

SHORT COMMUNICATION

급격한 광도 변화가 담배 잎에서 반사되는 Normalized Difference Vegetation Index에 미치는 영향

서계홍*

대구대학교 자연과학대학 생명과학과

Effect of a Sudden Increase in Light Intensity on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Reflected from Leaves of Tobacco

Kyehong Suh*

Department of Life Science, Daegu University, Daegu 38453, Korea

Abstract

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has played an important role in assessing green plant biomass through remote sensing on global scale since the early 1970s. The concept of NDVI is based on the fact that green plants show higher reflection in near-infrared region than in visible region of the electromagnetic spectrum. However, it is well known that the relocation of chloroplasts in plant leaf cells may dramatically change the optical properties of plant leaves. In this study I traced the changes in the reflectance and transmittance properties of Tobacco leaves at the wavelengths of 660 and 800 nm after a sudden increase in light intensity. The results showed that NDVI of leaves gradually decreased from 72.7% to 69.9% when exposed to a sudden increase in light intensity from 30 to 1,200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$. This means that the error resulting from the physiological status of the plant should be accounted for a more precise understanding of ground truth corresponding to the data from the remotely acquired images.

Key words : Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Spectral reflectance, Transmittance, Tobacco

1. 서론

인류 최초의 인공위성이 지구 궤도 진입에 성공한 1957년 이후, 우주 관측 혹은 지구 탐사를 위한 여러 종류의 장비를 탑재한 인공위성이 궤도를 선회하며 임무를 수행하고 있다. 이들 중 지구 환경에 대한 본격

적인 원격탐지는 가시광선대 3개, 그리고 근적외선대 1개 파장대를 촬영하는 Thematic Mapper를 탑재하고 1972년 발사된 Landsat-1 위성에 의하여 시작되었다.

원격 탐지 분야에서 지상의 식물량, 엽면적 지수, 엽록소 함량 등을 추정하는데 가장 널리 이용되어 온 지수인 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)는

Received 31 January, 2017; Revised 15 March, 2017;

Accepted 16 March, 2017

*Corresponding author: Kyehong Suh, Department of Life Science, Daegu University, Daegu 38453, Korea
Phone : +82-53-850-6453
E-mail : ecology@daegu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

식물에서는 잎 세포의 엽록소에 의한 흡광의 결과 660 nm 및 800 nm 파장에서의 파장별 반사율이 노출된 토양이나 물과 현저하게 다른 것을 이용하여 고안된 것으로 아래와 같은 수식으로 계산된다(Rouse et al., 1974).

$$\text{NDVI} = (R_{800} - R_{660}) \div (R_{800} + R_{660})$$

(여기서 R_{800} 및 R_{660} 은 각각 800 nm 및 660 nm에서의 반사율이다.)

이 지수는 육지의 생물량(biomass) 뿐 아니라 해양에서도 엽록소 밀도 추정에 이용되는 등 인공위성에서 탐지한 지상 자료의 해석에 관련된 다양한 분야에서 활용되어 왔다. 최근에는 고성능 탐지기를 공공 항공기에 탑재하여 촬영함으로써 파장(spectral) 및 공간(spatial) 해상도가 월등하게 향상된 지표 영상을 얻을 수 있게 되었다. 이에 따라 원격으로 획득된 영상에서 공간 해상도가 증가할수록, 각 화소(pixel)는 토양 등 지표의 다른 곳과 혼합된 것보다 토양이나 식물의 잎에서 나온 빛만으로 결정된 것의 수가 많아질 것이다.

그런데 광학적 특성이 거의 일정하게 유지되는 토양이나 물과는 달리 살아 있는 식물의 잎에서는 세포 내 엽록체 위치의 재배열에 의하여 잎의 반사율 및 투과율 등의 광학적 특성이 크게 변하는데(Davis et al., 2011), 이런 현상은 양치식물에 이르기까지 다양한 식물에서 보고되어 있다(Augustynowicz and Gabrys, 1999). 자연 상태에서 식생의 수관을 구성하는 식물 잎은 구름이나 바람 등의 기상 변화에 따라 급격한 광도 변화에 노출되어 있다. 따라서 식생을 구성하는 나무 잎의 광학적 성질은 광합성 색소인 엽록소의 최대 흡광이 나타나는 660 nm에서 특히 큰 변화가 예상되며, 이에 따라 NDVI 값도 영향을 받을 것으로 예상된다.

