

밭작물의 분광반사 특성과 식생지수

Spectral Reflectance Characteristics and Vegetation Indices of Field Crops

신 용 희*, 박 종 화**, 박 민 서***
Shin, Yong-Hee, Park, Jong-Hwa, Park, Min-Seo

Abstract

This study investigated the spectral reflectance and leaf area index (LAI) of field crops and determined vegetation indices when intermixed with field crops and soil. Ground-level spectral reflectance and leaf area index (LAI) were collected for eight crops including soybean. This study evaluated a number of spectral indices for estimating chlorophyll concentrations at the leaf scale difference, using samples from field crops at various stages of senescence.

The first and second derivative of reflectance spectra showed several peaks that were dependent in different degrees on leaf age and chlorophyll concentration in the crop leaves. Five vegetation indices were evaluated which had advantages over existing techniques. Experimental data recorded on field crops during the growing season were in good agreement with existing theoretical results. LAI according to the field crops growing properties increased until the maturity stage and then that was decreased until harvest. The spectral reflectance according to the most field crops growing properties were characterized by its hysteresis loop showing a graph of 650nm versus 850nm wavelength as "L loop".

I. 서론

태양광중 지상에 도달하는 파장은 300~5,000 nm대이며 그 중 인간의 눈으로 감지되는 가시광대는 380~760 nm 영역이다. 이 영역 가운데 식물의 광합성 작용과 밀접한 관련을 갖는 스펙트럼은 440~670 nm 영역으로 알려져 있다. 이 때 자외선 영역(400 nm 이하), 가시광선 영역(400~700 nm), 적외선 및 근적외선 영역

(700~2500 nm)의 파장대가 식물체의 생육상태, 생육장애 진단에 유용하게 이용될 수 있다. 따라서 얻고자 하는 생체정보의 종류에 따라 각기 특징을 나타내는 파장영역을 구별하여 사용하거나 특정한 파장대의 빛만 통과시키는 필터를 사용 또는 일정 파장을 취득하여 상호간의 조합을 통하여 생체정보를 얻게 된다. 현시점에서 위성탑재의 하이파이스펙트럼 센서는 시험단계를 거쳐 머지않아 실용화 단계에 접어들 것으로

* 한국수자원공사 수자원연구원(cjraos33@hanmail.net)

** 충북대학교 농과대학(jhpak7@chungbuk.ac.kr)

*** 충북대학교 대학원(hp1975@hanmail.net)

키워드 : 분광반사, 식생지수, NDVI, 반사율, 엽면적지수(LAI)

생각된다. 지금까지 하이파이스펙트럼 영상은 데이터처리, 해석, 컴퓨터와 사용자에 따라 많은 비용과 시간이 소요되었다. 그러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 지상에서 스펙트로미터(spectrometer)를 사용함으로써 빠르게, 현장의 정보를 비파괴적으로 작물과 토양의 생태특성 및 현상을 측정하고 진단하는 방법으로 이용되고 있다. 또한 위성이 자료를 취득하는 시간과 같이하여 지상정보를 취득하여 위성자료의 보정에 활용하는 방법으로 이용되고 있다. 양자를 농업에 효율적으로 적용하기 위해서는 계절의 변화에 크게 변하지 않는 지형과 비옥도, 수분 특성 등은 위성과 조사를 통해 작성한 토양분포도와 수량지도를 이용하면 될 것이다. 또한 각 논밭에서 잡초와 해충, 토양수분과 영양상태의 변화, 기상변동과 병해 등에 의한 스트레스 등 비교적 단기에 변화하는 것에 대해서는 현장에 관한 실시간 정보가 불가결하다. 따라서 논밭 작물의 관리에 필요한 정보의 변동특성은 위성과 현장의 센서와 계측방법을 적절히 선택하여 적용할 필요성이 있다.

작물의 분광반사곡선에서 클로로필 양과 밀접한 관계를 갖는 지점이 700nm 부근에서 형성되는 적색경계점(red edge)이다. 적색경계점은 토양의 경우 명확하지 않지만 작물은 일정 성장시기부터 뚜렷하게 나타나며 작물의 상태에 따라 그 위치와 크기도 약간 변화한다. 또한 분광반사곡선에서 일부 파장을 취하여 파장간의 조합으로 만들어지는 지수들은 식생정보를 파악하는데 유용하게 활용되고 있다.

식물의 반사특성에 관해 Asrar 등(1985)과 Huete 등(1985)은 잎의 반사율이 750~1100nm에서 50%, 이외의 파장대에서는 그 이하의 반사율을 가지며, 670nm 영역이 생육장애 추출에 용이하고, 550nm는 클로로필 함량 측정에 용이하다고 하였다. Blazquez 등(1986)은 건강한 수박 잎과 질병에 감염된 수박 잎의 반사도는 500~640, 740~900nm에서 큰 차이를 보이는 것으로 보고하였다. Attridge(1990)는 chloro-

phyll a의 경우 430nm와 660nm에서, chlorophyll b의 경우 450 nm, β -carotene의 경우 430~480nm 에서 흡수가 크다고 보고하였다. 동일한 연구로 Martinez 등(1992)은 chlorophyll a 측정시 432, 465, 610, 640, 665nm의 파장대에서 민감한 반응을 하였으며, chlorophyll b의 경우는 450 nm와 478 nm 파장에서 민감하게 반응하는 것으로 보고하였다. Nilsson 등(1995)은 질소결핍 생육장애의 경우 531, 550 nm 영역에서 민감하게 반응하며, 수분장애의 경우 531, 570 nm에서 민감하게 반응한다고 보고하였다. 홍석영 등(1997)은 스펙트로미터를 이용 태양 복사 스펙트럼을 측정하여 벼 군락의 엽면적지수를 비파괴적인 방법으로 추정하여 보고하였다. 장세진 등(2000)은 분광복사계의 Cosine receptor를 이용하여 벼 생장시기의 분광반사 특성의 변화를 분석하여 제시하였다. 박종화 등(2003)은 분광복사계를 사용하여 반사율 개념을 적용하여 벼의 생육단계별 분광반사 특성을 조사하여 벼의 성장 단계에 따른 식생지수를 제시하였다.

