

지상관측 레이더 산란계를 이용한 벼 군락의 후방산란계수 측정

홍석영*† · 홍진영** · 김이현* · 오이석**

*농업과학기술원 농업환경부 토양관리과, **홍익대학교 전파통신공학과

Measurement of Backscattering Coefficients of Rice Canopy Using a Ground Polarimetric Scatterometer System

Suk-Young Hong*†, Jin-Young Hong**, Yi-Hyun Kim*, and Yi-Sok Oh**

*National Institute of Agricultural Science and Technology, Rural Development Administration

**Department of Radio Science and Communication Engineering, Hongik University

Abstract : The polarimetric backscattering coefficients of a wet-land rice field which is an experimental plot belong to National Institute of Agricultural Science and Technology in Suwon are measured using ground-based polarimetric scatterometers at 1.8 and 5.3 GHz throughout a growth year from transplanting period to harvest period (May to October in 2006). The polarimetric scatterometers consist of a vector network analyzer with time-gating function and polarimetric antenna set, and are well calibrated to get VV-, HV-, VH-, HH-polarized backscattering coefficients from the measurements, based on single target calibration technique using a trihedral corner reflector. The polarimetric backscattering coefficients are measured at 30°, 40°, 50° and 60° with 30 independent samples for each incidence angle at each frequency. In the measurement periods the ground truth data including fresh and dry biomass, plant height, stem density, leaf area, specific leaf area, and moisture contents are also collected for each measurement. The temporal variations of the measured backscattering coefficients as well as the measured plant height, LAI (leaf area index) and biomass are analyzed. Then, the measured polarimetric backscattering coefficients are compared with the rice growth parameters. The measured plant height increases monotonically while the measured LAI increases only till the ripening period and decreases after the ripening period. The measured backscattering coefficients are fitted with polynomial expressions as functions of growth age, plant LAI and plant height for each polarization, frequency, and incidence angle. As the incidence angle is bigger, correlations of L band signature to the rice growth was higher than that of C band signatures. It is found that the HH-polarized backscattering coefficients are more sensitive than the VV-polarized backscattering coefficients to growth age and other input parameters. It is necessary to divide the data according to the growth period which shows the qualitative changes of growth such as panicle initiation, flowering or heading to derive functions to estimate rice growth.

Key Words : Polarimetric scatterometer, backscattering coefficient, rice canopy, LAI, biomass, plant height.

요약 : 본 논문은 지표면 현상의 관측에 날씨의 영향을 거의 받지 않는 마이크로파 L-밴드(1.95 GHz)와 C-밴드(5.3 GHz) scatterometer 시스템을 이용하여 농업과학기술원 내의 논에서 자라는 추청벼를 대상으로 2006년 5월 29일부터 10월 9일까지 생육에 따른 군락의 후방산란계수를 관측한 데이터와 작물의 생육과의 관계를 살펴보고 또한, 측정 시스템의 개요, 측정 시스템의 보정 방법들을 기술하고자 한다. Scatterometer 시스템의 송수신기로 HP 8753D 벡터 네트워크 분석기를 사용하며, 타워 위에 안테나를 설치하여 3.4 m의 높이에서 측정하도록 하였다. L-밴드와 C-밴드 scatterometer는 VV-, VH-, HV-, HH-편파를 측정하여 fully polarimetric한 데이터를 얻도록 설계된 레이더시스템으로 입사각을 30°~60°에서 10° 간격으로 각각 30개의 독립적인 샘플을 측정하여 통계적으로 후방산란계수를 얻었다. 타워에서 발생하는 전파 잡음과 안테나 패턴의 부엽에 의한 지면에서의 수직반사(coherent 성분) 전파를 제거하기 위해 네트워크 분석기의 time gating 기능을 사용하며, 55 cm 크기의 trihedral 전파반사기를 보정용 반사기로 사용하고, STCT(single target calibration technique) 방법을 이용하여 시스템을 보정하였다. 측정 결과를 분석하여 주파수, 입사각도, 편파의 변화에 대한 벼의 후방산란 특성과 벼의 생육상태와의 관계를 살펴보았다. L-밴드와 C-밴드 모두 벼의 생육과 밀접한 결과를 나타내었으나, 입사각이 작을 때는 C-밴드와의 상관성이 높게 나타났고 입사각이 커질수록 L-밴드와의 상관성이 높게 나타났다. 편파는 L-밴드와 C-밴드 모두 hh 편파가, 입사각은 50도에서 가장 생육의 변이를 잘 설명하는 것으로 나타났다. 생육 데이터 모두를 이용한 경우보다는 유수형성기 또는 출수기 등 벼 생육의 질적인 변화를 보이는 시기에 따라 나누어 분석하는 것이 변화추이를 더 잘 설명하는 것으로 나타났다.