이 연구에서는 담배 모체에 정상으로 달린 잎에 조사되는 광도의 급격한 변화에 따른 적색 및 근적외선 신호의 크기를 연속으로 추적하여 NDVI의 변화 규모를 파악함으로써 기후 변화 등 여러 요인에 의한 식생의 변화를 정밀하게 해석하는데 기여하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 식물 재료

태양광이 조사되는 유리 온실의 화분에서 10주 성장시킨 담배(*Nicotiana tabacum* L. cv. Xanti)의 잎을 대상으로 실험이 수행되었다. 측정에 사용된 잎은 15분 암 적응 시킨 후, 약광($30 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)을 30분간, 그리고 연이어 강광($1200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)을 50분 동안 조사하면서, 이산화탄소 흡수에 의한 광합성 속도와, 투과율 및 반사율을 10초 간격으로 연속 측정하였다.

2.2. 측정 및 분석

담배 잎을 모체에서 떼어내지 않은 상태를 유지하며 CO_2 고정에 의한 광합성률, 그리고 660 nm 및 800 nm 파장에서의 투과율 및 반사율을 동시에 측정하기 위하여 2개의 광섬유가 관통되도록 개조한 광합성상(Parkinson leaf chamber, ADC, Hoddesdon, Hertfordshire, UK)을 이용하였다(Jeong et al., 2002). 반사율 측정용 광섬유를 광합성상 내부 잎의 윗면과 60도 각도로 이루게 관통시켜 앞에서 반사된 빛을 수집하였다. 그리고 광합성상 내부 잎의 아랫 면을 통과한 빛은 BaSO_4 를 도말한 작은 면과 45도 각도로 만나 최대 산란되도록 하였으며, 이 산란광을 투과율 측정용 광섬유로 수집하였다. 담배의 잎에서 반사된 빛과 투과된 빛은 각각의 광섬유를 통하여 2대의 spectrometer (MMS, Zeiss)로 유도하여 그 세기를 동시에 측정하였으며 정의에 따라 NDVI 값을 계산하였다.

담배 잎의 광합성률은 Steady-state gas exchange system (LCA2, LDC, UK)을 이용하여 측정하였으며, 잎에 조사되는 광도는 할로겐 램프(12W DC, Philips, Eindhoven, Netherlands) 광원의 빛을 neutral density filter로 조절하여 약광($30 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 및 강광($1,200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 조건을 맞추었다. 광합성상에 공급되는 공기 중의 이산화탄소 농도는 360 ppm, 상대 습도는 40%, 그리고 유속은 250 mL/min로 조절하였다. 광합성상 안에 위치한 잎에 온도는 열전소자(Peltier Cooler)를 이용한 온도 조절기(MX7, Hanyong Co. Korea)를 이용하여 25°C로 유지하였다.

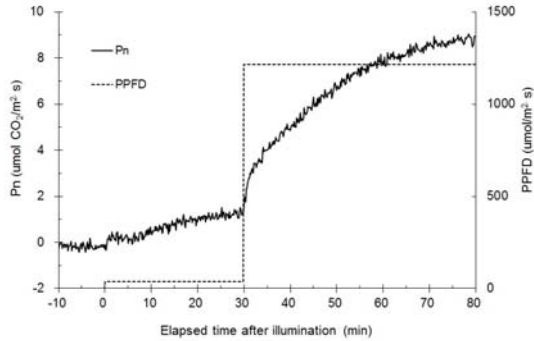


Fig. 1. Time trends in photosynthesis (Pn) and light intensity of illumination (PPFD). Dark-adapted leaves of Tobacco plant were exposed to low light ($30 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) for 30 minutes followed by high light condition ($1,200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

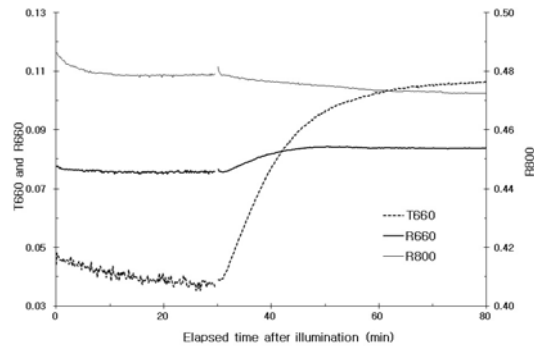


Fig. 2. Time trends in transmittances (T) and reflectances (R) from the leaves of Tobacco plant at 660 nm and 800 nm for the first 30 minutes of low-light ($30 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) followed by high-light condition ($1,200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

3. 결과 및 고찰

암 적응된 담배 잎의 광합성률은 $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 세기의 약광 조사와 함께 상승하기 시작하여 약 20분 경과함에 따라 $1.4 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 정도의 안정된 값을 나타내었다. 약광 조사 30분 후 1초 이내에 $1,200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 의 강광으로 변화시킴에 따라 재료 식물 잎의 광합성률은 약광의 경우보다 급격히 상승하기 시작하여 약 50분 경과 후 $9 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 에 도달하였다(Fig. 1). 이 같은 담배 식물 잎의 광합성률은 한국 중부 이남에 우점하는 신갈나무 잎의 $5 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 보다 약 80% 더 높은 값이었다(Suh, 2000).