논밭 작물 관리의 대부분은 발육단계에 대응해서 물과 영양분 공급이 적기에 이루어질 수 있도록 하는 것이다. 즉 비료의 공급, 물 스트레스의 제어 등은 작물의 발육에 맞추어서 수행하는 것이 효과적일 뿐 아니라 발육단계가 어긋나면 역효과를 나타낼 수도 있다. 따라서 작물의 성장 진행상황에 따라 그 작물의 발육단계와 특성을 파악해 두는 것은 수확까지의 계획을 설정하고 정확한 관리를 위해서 매우 중요하다. 발작물은 성장과정에서 영양분의 결핍 및 물 부족 등으로 인한 스트레스를 받을 경우 분광반사곡선의 일정 파장에서 변화를 보인다. 따라서 분광반사특성을 조사하면 작물의 성장에 따른 클로로필이나 크산토틸 등의 변화를 알 수 있고 작물의 상태파악이 가능하여 작물의 영양상태 체크와 질병의 예방과 영양분의 적절한 공급이 가능할 것이다. 특히, 발작물의 분광반사특성은 성장과정에서 토양과 작물의 피복 또는 멀칭을 위한 비닐

상호간의 작용에 의하여 나타나며, 피복형태는 대체적으로 도복하며 성장하는 작물부터 높게 자라는 작물까지 다양하게 분포하고 있다. 또한 작물의 형태와 색상도 파와 같이 가는 형상의 작물에서부터 토란과 같이 넓은 광엽식물까지 매우 다양하다.

본 연구에서는 발작물에 관한 분광반사특성과 식생지수 및 엽면적지수를 파악하기 위해 8가지 발작물에 관한 분광반사율과 각 작물의 성장단계별 분광반사특성을 조사 분석하였다. 또한 발작물의 식생정보 파악에는 5가지 식생지수에 관하여 검토하고 얻어진 결과를 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

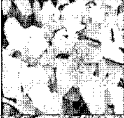

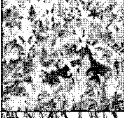


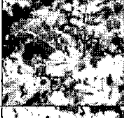
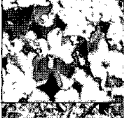

1. 재료 및 실험포 조건

발작물의 분광반사의 측정은 충북 청주시 흥덕구 석곡동에 위치한 20×43m의 밭 포장에 식재된 작물에 대하여 실시하였다. 밭 토양은 모래 73%, 실트 19%, 점토 8%인 사양토 (sandy loam)이며, 초기 함수비는 14.6%이다. 측정 작물은 Table 1과 같이 콩, 담배, 수박, 파, 토란, 무, 고추, 참외의 8가지이다. 발작물의 생육기간은 매우 짧아 작물에 따라 1~5개월 정도이므로 여기에 맞추어 측정기간은 2002년 5월 2일부터 8월 20일까지 조사하였다. 분광반사의 측정은 일정 시기별로 실시하고 작물에 따라서는 성장단계별 분광반사를 측정하였다.

2. 분광반사측정

분광반사측정 방법은 휴대용 분광복사계(Li-1800, Li Cor Inc; 측정파역: 300~1100nm, 측정간격: 2nm)를 이용하여 구름이 없는 날 오전 11시부터 오후 2시 사이에 실시하였다. 발작물에 대한 분광반사측정은 8가지 작물에 대해 생육단계별로 실시하였다. 측정방법 (박종화 등; 2002)

Table 1. Growing and measurement period for the field crops

| Field crops | Growing period | Measuring period | Picture |
|-------------|----------------|------------------|---|
| Soybean | May~Oct. | May 20~Aug. 10 |  |
| Tobacco | Apr.~Sep. | May 2~July 10 |  |
| Watermelon | Apr.~Aug. | June 6~July 10 |  |
| Green onion | Mar.~Nov. | May 29~Aug. 20 |  |
| Taro | Apr.~Sep. | May 29~Aug. 20 |  |
| Radish | May~July | June 26~July 10 |  |
| Melon | April~Aug. | May 20~July 10 |  |
| Red pepper | April~Sep. | May 2~June 27 |  |

은 작물의 초장 끝에서 약 50cm 떨어진 위치에 Telescope/Microscope을 고정하여 작물의 측정범위를 정하고 작물에서 반사되는 태양복사에너지를 측정하였다. 측정은 3회 실시하여 그 평균값을 이용하였다. 표준백색판의 반사에너지는 초장 위에 평평하게 위치시킨 다음 Telescope/Microscope 관측범위에 맞춘 후 측정하였다. 발작물이 성장함에 따라 초장길이 점점 길어지면 Telescope/Microscope의 위치 또한 초장의 성장 길이만큼 올려 Telescope/Microscope과 초장 끝의 거리가 항상 50cm를 유지하도록 하여 측정하였다.

반사율 $R(\lambda)$ 은 식(1)과 같이 a) 99%의 반사특성을 갖는 표준백색판으로부터 반사되는 전자파 에너지, $I_r(\lambda)$ 와 b) 대상물체로부터 반사되는 전자파에너지, $I_o(\lambda)$ 의 비로 계산한다.

$$R(\lambda) = \frac{I_o(\lambda)}{I_r(\lambda)} \quad (1)$$

3. 엽면적지수의 측정

발작물에 대한 엽면적지수(Leaf Area Index; LAI)는 식생 수관 분석장치(Plant Canopy Analyzer, LAI-2000, Li-Cor Inc.)를 이용하여 비파괴적인 방법으로 측정하였다. 식생이 없는 조건 측정을 위하여 수관 위에서 1회 측정하고 식생에 따른 엽면적지수의 측정은 수관 아래에서 투과해 들어오는 전자파에너지를 3회 측정하여 식생 위와 아래의 전자파에너지를 비교하여 엽면적지수(LAI)값을 구하였다. 측정은 2회 반복 실시하여 얻은 평균 LAI값을 사용하였다.

식생군락이 광선이 통과하는 범위에 분포하면 식생 수관 분석장치의 실리콘 검파기 7~68° 범위에서 천정각이 θ 만큼 기울어진 부분에서 빛이 식물에 의해 차단되지 않는 양은 gap fraction $T(\theta)$ 가 된다.

