

연초의 엽위 분포형태에 따른 지상 원격센서의 유효 탐사거리와 측정 효율성 평가

정현철 · 홍순달^{1,*}

농촌진흥청 농업과학기술원, ¹충북대학교 농화학과

Evaluation of Effective Sensing Distance and Measurement Efficiency for Ground-Based Remote Sensors with Different Leaf Distribution in Tobacco Plant

Hyun-Cheol Jeong, and Soon-Dal Hong^{1,*}

National Institute of Agricultural Science and Technology Suin-ro 150, Seodun-dong Kweonseon-gu, Suwon-si 441-707, Korea
¹Department of Agricultural Chemistry, Chungbuk National University Seonbong-ro 410, Gaeshin-dong Cheongju-si 361-763, Korea

Tobacco plants grown in pots by sand culture for 70 days after transplanting were used to evaluate the sensing distance and measurement efficiency of ground-based remote sensors. The leaf distribution of tobacco plant and sensing distance from the sensors to the target leaves were controlled by two removal methods of leaves, top-down and bottom-up removal. In the case of top-down removal, the canopy reflectance was measured by the sensor located at a fixed position having an optimum distance from the detector to the uppermost leaf of tobacco every time that the higher leaves were one at a time. The measurement of bottom-up removal, a the other hand, was conducted in the same manner as that of the top-down removal except that the lower leaves were removed one by one. Canopy reflectance measurements were made with hand held spectral sensors including the active sensors such as GreenSeekerTM red and green, Crop Circle ACS-210TM red and amber, the passive sensors of Crop CircleTM, and spectroradiometer SD2000TM. The reflectance indices by all sensors were generally affected by the upper canopy condition rather than lower canopy condition of tobacco regardless of sensor type, passive or active. The reflectance measurement by GreenSeekerTM was affected sensitively at measurement distance longer than 120 cm, the upper limit of effective sensing distance, beyond which measurement errors are appreciable. In case of the passive sensors that has no upper limit of effective distance and Crop CircleTM(ACS210) that has the upper limit of effective sensing distance specified with 213 cm, longer than that of estimated distance, the measurement efficiency affected by the sensing distance showed no difference. This result suggests that it is necessary to use the sensor specified optimum distance. The result revealed that active sensors are more superior than their passive counterparts in establishing between the relative ratio of reflectance index and the dry weight of tobacco treated by top-down removal, and in the evaluation of biomass. The Crop Circle ACS-210TM red was proved to have the highest efficiency of measurement, followed by Crop Circle ACS-210TM amber and GreenSeekerTM red, Crop CircleTM passive, GreenSeekerTM green, and spectroradiometer, in descending order.

Key words : Leaf distribution of tobacco, Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) , Ground-based Remote Sensor

서 언

식물조직과 상호 작용하는 빛의 3가지 기작은 흡수(absorptance), 투과(transmittance), 반사(reflectance)

로 구분된다. 즉 빛의 일부는 식물의 광합성작용에 흡수 이용되고(absorptance), 다른 일부는 파장의 변화가 없이 식물조직을 그대로 통과하며(transmittance), 나머지 일부는 식물 표면으로부터 반사(reflectance)되는 상호작용을 한다(Hatfield et al, 1993). 따라서 에너지 보존법칙에 의하여 이들 3가지 상호작용의 총합은 항상 1.0(혹은 100%) 이며 식물

접 수 : 2008. 2. 12 수 리 : 2008. 3. 2
*연락처 : Phone: +82432612564,
E-mail: sdhong@cbnu.ac.kr

잎 반사율에 대한 평가에서 이들 세 가지 특성들은 물리적 및 생리적 근거로써 함께 고려되고 있다. 잎에 의해서 반사되고, 투과되고, 흡수되는 복사선의 분광학적 특성은 생육조건에 대한 생리적인 감응도와 환경에 대한 식물 적응도를 보다 자세하게 이해할 수 있게 하였다(Cater et al., 2002; Cater, 1993). 이러한 분광학적 특성에 대한 조사는 1960년대 이후 기기 발달과 스트레스 검출을 위한 원격탐사(remote sensing)의 잠재능력에 대한 흥미를 유발시키며 크게 발전되었다. 대부분 원격탐사에서 식물 스트레스에 감응하는 잎의 반사율 평가는 투과율이나 흡수율에 대한 평가보다 더 광범위하고 정밀하게 검토되었다(Carter and Knapp, 2001; Jackson et al., 1986; Gitelson et al., 2001).

식물체 잎은 광합성 색소와 다른 식물색소에 의해 가시광 영역(400-700 nm)의 복사선을 강하게 흡수하기 때문에 동일 영역의 반사율과 투과율은 전형적으로 매우 낮다(Chappelle et al., 1992). 반면에 근적외광 영역(700-1300 nm)의 복사 에너지는 내부 세포질 입자들과 색소들에 의한 흡수가 매우 낮고 또한 엽육의 세포벽 접촉면에서 상당한 분산이 일어나기 때문에 반사율과 투과율은 일반적으로 높다(Gausman, 1974, 1977; Slaton et al., 2001). 이러한 가시광 영역과 근적외광 영역 사이에 현저한 차이를 보이는 반사율 특성은 작물 및 자연식생을 관리하고 모니터링하기 위한 원격탐사 방법의 대부분을 차지한다(Knipling, 1970; Bauer, 1975).

가시광과 근적외광 파장에서 반사된 복사에너지의 차이, 비율, 혹은 직선적 조합(Deering et al., 1975; Richardson and Wiegand, 1977; Tucker, 1979; Jackson, 1983)으로 계산된 식생지표들은 토양과 식물의 반사율 분광 성질의 차이를 활용하고 있다. 식물 생장지표 비율(NIR/Red)과 Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) 같은 지표들은 녹색 생체량 혹은 엽면적 지수(Leaf Area Index, LAI)를 추적하기 위한 정량적 수단으로 많이 활용되었다(Jackson and Huete, 1991; Wiegand et al., 1991). Gitelson 등(1996)은 Green Normalized Difference Vegetation Index(GNDVI)의 이용을 제안하였으며 이것은 식물체 생체량의 canopy 변이를 평가하는데 기존에 사용되었던 NDVI보다 훨씬 유용한 것으로 입증되고 있다. 그 이외 작물의 생체량 혹은 수량을 평가하는데 많은 유용한 지표들이 검토되고 있으며 이러한 지표들은 녹색 엽면적, 생물 총량, 녹색 피복도, 작물 생산성, 광합성 활성도등과 같은 다양한 식생변이들과 양호한 상관을 갖는 것으로 알려졌다(Wiegand et al., 1991; Huete, 1988; Gilabert et al., 2002; Osborne et

al., 2002).