한편 약광 조사 직후 0.048이었던 담배 잎의 660 nm 투과율은 30분 후 0.037로 감소함으로써 약 77% ($0.037/0.048$)의 변이를 나타내었다(Fig. 2). 이어 강광

의 조사에 따라 잎의 투과율은 0.037에서 0.106까지 급격히 상승하여 강광 초기 값에 대하여 285% ($0.106/0.037$)에 이르렀다. 이같이 잎의 투과율이 약 20분에 걸쳐 급속히 변하는 것은 이미 알려진 바와 같이 약광 하에서 빛의 진행 방향에 수직으로 배열하던 잎 세포 내 엽록체가 세포벽 쪽으로 이동하기 때문으로 해석된다(Trojan and Gabrys, 1996).

광도 변화에 따른 660 nm 반사율은 그 변이 폭이 동일 파장의 투과율보다 작기는 하지만 유사한 양상으로 증감하였다(Fig. 2). 즉, 약광 조사에 따라 660 nm 반사율은 0.077(T=0분)에서 0.076(T=29분)으로 감소하여 동일 파장에서의 투과율보다 근소한 차이가 나타났다. 한편 강광 조사에 따라 초기(T=30분) 0.076이던 660 nm 반사율은 50분 후 0.084(T=80분)로 15% ($0.084/0.076=115\%$) 상승하였다(Table 1).

Table 1. Time trends in transmittance (T), reflectances (R) at 660 nm and 800 nm from the leaves of the Tobacco plant after illumination (30 minutes of low light condition was followed by high light condition). NDVIs were calculated with reflectances at 660 nm and 800 nm by definition and expressed with percentage based on the NDVI at the beginning of the low light condition (0 minute)

Time (min)	T ₆₆₀	R ₆₆₀	R ₈₀₀	NDVI(%)
0	0.044	0.077	0.486	0.726 (100.0)
29	0.037	0.076	0.479	0.727 (100.2)
30	0.039	0.076	0.482	0.726 (100.0)
80	0.106	0.084	0.472	0.699 (96.3)

한편 0.486이던 강광 초기 800 nm 반사율은 0.479로 감소함으로써 엽록체 이동에 따른 차이가 거의 없었다(0.479/0.486=98%). 따라서 NDVI의 변화는 800 nm 파장의 근적외선이 아니고 660 nm 파장의 적색 신호(660 nm)에 의하여 주도됨을 알 수 있었다. 약광에서 강광으로 급격한 변화에 따른 NDVI의 변화를 Fig. 3에 나타내었는데, 초기 30분 이후의 강광 조건에 비하여 상대적으로 큰 측정 오차가 약광에서 측정된 값에 포함되어 있음을 볼 수 있었다.

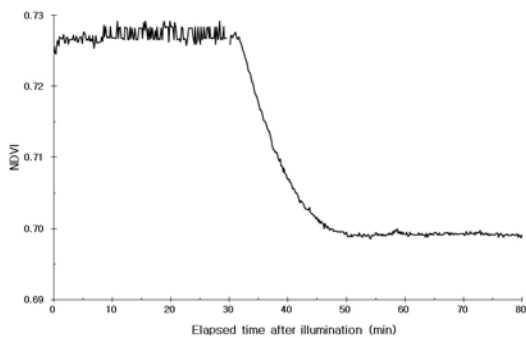


Fig. 3. Time trends in NDVI of the Tobacco leaves for the first 30 minutes of low-light ($30 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) followed by high-light condition ($1,200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

660 nm 및 800 nm 파장의 반사율 변화에 따라 약광 초기 0.726이었던 NDVI는 30분후 0.727로 소폭 증가한 후 (0.727/0.726=0.3%), 이어진 강광 조사에 따라 특히 처음 20분간 급격히 감소한 후 안정되어 50분 경과 후에는 0.699까지 저하되었다(0.699/0.727=96.1%). 즉 동일 광도(강광)에서도 엽록체 이동의 정도에 따라 NDVI는 약 4%의 변이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 원격으로 지상의 영상을 획득하는 순간 지상의 식물 잎의 NDVI는 직전에 받았던 광도 변화에 따라 4%의 오차를 포함하고 있음을 뜻한다. 또한 NDVI의 변화가 약 20분에 걸쳐 진행되므로 이 변화는 광화학적 변화가 아니고, 식물의 생리학적 변화임을 추측할 수 있다. 따라서 살아 있는 식물에서 분리한 잎을 대상으로 하는 경우 식물의 생리학적 변화에 따라 광학적 특성의 변화가 지속되므로 측정과 자료의 해석에 세심한 주의가 필요하다.