Beer-Lambert 법칙에 따르면

$$T(\theta) = \exp(-G(\theta)\mu S(\theta)) \quad (2)$$

여기서, $T(\theta)$ 는 수관을 통과한 태양에너지의 통과율, $G(\theta)$ 는 일정 방향(θ)에 투영된 균엽부분,

$$G(\theta) = \frac{1}{\sin\theta} \frac{d\theta}{d\theta}$$

μ 는 균엽밀도(m^2 균엽/ m^3 수관), $S(\theta)$ 는 5개 각도의 검파기를 통과한 길이이다.

Miller(1967)의 균엽밀도 μ 에 관한 해석법을 적용하면

$$\mu = 2 \int_{\pi/2}^0 \frac{-\ln(T(\theta))}{S(\theta)} \sin\theta d\theta \quad (3)$$

균질인 수관의 균엽밀도는 수관높이 z 에 따라 변화하는 LAI로 나타낼 수 있으므로 식(4)와 같이 표현되며, 일정 각도 통과길이 S 는 θ 와 수관높이 z 와의 관계에서 다음 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$LAI = \frac{\text{Total leaf area}}{\text{Projected ground area}} = \mu z \quad (4)$$

$$S(\theta) = \frac{z}{\cos\theta} \quad (5)$$

식(3)과 식(5)를 식(4)에 대입하면 엽면적지수(LAI)는 다음 식으로 나타내어진다.

$$LAI = -2 \int \ln(T(\theta)) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (6)$$

$T(\theta)$ 가 5개의 실리콘 검파기에서 측정되므로 LAI는 식(7)을 이용하여 구할 수 있을 것이다.

$$LAI = -2 \sum \frac{-\ln(T(\theta_i))}{S(\theta_i)} W_i \quad (7)$$

여기서, θ_i 는 각 검파기 링의 중심각도이며, W_i 는 가중치 0를, $S(\theta_i)$ 는 통과길이 이다.

4. 식생지수

식생지수는 학자들마다 여러 가지 반사파장에 따른 식생군락의 밀도와외의 상관관계를 밝히는데 이용되면서 구성식의 조합들은 대체로 각 파장 반사율들의 비율로 나타내고 있다. 최초의 식생지수는 Birth와 McVey(1968)에 의해 발표된 단순 식생지수(SR)로 적색과 근적외선파장영역 반사값의 비로 나타낸 것이다(Broge 등; 2002). Rouse 등(1974)은 식생의 밴드별 반사치의 차이를 이용 정규화 식생지수(NDVI; Normalized Difference Vegetation Index)를 개발하여 제시하였고 현재 가장 광범위하게 이용되고 있다. Pearson 등(1976)은 작물의 초장과 엽록소 함량, 엽면적 등 작물군락의 밀도에 관계되는 요인이 가시광선영역과 근적외선영역의 파장들의 반

Table 2. Various Vegetation Index

| Vegetation Index | Method of transformation | Reference |
|---|---|---|
| Simple Ratio(SR), RVI(Ratio Vegetation Index) | $SR = \frac{NIR}{RED} = RVI$ | Birth and Mcvey, 1968 |
| Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) | $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$ | Rouse et al., 1974; Deering et al., 1975 |
| Atmospherically Resistant Vegetation Index(ARVI) | $ARVI = \frac{NIR - rb}{NIR + rb}$ $rb = RED - \gamma (BLUE - RED)$ | Kaufman and Tanre, 1992; Huete and Lin, 1994 |
| Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and Modified SAVI(MSAVI) | $SAVI = \frac{(1+L)(NIR - RED)}{NIR + RED + L}$ | Huete,1988;Huete and Liu,1994; Running et al.,1994 |
| The Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2) | $MSAVI2 = \frac{1}{2} \times (2(NIR+1) - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8(NIR - RED)})$ | Qi et al.,1994 ratio-based |

where NIR is a near infrared wavelength, RED is a red wavelength, BLUE is a blue wavelength, rb with a value of 1.0 for gamma, L is a correction factor which ranges from 0 for very high, and ^2 signifies the squaring of the value and sqrt() is the square-root operator

사랑과 밀접한 관련이 있다고 보고 이 반사파장들을 이용한 조합으로 RVI(Ratio Vegetation Index)를 제시하였다. 단순식생지수(SR)와 RVI는 거의 같은 개념으로 적용파장의 차이로 표현된다. 현재까지 제안되고 있는 것은 약 50여종 이상이 있으나 실용화되고 있는 식생지수중의 일부를 정리해 보면 Table 2 (Broge 등; 2002)와 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 발작물의 분광반사특성

일정 생육시기에 대한 발작물의 특징과 식생정보를 추출하기 위해 분광반사특성을 조사하였다. Fig. 1은 2002년 6월 26일 8가지 발작물에 대해 측정한 분광반사특성을 나타낸 그래프이다. 그림과 같이 발작물인 녹색 식물의 스펙트럼 반사는 독특하여 작물 및 파장에 따라 각각 다른 특징을 갖는다. 즉 가시파장에서는 색소가 식물의 파장별 반응을 지배하고 다른 식물의 색소도 또한 가시파장 영역에서 중요한 역할을 한다. 근적외선 영역에서는 녹색 잎이 매우 적은 에너지를 흡수하기 때문에 반사가 크게 증가하고, 중적외선 영역에서는 물이 특수 파장에서 에너지를 많이 흡수하며 녹색 잎의 수분 함수량이 매우 크

기 때문에 이들 물에 의한 흡수는 이 영역에서의 파장별 특성을 지배하게 된다. 또한 가시파장의 청색(blue)과 적색(red) 영역에서는 매우 낮은 반사특성을 나타낸다. 이 낮은 반사는 두 개의 엽록소 흡수 영역에 대응하는 것으로 즉, 잎 속의 엽록소가 대략 450nm와 650nm에 중점적으로 존재하기 때문에 이들 파장영역 대부분의 입사에너지는 흡수되기 때문이다. 두 엽록소 흡수 영역 사이의 파장에서는 비교적 흡수가 적게 일어나며 최대의 반사는 녹색 파장 영역인 약 540nm에서 발생한다. 이와 같은 현상은 잎이 녹색으로 보이는 원인으로 녹색파장에서 낮은 흡수 때문이라고 할 수 있다. 병충해나 영양물질의 부족 및 물 스트레스를 받는 식물의 경우 엽록소 생산이 감소하여 색소의 결핍으로 엽록소 흡수 영역에서 흡수가 약화하게 된다. 이러한 식물은 특히 적색파장 영역에서 높은 반사가 일어나며 황색이나 백색으로 보인다. 가시광선파장영역에서 근적외선영역으로 변화하는 약 700nm 파장에서 반사는 현저하게 증가한다. 즉 근적외선에서는 가시광선에 비하여 매우 높은 반사와 투과, 매우 낮은 흡수를 나타낸다.

