

X-밴드 레이더 산란계 자동 측정시스템 구축과 벼 생육 모니터링

김이현^{1,2} · 홍석영¹ · 이훈열^{2*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원, ²강원대학교 지구물리학과

Construction of X-band automatic radar scatterometer measurement system and monitoring of rice growth

Yi-Hyun Kim^{1,2}, SukYoung Hong¹, and Hoonyol Lee^{2*}

¹National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

²Department of Geophysics, Kangwon National University

Microwave radar can penetrate cloud cover regardless of weather conditions and can be used day and night. Especially a ground-based polarimetric scatterometer has advantages of monitoring crop conditions continuously with full polarization and different frequencies. Kim et al. (2009) have measured backscattering coefficients of paddy rice using L-, C-, X-band scatterometer system with full polarization and various angles during the rice growth period and have revealed the necessity of near-continuous automatic measurement to eliminate the difficulties, inaccuracy and sparseness of data acquisitions arising from manual operation of the system. In this study, we constructed an X-band automatic scatterometer system, analyzed scattering characteristics of paddy rice from X-band scatterometer data and estimated rice growth parameter using backscattering coefficients in X-band. The system was installed inside a shelter in an experimental paddy field at the National Academy of Agricultural Science (NAAS) before rice transplanting. The scatterometer system consists of X-band antennas, HP8720D vector network analyzer, RF cables and personal computer that controls frequency, polarization and data storage. This system using automatically measures fully-polarimetric backscattering coefficients of rice crop every 10 minutes. The backscattering coefficients were calculated from the measured data at a fixed incidence angle of 45° and with full polarization (HH, VV, HV, VH) by applying the radar equation and compared with rice growth data such as plant height, stem number, fresh dry weight and Leaf Area Index (LAI) that were collected at the same time of each rice growth parameter. We examined the temporal behaviour of the backscattering coefficients of the rice crop at X-band during rice growth period. The HH-, VV-polarization backscattering coefficients steadily increased toward panicle initiation stage, thereafter decreased and again increased in early-September. We analyzed the relationships between backscattering coefficients in X-band and plant parameters and predicted the rice growth parameters using backscattering coefficients. It was confirmed that X-band is sensitive to grain maturity at near harvesting season.

Key words: Scatterometer, X-band, Rice, Backscattering coefficients, Polarization, Rice growth parameters.

서 언

우리나라는 여름철의 기후 특성상 비 오는 기간이 길고 일조량이 적어 광합성에 비해 날씨에 영향을 거의 받지 않는 레이더영상 활용성이 점점 중요시되고 있는데 작물생육 및 수량, 토양수분, 홍수가뭍 등 재해관측 등 국내외에서 농업분야 활용 연구가 활발히 진행되고

있다.

레이더 자료를 이용하여 작물생육과의 관계를 분석하는 연구는 미국, 일본, 유럽연합 등을 중심으로 활발히 이루어지고 있는데 이들 국가에서는 인공위성 및 지상 레이더 자료를 이용하여 작물 생육을 모니터링하고, 추정하여 작물생육모형개발을 통해 작물식생변화를 정량화하여 활용하고 있다 (Bouman, 1991; Kurosu et al., 1997; Le Toan et al., 1989; Macelloni et al., 2001; Maity et al., 2004; Paris, 1986; Ulaby et al., 1984; Wigneron et al., 1999). 미국은 1970년대 후반 토양수분과 엽면적지수를 입력변수로 사용하여 단

접수 : 2010. 5. 3 수리 : 2010. 6. 14

*연락처 : Phone: +82332508587

E-mail: hoonyol@kangwon.ac.kr

순한 작물산란모델인 water cloud model을 개발한 이후 (Attema and Ulaby, 1978) 토양수분, 기상 등 다양한 인자를 이용한 좀 더 복잡한 산란 모델을 개발하고 있고 마이크로파와 작물 및 토양과의 물리적 상호관계의 이해도를 증가시킨 일반적인 모델 개발을 활발하게 수행 하고 있다.

Brisco et al. (1990)은 X-밴드 안테나를 이용하여 시계열에 따라 편파 (Polarization), 입사각도에 따른 후방산란계수 (Backscattering coefficients)와 밀의 엽면적지수, 바이오매스 등 생육인자와의 관계를 분석하였고, Palosica (1998)은 레이더 영상자료를 이용하여 작물별로 분류하였는데 특히 벼의 재배면적을 추정할 경우 두 시기 이상의 영상자료를 R, G, B 등으로 합성하면 추정정확도를 향상시킬 수 있다는 연구결과를 발표하였다. Le Toan et al. (1997)은 레이더영상인 ERS-1을 이용하여 벼 생육시기별 후방산란계수와 벼 biomass와의 관계를 분석하여 추정식을 구하였고, Bouvet et al. (2009)은 ENVISAT 영상자료를 통해 메콩강 지역의 작부체계를 분류하였다. Lin et al. (2009)은 ENVISAT 영상자료를 이용하여 중국 남동부 사탕재 배치지역에 대해 생육을 모니터링하고 엽면적지수를 추정하였고, Cuizhen et al. (2009)은 ALOS 레이더 영상과 작물생육모형 (Radiative transfer model)을 이용하여 중국 남부 벼농사지역에 벼 산란특성을 분석하였는데 초장, 엽면적지수가 증가할수록 체적산란 (volume scattering)과 이중산란 (double bounce scattering)이 주로 일어났다.

