

스펙트로레디오메터를 이용한 벼 생장시기의 분광반사 특성 변화 분석*

장세진¹ · 서애숙¹ · 김판기² · 윤진일³

Analysis of Spectral Reflectance Characteristic Change during Growing Status of Rice Plants using Spectroradiometer*

Se-Jin Jang¹ · Ae-Sook Suh¹ · Pan-Gi Kim² · Jin-Il Yun³

요 약

관심있는 농작물의 반사 특성에 대한 지식은 우리에게 농업 분야에서의 원격탐사 활용에 대한 가능성을 제공한다. 본 연구에서는 일품벼의 이앙기에서 수확기까지의 성장 단계에 따른 반사 특성을 측정 및 분석하였다. 벼는 1999년 5월 20일에 경기도 수원시 서둔동 수원기상대(37°16' N, 126°59' E, 39m Alt.) 뒤에 위치한 3개의 실험 포장에 이앙되었다. 반사 특성 측정은 구름과 바람이 없는 맑은 날을 선택하여 300nm에서 1100nm까지 관측할 수 있는 휴대용 스펙트로레디오메터(Portable spectroradiometer, Li-1800, 미국 Li Cor Inc.)를 사용하였고 관측 시간은 태양 고도 변화에 따른 반사율의 변화를 최소화하기 위하여 태양 고도 변화가 가장 적은 오전 11시에서 오후 1시까지 수행하였다. 관측 높이는 벼 군락으로부터 30cm였고 측정 회수는 1일 3개 포장에 대해 수직 방향으로 각각 3회 관측하였다. 결과적으로, 벼의 경우 가시 영역의 평균 반사율이 청색 영역(400nm~498nm)에서 약 2.34%~2.55%, 녹색 영역(500nm~598nm)에서 약 5.05%~6.01% 그리고 적색 영역(600nm~698nm)에서 약 4.21%~5.24%이며, 벼의 성장 단계에 따라 가시 영역의 경우는 반사율이 감소함을 알 수 있었다. 또한 근적외 영역의 경우는 관측 결과에 따라 두 가지 경우로 나누어 분석을 하였는데, 첫 번째는 700nm~800nm까지 파장의 증가에 따라 반사율이 급격히 증가하는 영역과 800nm~1100nm까지 파장에 따라 반사율이 거의 일정한 영역이다. 이 영역들의 평균 반사율은 700nm~800nm에서 약 22.3%~23.0%, 800nm~1100nm에서는 약 29.4%~33.1%이다. 특히 이 영역은 8월 23일까지 벼의 성장에 따라 반사율이 증가하였으며, 그 이후에는 감소하는 경향을 나타내었다.

주요어: 벼, 분광 특성, 반사율, 스펙트로레디오메터

2000년 9월 8일 접수 Received on September 8, 2000

* 본 연구는 학술진흥재단의 1998년도 과학기술기초중점연구(사업명:농업과학연구-NICEM 기기 활용 연구)과제로 지원한 “스펙트로레디오메타 장비를 이용한 작물의 생육단계 따른 반사스펙트럼의 특성” 사업의 일환으로 수행 되었음

1 기상청 기상연구소 원격탐사연구실 Remote Sensing Lab. Meteorology Research Institute, METRI-KMA

2 서울대학교 농업과학공동기기센터 National Instrumentation Center for Environmental Management, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

3 경희대학교 생명자원과학연구원/농학과 (jiyun@nms.kyunghee.ac.kr)

Department of Agronomy/Institute of Life Science and Natural Resource, Kyunghee University