가시광선영역인 400~700nm의 반사율을 보면 담배를 제외한 발작물 대부분의 반사율은 10% 미만으로 매우 낮다. 가시광선파장영역에서 담배의 반사율이 높은 이유는 담배 잎 색깔이 녹색

에서 노랗게 변해 가는 시기이기 때문이다. 근적외선영역에서는 같은 녹색식물이라 할지라도 파와 같이 속이 비고 근조직이 단단하지 않은 식물의 반사율이 낮은 반면 토란과 같이 잎 조직이 단단하고 잎 표면이 매끄러운 식물의 반사율은 상당히 높게 나타난다. 그리고 대부분의 발작물이 잎에 함유되어 있는 수분의 영향에 의해 980 nm 파장에서 전자파에너지의 흡수로 반사율은 낮아진다. 만약 한해와 같은 물 스트레스가 발생한다면 980nm 파장의 반사율은 건강한 작물의 반사율 저하보다 적게 나타날 것이다.

발작물의 분광반사율곡선은 작물에 따라 정도의 차이는 있으나 담배를 제외하면 거의 비슷한 패턴을 보인다. 적색경계(red edge, 700nm 전후) 전의 가시광영역의 반사율은 담배를 제외하면

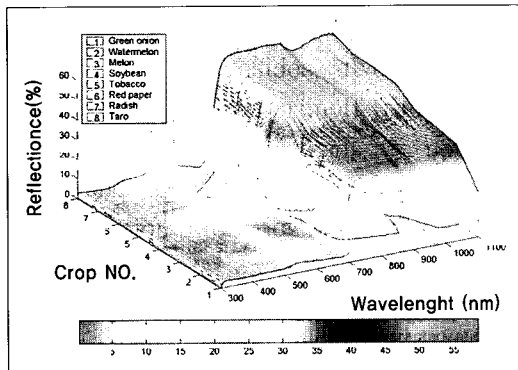


Fig. 1. Spectral reflectance of eight field crops

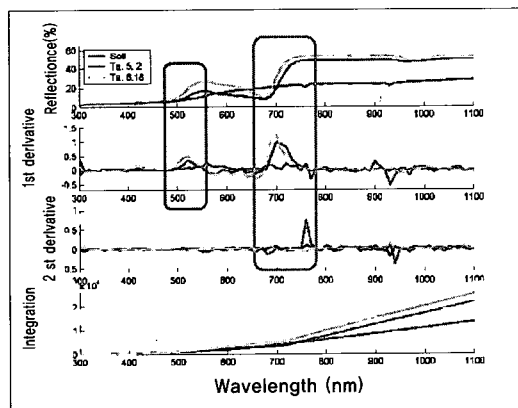


Fig. 2. Spectral reflectance, 1st and 2nd derivative of reflectance curve for tobacco

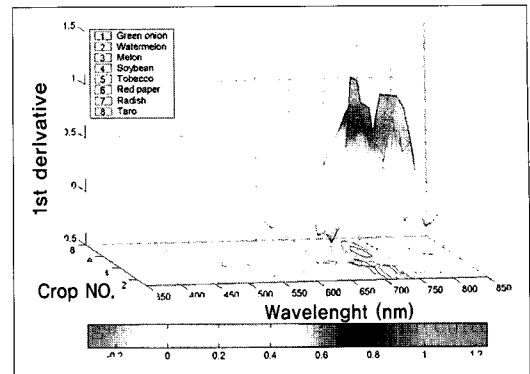


Fig. 3. First derivative of reflectance curve for the field crops

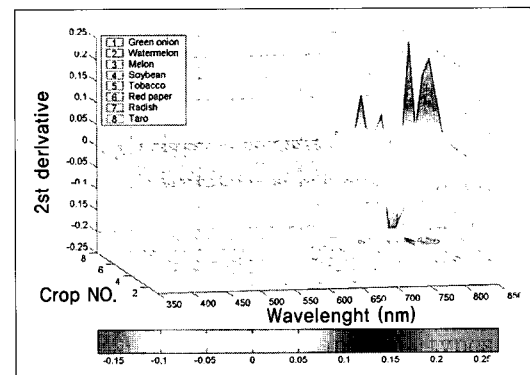


Fig. 4. Second derivative of reflectance curve for the field crops

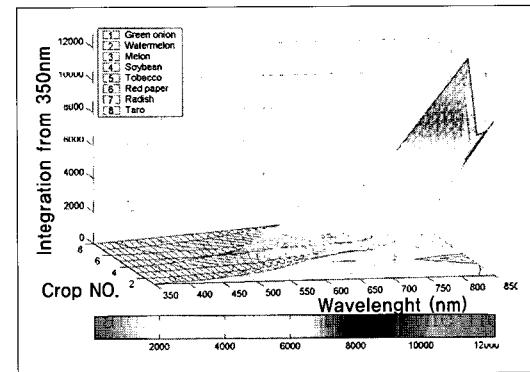


Fig. 5. Integral from 350nm to 850nm of reflectance curve for the field crops

10% 미만을 나타낸다. 근적외선파장에서는 잎 조직이 단단하고 표면이 매끄러운 작물의 반사율이 파와 같이 속이 빈 작물보다 2~3배 정도 높게 나타났다.

반사율이 낮은 순서부터 정리하면 파<수박<참외<콩<담배<고추<무<토란의 순으로 나타났다.