복사 에너지의 공급원으로 대표적인 것은 태양광이며 이와 같이 자연적으로 이용 가능한 전자기 에너지 공급 시스템은 “수동형(passive)” 시스템이라 한다. 이와 대조적으로 발광 다이오드(light-emitting diode, LED)나 레이더 시스템과 같이 대상물체에 조사하기 위하여 자체광원을 갖고 있는 전자기 에너지 공급 시스템은 “능동형(active)” 시스템이라 구분한다(Lillesand et al., 2004). 자연광을 이용하는 수동형 시스템은 측정할 때 마다 표준반사판을 이용하여 표준화(normalization)과정을 수행해야 하고 태양광의 세기변화, 구름 및 미세입자(aerosol) 등에 의해 측정치가 영향을 받는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 최근에는 인위적 광원을 이용하는 능동형 시스템의 센서가 개발되고 있다. 능동형 센서는 광원 방출시 매 초당 수회씩 광원(light source)을 차단하여 불연속적으로 변조(modulation)된 광원을 이용하기 때문에 연속적으로 광원을 방출하는 자연광과 구별하여 측정할 수 있으며 광 조건에 관계없이 심지어 야간에도 측정할 수 있다. 최근에 개발되고 있는 이러한 지상 원격 측정 센서들은 농업적 활용도가 점차로 증가되고 있으며 미국의 경우는 정밀농업을 실천하는 현장기술로 자리 잡고 있는 실정이다. 그러나 식물체로부터 반사되는 복사선을 검출하는 능력은 센서로부터 목표물까지의 거리에 따라 측정영역의 크기가 변화되며 센서 검출기의 측정효율은 크게 영향을 받게 된다. 그 결과 식물의 광합성능력에 따른 식물의 생체량을 평가하는 지상원격센서의 효율은 측정거리가 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 따라서 본 연구는 이러한 센서들의 유효 측정거리와 측정효율성을 비교하기 위하여 연초 식물의 캐노피(canopy) 조건에 따라 평가하였다.

재료 및 방법

연초 생육 센서의 측정효율을 평가하기 위한 공시작물은 광엽 식물인면서 엽간 거리가 넓고 이에 따른 건물중 변화속도도 큰 연초를 선택하여 온실에서 사경재배로 생육시켰다. 사경재배는 직경 30 cm, 높이 30 cm 포트에 세척된 모래(0.1mm 이상의 입자크기)를 채우고 황색종 KF118 (*Nicotiana tobacum* L.)의 묘를 이식한 다음 가로, 세로, 높이가 45 cm × 35 cm × 25 cm인 사각용기 내부에 포트를 설치하였다. 연초 묘는 2005년 4월 20일에 이식하였고 수분공급은 포트 밑면의 사각용기에 공급된 용액으로부터 모세관 작용으로 근권에 공급되도록 하였다. 수분의 공급은 연초 이식후 부터 2주까지는 영양액 대신 물을 공급하였고, 2주부터 4주까지는 Hoagland 영양액 질소 처리농도의 50% 농도로, 4주부터 수확기까지는 100%

처리능도로 70일간 유리온실에서 재배하였다. 센서측정에 활용된 연초의 엽수는 보통 18매 내외가 되도록 순지르기를 한 상태에서 평가하였다. 센서 측정후 제거방식에 따라 채취된 엽개체의 시료는 생체중과 건물중을 조사하여 건물중 변화와 센서 측정체의 상호관계 분석에 활용하였다.

식생지표 및 특성 식물의 성장량 평가를 위하여 보편적으로 활용되는 반사율지표들 중에서 수동형 센서와 능동형 센서 모두 공통적으로 활용되는 Red Normalized Difference Vegetation Index [(NIR-Red)/(NIR+Red), rNDVI], Green Normalized Difference Vegetation Index [(NIR-Green)/(NIR+Green), gNDVI], 및 Amber Normalized Difference Vegetation Index [(NIR-Amber)/(NIR+Amber), aNDVI]를 사용하였다.

자연광을 이용하는 수동형 센서는 Crop Circle™과 광범위한 파장영역의 반사율을 연속적으로 측정하는 spectroradiometer(Ocean Optics)를 이용하였다. 변조된 인공광원을 이용하는 능동형 센서는 GreenSeeker™(Ntech industries, Inc.)의 green과 red 그리고 Crop Circle ACS-210™ red와 amber 센서등을 이용하였으며 이러한 센서들의 특성은 Table 1에 나타났다.

Crop Circle™ 수동형 센서 측정원리는 녹색(550 nm), 호박색(600 nm), 적색(680 nm), 근적외광(820 nm) 영역의 반사율을 이용한 지표들이 식물체의 엽록소 함량이나 성장량과 밀접한 관계를 갖는다는 연구결과에 근거하여 이 센서는 녹색(550 nm), 호박색(600 nm), 적색(680 nm), 근적외광(820 nm) 영역 등 4개 복사선 영역의 반사율을 검출할 수 있도록 고안되었으며 작물의 canopy에 대한 반사율을 자연광 조건에서 측정하는 다중센서형(multi-sensor) 자료 수집체계를 가지는 수동형 센서 이다. 측정된 4개 복사선 영역의 반사율은 이미 식생지표로 개발된 rNDVI와 gNDVI 및 aNDVI를 포함한 여러 가지 지표로 전환하여 평가할 수 있다. 기본 장비는 대조기능을 하는 하나의 상향 센서, 그리고 1개에서 31개 센서까지

network으로 연결할 수 있는 하향 센서, Data Hub, GPS signal로 구성되어 있다. 그리고 하향 센서의 검출영역은 후드 길이로서 다르게 조절할 수 있으며 측정영역인 원의 직경은 다음 식에 의하여 구할 수 있다. 실제로 후드 길이가 5 cm이고 후드에서 측정목표까지 90 cm라고 가정하면 측정되는 원 영역의 직경은 52 cm가 된다.

$$\text{직경}(D) = \frac{2.3}{d} \times h$$

d: 센서후드길이,

h: 센서후드에서 측정지역까지 거리

이 측정기의 센서는 간이형 혹은 이동식 테이블에 장착하여 측정할 수 있으며 또한 소형 및 대형 농기계에 GPS와 함께 최대 31개 센서까지 연결하여 작물 canopy에 대한 반사율을 동시에 측정하는 수동형 센서의 일종이다.

Spectroradiometer, SD-2000™ 수동형 센서 이 측정기는 자연광을 이용하는 수동형 측정체계의 형태로 가시광에서 원적외선(340 nm~1020 nm)까지 모든 복사선 영역에 대한 반사율을 1 nm 혹은 그 이하 단위로 전 파장의 반사율을 측정할 수 있으며 다양한 파장의 반사율을 이용하여 목적에 따라 다양한 지표를 개발할 수 있다. 처음에 표준 반사율판(반사율 99%)을 이용하여 입사광을 반사시켜 태양으로부터의 입사광량과 표준 반사율판의 반사광량을 동일하게 인식시켜 주는 표준화과정을 수행한 후 대상 물체에 대한 반사광량을 측정한다. 이 때 대상 물체로부터 반사광량을 측정함과 동시에 태양으로부터의 입사광량을 측정하여 표준화과정의 입사광량과 비교하여 증감된 비율만큼을 반사광량에 적용하여 입사광량의 변화에 따른 반사광량의 변화를 보정함으로써 구름이나 대기 상태에 따른 오차를 최소화 할 수 있다. 측정영역은 센서로부터 20도 원추형으로 복사선이 방출되어 측정거리가 60 cm 일 경우 원 직경은 약 30 cm가 된다. 측정된 자료는 컴퓨터를 이용하여 입사광량에 대한

Table 1. Specification of ground-based remote sensors estimated in the experiment.