ABSTRACT

Knowledge for reflectance characteristic of interesting targets will provide us with actual application of remote sensing on agriculture. In this study, we have measured and analyzed reflectivity characteristics based on growing status from transplanting time to harvesting time. Rice paddies transplant into 3 fields at 20, May, 1999. Measurement of reflectivity characteristics were carried out with a portable spectroradiometer for frequencies from 300nm to 1100nm during the time period from 11:00 AM to 01:00 PM of clear sky and calm a day. The measurements for a day repeated 3 times(also, 3 times to each measurement)for reliable values. In result, we found that averaged reflectivity of visible range has about 2.34% - 2.55% in blue region(400nm-498nm), about 5.05% - 6.01% in green region(500nm-598nm) and about 4.21% - 5.24% in red region(600nm-698nm). It must be noted that the more rice canopy grows, the more spectral reflectivity decreases in visible region. Also, we separated infrared region into two cases - One case is increasing region with 700nm-780nm, the other is fixed region with 800nm-1100nm. Averaged reflectivity of these regions has about 22.3% - 23.0% in increasing region, about 29.4% - 33.1% in fixed region. It must be noted that more rice canopy grows, the more spectral reflectivity also increases up to 23, Aug. in infrared region. After 23, Aug, the reflectivity has a tendency toward decrease.

KEYWORDS: Rice, Spectral Characteristic, Reflectivity, Spectroradiometer

서론

원격탐사(remote sensing)는 관측 대상을 직접 접촉하지 않고 그 대상의 존재, 성격, 모양, 색깔 등을 감지하거나 식별하는 것을 말한다(Remote Sensing Note, 1993). 위성 기술의 발전과 더불어 생활 곳곳에서 작업의 효율성과 인간 활동의 한계를 극복하며 실시간의 주기적 자료 수집을 위하여 원격탐사에 기반한 연구 및 조사 작업의 필요성이 제기되고 있다. 농업 분야의 원격 탐사의 활용은 작물 구별, 작황 진단, 수확량 예측 등에 사용될 수 있으며(이정택 등 1997a, 1997b; Shibayama와 Munakata, 1986a, 1986b; Inoue와 Iwasaki, 1991), 인공위성으로부터 단위면적 당 작물 수확량을 알아내기 위해서는 작물 재배지역의 반사 스펙트럼의 차이에 기초하여 수확량 결정에 중요한 작물 생체 정보 및 상태를 분석하고 대상 작물의 최종적인 수확량을 추정 예

측하여야 한다(홍석영 등 1998; Shibayama 등 1993).

그러나 이 모든 과정은 지표상의 피복별, 관측 대상별 반사 특성의 이해를 전제로 하고 있으며(Remote Sensing Note, 1993) 벼 군락의 경우도 예외일 수 없다(Shibayama와 Munakata, 1986a, 1986b; Shibayama와 Akiyama, 1986a, 1986b). 일반적인 여러 지표 대상의 파장대별 반사특성을 살펴보면 눈(snow)의 경우, 가시영역에서 높고 적외선 영역에서는 낮으며 건조 토양의 경우는 적외선 영역으로 갈수록 높다. 또한 벼의 경우 가시광선 영역에서는 낮은 반사율을 근적외선 영역에서는 상대적으로 높은 반사율을 보이고 있다(Lillesand와 Kiefer, 1994; Remote Sensing Note, 1993). 본 연구는 이양 후 출수, 수확기까지의 3개 포장의 벼를 대상으로 생육 단계에 따른 반사광을 측정하여 시기별 분광 특성을 이해함을 목적으로 하고 있다.

재료 및 방법

본 연구에서는 휴대용 분광복사계(Li-1800, Li Cor Inc.)를 사용하여 벼 군락으로부터 반사되는 빛을 관측하였는데, 이 기기는 cosine receptor 또는 fiber optic probe의 remote cosine receptor(Li-1800-10, Li Cor Inc.)에 입사한 빛을 분광기로 파장별로 분광하여 그 에너지를 실리콘 디텍터로 측정한다. remote cosine receptor는 15°의 FOV(field of view) 내의 전천광(全天光) 또는 식물 군락내의 산란광(散亂光), 반사광(反射光) 등의 파장조성(波長組成), 즉 광질(light quality)을 측정할 수 있으며, 측정 파장역은 cosine receptor를 사용하는 경우는 300~1,100nm이고, remote cosine receptor의 경우 330~1,100nm이다.