밭 토양과 초기 담배 및 일정 시기 성장 후의 분광반사곡선과 이에 대한 1차도함수, 2차도함수 및 적분곡선을 같이 도시하면 Fig. 2와 같다. 그림과 같이 녹색 파장 영역인 약 540nm와 적색경계 전후에서 1차도 함수의 변화치가 크게 변화한다. 이는 토양과 작물이 갖는 특징을 잘 표현해 주는 것으로 판단되어 각 작물의 분광반사곡선에 대한 1차도 함수, 2차도함수 및 적분곡선을 각각 Fig. 3~5에 나타냈다. 8가지 작물에 대한 도함수 값에서 1차도함수의 가장 큰 변화는 적색경계의 730nm 전후이며, 이 지점은 작물에 따른 클로로필 양의 차이를 나타내는 것으로 작물의 성장정도와 색소농도에 따라 달리 표현되는 것으로 생각된다. 작물 중 콩을 선정하여 성

장과정에 따른 분광반사곡선과 곡선에 대한 1차, 2차도함수 및 적분곡선을 각각 Fig. 6~9에 나타내었다. 콩의 반사율은 성장함에 따라 가시광선 영역 중 녹색파장에서 점점 높아지며, 근적외선 영역에서 일정시기까지는 높아지다 콩각지를 형성하는 시기부터 낮아지는 특성을 보였다. 이 특징은 1차, 2차도함수 및 적분곡선에서 잘 나타내주고 있으며 6월 초에 가장 두드러진 변화를 나타냈다.

2. 발작물의 식생지수와 LAI

센서에 입사된 분광반사특성은 토양과 식생에 관한 반사율 정보가 같이 취득되어 측정조건에 따라 노이즈로 표현된다. 따라서 전체적인 분광스펙트럼의 형상으로 검토하기 보다는 필요에 따라 특

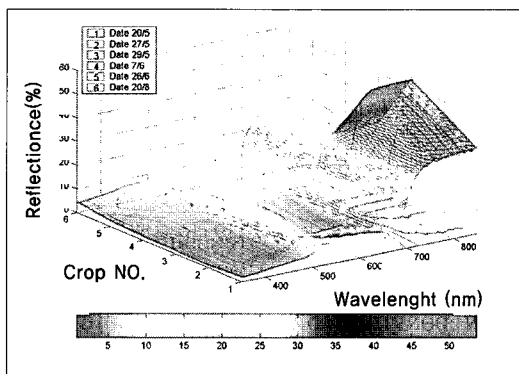


Fig. 6. Spectral reflectance for soybean

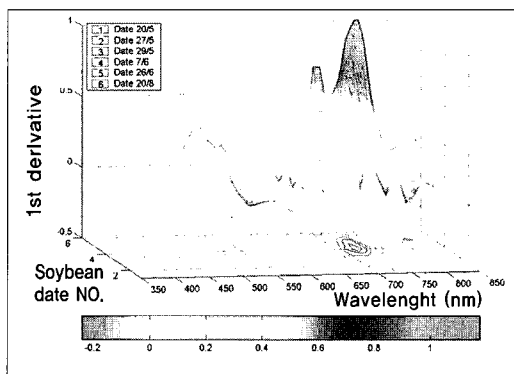


Fig. 7. First derivative of reflectance curve for soybean

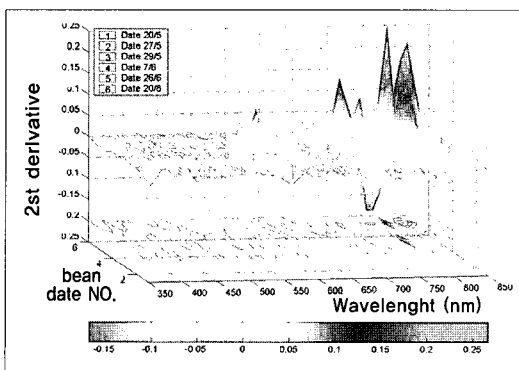


Fig. 8. Second derivative of reflectance curve for soybean

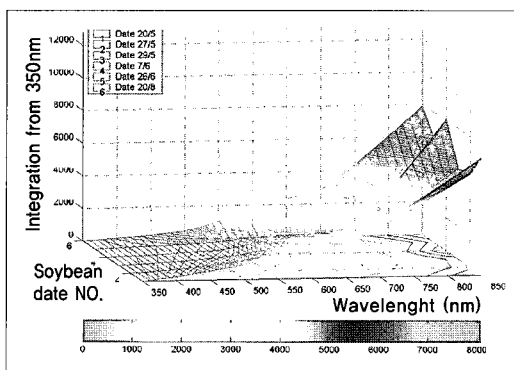


Fig. 9. Integral from 350nm to 850nm of reflectance curve for soybean

정파장의 반사율을 선택하여 조합하거나 비를 구하여 지수로 만들어 이용하고 있다. 식생지수(Vegetation Index, VI)는 식물의 양, 계절적 변화, 식생의 생리적 조건 및 특성을 나타내는 인자 중의 하나이다. 특히 식생에 관련된 지수는 지표면에서 녹색식물의 상대적인 분포와 활동성, 엽면적지수(LAI), 엽록소 함량 및 광합성 흡수복사량(APAR) 등과 관련된 지표로 사용되며 가시광선영역과 근적외선영역 파장들의 반사특성과 밀접한 관련이 있다. 이러한 식생지수들은 위성데이터로부터 지표면의 식생상태를 추정하기 위해 제안되었으며 대표적인 식생지수로는 정규화식생지수(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)가 있다. NDVI는 지구규모의 자원문제를 취급할 경우 관측지역이나 계절 등 관측조건의 차이에서 발생하는 영향을 최소화하기 위해 제안되었다(Rouse 등, 1974). NDVI는 근적외선파장과 적색파장을 이용하여 두 파장을 조합함으로써 계산할 수 있다. 이 관계를 정리하면 식(8)과 같다.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} = \frac{IR_{850} - RED_{650}}{IR_{850} + RED_{650}} \quad (8)$$

여기서, IR_{850} 은 근적외선파장(NIR)중 850nm의 파장, R_{650} 은 가시광선파장의 적색파장(RED)인 650nm이다. 식생과 토양, 물에 대한 NDVI는 다음과 같은 범위에서 분포한다.

식생: $0 < NDVI \leq 1$, 토양: $0 \leq NDVI \leq 1$, 물: $-1 \leq NDVI \leq 1$

본 연구에서 취득한 자료들의 활용도를 높이기 위하여 지금까지 제안된 식생지수 가운데 관련성이 깊은 지수를 선택하여 그 특성을 조사하였다.