Source of light (sensor type)	Sensors	Output of vegetation index	Wavelength
Solar light (passive sensor)	Crop Circle™	rNDVI, gNDVI, aNDVI	550 nm, 600 nm, 680 nm, 820 nm
	Spectroradiometer(SD 2000™)	Variable	340-1020 nm
Light-emitting diode(LED) (active sensor)	Crop Circle ACS-210™ (red)	rNDVI	650±5 nm, 880±10 nm
	Crop Circle ACS-210™ (amber)	aNDVI	590±5.5 nm, 880±10 nm
	Greenseeker™ (red)	rNDVI	660±10 nm, 770±15 nm
	Greenseeker™ (green)	gNDVI	530±15 nm, 770±15 nm

반사광량의 비율을 구함으로써 반사율을 계산하고 이렇게 계산된 각 파장의 반사율로 각종 식물생장지표들을 계산할 수 있다.

Crop Circle ACS-210™ red and amber 능동형 센서 이 측정기는 진행방향과 수직으로 변조된 LED 광을 방출하고 검출부에서 자연광과 구분되는 변조된 반사광을 검출하여 지표 값으로 출력한다. 적색(red) 센서는 근적외광 파장으로 880 ± 10 nm와 적색 파장으로 650 ± 5 nm, 그리고 호박색(amber) 센서는 근적외광 파장으로 880 ± 10 nm와 호박색 파장으로 590 ± 5.5 nm의 LED광원을 이용하며 각각 rNDVI와 NIR/Red, aNDVI와 NIR/Amber 지표를 산출한다. 센서와 목표물까지의 거리가 증가할수록 관측영역은 $32^\circ \times 6^\circ$ 증가하게 된다. 따라서 센서와 목표물까지의 거리가 90 cm일 때 측정영역은 50×10 cm가 된다.

GreenSeeker™ red and green 능동형 센서 이 측정기는 센서의 진행방향에 비스듬한 수직으로 변조된 LED광을 방출하는 센서이다. 적색(red) 센서는 근적외광 파장으로 770 ± 15 nm와 적색 파장으로 660 ± 15 nm, 그리고 녹색(green) 센서는 근적외광 파장으로 770 ± 15 nm와 녹색 파장으로 530 ± 15 nm의 변조된 반사광을 검출하여 각각 rNDVI와 Red/NIR, gNDVI와 Green/NIR 지표를 산출한다. 그리고 센서의 측정높이를 60 cm에서 120 cm까지 변화해도 측정영역은 1×60 cm로 일정하게 유지되는 특징을 갖는다. 기본 장비는 센서헤드, PDA, Control box 등으로 구성되어 있으며 여러 개의 센서를 장착할 수 있는 네트워크로서 액체비료 살포기를 장착하여 작물의 질소 영양상태의 측정과 동시에 적정량의 질소비료를 살포할 수 있다.

Top-down 엽 제거에 따른 유효 측정거리 측정 지상 원격탐사 센서에 대하여 엽위 분포형태에 따른 효율적인 측정거리를 평가하기 위하여 센서는 상위엽을 기준으로 수직 상단의 일정한 위치에 고정시키고 연초식물의 캐노피 형태를 변화시키며 측정 비교하였다. Top-down 형식의 엽 제거는 최상위 엽으로부터 하위엽 방향으로 하나씩 제거하면서 건물중 변화에 따른 센서의 측정효율을 평가하는 방식이다. 센서로부터 20도 원추형의 측정영역을 갖는 수동형 센서인 Crop Circle™와 Spectroradiometer 센서는 연초 최상위 엽으로부터 60 cm 상단에 고정시키고 엽을 제거하면서 측정하였다. 수동형 센서에서 측정거리를 60 cm부터 시작한 이유는 상위엽의 크기가 측정영역의 원 직경 30 cm 이내에 분포되었기 때문이며 센서위

치를 고정시킨 후 엽이 제거될 때 변화되는 측정거리의 효율성을 평가하였다. 그리고 능동형 센서인 Crop Circle ACS-210™ 센서(red, amber)는 최상위 엽으로부터 50 cm 상단에서, Greenseeker™ 센서(red, green)는 80 cm 상단의 높이에서 목표물 전후방향으로 scanning하며 측정하였다. 능동형 센서의 측정거리를 각각 50 cm와 80 cm로 고정시킨 이유는 각 센서의 측정영역이 상위엽의 크기보다 큰 조건으로 하기 위함이며 수동형 센서와 마찬가지로 엽이 제거될 때 변화되는 측정거리에 따른 측정효율성을 평가하였다. 시료에 대한 반사율지표의 측정은 연초의 캐노피를 유효거리 유지하며 스캐닝 하는 방식으로 측정하였고 측정회수는 spectroradiometer를 제외한 전용센서들의 경우 최소 100개 이상의 반복 측정치로 하였고 spectroradiometer의 경우는 전파장을 측정하는 특성 때문에 5반복으로 측정하였다. 센서 측정후에 차례대로 제거되는 각각의 연초엽은 생체중과 건물중을 조사하여 센서들의 식생지표와 연초 건물중 변화와의 상호관계를 비교 평가하였다.

Bottom-up 엽 제거에 따른 유효 측정거리 측정 이 측정방법은 top-down 제거방법과 반대로 연초의 최하위 엽으로부터 상위엽 방향으로 차례대로 엽을 제거하며 건물중을 변화시킬 경우 센서의 측정 효율을 평가하기 위한 것이다. 측정될 연초식물은 각각 상위엽으로부터 15매의 엽이 분포되도록 한 다음 최하위 15번엽부터 상위엽 방향으로 하나씩 차례대로 제거하면서 측정하였다. 수동형 센서와 능동형 센서의 측정위치 및 측정방법은 top-down 제거방법에서와 동일한 조건으로 하였다. 또한 측정 후 제거되는 연초엽의 생체중과 건물중을 조사하여 센서들의 측정효율을 비교하였다.

두 가지 엽 제거형태에서 센서의 측정효율성을 생체중이나 건물중으로 평가한 이유는 광합성과 관련된 가시광 복사선과 엽의 치밀도와 관련된 근적외광의 반사율을 이용한 식생지표가 엽록소와 관련된 색상이나 질소함량과도 관련 있지만 보다 근본적인 특성은 식물의 생체량을 효율적으로 평가하기 때문이다.

결과 및 고찰

Spectroradiometer 센서의 유효측정 거리 가시광 영역인 340 nm부터 근적외광 영역인 1020 nm까지 0.5 nm 단위로 반사율을 측정하는 수동형형 spectroradiometer의 반사율지표 aNDVI와 gNDVI는 top-down 및 bottom-up 엽 제거형태에 따른 연초의 건물중 변화와의 상호관계를 Fig. 1에 나타냈다. 이 센서의 측정영역은 센서 검출부로부터 20도의 원추형

으로 측정거리가 늘어날수록 원형의 목표물 직경은 증가하며, 90 cm 거리일 경우 측정영역 원의 직경은 약 50 cm가 된다. 엽의 제거방식을 top-down으로 한 경우 이 센서의 반사율지표들은 상위엽이 차례대로 제거되며 건물중이 감소함에 따라 측정값이 감소하는 비례관계를 보였다. 그러나 엽 제거방식을 bottom-up으로 하위엽부터 차례로 제거하는 경우는 측정영역에 상위엽이 그대로 존재하고 있기 때문에 반사율지표들은 건물중 감소에 따라 감응하지 않으며 일정한 측정값을 유지하였다.