1. 서론

아시아 몬순지대에 위치한 우리나라는 여름철에 집중되는 강우패턴과 고온다습한 기후특성으로 작물의 생육이 왕성한 시기의 광학영상을 취득하는데 많은 제약이 있다. 이러한 조건에서도 자료취득이 가능한 SAR 데이터를 활용하여 벼의 생육에 따른 레이더 산란특성 분석이나 scatterometer 시스템을 이용한 측정연구에 관심이 높아지고 있다. 벼농사를 짓는 충남 당진군 넓은 평야 지역에 대하여 벼 생육기간 동안 9시기의 RADARSAT (C-밴드; 5.3 GHz, HH)자료를 standard beam mode 5 또는 6으로 취득하여 캘리브레이션 과정을 통하여 지표면의 특성을 잘 나타내는 후방산란계수를 구한 후 초장, 엽면적지수, 현물중, 건물중 등 벼의 생육변수와와의 관계를 살펴 보고 회귀식을 구하였다. 벼의 생육초기 담수상태일 때 논외 후방산란계수의 범위는 -16~-13dB이었고, 벼의 영양생장이 최대에 달했을 때 -4.4dB~-3.1dB 범위로 그 차이가 생육단계별로 뚜렷한 차이를 보였다 (Hong *et al.*, 2000). 후방산란계수는 벼의 생육변수, 초장, 엽면적지수, 생체중, 건물중과 함수관계를 나타내었다. 엽면적지수는 출수기 전의 자료를 이용하여 영양생장기의 생육추정에 사용하도록 1차 다항식으로 표현

할 수 있었고, 건물중의 경우 2차 다항식으로 설명할 수 있었는데 벼가 분얼을 하는 동안까지는 생육이 증가함에 따라 후방산란계수가 증가하다가 그 후로는 더 이상 증가하거나 감소하지 않고 포화되어 유지되고 있는 것을 알 수 있었다(Hong *et al.*, 2000).

벼의 생육기간 동안 여러 주파수와 입사각, 편파로 관측하여 작물 군락에 대한 단순 산란모형과 microwave backscattering signatures와의 연관을 분석한 일본의 연구결과에서는, 주파수가 높은 Ka, Ku, X 밴드는 생육초기의 변화에 민감하였는데, σ^0 는 LAI 증가함에 따라 증가하였으나 그 후 반응이 없었다가 입사각이 클 때 이들 밴드의 σ^0 는 출수기까지는 감소하다가 그 후에는 수확기까지 증가하였다. C-와 L-밴드는 출수나 성숙과 같은 생리적인 생육변화보다는 바이오매스 생육과 더 밀접하게 관련이 있었다. 이와 반대로, Ka-와 Ku-밴드는 출수기 이후 벼 낱알의 생육변화에 매우 민감하였다(Inoue, 2003).

본 연구에서는 지표면 현상의 관측에 날씨의 영향을 거의 받지 않는 마이크로파 L-밴드(1.95 GHz)와 C-밴드(5.3 GHz) scatterometer 시스템을 이용하여 농업과학기술원 내의 논에서 자라는 추청벼를 대상으로 2006년 5월 29일부터 10월 9일까지 생육에 따른 군락의 후

방산란계수를 관측한 데이터와 작물의 생육과의 관계를 살펴보고 또한, 측정 시스템의 개요, 측정 시스템의 보정 방법들을 기술하고자 한다.