관측은 1999년 5월 20일에 벼를 이앙한 3개 포장을 대상으로 진행하였으며, 물의 높이는 12cm이고 관측 높이는 벼 군락으로부터 30cm이다. 관측시 고려한 환경 조건은 대기의 변화에 따른 반사율의 변화(Shibayama와 Wiegand, 1985)가 비교적 적은, 바람이 없고 구름이 없는 맑은 날에 수행하였다(표 1). 관측은 10~20일 간격으로 시행하였으며, 3회 반복 측정하였다. 태양 고도 변화에 의한 반사율

의 변화를 최소화하기 위하여, 태양 고도의 변화가 적은 정오 무렵(오전 11시~오후 1시)에 진행하였다. 관측 파장 범위는 390nm에서 1100nm까지이며, 관측 간격은 2nm 간격이다.

관측 방법은 태양의 입사광에 대한 전반사량을 구하기 위하여 전반사 물질인 BaSO₄를 입힌 판에 대한 반사량을 벼 군락과 동일한 높이에서 수직으로 1회 측정하고 전반사 판을 제거한 이후에 벼 군락을 대상으로 하여 같은 방법으로 반사량을 2~3회 측정하여, 아래 식 1에 대입 반사율을 계산한다(Remote Sensing Note, 1993).

$$\text{반사율(\%)} = \frac{\text{벼군락이 반사하는 반사광의 양}}{\text{전반사물질이 반사하는 반사광의 양}} \times 100 \quad (1)$$

또한 관측 간격이 모두 상이해서 서로 비교할 수 없는 것을 극복하기 위하여 각 파장별 반사율의 차이를 관측 간격으로 식 (2)와 같이 나눔으로써 일일 반사증감율을 계산하여 정량적인 비교를 가능하게 하였다.

$$\text{반사증감율} = \frac{\text{해당관측기간의 반사율변화의 차}}{\text{해당 관측 기간}} \quad (2)$$

TABLE 1. Date, number, interval of observation

Date	11 Jun.	19 Jun.	30 Jun.	6 Jul.	20 Jul.	10 Aug.	23 Aug.	15 Sep.
Observation time	12:00	12:00	11:50	11:50	12:30	11:40	11:00	11:20
	~ 13:00	~ 12:35	~ 12:30	~ 12:50	~ 13:25	~ 12:20	~ 12:10	~ 12:05
Observation number *	A-2	A-3	A-2	A-2	A-3	A-3	A-2	A-2
	B-2	B-2	B-2	B-2	B-3	B-3	B-2	B-2
	C-2	C-3	C-3	C-2	C-3	C-3	C-3	C-2
Weather condition	clear	cloudy	clear	cloudy	clear	clear	cloudy	clear
Remark	effect of effect of water water							
Observation interval (day)		8	11	6	14	20	13	22

* A, B, C are name of fields

반사 증감율은 관측기간 동안의 일별 반사율의 증감율을 나타내며, 부호가 -이면 반사율이 기간이 경과됨에 따라 감소하는 것이고, +이면 증가하는 것이다. 또한 증감율이 클수록 동일한 기간에 반사율이 상대적으로 크게 증가하거나 감소하는 것을 의미한다.

자료의 분석은 모두 5개 영역으로 나누어 이루어졌는데, 가시광선 영역에서는 청색(400nm~498nm), 녹색(500nm~598nm), 적색(600nm~698nm) 영역의 3개 영역, 근적외선 영역에서는 반사율이 파장 변화에 따라 급격히 증가하는 700nm~798nm 영역, 파장의 변화에 따라서 거의 일정하게 유지되는 800nm~1,100nm 영역의 2개 영역으로 나누어 모두 20nm 간격으로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 가시광선 영역(400nm~698nm)

그림 1은 가시광선 영역의 청색, 녹색, 적색 영역에 해당하는 시기별 각 포장의 평균 반사율 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 청색 영역에서 포장 A의 경우 최대 반사율은 6월 11일 460nm에서 6.35%이고 최소 반사율은 8월 10일 400nm에서 0.87%, 포장 B의 경우 최대 반