비율 식생지수(Ratio Vegetation Index: RVI)는 R_{650} 과 IR_{850} 의 비로 제시되었다(Pearson and Miller, 1972).

$$RVI = \frac{NIR}{RED} = \frac{IR_{850}}{R_{650}} \quad (9)$$

토양조절식생지수(Soil Adjusted Vegetation Index; SAVI)는 NDVI 계산식에 식생과 토양의

1차 분광반응에서 나타나는 토양의 영향을 최소화하기 위해 토양정보인자 L을 추가하여 나타낸 식생지수이다(Huete, 1988).

$$SAVI = \frac{(1+L)(NIR-RED)}{NIR+RED+L}, L=0.5 \quad (10)$$

최소대기영향 식생지수(Atmospherically Resistant Vegetation Index; ARVI)는 SAVI를 수정하여 청색, 적색, 근적외선파장영역의 복사량을 정규화하고 대기의 영향을 줄일 수 있는 방법이다(Kaufman 등, 1992).

$$SAVI = \frac{NIR+rb}{NIR+rb}, \quad rb = RED - r \times (RED - BLUE), r=1.0 \quad (11)$$

여기서, r은 적색과 청색파장의 차에 대한 가중치, Blue는 청색파장이다.

수정토양조절식생지수(Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2; MSAVI2)는 SAVI를 변형하여 L값을 연속적인 함수로 사용하여 토양조절 효과를 최적화하고 SAVI의 범위를 확장하기 위해 제시되었다.

$$MSAVI2 = \frac{1}{2} \times (2(NIR+1) - \sqrt{(2 \times NIR+1)^2 - 8(NIR-RED)}) \quad (12)$$

Table 3은 2002년 6월 26일에 측정된 7가지 발작물에 대한 분광반사특성에서 얻어진 5가지 식생지수와 식(7)에 의해 측정하여 계산된 엽면적지수(LAI)를 구하여 LAI값이 작은 작물부터 큰 순으로 정리한 표이다. 이는 일정 구역의 영상이 취득되었을 경우 동일한 시점에서의 작물간의 식생지수 차이를 파악하기 위함이다. 발작물에 있어 LAI가 증가할수록 식생지수도 일정한 패턴으로 증가한다. 이 들 식생지수 중 RVI는 LAI와 매우 유사한 변화패턴을 보이며 회귀분석을 한 결과 $p < 0.001$ 로 고도의 유의성을 갖는다. 작물에 따른 특성은 전술한 생육단계에 따른 발작물의 분광반사특성 결과를 잘 표현해준 것이라 할 수 있다.

Table 3. Comparison of the five vegetation indices and LAI with the seven field crops at June 26, 2002

| Vegetation | LAI | NDVI | RVI | SAVI | ARVI | MSAVI2 |
|-------------|------|------|-------|------|------|--------|
| Tobacco | 1.02 | 0.55 | 3.42 | 0.82 | 0.77 | 1.21 |
| Watermelon | 1.18 | 0.74 | 6.65 | 1.10 | 0.82 | 1.35 |
| Green onion | 1.3 | 0.76 | 7.36 | 1.12 | 0.79 | 1.36 |
| Taro | 1.68 | 0.83 | 11.00 | 1.24 | 0.85 | 1.41 |
| Radish | 1.97 | 0.88 | 15.60 | 1.31 | 0.89 | 1.44 |
| Melon | 2.3 | 0.90 | 18.86 | 1.33 | 0.91 | 1.45 |
| Red pepper | 2.94 | 0.91 | 20.76 | 1.35 | 0.92 | 1.45 |

일반적으로 성장과정에 따라 다양하게 변화하는 작물의 엽면적지수를 정확히 측정한다는 것은 많은 인력, 시간과 경비를 동반하게 된다. 따라서 RS의 장점을 최대한 살리기 위해서는 위성 자료의 취득시점에 맞추어 자료보정을 위한 지점을 설정하여 현장자료를 취득 보정해 가는 방법이 일반적으로 활용되고 있다. 그러나 우리나라의 경우 이러한 보정을 위한 조사기관이나 지점 설정이 없어 위성자료와 지상 자료의 정확한 보정이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 기초 조사로 일정지점에서 작물이 갖는 특징을 먼저 파악해 둘 필요성이 있어 여러 가지 발작물에 관한 분광반사특성과 엽면적지수(LAI)를 조사하였다. 분광반사 조사에서 얻어진 결과를 사용하여 NDVI를 구하고, 얻어진 NDVI와 LAI는 어떠한 관계로 표현되는가를 검토하였다.

Fig. 10은 각 발작물에 대한 LAI와 작물별 NDVI와의 상관관계를 나타낸 그래프로 $NDVI = aLAI^2 + bLAI + c$ 의 형태에서 높은 상관성을 보였다. Fig. 11은 각 발작물에 대한 LAI와 작물별 RVI와의 상관관계를 나타낸 그래프로 $RVI = aLAI + b$ 의 형태에서 매우 높은 상관성을 나타냈다. 이와 같이 식생지수와 발작물의 LAI와의 관계는 서로 정의 비례관계가 있음을 알 수 있다. 그러나 아직 수많은 논밭 작물의 특성을 하나의 식으로 표현하기는 어려움이 있다. 그러나 동일한 시기에 여러 작물이 혼재해 있을 경우 식생지수를 이용하여 개략적인 엽면적지수를 추정

할 수 있다면 이는 각 시기별 작물의 소비수량 및 증발산량을 추정하는데 크게 기여할 수 있으리라 생각된다. 특히 우리나라의 경우 작물의 엽면적지수에 관한 조사와 연구가 미진한 관계로 대표 값을 사용하는 경우가 많아 포장에서의 작물 소비수량 및 증발산량을 산정하는데 어려움

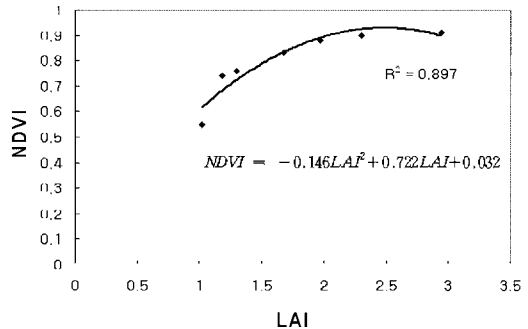


Fig. 10. Relationship between LAI and NDVI of the seven field crops at June 26, 2002

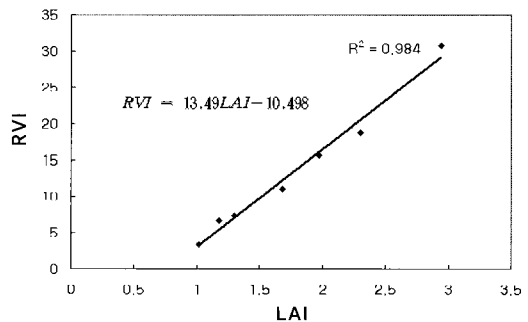


Fig. 11. Relationship between LAI and RVI for the seven field crops at June 26, 2002

이 많다. 따라서 앞으로 보다 체계적으로 조사하여 그 관계를 좀 더 구체화한다면 위성과 현장에서 취득한 NDVI를 이용하여 지역적인 LAI와 전국적인 LAI 값을 구체화하고 계절별 특징을 명확히 할 수 있을 것이다.