2. 연구 방법

1) L-밴드 및 C-밴드 레이더 산란계를 이용한 지상관측

농업과학기술원 구내 벼논을 대상으로 L 밴드의 표준 혼 안테나 두 개와 C 밴드의 OMT를 각각 삼각대(1.5 m)에 고정하여 타워 위(1.9 m)에 설치하였다. 측정은 각도 별(30°, 40°, 50°, 60°)로 독립적인 지표면 측정샘플을 얻기 위해 30번씩 안테나를 회전하면서 모든 편파(vv, hh, vh, hv)에 대해 수행하였으며 30도 이내의 각도(0, 10, 20도)에서는 타워의 구조와 지면에서의 직접 반사파 때문에 측정이 어려웠고, 70도 이상(70, 80도)에서는 측정값이 시스템 노이즈값에 근접하여 정확한 측정 결과를 얻기 어려웠다. 따라서, 30°, 40°, 50°, 60°의 각도 범위에서만 측정하였다. 지표면에서 안테나까지의 높이(h)는 3.4 m이었으며 측정기간은 2006년 5월 초부터 10월 말까지 일주일 내지 열흘에 한번씩 측정하였다. 보정용 target으로는 trihedral 전파반사기(corner reflector)를 사용하였다. 산란계수 측정 시스템의 송수신기는 네트워크 분석기(HP8753D)를 사용하였으며 time gating 기능을 이용하여 측정함으로써 측정 목표물에 대한 전파산란 이외의 잡음(안테나 어댑터, 안테나 지지대, 측정 주변의 구조물 등에서의 반사파)을 제거하여 마치 전파 무반향실 측정과 동일한 효과를 볼 수 있었다.

2) 편파별 후방산란계수 측정 방법과 산란계수 추출방법

측정데이터를 보정하기 위해 보정용 목표물인 전파반사기의 전파산란 측정값과 이론적인 RCS (radar cross section) 값, 측정 목표물에서의 전파산란 측정값과 illumination integral (A_{ill}) 계산 값을 구해야 하며 이를 통해 지표면의 레이더 산란계수 값을 계산하였다. 또한, Illumination integral (A_{ill})을 구하기 위해서는 시스템에 사용하는 안테나의 모든 각도 별 이득(gain)을 알아야

함으로 principal E-면과 H-면에서 얻은 측정 패턴들을 interpolation하여 3차원의 안테나 패턴 및 이득 함수를 계산하였다. L-밴드 표준 혼 안테나와 C-밴드 OMT의 H-plane HPBW (half-power beam-width)는 각각 30°, 32°였으며, E-plane의 HPBW는 각각 28°, 25°였으며 다음 식(1)에 의해 A_{ill} 을 계산하였다.

$$A_{ill} = \int_s \frac{g^2(\theta, \phi)}{R^4(\theta, \phi)} ds \quad (1)$$

Scatterometer 시스템을 보정하는 다양한 방법 중 비교적 간단한 방법인 STCT (single target calibration technique) 방법을 사용하였다(Sarabandi and Ulaby, 1990). STCT는 점 표적물에 대한 보정 방법 중 하나이며 서로 수직인 편파를 4-port 네트워크로 모델링하여 편파 간의 cross-talk 성분을 제거하는 방법이다. 다음 식들(2)은 이론적인 보정용 반사기의 산란계수 값과 실제 반사기 측정값 및 논외의 측정값을 이용하여 산란행렬을 구하는 방법을 나타낸 것이다

$$S_{vv} = \frac{1}{(1 - C^2)^2} \left[-2C^2 \left(\frac{m_{vh}^u}{m_{vh}^0} + \frac{m_{hv}^u}{m_{hv}^0} \right) + (1 + C^2) \right.$$

$$\left. \left(\frac{m_{vv}^u}{m_{vv}^0} + C^2 \frac{m_{hh}^u}{m_{hh}^0} \right) \right] s^0$$

$$S_{hh} = \frac{1}{(1 - C^2)^2} \left[-2C^2 \left(\frac{m_{vh}^u}{m_{vh}^0} + \frac{m_{hv}^u}{m_{hv}^0} \right) + (1 + C^2) \right.$$

$$\left. \left(\frac{m_{hh}^u}{m_{hh}^0} + C^2 \frac{m_{vv}^u}{m_{vv}^0} \right) \right] s^0$$