사율은 6월 11일 460nm에 6.22%, 최소 반사율은 8월 10일 400nm에서 0.93%, 포장 C의 경우 최대 반사율은 6월 11일 480nm에 5.9%, 최소 반사율은 8월 10일 400nm에 0.88%이다. 전반적으로 낮은 반사율을 가지고 있으며 평균 반사율은 2.44%이다. 녹색 영역의 경우, 포장 A는 최대 반사율이 9월 15일 560nm에서 10.6%이고 최소 반사율은 8월 10일 500nm에서 1.72%, 포장 B는 최대 반사율이 6월 11일 580nm에 8.54%, 최소 반사율은 7월 20일 500nm에서 1.86%, 포장 C의 경우 최대 반사율은 6월 11일 580nm에 9.35%, 최소 반사율은 8월 10일 500nm에 1.62%이다. 전반적인 녹색 영역의 반사율은 청색이나 적색 영역에 비하여 상대적으로 높음을 볼 수 있으며 평균 반사율은 5.55%이다. 적색 영역의 포장 A의 경우 최대 반사율은 6월 11일 600nm에서 10.2%이고 최소 반사율은 8월 10일 680nm에서 1.55%, 포장 B의 경우 최대 반사율은 6월 11일 620nm에 8.68%, 최소 반사율은 7월 20일 680nm에서 1.87%, 포장 C의 경우 최대 반사율은 6월 11일 620nm에 9.81%, 최소 반사율은 8월 10일 680nm에 1.58%이다. 전체적인 적색 영역의 반사율은 청색 영역보다는 크고 녹색 영역보다 작음을 알 수 있고 평균 반사율은 4.68%의 범위를 가지고 있다.

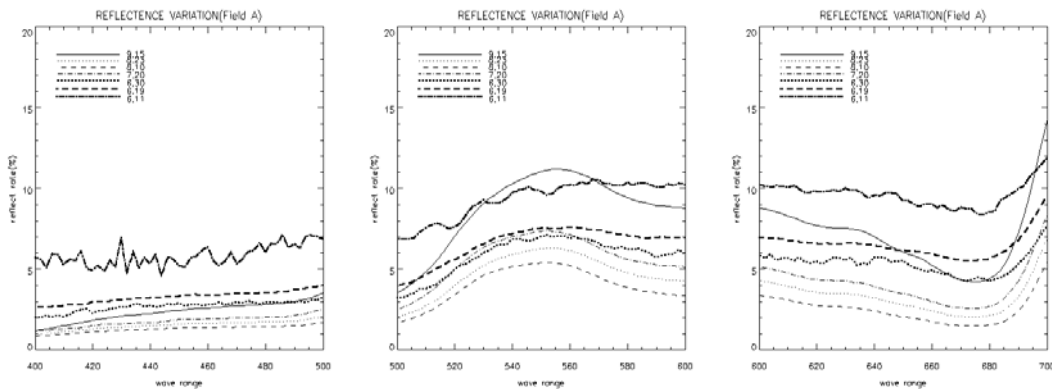


FIGURE 1. Averaged reflectivity of visible wavelength range(blue, green, red)

표 2의 반사증감율을 보면 처음 6월 11일에서 19일로의 반사증감율이 다른 부분에 비하여 상당히 큰 것을 알 수 있는데 그 이유는 6월 11일의 반사 특성의 경우 벼 군락의 반사 특성이기보다는 포장 내에 존재하는 물의 반사 특성에 영향을 많이 받기 때문이다. 따라서 이후 분석에서 이 부분의 큰 변화는 벼 군락의 특성을 나타내지 않는다고 판단하여 6월 19일 이후의 자료를 중심으로 분석을 전개해야만 한다. 표에서 보면 가시광선의 청색, 녹색, 적색 영역의 시기별 반사율은 이양 초기부터 8월 10일까지의 반사율은 전반적으로 감소하는 모습으로 나타나고 있고 8월 10일 이후 상승하고 있다. 또한 반사증감율이 최대인 기간은 6월 19일에서 6월 30일 사이로 벼 군락의 성장과 함께 물에 의한 반사특성이 대폭 감소되기 때문인 것으로 여겨진다.