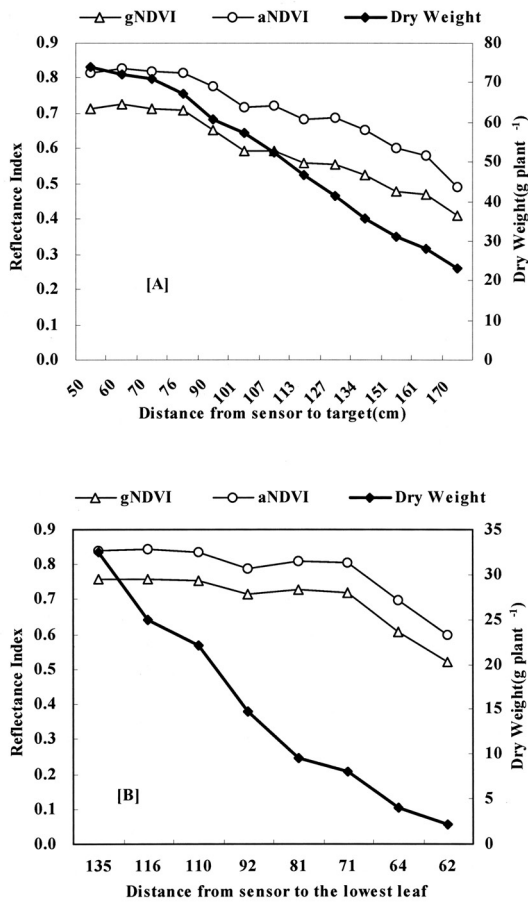


Fig. 1. Changes of NDVI by spectroradiometer and dry weight of tobacco at different sensing distances from sensor to target made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

Crop Circle™ 수동형 센서의 유효측정거리 Figure 2는 엽 제거형태에 따른 연초 건물중 변화에 따른 Crop Circle™ 수동형 센서 반사율지표들의 상호관계를 나타냈다. 엽 제거방법이 top-down인 경우 spectroradiometer의 경우와 동일하게 이 센서의 반사율지표들은 상위엽이 차례로 제거되며 건물중이 감소함에 따라 줄어드는 비례관계를 보였다. 그러나 엽을 bottom-up 방법으로 제거한 경우 반사율지표 aNDVI

와 gNDVI는 하위엽을 차례로 제거하여 상위엽이 4-5매 남아있을 때까지 건물중의 감소변화를 검출하지 못하였으며 그 다음 하위엽이 제거될 경우, 즉 센서로부터 최하위 엽까지 거리가 71cm 이하로 줄어들 때 비로소 지표들이 감소되는 감응을 나타냈다. 이러한 결과로부터 수동형 센서인 Crop Circle™에 의한 반사율 지표값은 하위엽보다 상위엽의 분포형태에 따라 민감하게 영향을 받는 것으로 spectroradiometer의 경우와 동일한 경향을 보였다. 센서의 측정거리가 제한되어 있지 않은 이러한 수동형 센서들의 측정치는 식물 canopy의 하위엽보다 상위엽의 분포형태에 크게 의존되는 특성을 나타냈다.

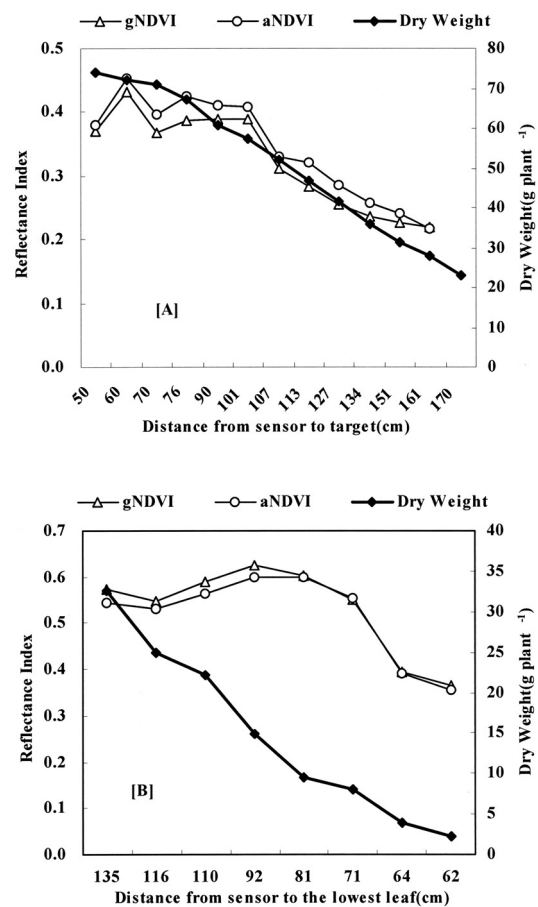


Fig. 2. Changes of NDVI by Crop Circle™ passive sensor and dry weight of tobacco at different sensing distances from sensor to target made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

엽위분포에 따른 Spectroradiometer 지표와 건물중의 상대비율 엽 제거방법에 따라 형성된 엽위분포별 spectroradiometer 반사율지표와 연초 건물중의 상호관계를 상대 비율값으로 Fig. 3에 나타냈다. 엽을 상위엽으로부터 하위 20매 엽까지 차례로 제거하는 top-down 방법에서 연초 건물중이 약 40%까지 직선적

으로 감소될 때 이 센서의 반사율지표 aNDVI와 gNDVI는 약 85 % 까지 직선적으로 감소되는 완만한 기울기를 갖는 비례관계를 보였다. 그러나 엽을 하위 15번째 엽부터 상위 엽까지 차례로 제거하는 bottom-up 방법에서 연초 건물중은 약 5 %까지 감소되었으나 반사율지표들은 상위 5매 엽까지 하위 엽들을 제거하여도 거의 변화되지 않고 일정한 측정값을 보였으며 상위 5매 엽이 제거될 때 비로소 80 %로 감소되었다. 이러한 결과는 유효측정거리에서 평가되었던 Fig. 1의 평가와 동일한 경향으로 캐노피의 하위엽보다는 상위 엽의 분포특성에 민감함을 보였다. 그리고 top-down 방법에서도 이 센서는 상위엽 캐노피의 건물중 변화를 민감하게 검출하지 못하는 특성을 보였다.

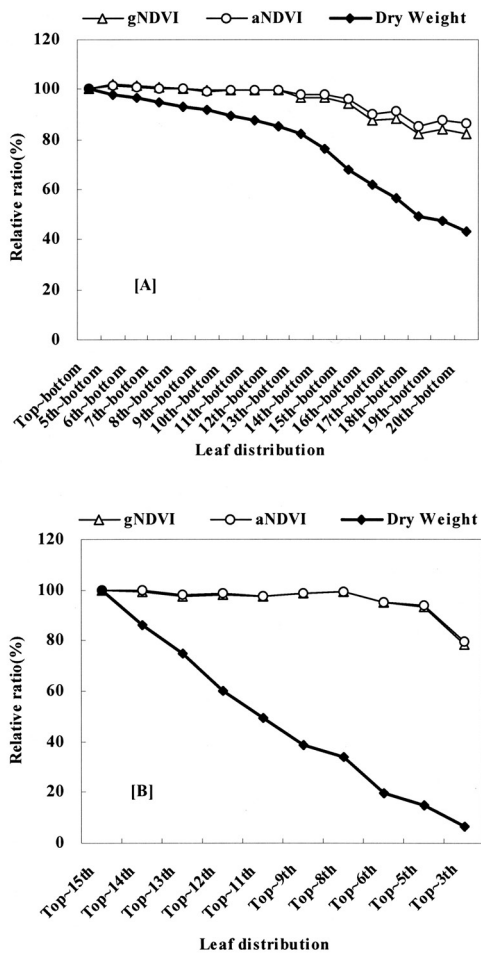


Fig. 3. Changes of relative ratio of NDVI by spectroradiometer and relative dry weight of tobacco at different stalk positions made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