$$S_{vh} = \frac{1}{(1 - C^2)^2} \left[2 \frac{m_{vh}^u}{m_{vh}^0} + 2C^2 \frac{m_{hv}^u}{m_{hv}^0} - (1 + C^2) \right.$$

$$\left. \left(\frac{m_{vv}^u}{m_{vv}^0} + \frac{m_{hh}^u}{m_{hh}^0} \right) \right] s^0$$

$$S_{hv} = \frac{1}{(1 - C^2)^2} \left[2 \frac{m_{hv}^u}{m_{hv}^0} + 2C^2 \frac{m_{vh}^u}{m_{vh}^0} - (1 + C^2) \right.$$

$$\left. \left(\frac{m_{vv}^u}{m_{vv}^0} + \frac{m_{hh}^u}{m_{hh}^0} \right) \right] s^0$$

$$a \equiv \frac{m_{12}^0 m_{21}^0}{m_{11}^0 m_{22}^0}, C = \pm \frac{1}{\sqrt{a}} (1 - \sqrt{1 - a}) \quad (2)$$

s^0 은 이론적인 보정용 반사기의 산란계수 값이며, m_{pq}^0 은 보정용 반사기의 측정값, m_{pq}^U 은 논외의 측정값, C는 서로 수직인 편파에 대한 cross-talk을 의미한다. 산란행렬을 구하면 다음 식(3)과 같이 논외의 모든 편파 별 산란계수 값을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{pq}^0 = \frac{4\pi}{A_{ill, pq}} \left| S_{pq} \right|^2 \quad (3)$$

3) 벼 군락의 생육조사 및 분석

농업과학기술원 구내 답작 포장(미사질 양토 내지 식양토)에서 추청벼를 대상으로 2006년 5월 29일부터 10월 9일까지 생육에 따른 군락의 backscattering을 관측하고 동시에 생육분석을 위한 벼 시료 3주씩 채취하여 초장, 엽면적지수, 생체중, 건물중을 측정하였다. 엽면적지수는 단위면적에 대한 군락의 엽면적으로 정의되고 개엽을 모두 떼어내어 LI-3100 (LI-COR, Inc. USA)를 이용하여 직접 측정한 후 주(株) 재식밀도로 구하였다. 식물체를 80℃ 건조기에서 48시간 건조시킨 후 평량한 것을 건물량으로 하였다. 파종은 4월 12일, 이앙은 5월 17일, 출수기는 8월 16일, 수확일은 10월 12일이었고, 질소 9 kg/10a 기준으로 표준시비하였다.

마이크로파 L-밴드(1.95 GHz)와 C-밴드(5.3 GHz) scatterometer 시스템을 이용하여 관측하여 얻어진 후방산란계수와 벼 군락의 생육과의 관계를 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

1) 벼 군락의 생육에 따른 마이크로파의 후방산란계수 변화

벼 군락의 생육에 따른 마이크로파의 후방산란계수의 범위는 L-밴드가 약 -50 dB ~ 0 dB의 범위, C-밴드가 약 -40 dB ~ -5 dB의 범위를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 1). 입사각이 클수록 군락의 volume scattering으로 인해 후방산란계수가 커지는 경향을 나타내었고 vv- 또는 산란계수가 전반적으로 높게 나타났다. hh- 편파가 vh-와 hv- 편파에 비해 후방 L-밴드와 C-밴드 모두 입사각이 30도, 40도, 50도일 때, hh-, hv-, vh- 편파는 생육이 진행됨에 따라 후방산란계수가 점점 증가하다가 유수형성기 즉, 작물의 질적

인 변화가 일어나는 시기부터 증가하는 경향이 둔감해지고 출수기 이후로는 그 값이 일정수준에 머무르고 증가하지 않았다.