2. 근적외선 영역(700nm~1,100nm)

그림 2는 근적외선 영역의 700nm~800nm과 800nm~1,100nm에 해당하는 시기별 각 포장의

반사율 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 700~800nm의 경우, 포장 A는 최대 반사율이 8월 23일 780nm에서 41.6%이고 최소 반사율은 8월 10일 700nm에서 5.5%, 포장 B의 경우 최대 반사율은 8월 23일 780nm에 46.3%, 최소 반사율은 7월 20일 700nm에서 10.6%, 포장 C의 경우 최대 반사율은 8월 23일 780nm에 49.3%, 최소 반사율은 8월 10일 700nm에 5.0%이다. 전체적으로 보면 가시광선 영역과 가까운 700nm에서 최소 반사율을 근적외선과 가까운 780nm에서 최대 반사율을 갖고 있으며 평균 반사율은 22.7%이다. 800nm~1,100nm에 해당하는 시기별 각 포장의 반사율 변화를 살펴보면, 포장 A의 경우 최대 반사율은 8월 23일 1080nm의 44.2%이고 최소 반사율은 6월 11일 1000nm의 9.8%, 포장 B의 경우 최대 반사율은 8월 23일 880nm의 48.4%이고 최소 반사율은 6월 11일 980nm의 6.5%, 포장 C의 경우 최대 반사율은 8월 23일 1060nm의 50.3%이고 최소 반사율은 6월 11일 1000nm의 6.7%이다. 이양 후 계속적인 벼 군락의 성장과 함께 반사율이 증가하고 있으며 평균 반사율은 31.4%이다.

TABLE 2. Rate of increase and decrease for visible range

(nm) wavelength		date		11 Jun.	19 Jun.	30 Jun.	20 Jul.	10 Aug.	23 Aug.
		11 Jun.	19 Jun.	30 Jun.	20 Jul.	10 Aug.	23 Aug.	15 Sep.	
blue	400	-0.39378	-0.05068	-0.04186	-0.01511	0.01118	0.00846		
	420	-0.24708	-0.06403	-0.03741	-0.01797	0.01343	0.02079		
	440	-0.26249	-0.04194	-0.05241	-0.01940	0.01528	0.02908		
	460	-0.36689	-0.05437	-0.04338	-0.02496	0.01880	0.03756		
	480	-0.30764	-0.05432	-0.04585	-0.02763	0.02133	0.04271		
green	500	-0.35453	-0.07043	-0.03435	-0.03909	0.027697	0.058194		
	520	-0.25129	-0.05524	0.000314	-0.07402	0.042299	0.117134		
	540	-0.31144	-0.03230	0.0008003	-0.08887	0.057011	0.169603		
	560	-0.32452	-0.06582	0.012026	-0.09154	0.072923	0.193676		
	580	-0.40972	-0.08123	-0.02892	-0.08435	0.069596	0.184220		
red	600	-0.40626	-0.09805	-0.03757	-0.08342	0.068180	0.179818		
	620	-0.40351	-0.10471	-0.05498	-0.07571	0.062922	0.164545		
	640	-0.38922	-0.06614	-0.08930	-0.07275	0.061852	0.153372		
	660	-0.38938	-0.09310	-0.09539	-0.05853	0.049589	0.115607		
	680	-0.35497	-0.13275	-0.07477	-0.05566	0.044573	0.094695		