발작물의 생육단계별 특성 조사를 위해 콩을 선정하여 5개의 식생지수를 나타내면 Table 4와 같다. 콩에 있어서 각 식생지수 값에는 약간의 차가 있으나 전체적인 경향은 비슷한 변화패턴을 보인다. 기상조건의 불안정으로 7월에 측정된 데이터가 없어 식생지수의 최고점은 명확하지 않으나 6월 26일까지는 콩이 성장하면서 필요로 하는 태양에너지를 흡수하면서 활발한 광합성작용을 하고 있는 것으로 생각된다. 이후는 콩깍지가 여물어가면서 잎의 노화가 진행되는 단계로 각 식생지수는 낮아지는 것으로 해석된다. 이와 같은 경향은 전술한 분광반사곡선과 이에 대한 1차도함수, 2차도함수 및 적분곡선에서 나타난 특성과 유사한 경향을 나타내는 것으로 식물의 생육과 생태특성을 파악하기 위한 유용한 방법으로 생각된다.

Table 4. Comparison of the five vegetation indices with the soybean growth stage

| Time (days) | NDVI | RVI | ARVI | SAVI | MSAVI2 |
|-------------|------|-------|------|------|--------|
| May 20 | 0.38 | 2.22 | 0.59 | 0.56 | 1.04 |
| May 27 | 0.47 | 2.76 | 0.68 | 0.69 | 1.13 |
| May 29 | 0.71 | 5.86 | 0.82 | 1.05 | 1.33 |
| June 07 | 0.91 | 20.71 | 0.93 | 1.35 | 1.45 |
| June 07 | 0.93 | 28.06 | 0.94 | 1.38 | 1.46 |
| Aug. 20 | 0.56 | 3.54 | 0.81 | 0.83 | 1.21 |

3. 발작물의 정보추출

8가지 발작물의 분광반사특성을 조사하여 분광반사특성을 생육단계별로 정리하여 그 특징을 정리하면 Fig. 12와 같이 도시화 할 수 있다. 녹색식물의 경우 성장이 점점 왕성해지는 영양성장기에 450 nm와 650 nm 파장대에서 광합성작용은 활발해지며 클로로필 농도의 증

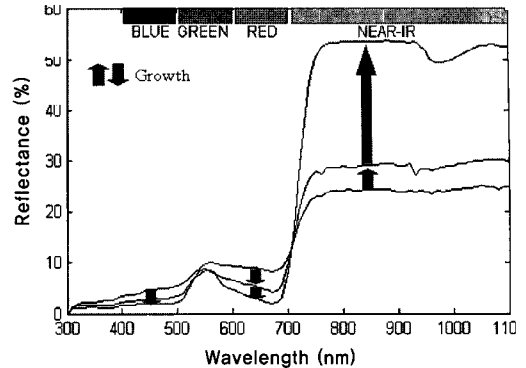


Fig. 12. Pattern of spectral reflectance for the growing green crops

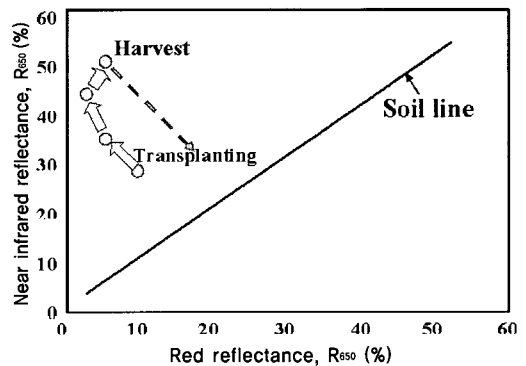


Fig. 13. Hysteresis loop of reflectance of the field crops

가를 가져와 전자파에너지를 흡수하므로 반사율은 떨어진다. 반대로 근적외선영역에서는 성장이 왕성해지면서 근섬유조직이 발달하게 되고 반사율은 증가한다 (Peterson and Running, 1989). 그 결과 발작물이 성장함에 따라 가시광선영역의 반사율은 낮아지고 근적외선파장영역의 반사율은 높아지는 특징을 보인다. 특히 클로로필 양과 밀접한 관계를 갖는 지점(700nm 부근)의 적색경계점(red edge)을 경계로 성장 단계별 변화는 양분되는 특징을 보인다. 즉 적색경계점(red edge) 이전은 발작물이 성장함에 따라 분광반사특성은 낮아지나 이후의 분광반사율은 높아지는 특성이 파악되었다.

발작물이 성장하면서 나타내는 분광반사특성

의 이력(hysteresis)을 알아보기 위하여 가시광선영역에서 650nm를 선정하고 근적외선영역에서 850nm를 선정하여 그래프로 나타내면 Fig. 13과 같은 이력곡선으로 표현된다. 밭작물의 특징은 밭의 수분 증발을 억제하기 위해 멀칭한 비닐의 영향이 나타나 이력곡선에 있어서도 벼와는 약간 다른 형태로 나타난다(박중화 등;2003). 밭작물의 성장에 따른 이력곡선(hysteresis loop)은 토양선(soil line)을 시작점으로 하는 L자형을 형성한다. 일반적으로 가시광선영역에서는 녹색식물이 갖는 광합성 작용과 이에 관련된 잎의 chlorophyll 작용에 의한 청색과 적색영역의 광 흡수와 카로틴과 크산토폴에 의한 청색영역의 광 흡수작용 등에 의해 반사율이 낮아지면서 이력이 변화하게 된다. 근적외선영역에서는 줄기가 반사율에 영향을 주어 반사율은 높아지게 되며 두 반사율의 상호작용에 의해 이력곡선은 변화하게 된다. 대체적으로 녹색식물의 수확 시기는 성장단계로 잎이 녹색일 때이므로 벼 등의 작물에서 보이는 토양선 가까이까지 이력곡선은 근접하지 않고 토양선의 먼 지점에서 수확을 하게 되어 이력곡선은 멈추게 된다. 만약 성장단계 중간에 수확을 하지 않고 그냥 둔다면 이력곡선은 역 U자형 루프를 형성할 것이다.