2) 마이크로파 측정 조건에 따른 후방산란계수와 벼 생육과의 관계

측정 결과를 분석하여 주파수, 입사각도, 편파의 변화에 대한 벼의 후방산란 특성과 벼의 생육상태와의 관계를 살펴보았다(표 1). L-밴드와 C-밴드 모두 벼의 생육과 밀접한 결과를 나타내었으나, 입사각이 작을 때는 C-밴드와의 상관성이 높게 나타났고 입사각이 커질수록 L-밴드와의 상관성이 높게 나타났다. 편파는 L-밴드와 C-밴드 모두 hh- 편파가, 입사각은 50도에서 가장 생육의 변이를 잘 설명하는 것으로 나타났다. 생육 데이터 모두를 이용한 경우보다는 유수형성기 또는 출수기 등 벼 생육의 질적인 변화를 보이는 시기에 따라 나누어 분석하는 것이 변화추이를 더 잘 설명하는 것으로 나타났다.

입사각에 따른 후방산란계수의 변화양상이 벼 군락의 생육과 밀접하게 연관되어 있는데 그 중 시간에 따른 생육변이를 가장 잘 설명하는 50도에서 관측한 후방산란계수와 벼 생육과의 관계를 그림 2와 같이 나타내었다.

후방산란계수는 L-밴드와 C-밴드 모두 초장 또는 엽면적지수, 생체중, 건물중의 순서로 생육을 잘 설명하였고, hh- 편파가 다른 편파에 비해 벼 군락의 생육을 가장 잘 설명하는 것으로 나타났다. 초장은 60 cm~80 cm 정도 자랄 때까지, 엽면적지수는 약 2.5가 될 때까지 L-밴드와 C-밴드에서 후방산란계수가 증가하다가 값이 포화되는 경향을 나타내었다. 생체중과 건물중은 각각 3,000 g/m²과 1,000 g/m² 부근에서 plateau를 이루는 경향이었으나 생식생장기의 절정인 유수형성기까지의 자료를 이용했을 경우 후방산란계수와와의 상관계수가 0.9(p<0.001) 정도가 되는 것으로 나타났다.

4. 결론

마이크로파 L-밴드(1.95 GHz)와 C-밴드(5.3 GHz) scatterometer 시스템을 이용하여 농업과학기술원 내의 미사식양질 논에서 자라는 추청벼를 대상으로 2006년 5월 29일부터 10월 9일까지 생육에 따른 군락의 후방산란