엽위분포에 따른 Crop Circle™ 센서 지표와 건물중의 상대비율 Figure 4는 Crop Circle™ 반사율지표 aNDVI와 gNDVI의 엽 분포형태에 따른 건물중의 변

화를 상대 비율값으로 나타낸 것이다. 엽을 상위 엽으로부터 하위 19매 엽까지 차례로 제거하는 top-down 방법에서 연초 건물중이 약 50%까지 직선적으로 감소될 때 반사율지표 aNDVI와 gNDVI의 상대비율 값은 동일한 기울기로 직선적으로 감소되는 비례관계를 보였다. 그러나 엽을 하위 15번째 엽부터 상위 엽까지 차례로 제거하는 bottom-up 방법에서 연초 건물중은 약 20 %까지 감소되었으나 반사율지표들은 상위 9매 엽까지 하위 엽들을 제거하여도 거의 변화되지 않고 일정한 측정값을 보였으며 상위 8매 엽이 제거될 때 비로소 90 % 이하로 감소되었다. 이러한 결과는 수동형 센서인 spectroradiometer와 Crop Circle™ 반사율지표에 대한 유효측정거리 및 엽위별 상대비율의 평가결과와 동일한 경향을 보였다. 따라서 Crop Circle™ 수동형 센서는 spectroradiometer 센서와 동일하게 상위엽 캐노피의 형태에 따라 반사율지표 측정치가 민감하게 영향을 받았으나 상위엽 캐노피의 건물중 감소를 검출하는 능력은 Crop Circle™ 센서가

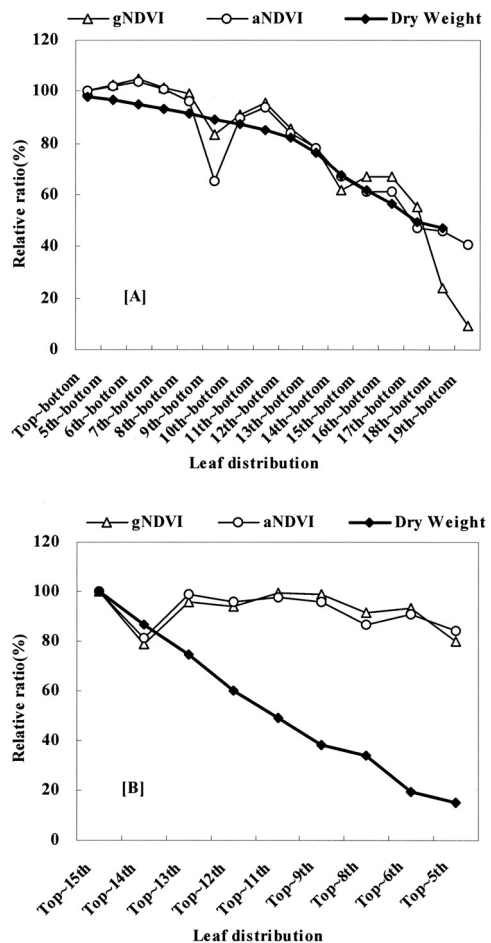


Fig. 4. Changes of relative ratio of NDVI by Crop Circle™ passive sensor and relative dry weight of tobacco at different stalk positions made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

spectroradiometer보다 양호한 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 센서의 측정회수가 전용센서인 경우 최소 100회 이상이지만 전 파장영역을 측정하는 spectroradiometer는 측정시간으로 5회로 제한되었기 때문에 측정의 신뢰도가 낮아진 것으로 생각되었다.

Crop Circle ACS-210™ 능동형 센서의 유효측정거리

Figure 5는 엽 제거형태에 따른 연초 건물중 변화에 따른 Crop Circle ACS-210™에 의해 측정된 aNDVI와 rNDVI의 상호관계를 나타냈다. 엽 제거방법이 top-down인 경우 수동형 센서들의 경우와 동일하게 이 센서의 반사율지표들은 상위엽이 차례로 제거되며 건물중이 감소함에 따라 감소되는 비례관계를 보였다. 그러나 엽을 bottom-up 방법으로 제거한 경우 반사율 지표 aNDVI와 rNDVI는 하위엽을 차례로 제거하여 상위엽이 4-5매 남아있을 때까지 건물중의 감소에 따라 줄어들지 않고 상위엽 캐노피에 의한 일정한 값을 지속하였고 그 다음 하위엽이 제거될 경우, 즉 센서로부터 최하위 엽까지 거리가 54cm 이하로 줄어들 때

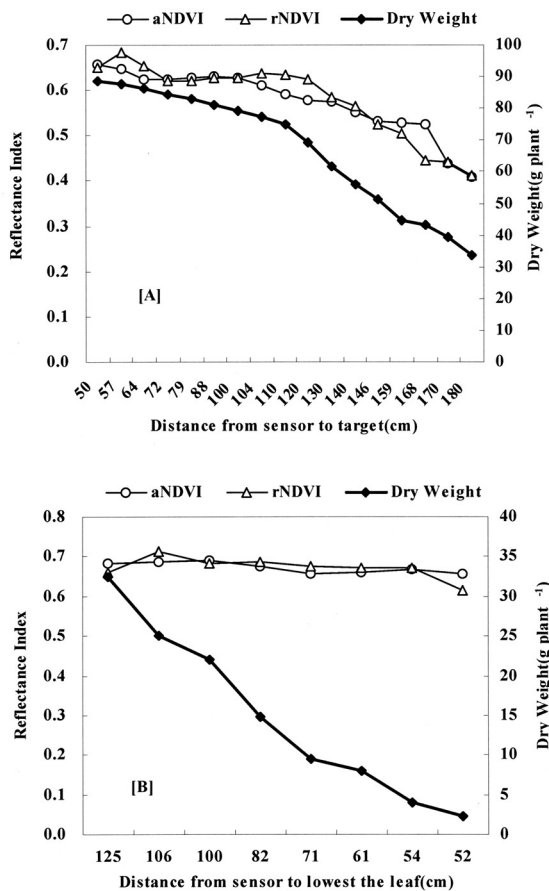


Fig. 5. Changes of NDVI by Crop Circle ACS-210™ and dry weight of tobacco at different sensing distances from sensor to target made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

비로소 지표들이 감소되는 감응을 나타냈다. 이러한 결과로부터 능동형 센서인 Crop Circle ACS-210™에 의한 반사율 지표값은 유효 측정거리로 규정된 25-213 cm범위 내에서 하위엽보다 상위엽의 캐노피 형태에 따라 영향을 받는 것으로 수동형 센서들과 동일한 경향을 보였다.