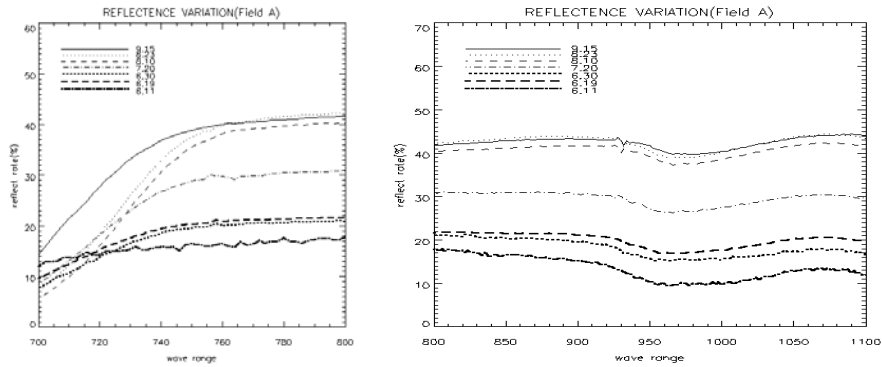


FIGURE 2. Averaged reflectivity of infrared wavelength range

표 3의 근적외선의 상승 영역 반사증감율을 보면 일반적으로 계속 증가를 하고 있지만, 6월의 경우가 가장 큰 것으로 나타난다. 그 이유는 벼 군락이 포장의 물을 가림으로써 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 일반적으로 잎의

공기층은 적외선 영역을 반사하는 것으로 알려져 있기에 벼의 군락이 성장해 감에 따라 급속히 증가하는 것이다. 또한 일정 영역의 경우 시간이 경과할수록 반사증감율이 감소하다가 는 8월 23일을 기점으로 상승을 멈추거나

TABLE 3. Rate of increase and decrease for infrared range

Date		11 Jun.	19 Jun.	30 Jun.	20 Jul.	10 Aug.	23 Aug.
(nm) wavelength		19 Jun.	30 Jun.	20 Jul.	10 Aug.	23 Aug.	15 Sep.
700 ~ 780	700	-0.29296	-0.16869	0.037653	-0.13976	0.112902	0.291863
	720	0.122975	-0.13431	0.223465	-0.09978	0.181146	0.356909
	740	0.444450	-0.06851	0.409350	0.186543	0.174592	0.118265
	760	0.565038	-0.07975	0.489420	0.404029	0.123492	-0.03929
	780	0.465213	-0.06508	0.497200	0.435510	0.143954	-0.07535
800 ~ 1100	800	0.489025	-0.0678	0.500645	0.449976	0.154046	-0.07674
	820	0.520813	-0.08805	0.505825	0.470129	0.155385	-0.08038
	840	0.651663	-0.08915	0.52268	0.47609	0.169485	-0.06937
	860	0.617487	-0.10438	0.533145	0.491409	0.176885	-0.07307
	880	0.721287	-0.13041	0.54397	0.509043	0.177131	-0.07393
	900	0.743775	-0.1452	0.55273	0.528738	0.159315	-0.06798
	920	0.802475	-0.15887	0.564145	0.545024	0.142808	-0.06102
	940	0.928625	-0.20438	0.603885	0.556057	0.111438	-0.02642
	960	0.872789	-0.14889	0.55492	0.549538	0.097115	0.002939
	980	0.893148	-0.15821	0.563645	0.528286	0.098508	-0.0069
	1000	0.981476	-0.20629	0.60715	0.523505	0.130077	-0.02408
1020	0.962887	-0.23908	0.623525	0.549428	0.127892	-0.02904	
1040	0.93935	-0.24374	0.63575	0.552286	0.136177	-0.0383	
1060	0.873912	-0.23729	0.624175	0.564105	0.160939	-0.04186	
1080	0.938788	-0.24876	0.628685	0.572795	0.144738	-0.02389	
1100	0.951463	-0.26554	0.63735	0.580086	0.151077	0.003043	

감소하는 경향을 보이고 있다.

요약 및 결론

본 연구에서 3개 포장의 벼 성장 단계에 따른 반사 특성의 변화를 이앙 시기에서 수확 전의 기간 동안에 대하여 LI-1800 분광복사계를 이용하여 관측 분석해본 결과는 다음과 같다.

가시광선 영역의 경우 8월 10일을 기점으로 반사율이 감소하다 증가하고 있으며 관측 기간동안의 평균 반사율은 청색 2.43%, 녹색 5.54%, 적색 4.68%으로서 청색, 적색, 녹색 순으로 반사율이 높음을 알 수 있었다. 또한 시기별 최대 반사증감기는 6월 19일에서 30일 사이이다. 이 시기의 특징은 벼 군락의 성장과 함께 엽록소, 카로틴, 크산토펜과 같은 식물 색소에 의한 흡수가 일어나기 때문인 것으로 분석된다.