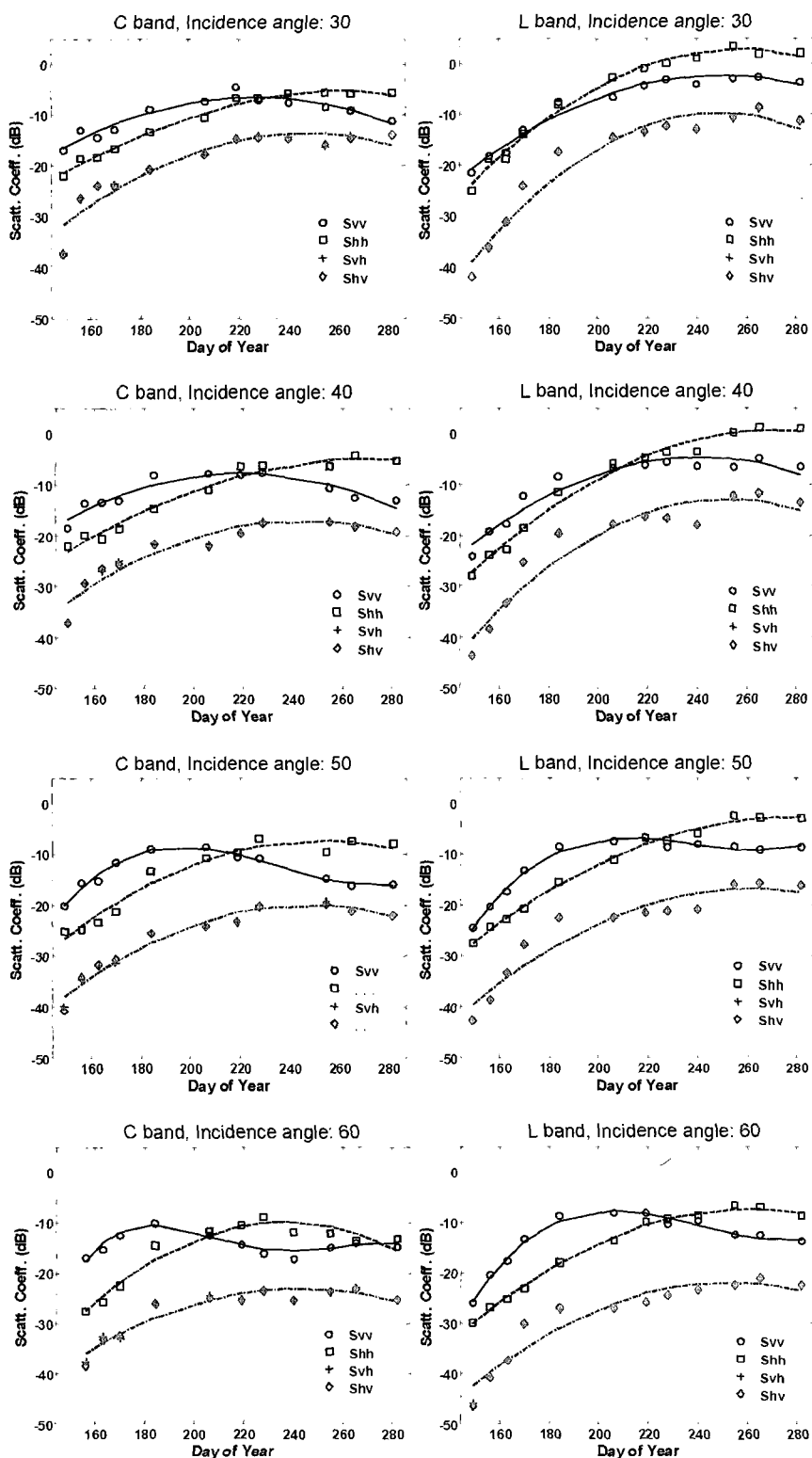


Fig. 1. Backscattering coefficients of rice growth as a function of time at different wavelengths, incidence angles, and polarization.

Table 1. Correlations of radar backscattering to rice growth.