IV. 요약 및 결론

RS기법을 이용하여 밭작물의 생육단계별 분광반사특성, 식생지수 및 엽면적지수(LAI)를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 녹색식물일 때 수확하는 밭작물(파, 토란, 수박, 참외, 무 등)의 분광반사특성은 400~700nm의 반사율이 10% 미만이며, 작물이 성장할수록 Chlorophyll의 증가로 반사율은 점점 낮아진다. 근적외선영역에서는 녹색식물 가운데 파와 같이 속이 비고 근조직이 약한 식물의 반사율이 낮은 반면 토란과 같이 잎의 조직이 단단하고 표면이

매끄러운 식물의 반사율이 높다는 점이 확인되었다.

2. 밭작물에 대한 생육단계별 분광반사특성 자료를 이미 개발되어 있는 5가지 식생지수 계산식을 이용한 결과 각 식생지수는 밭작물의 생육단계별 생육상태를 잘 표현해 주었으며 식생지수와 밭작물의 LAI는 정비례 관계를 보였다.

3. 밭작물의 생육단계별 분광반사특성에 대해 1차 도함수와 2차 도함수로 표현하였을 때 성장단계별 특징이 일정 파장대인 적색경계(예, red edge 등)에서 변화가 심하게 나타나며 식물의 생육단계를 잘 표현해주는 점이 확인되었다.

4. 밭작물의 분광반사특성에 의한 작물의 성장과정을 이력곡선으로 나타낸 결과 L자형 이력곡선을 형성하였다. 만약 수확을 하지 않은 상태의 이력곡선은 역 U자형 루프를 형성하는 것으로 나타났다.

여기에서 얻어진 결과들은 동일한 시기에 여러 작물이 혼재해 있을 경우 각 작물이 갖는 엽면적에 따라 달리 표현되는 식생지수를 파악하고 구분하는데 이용될 수 있을 것이다. 또한 앞으로 보편화 될 위성자료의 적극적인 활용에 있어 RS의 장점을 최대한 살리기 위해서 위성자료의 취득시점에 맞추어 자료보정을 위한 지점을 설정하여 현장자료를 취득 보정해 가는 방법으로 활용될 수 있을 것이다. 따라서 앞으로 위성주기와 맞추어 분광반사특성과 LAI의 조사를 보다 체계화하고 좀 더 구체화한다면 위성화상을 사용하여 보다 정확한 NDVI와 LAI의 산정이 가능할 것이다.

참고문헌

1. 박종화 · 이상혁 · 신용희 · 전택기, 2002. 분광반사율에 의한 콩잎의 식생피복률 추정, 한국관개배수, 9(1), pp. 29-37.
2. 박종화 · 신용희 · 박민서, 2003. 벼의 생육단계별 분광반사 특성, 한국관개배수, 10(1), pp. 53-61.
3. 장세진 · 서애숙 · 김판기 · 윤진일, 2000. 스펙트로레디오메터를 이용한 벼 생장시기의 분광반사특성 변화 분석, 한국지리정보학회지, 3(3), pp. 12-19.
4. 홍석영 · 이정택 · 임상규 · 정원교 · 조인상, 1998. 분광반사특성을 이용한 벼의 생장량 추정, 한국원격탐사학회지, 14(1), pp. 83-94.
5. Asrar, G., E. T. Kanemasu, and M. Yoshida, 1985. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle, Remote Sens. Environ., 17, pp. 1-11.
6. Attridge, T. H., 1990. Light and Plant Responses. London: Edward Arnold.
7. Baret, F., I. Champion, G. Guyot, and A. Podaire, 1987. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer, Remote Sens. Environ., 22, pp. 367-378.
8. Broge, N.H. and Mortensen, J. V., 2002. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data, Remote Sens. Environ., 81, p. 48.
9. Carter, G.A., and B.A. Spiering, 2002. Optical properties of intact leave for estimating chlorophyll concentration, J. Environ. Qual., 31, pp. 1424-1432.
10. Daughtry, C.S.T., K.P. Gallo, S.N. Goward, S.D. Prince, and W.P. Kustas, 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies, Remote Sens. Environ., 39, pp. 141-152.
11. Huete, A.R., R.D. Jackson, and D.F. Post, 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds, Remote Sens. Environ., 17, pp. 37-53.
12. Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI), Remote Sens. Environ., 25, pp. 295-309.
13. Kaufman, Y.J. and D. Tnare., 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(2), pp. 261-270.
14. Martinez v. Remisowsky A., McClendon J.H., Fukshansky L. (1992). Estimation of the optical parameters and light gradients in leaves: multi-flux versus two-flux treatment, Photochem. Photobiol., 55, pp. 857-865.
15. Miller, J.B., 1967. A Formula for Average Foliage Density, Aust. J. Bot, 15, pp. 141-144.
16. Nilsson, Hans-Eric. 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology, Canadian Journal of plant pathology, 17, pp. 154-166.
17. Nilsson, H.E. 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology, Annu. Rev. Phytopathol., 33, p. 4.
18. Pearson R.L, Miller L.D and Tucker C.J., 1972. Handheld Spectral Radiation to Estimate Gramineous Biomass, Appl. Optics, 15, pp. 416-418.
19. Peterson, D.L. and S.W. Running., 1989. Application in Forest Science and Management, Theory and Applications of Optical Remote Sensing, Doghouses Asrar, New Youk, John Wiley and Sons, pp. 421-473.
20. Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering., 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt, NASASP-351, pp. 301-317.
21. Welles, J. M. and Norman, J. M., 1991. Instrument for Indirect Measurement of Canopy Architecture. Agronomy Journal, 83(5), pp. 818-825.