잎의 광학적 특성 변화를 초래하는 세포 내 엽록체

이동은 세포 내 청색광 수용체인 phototropin에 의하여 시발되는데, 이 단백질이 많은 종류의 육상 식물에서 발견되고 있다(Li et al., 2015). 24종의 식물을 대상으로 한 Davis et al.(2012)의 연구에서 투과율 변화가 본 연구와 동일 재료인 담배보다 더 큰 것으로 보고된 8종 식물들의 경우 반사율뿐 아니라 NDVI 변화 또한 담배보다 더 클 것으로 예상된다. 자연에서 숲의 수관을 구성하는 식물의 잎이 받는 빛의 세기가 일정하지 않고 지속적으로 변한다는 것은 빛 이용 효율과 함께 널리 알려져 있다(Way and Pearcy, 2012). 이 실험에서는 잎에 조사되는 광도를 30-1200의 범위에서 변화시켰는데, 실제 자연에서 식물의 잎에 조사되는 광도의 변이 폭은 이보다 큰 경우가 흔하므로, 식물에서 NDVI의 실제 변화 폭은 이 연구의 결과보다 더 클 것으로 추측된다. 따라서 원격 탐지된 영상 자료를 이용하여 생물량의 분포 등 지상의 실제 상황을 정밀하게 추정하려면 급격한 광도 변화가 NDVI의 변화에 미치는 영향이 보다 다양한 종류의 식물을 대상으로 자세히 파악되어야 할 것이다.

4. 결론

이 연구에서는 담배 식물을 재료로 하여 약광 및 강광 조건에서 광합성률, 그리고 NDVI를 구성하는 적색(660 nm) 및 근적외선(800 nm) 신호의 변화를 조사하였다.

- 1) 노출된 토양이나 수면 혹은 얼음과 달리 살아 있는 식물 잎의 광학적 특성은 생리학적인 조건, 즉 광도 변화에 따른 엽록체 이동에 따라 달라진다.
- 2) 급격한 광도 변화에 따른 NDVI의 변화는 적색 신호(660 nm)에 의하여 주도된다.
- 3) 급격한 광도 변화에 따른 NDVI의 변화는 담배 식물에서 약 4%의 변이가 관찰되었다.
- 4) 식물의 종류에 따라 다양한 차이가 예상되므로 특히 이용도가 높은 작물과 자연 환경에서 우점종을 우선하여 보다 자세한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2012학년도 대구대학교 학술연구비의

지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Augustynowicz, J., Gabrys, H., 1999, Chloroplast movements in fern leaves: Correlation of movement dynamics and environmental flexibility of the species, *Plant, Cell & Environ.*, 22, 1239-1248.
- Davis, P. A., Caylor, S., Whippo, C. W., Hangarter, R. P., 2011, Changes in leaf optical properties associated with light-dependent chloroplast movements, *Plant, Cell & Environ.*, 34, 2047-2059.
- Jeong, W. J., Park, Y., Suh, K., Raven, J. A., Yoo, O. J., Liu, J. R., 2002, A Large population of small chloroplasts in Tobacco leaf cells allows more effective chloroplast movement than a few enlarged chloroplasts, *Plant Physiol.*, 129, 112-121.
- Li, F., Rothefels, C. J., Melconian, M., Villarreal, J. C., Stevenson, D. W., Graham, S. W., Wong, G. K. S., Mathews, S., Pryer, K. M., 2015, The origin and evolution of phototropins, *Front Plant Sci.*, 6, 1-11.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Scheel, J. A., Deering, D. W., 1974, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1, 48-62.
- Sellers, P. J., 1985, Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, *Int. Remote Sens.*, 6, 1335-1372.
- Suh, K., 2000, Estimation of photosynthetic light use efficiency in a single leaf by analyzing narrow-band spectral reflectance, *J Photosci.*, 7, 139-142.
- Trojan, A., Gabrys, H., 1996, Chloroplast distribution in *Arabidopsis thaliana* (L.) depends on light conditions during growth, *Plant Physiol.*, 111, 419-425.
- Way, D. A., Pearcy, R. W., 2012, Sunflecks in trees and forests: From photosynthetic physiology to global change biology, *Tree Physiol.*, 32, 1066-1081.