			1.95 GHz (L-band)				5.3 GHz (C-band)			
			vv-pol	hh-pol	hv-pol	vh-pol	vv-pol	hh-pol	hv-pol	vh-pol
30°	Overall	Plant Height	0.94	0.97	0.91	0.92	0.81	0.98	0.87	0.87
		LAI	0.92	0.94	0.88	0.88	0.83	0.98	0.86	0.86
		TFW	0.82	0.84	0.79	0.80	0.63	0.89	0.78	0.77
		TDW	0.71	0.73	0.70	0.70	0.49	0.76	0.66	0.65
	Heading st.	Plant Height	0.94	0.96	0.90	0.90	0.92	0.98	0.86	0.86
		LAI	0.90	0.91	0.84	0.84	0.89	0.96	0.83	0.82
		TFW	0.82	0.84	0.76	0.76	0.80	0.91	0.79	0.79
		TDW	0.81	0.83	0.75	0.75	0.83	0.91	0.79	0.78
	Panicle Ini.	Plant Height	0.92	0.96	0.90	0.90	0.93	0.96	0.77	0.77
		LAI	0.93	0.95	0.90	0.90	0.93	0.95	0.75	0.74
		TFW	0.84	0.90	0.84	0.84	0.87	0.92	0.81	0.81
		TDW	0.80	0.87	0.80	0.80	0.85	0.89	0.78	0.79
40°	Overall	Plant Height	0.88	0.97	0.90	0.90	0.59	0.98	0.88	0.87
		LAI	0.85	0.94	0.85	0.85	0.61	0.98	0.87	0.86
		TFW	0.74	0.87	0.78	0.78	0.34	0.91	0.76	0.76
		TDW	0.63	0.78	0.70	0.70	0.18	0.81	0.65	0.64
	Heading st.	Plant Height	0.89	0.96	0.87	0.87	0.85	0.99	0.86	0.85
		LAI	0.83	0.92	0.82	0.82	0.78	0.98	0.82	0.81
		TFW	0.74	0.84	0.72	0.72	0.71	0.93	0.78	0.77
		TDW	0.73	0.83	0.72	0.72	0.70	0.93	0.76	0.75
	Panicle Ini.	Plant Height	0.89	0.97	0.88	0.88	0.87	0.99	0.77	0.75
		LAI	0.89	0.97	0.88	0.89	0.86	0.99	0.76	0.74
		TFW	0.82	0.91	0.81	0.81	0.86	0.92	0.77	0.77
		TDW	0.78	0.89	0.77	0.77	0.82	0.90	0.73	0.73
50°	Overall	Plant Height	0.81	0.99	0.90	0.90	0.27	0.95	0.93	0.92
		LAI	0.80	0.96	0.85	0.85	0.30	0.94	0.91	0.89
		TFW	0.63	0.90	0.79	0.79	0.01	0.83	0.80	0.78
		TDW	0.52	0.80	0.72	0.72	-0.12	0.71	0.68	0.67
	Heading st.	Plant Height	0.85	0.98	0.85	0.85	0.71	0.97	0.93	0.91
		LAI	0.79	0.95	0.79	0.79	0.62	0.93	0.87	0.85
		TFW	0.68	0.89	0.70	0.70	0.50	0.86	0.83	0.81
		TDW	0.69	0.89	0.69	0.69	0.49	0.84	0.80	0.78
	Panicle Ini.	Plant Height	0.89	0.97	0.85	0.85	0.85	0.97	0.88	0.87
		LAI	0.89	0.97	0.86	0.86	0.85	0.97	0.87	0.85
		TFW	0.83	0.93	0.80	0.80	0.78	0.90	0.88	0.86
		TDW	0.79	0.91	0.75	0.75	0.74	0.87	0.84	0.83
60°	Overall	Plant Height	0.67	0.99	0.89	0.89	-0.20	0.87	0.89	0.89
		LAI	0.67	0.97	0.86	0.85	-0.29	0.88	0.85	0.85
		TFW	0.48	0.89	0.79	0.78	-0.31	0.68	0.75	0.75
		TDW	0.35	0.78	0.69	0.69	-0.19	0.52	0.65	0.64
	Heading st.	Plant Height	0.79	0.98	0.85	0.84	0.00	0.96	0.91	0.90
		LAI	0.72	0.95	0.79	0.78	-0.09	0.91	0.84	0.83
		TFW	0.61	0.89	0.71	0.70	-0.28	0.82	0.76	0.74
		TDW	0.62	0.89	0.69	0.68	-0.27	0.80	0.73	0.71
	Panicle Ini.	Plant Height	0.86	0.97	0.83	0.82	0.64	0.96	0.92	0.91
		LAI	0.86	0.97	0.83	0.83	0.68	0.97	0.91	0.91
		TFW	0.81	0.93	0.76	0.75	0.46	0.86	0.89	0.85
		TDW	0.77	0.91	0.71	0.70	0.38	0.82	0.84	0.80

