 두 차광 형태에 대해 차광을 변화에 따른 ETR과 NPQ의 정량적 변화를 면밀히 추적하는 후속 연구가 필요하겠다. 또한 콩 뿐만 아니라 다양한 작물에서의 반응 차이를 살펴볼 필요가 있다.

#### 적 요

광은 식물 광합성에 반드시 요구되는 에너지이다. 차광의 종류를 전면차광과 부분차광으로 구분하고, 각각의 차광 조건에서 생육한 콩의 엽록소 형광을 관측하여 광합성능을 평가하였다. 전면차광에서는 SPAD값으로 대표되는 엽록소 농도와 광이용효율을 표현하는 ETR (Electron Transport Rate)이 크게 낮아졌다. 차광박스 제거 후에 SPAD와 ETR 모두 대조구와 같은 정도가 되었으나, 열 소산 기작을 나타내는 NPQ (Non-Photochemical fluorescence Quenching)는 높아졌다. 이렇게 전면차광을 겪었던 콩의 광이용효율은 회복했지만, 높아진 NPQ가 광인산화 효율을 떨어뜨리므로 실제 노지 광합성량은 필연적으로 낮아질 것이다. 부분차광에서도 SPAD와 ETR이 대조구와 큰 차이를 보이지 않았으나, NPQ는 높은 모습을 보였다. 따라서, 도시 농업 또는 영농형 태양광과 같은 부분차광 조건의 광합성량은 단순히 작물의 광이용효율과 누적 광 에너지량으로 계산한 추정값보다 작을 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

이 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ015103052021)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

An, K., C. Yoon, S. Shin, S. Kim, and J. Cho, 2021: Characteristics of paddy rice by planting density under agrophotovoltaic module structure. *Proceeding of the Korean Solar Energy Society of Conference*, 175pp.  
 Cho, Y., H. Kim, E. Jo, D. Oh, H. Jeong, C. Yoon,

- K. An, and J. Cho, 2021: Effect of partial shading by agrivoltaic systems panel on electron transport rate and non-photochemical quenching of crop. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **23**(2), 100-107. (in Korean with English abstract)
- Gardner, Frank P., R. Brent Pearce, and Roger L. Mitchell, 2017: *Physiology of Crop Plants*. Scientific publishers, 19pp.
- Han, H., and J. Ryoo, 1988: Effects of shading on growth and dry matter accumulation of corn and sorghum species I. Effect of shading on photosynthetic rate. *Journal of the Korean Society of Grassland Science* **8**(1), 61-65. (in Korean with English abstract)
- Hirose, T., and M. J. A. Werger, 1987: Maximizing daily canopy photosynthesis with respect to the leaf nitrogen allocation pattern in the canopy. *Oecologia* **72**(4), 502-526.
- Kim, H., S. Jee, J. Kim, M. Kang, S. Yun, M. Kim, J. Kim, Y. Lee, J. Son, G. Song, H. Jeon, and J. Chung, 2020: Rice and electric power production by adjusting the module angle of grid-connected agro-photovoltaic plant. *Proceedings of the Korean Society of Crop Science Conference*, 91pp.
- Kim, K., S. Kim, B. Huh, and K. Yoon, 1991: Effects of shading at heading stage on yield components in rice. *Journal of Korean Society of Crop Science* **36**(2), 127-133. (in Korean with English abstract)
- Murchie, E. H., and K. K. Niyogi, 2011: Manipulation of photoprotection to improve plant photosynthesis. *Plant Physiology* **155**(1), 86-92.
- Sin, P., W. Sang, J. G. Baek, Y. H. Lee, D. W. Gwon, J. H. Kim, J. I. Jo, and M. C. Seo, 2019: Effects of shading on growth and yield components of soybean at different growth stages. *Proceedings of the Korean Society of Crop Science Conference*, 129pp.
- The Society for the Study of Species Biology (SSSB), 2003: *Introduction to Plant Physiological Ecology*. Hiroyuki, M. and K. Naoki (Eds.), Bun-ichi Sogo Shuppan Co, 252-253.
- Xiong, D., J. Chen, T. Yu, W. Gao, X. Ling, Y. Li, S. Peng, and J. Huang, 2015: SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Scientific report* **5**(1), 1-12.
- Yoon, C., S. Choi, K. N. An, J. H. Ryu, H. Jeong, and J. Cho, 2019: Preliminary experiment of the change of insolation under solar panel mimic shading net. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(4), 358-365. (in Korean with English abstract)