관측에서도 알 수 있듯이 700nm의 경우는 가시광선 영역의 성격을 많이 나타내기 때문에 근적외선의 경우는 720nm부터라 볼 수 있으며 벼 군락의 성장과 함께 지속적으로 증가함을 볼 수 있다. 700nm - 800nm의 평균 반사율은 22.7%, 800nm - 1100nm 영역의 경우 33.4%이다. 특히 이 영역의 반사 특성이 8월 23일까지 꾸준히 상승하지만 반사증감율은 감소하며 23일 이후 더 이상 증가하지 않고 감소하고 있는 것이 특징이다.

전반적으로 가시광선 영역의 반사율이 근적외선 영역 보다 작은 이유는 가시광선 영역의 경우 이앙 초기에는 물의 반사 특성의 영향으로 반사율이 작으며 군락의 성장에 따라서는 광합성에 사용됨으로써 반사율이 적게 되며, 근적외선 영역의 경우는 잎 내부구조 사이의 공기층의 영향으로 반사율이 높게 된다 (홍석영 등, 1998).

이렇게 얻어진 분광 특성에 대한 이해는 식생 지수를 이용한 벼 수확 재배 면적의 산출, 엽면적지수, 건물량 등과의 상관관계를 이

용하여 벼 수확량 예측 등을 위성을 통하여 추정할 수 있게끔 할 수 있다. 실제로 원격탐사 분야에서 식생 지수로 많이 사용하고 있는 것은 비율 식생 지수(ratio vegetation index)로서 가시광선과 근적외선에서의 두드러진 차이를 보이는 식물 반사 특성에 기초를 둔 것이라 할 수 있다. **KAGIS**

참고 문헌

- 이정택, 이춘우, 주문갑, 홍석영. 1997a. 태양광 반사율을 이용한 벼 군락의 엽면적지수 추정. 한국작물학회지 42(2) : 173-181.
- 이정택, 이춘우, 주문갑, 홍석영, 김한명. 1997b. 태양광 반사율을 이용한 벼 군락의 건물량 추정. 한국작물학회지 42(3) : 255-262.
- 홍석영, 이정택, 임상규, 정원교, 조인상. 1998. 분광반사특성을 이용한 벼의 성장량 추정. 한국원격탐사학회지 14(1) : 83-94.
- Lillesand, T. T. and R. W. Kiefer. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation(3rd ed.). John Wiley & Sons Inc. pp.49-147.
- Inoue, Y., K. Iwasaki. 1991. Spectral estimation of radiation absorptance and leaf area index in corn canopies as affected by canopy architecture and growth stage. Japan. Jour. Crop Sci. 60(4):578-580.
- Inoue, Y., S. Morinaga and M. Shibayama, 1993 : Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. Japan. Jour. Crop Sci. 62(3):462-469.
- Japan Association on Remote Sensing. 1993. Remote Sensing Note. Nihon Printing Co. Ltd. pp.2-55.
- Shibayama, M. and K. Munakata. 1986a. A spectroradiometer for field use II. Biomass estimates for paddy rice using 1,100 and 1,200nm reflectance. Japan. Jour. Crop Sci. 55(1):28-34.

- Shibayama, M. and K. Munakata. 1986a. A spectroradiometer for field use III. A comparison of some vegetation indices for predicting luxuriant paddy rice biomass. Japan. Jour. Crop Sci. 55(1):47-52.
- Shibayama, M. and T. Akiyama. 1986a. A spectroradiometer for field use VI. Radiometric estimation for chlorophyll index of rice canopy. Japan. Jour. Crop Sci. 55(4):433-438.
- Shibayama, M. and T. Akiyama. 1986b. A spectroradiometer for field use VII. Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies. Japan. Jour. Crop Sci. 55(4):439-445.
- Shibayama, M. and C. L. Wiegand. 1985. View azimuth and zenith, and solar angle effects in wheat canopy reflectance. Remote Sensing of Environment 18:91-103.
- Shibayama, M., W. Takahashi, S. Morinaga and T. Akiyama. 1993. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectroradiometer, Remote Sensing of Environment 45:117-126. **KAGIS**