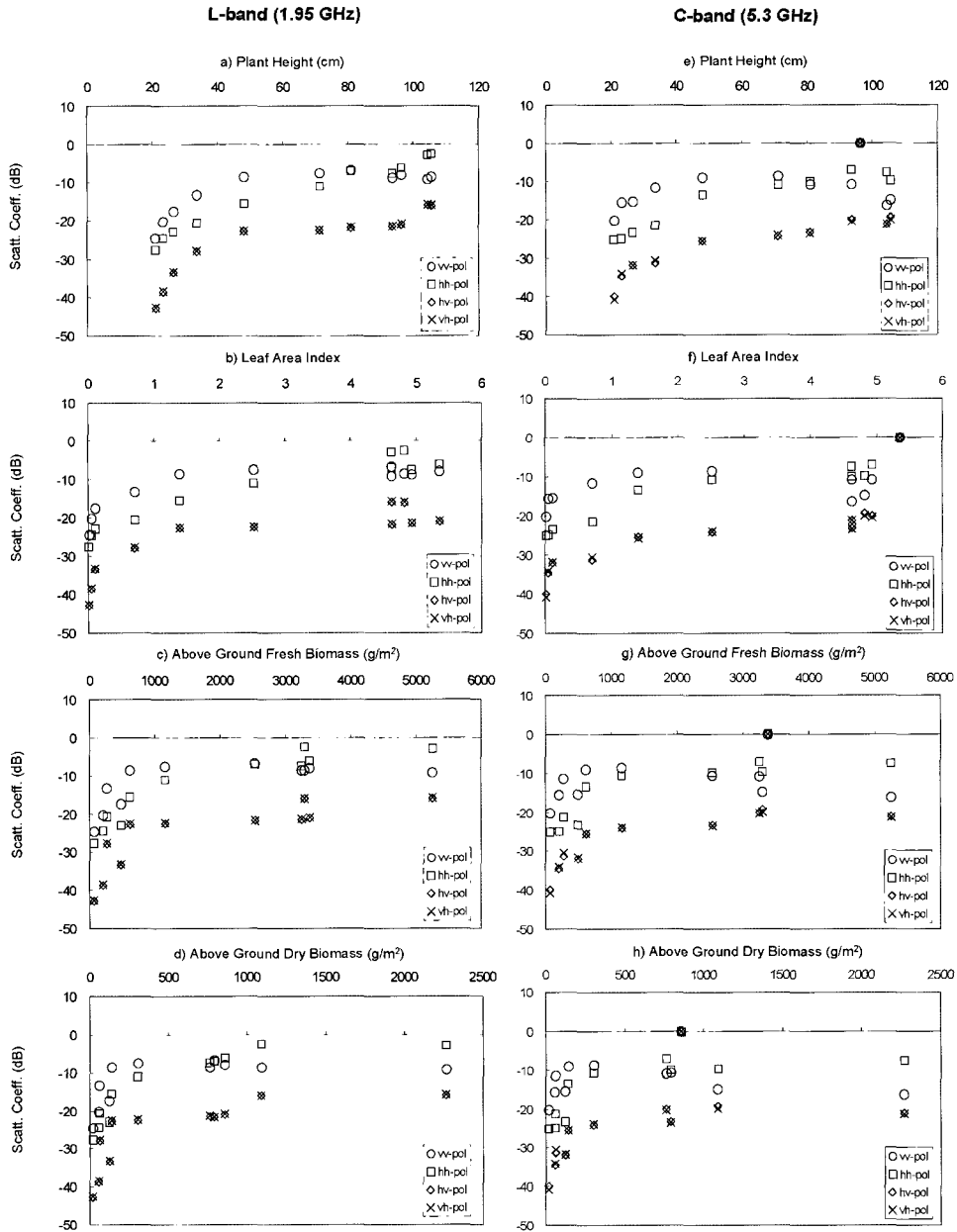


Fig. 2. Relationship between radar backscattering coefficients and rice growth at 50 degree incidence angle.

계수를 관측한 측정 시스템의 개요, 측정 시스템의 보정 방법들을 기술하고, 관측한 후방산란계수와 벼 군락의 생육과의 관계를 살펴보았다. 주파수, 입사각도, 편파의 변화에 대한 벼의 후방산란 특성과 벼의 생육상태와의 관계를 살펴보았다. L-밴드와 C-밴드 모두 벼의 생육과 밀접한 결과를 나타내었으나, 입사각이 작을 때는 C-밴

드와의 상관성이 높게 나타났고 입사각이 커질수록 L-밴드와의 상관성이 높게 나타났다. 편파는 L-밴드와 C-밴드 모두 hh 편파가, 입사각은 50도에서 가장 생육의 변이를 잘 설명하는 것으로 나타났다. 생육 데이터 모두를 이용한 경우보다는 유수형성기 또는 출수기 등 벼 생육의 질적인 변화를 보이는 시기에 따라 나누어 분석하는 것이

변화추이를 더 잘 설명하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- Hong, S. Y., S. H. Hong, and S. K. Rim, 2000. Relationship between Radarsat backscattering coefficient and rice growth, *Korean J. Remote Sensing*, 16(2): 109-116.
- Inoue, Y., 2003. Remote sensing and GIS for spatial assessment of agro-ecosystem Dynamics. In Proc. of the First Int'l Symposium on Assessing and Rational Management of the Agro-Ecosystem for Clean and Friendly Future Environment, October 22, 2003, Seoul, Korea, pp.111-198.
- Sarabandi, K. and F. T. Ulaby, 1990. A Convenient Technique For Polarimetric Calibration of Single-Antenna Radar Systems, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 28(6): 1022-1033.