GreenSeeker™ 능동형 센서의 유효측정거리

Figure 6은 GreenSeeker™에 의해 측정된 gNDVI와 rNDVI를 엽 제거방법에 따른 연초의 건물중 변화와의 상호관계를 나타낸 것이다. 엽을 top-down 방법으로 제거한 경우 반사율지표 gNDVI와 rNDVI는 상위엽 캐노피가 줄어들며 건물중이 감소함에 따라 비례적으로 감소되는 경향을 보였으며 이 센서의 유효측정거리 한계로 규정된 120 cm보다 멀어질 경우 반사율지표 측정치는 크게 감소되며 측정오차를 나타냈다. 반면에 엽을 bottom-up 방법으로 제거한 경우 반사율지표 gNDVI와 rNDVI는 하위엽이 차례로 제거되며 건물중이 줄어드는 변화와 관계없이 상위엽 캐노피의 측정

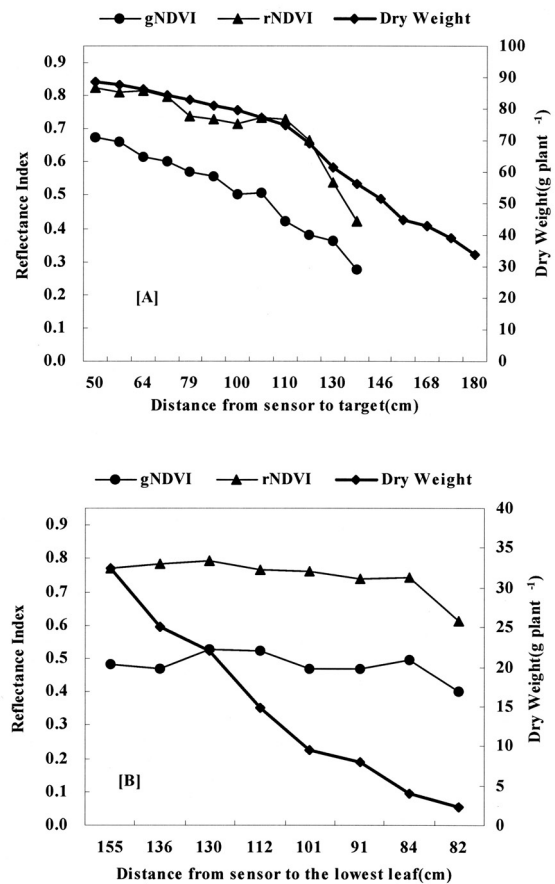


Fig. 6. Changes of NDVI by GreenSeeker™ and dry weight of tobacco at different sensing distances from sensor to target made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

치로서 일정한 값을 지속하였다. 그러나 하위 엽들이 제거되고 남아있는 상위엽이 4-5매(센서로부터 84 cm 이하) 조건에서 추가로 하위엽이 제거될 때는 건물중이 감소함에 따라 gNDVI와 rNDVI는 약간 감소하는 감응을 보였다. 따라서 능동형 센서인 GreenSeeker™에 의한 반사율 지표값은 수동형 센서들 및 Crop Circle ACS-210™의 반사율지표들과 동일한 경향으로 유효 측정거리로 규정된 80-120 cm범위 내에서 하위엽보다 상위엽의 캐노피 형태에 따라 크게 영향 받았다.

엽위분포별 Crop Circle ACS-210™ 센서지표와 건물중의 상대비율 엽 제거방법에 따른 연초 엽위분포별 건물중과 Crop Circle ACS-210™의 반사율지표 aNDVI와 rNDVI의 상호관계를 상대비율 값으로 Fig. 7과 8에 나타냈다. 엽을 상위 엽으로부터 하위 18매 엽까지 차례로 제거하는 top-down 방법에서 연초 건물중이 약 40 %까지 직선적으로 감소될 때 반사율지표 aNDVI(Fig. 7)와 rNDVI(Fig. 8)의 상대비율 값은

동일한 기울기로 약 50 %까지 직선적으로 감소되는 비례관계를 보였으며 특히 rNDVI는 aNDVI보다 건물중 감소 기울기와 더 일치하였다. 이러한 결과는 Crop Circle ACS-210™가 상위엽 캐노피의 건물중 변화를 검출하는 능력이 다른 수동형 센서들보다 현저하게 양호하다는 것과 또한 rNDVI가 aNDVI보다 더 양호하다는 것을 시사하고 있다. 그러나 엽을 하위 15번째 엽부터 상위 엽까지 차례로 제거하는 bottom-up 방법에서 연초 건물중은 약 10 %까지 감소되었으나 반사율지표들은 상위 4매 엽까지 하위 엽들을 제거하여도 거의 변화되지 않고 상위엽 캐노피에 대한 측정값으로 일정하게 지속되었다. 이러한 결과는 수동형 센서들에 대한 엽위분포별 반사율지표들의 상대비율 값에 대한 평가결과와 동일한 경향이였다. 즉 지상부 원격측정 센서들의 반사율지표들은 측정식물의 상위엽 캐노피 형태특성에 따라 좌우된다는 것을 보여주었다.

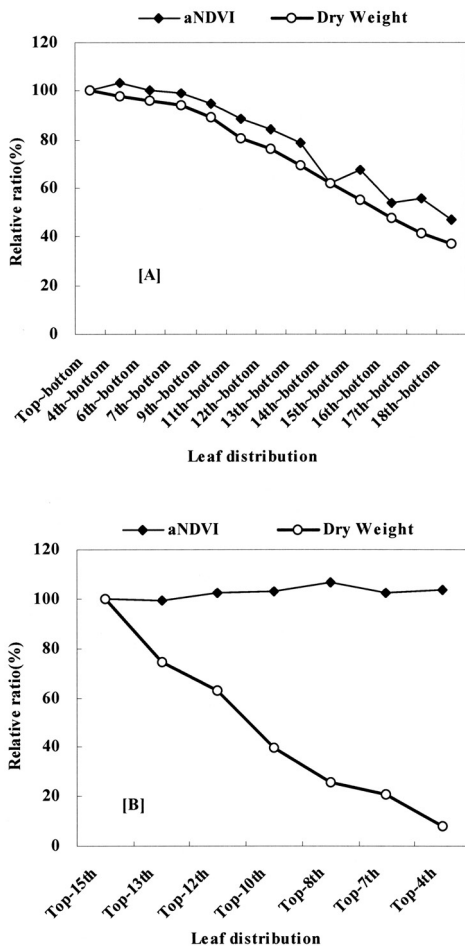


Fig. 7. Changes of relative ratio of aNDVI by Crop Circle ACS-210™ active sensor and relative dry weight of tobacco at different stalk positions made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

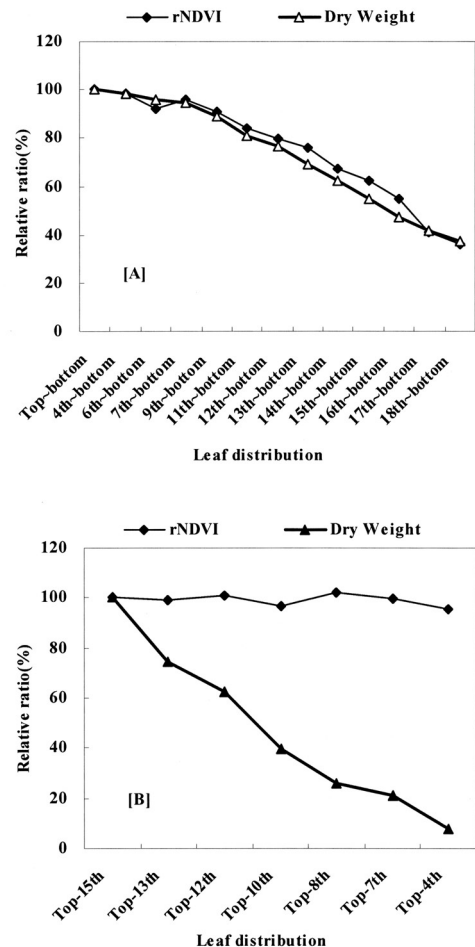


Fig. 8. Changes of relative ratio of rNDVI by Crop Circle ACS-210™ active sensor and relative dry weight of tobacco at different stalk positions made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

엽위분포별 GreenSeeker™ 센서지표와 건물중의 상대 비율 Crop Circle ACS-210™의 센서와 동일한 방법으로 엽 제거방법에 따른 연초 엽위분포별 건물중과 Crop Circle, ACS-210™의 반사율지표 gNDVI와 rNDVI의 상호관계를 상대비율 값으로 Fig. 9와 10에 나타냈다. 엽을 상위 엽으로부터 하위 15매 엽까지 차례로 제거하는 top-down 방법에서 연초 건물중이 약 60 %까지 직선적으로 감소될 때 반사율지표 gNDVI(Fig. 9)의 상대비율 값은 비슷한 기울기로 약 30%까지 더 크게 감소되는 비례관계를 보였으나 rNDVI(Fig. 10)의 상대비율 값은 건물중의 상대비율 값과 같은 기울기로 약 60 %까지 감소되는 비례관계를 보였다. 이러한 결과는 GreenSeeker™의 rNDVI는 gNDVI보다 연초 건물중 변화를 검출하는 능력이 더 양호하다는 것을 시사하고 있다. 그러나 엽을 하위 15 번째 엽부터 상위 엽까지 차례로 제거하는 bottom-up 방법에서 연초 건물중은 약 10 %까지 감소되었으나 반사율지표들은 상위 5매 엽까지 하위 엽들을 제거하

여도 거의 변화되지 않고 상위엽 캐노피에 대한 측정값으로 일정하게 지속되었으며 상위 4매 엽까지 제거해야 약간 감소되는 감응을 나타냈다. 이러한 결과는 모든 지상원격측정 센서들에 대한 엽위분포별 반사율지표들의 상대비율 값에 대한 평가결과와 동일한 경향이였다. Kang(2007)은 옥수수 14개 엽이 전개되었던 R1 생육시기에 본 연구와 동일한 엽 제거방법으로 평가한 결과 GreenSeeker-red 센서 측정치에 미치는 영향은 상위엽 4개가 대부분을 차지한다는 본연구와 유사한 결과를 보고하였는데 이는 센서로부터 방출된 복사선이 상위에 분포하는 엽면적에 따라 반사되는 정도가 크게 영향받기 때문이다.

연초 엽위별 건물중과 반사율 지표의 상관 연초 엽 제거방법에 따른 지상원격측정 센서들의 측정효율을 평가한 결과에서 각 센서들의 반사율지표는 상위엽 캐노피 형태에 좌우되는 것으로 밝혀졌다. 따라서 이식 후 70일째 연초의 엽위를 상엽, 중엽, 하엽으로 3등분하여 건물중과 능동형 센서 반사율지표들의 상

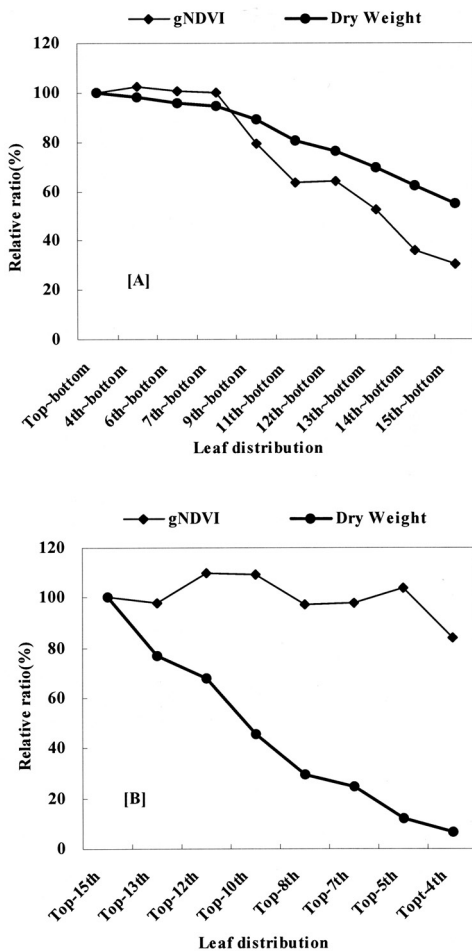


Fig. 9. Changes of relative ratio of gNDVI by GreenSeeker™ active sensor and relative dry weight of tobacco at different stalk positions made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

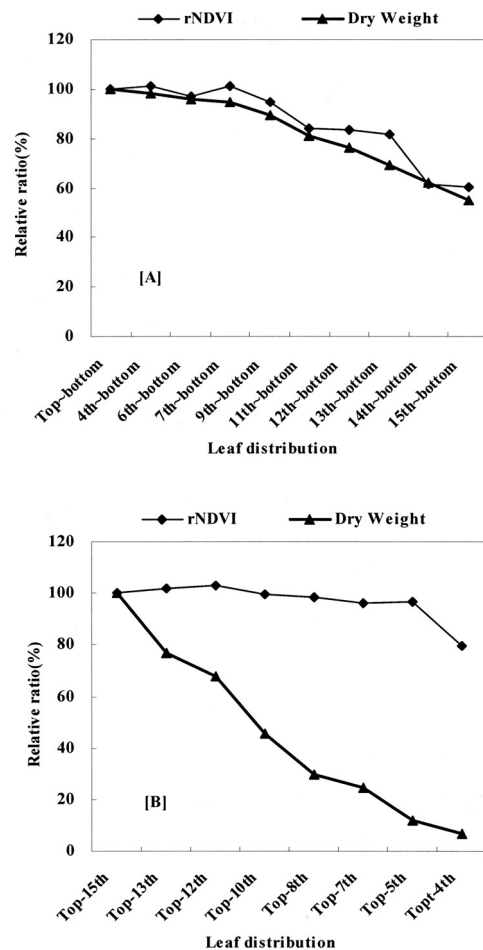


Fig. 10. Changes of relative ratio of rNDVI by GreenSeeker™ active sensor and relative dry weight of tobacco at different stalk positions made by removal method of leaves. [A] Top-down removal and [B] Bottom-up removal.

Table 2. Correlation coefficient between vegetation indices by active sensors and dry weight of tobacco leaves at different stalk position (n=23).

Sensor	Index	Dry weight of tobacco leaves		
		Top	Middle	Bottom
Crop Circle ACS-210™ (red)	rNDVI	0.647**	0.513**	0.062
Crop Circle ACS-210™ (amber)	aNDVI	0.654**	0.526**	0.226
Greenseeker™ (red)	rNDVI	0.524**	0.335*	0.098
Greenseeker™ (green)	gNDVI	0.584**	0.424**	0.224**

*,** : Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

관계수를 Table 2에 나타냈다. 이들 반사율지표들은 역시 엽 제거방법에서 평가한 결과와 동일하게 상업의 건물중과 가장 밀접한 상관을 보였으며, 특히 능동형 센서인 Crop Circle ACS-210™ aNDVI와 rNDVI의 상관관계수가 가장 컸다. 이와 같이 센서 반사율지표에 의한 작물의 생체량 혹은 건물중 평가에 대한 양호한 효율성은 본 연구의 연초이외에도 벼(Kim Y.H. and S.Y. Hong, 2007; Kong H.Y., 2007), 옥수수(Kang S.S, 2007; Hong S.D and J.J Kim, 2003), 및 고추(Kim H.K., 2006)에서도 동일한 결과들이 보고되었다.

따라서 모든 지상원격측정 센서들에 대한 유효측정거리 평가와 엽위분포별 상대비율 평가를 종합하여 비교해 볼 때 모든 반사율 측정치는 수동형과 능동형 센서의 종류에 관계없이 목표식물의 하위엽보다 상위엽의 캐노피 형태에 따라 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 연초 건물중 변화를 검출하는 능력은 수동형 센서보다 능동형 센서가 양호한 경향이었으며 센서 및 반사율지표들 간에는 Crop Circle ACS-210™ red > Crop Circle ACS-210™ amber = GreenSeeker™ red > Crop Circle™ 수동형 > GreenSeeker™ green > spectroradiometer SD2000™의 순으로 검출능력이 감소되었다. Kang(2007)은 옥수수에 대한 측정영역 및 유효거리를 평가한 결과 능동형 센서의 경우 Crop Circle ACS-210이 GreenSeeker보다 낮은 측정치의 변동계수를 보이며 더 양호하다는 동일한 결과를 보고하다. 또한 센서와 목표물까지의 거리가 증가함에 따라 표준편차와 변동계수가 증가하여 GreenSeeker 센서는 90±20cm의 범위 내에서 Crop Circle ACS-210센서는 90±10cm의 범위 내에서 일정 거리를 유지하며 측정하는 것이 바람직하다고 제안하였는데 본 연구에서도 측정거리가 120 cm 초과할 경우 반사율지표는 크게 감소하였다.

적 요

사경제배에서 이식후 70일 동안 생육된 연초 식물체를 이용하여 지상원격측정 센서들의 유효 측정거리와 측정 효율성을 평가하였다. 센서의 측정거리와 목

표물의 캐노피 형태는 연초 엽의 제거방법을 상위엽부터 하위엽으로 차례로 제거하는 top-down 방법과 하위엽부터 상위엽으로 차례로 제거하는 bottom-up 방법으로 구분하여 조절하였다. 시험에 적용된 센서들은 수동형 센서로서 Crop Circle™과 Spectroradiometer 그리고 능동형 센서는 Crop Circle ACS-210™ red와 amber 및 GreenSeeker™ red와 green 등 4개 종류를 비교하였다. 검토된 모든 센서들의 반사율지표는 수동형과 능동형 센서의 종류에 관계없이 연초식물의 하위엽보다 상위엽의 캐노피 형태에 따라 크게 영향을 받았다. 비교 검토된 측정거리보다 큰 213 cm의 유효거리를 갖는 Crop Circle™(ACS210)에 의한 반사율지표들은 센서의 유효거리가 제한되지 않은 수동형 센서의 경우와 동일하게 측정거리에 따른 차이를 보이지 않았다. 그러나 유효거리 80-120cm로 제시된 Greenseeker™ 능동형 센서는 유효측정거리의 한계로 규정된 120 cm보다 멀어질 경우 반사율지표는 크게 감소되고 측정오차를 보여 센서별로 규정된 유효 측정거리는 반드시 지켜야 하는 것으로 확인되었다. 연초 엽의 top-down 제거방법에 따른 건물중과 반사율지표의 상대비율로 상호관계를 평가한 결과 건물중 변화를 검출하는 능력은 수동형 센서보다 능동형 센서가 양호한 경향이었으며 센서 종류별로는 Crop Circle ACS-210™ red > Crop Circle ACS-210™ amber = GreenSeeker™ red > Crop Circle™ passive > GreenSeeker™ green > spectroradiometer의 순으로 측정효율이 감소되었다.

사 사

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

Bauer, M.E., 1975. The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops, *Advance in Agronomy*. 27:271-304.
 Carter, G.A. 1993. Responses of leaf spectral reflectance to plant

- stress. *American Journal of Botany*. 80(3):239-243.
- Cater, G.A. and A.K. Knapp. 2001. Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*. 88(4):677-684.
- Cater, G.A. and B.A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. *J. Environ. Qual.* 31:1424-1432.
- Chappelle, E.W., M.S. Kim, and J.E. McMurtrey. 1992. Ratio analysis of reflectance spectra(RARS)-An algorithm for the remote estimation of the concentration of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sens. Environ.* 39(3):239-247.
- Deering, D.W., Jr., J.W. Rouse, R.H. Haas, and J.A. Schell. 1975. Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data, Proceedings of the 10th International Symposium on remote sensing of environment, 06-10 October, Ann Arbor, Michigan (ERIM). 2:1169-1178.
- Gitelson, A.A., M.N. Merzlyak, and H.K. Lichtenthaler. 1996. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *J. Plant Physiology*. 148:501-508.
- Gitelson, A.A., M.N. Merzlyak, and O.B. Chivkunova. 2001. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology* 74(1) : 38-45.
- Gausman, H.W. (1974) Leaf reflectance of near-infrared. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 40(2):183-191.
- Gausman, H.W. 1977. Reflectance of leaf components. *Remote Sensing of environment*. 6(1):1-9.
- Gilabert, M.A., J. Gonzalez-Piqueras, F.J. Garcia-Haro, J. Melia. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 82:303-310.
- Hatfield, J.L. and P.J. Pinter, Jr. 1993. Remote sensing for crop protection. *Crop protection*, 12(6):403-414.
- Hong, S.D. and J.J. Kim. 2003. Agricultural application of ground remote sensing. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(2):92-103.
- Huete, A.R. 1988. Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. *Remote Sensing of Environ.* 25:89-106.
- Jackson, R.D., 1983. Spectral indexes in N-space, *Remote Sensing of Environment* 13(5):409-421.
- Jackson, R.D. (1986) Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology*. 24:265-287.
- Jackson, R.D., and A.R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indexes. *Preventive Veterinary Medicine*. 11(3-4):185-200.
- Kang S.S. 2007. Evaluation for Biomass and Nitrogen Nutrition of Crops by Reflectance Indices of Ground-based Remote Sensors. Ph.D. Thesis, Chungbuk National University, Korea.
- Kim H.K. 2006. Estimation of red pepper(*Capsicum annum* L.) biomass by reflectance indices with ground-based remote sensor. Master's Thesis, Chungbuk National University, Korea.
- Kim Y.H., and S.Y. Hong. 2007. Estimation of nondestructive rice leaf nitrogen content using ground optical sensors. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(6):435-441.
- Knipling, E.B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1:155-159.
- Kong H.Y. 2007. Estimation of N-fertilizer level and production of rice(*Oryza sativa* L.) using ground-based remote sensor. Master Thesis, Chungbuk National University, Korea.
- Lillesand, T.M., R.W. Kiefer, and J.W. Chipman. 2004. Remote sensing and image interpretation. 5th ed. John Wiley & Sons, New York.
- Osborne, S.L., J.S. Schepers, D.D. Francis, and M.R. Schlemmer, 2002a. Use of spectral radiance to estimate in-season biomass and grain yield in nitrogen- and water-stressed corn. *Crop Sci.* 42:165-171.
- Slaton, M.R., E.R. Hunt, and W.K. Smith, 2001. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics, *American Journal of Botany*, 88(2):278-284.
- Richardson, A.J., and C.L. Wiegand. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 43:1541-1552.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring
- Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.E. Escobar, and A.H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment* 35 : 105-119.