Inoue et al. (2002)은 벼 생육기간 동안 레이더 자료를 이용하여 주파수와 입사각, 편파별로 벼 생육을 관측하고, 작물군락에 대한 단순산란모형과 후방산란계수와의 관계를 분석하였다. Yamaguchi et al. (2005)은 Polarimetric Synthetic Aperture Radar (POLSAR) decomposition을 하기 위한 산란모델을 개발하였고, Susaki et al. (2008)은 실내 포트시험을 통해 decomposition 방법을 이용하여 벼의 산란특성을 알아보았는데 X-밴드의 경우 표면 산란 (surface scattering)이 주로 일어났고 L-밴드는 체적산란이 주로 발생한다는 결과를 발표하였다.

국내의 경우 Hong et al. (2000)이 RADARSAT영상을 이용하여 벼 생육기간 동안 9시기의 자료를 standard

beam mode 5 또는 6으로 취득하여 보정 (calibration) 과정을 통하여 지표면의 특성을 잘 나타내는 후방산란계수를 구하고, 초장, 엽면적지수, 현물중, 건물중 등 벼의 생육변수와의 관계를 분석하였다. Kim et al. (2009)은 다편파 레이더 산란계 시스템을 이용하여 벼 생육시기에 따른 후방산란계수 변화를 관측하고 밴드, 편파 및 입사각도별 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계를 분석하였다. 하지만 다편파 산란계시스템을 통한 관측과정에서는 안테나의 선택과 각도 조절이 모두 수동으로 이루어졌고 측정이 3-7일 간격으로 얻어져 자료의 신뢰성이 제한적이었다. 또한, 측정시기에 따라 강우, 바람, 습도 등 기후요인이 후방산란계수에 많은 영향을 미쳤고 측정시마다 calibration 과정에서의 정확도 문제 등이 발생하였다.

따라서 본 연구에서는 기후 등의 영향을 받지 않고 레이더 산란 측정을 할 수 있는 X-밴드 레이더 산란계 자동관측 시스템을 구축하고, 벼 생육시기에 따른 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계 분석을 통해 최적관측조건을 구명하고 이를 통해 얻어진 후방산란계수를 이용하여 벼 생육을 추정하고자 하였다.

재료 및 방법

연구지역 레이더 산란특성 측정은 국립농업과학원 시험포장 (37° 15' 28.0" N, 126° 59' 21.5" E)에서 2008년도 추청벼 (*Oryza sativa L. var. sativa*)를 대상으로 모이앙기 전 (5월 16일)부터 벼 수확기 (10월 12일)까지 수행하였다. 시험포장의 면적은 약 660 m², 재식 밀도 30 cm × 15 cm 이고, 비료 시용의 경우 질소는 요소비료 100 kg ha⁻¹, 인산은 용과린, 칼륨은 염화칼륨을 사용하여 토양검정시비량에 따라 비료를 처리하였다. 본 실험포장의 공시토양은 화동토로 토성속은 식양질이고, 벼 이앙일은 5월 18일, 수확일은 10월 12일이었으며 시험 전 토양이화학적은 Table 1에서 보는 바와 같다.

벼 생육조사 초장 (plant height), 생체중 (fresh biomass weight), 엽면적지수 (Leaf area Index) 등 벼 생육조사는 모이앙기 직후부터 수확기까지 정기적으

Table 1. Soil chemical properties of the experimental plot for fertilizer recommendation.

pH	OM	NH ₄ -N	Available P ₂ O ₅	Exchangeable cations			CEC	Available SiO ₂
				K	Ca	Mg		
(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- cmol _c kg ⁻¹ -----			mg kg ⁻¹	
5.9	20	9	38	0.50	6.6	1.9	18.1	143



Fig. 1. Field view X-band automatic scatterometer system ; (left) The Shelter installed in the experimental paddy field with an X-band looking at the 45 degree ; (right) RF systems inside the shelter with network analyzer, RF cable and a computer that controls frequency, polarization and data storage.

로 조사 (1회/주)하였으며 이삭 건물중 (grain dry weight) 경우 8월 말부터 약 3일 간격으로 조사하였는데 생육조사방법은 생육이 고른 벼 3주를 선택하여 초장, 생체중등을 측정하고 70℃에서 건조하여 건물중 (dry biomass weight)등을 측정하였다. 엽면적지수는 단위면적에 대한 균락의 엽 면적으로 정의되고 개엽을 모두 떼어내어 LI-3100 (LI-COR, Inc. USA)을 이용하여 직접 측정한 후 주 (株) 재식밀도로 구하였다. 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계 및 생육추정을 알아보기 위해 SAS 프로그램 (Enterprise Guide 4.0)을 이용하여 상관분석 및 회귀분석을 수행하였다.

X-밴드 레이더 산란계 자동 관측시스템 구축 X-밴드 레이더 산란계 자동 관측시스템은 현장측정과정에서의 강우, 바람 등 기후의 영향을 최소화 하기위해 설계 및 구축하였다. 자동 관측시스템 설치는 모 이앙기전 (5월 16일)에 하였고, 구성요소로는 X-밴드 안테나, 네트워크 분석기, GPIB (General Purpose Interface Bus) —USB, calibration kit, RF Cable, 노트북 컴퓨터 등으로 되어있다 (Fig. 1). 네트워크분석기, RF Cable, 측정프로그램이 내장된 컴퓨터 등은 강우, 바람을 피해 관측시스템 건물 내부에 설치하였고 건물외부에 안테나를 설치하였는데, 안테나와 RF cable 부분에 밀봉처리를 하여 비가 안테나 내부로 스며드는 것을 차단하였다.

자동 산란계 관측시스템의 구성항목별 특성은 Table 2와 같다. 네트워크 분석기는 Agilent Technologies사의 8720D 모델을 사용하였으며 가용 가능한 주파수의 범위는 20 MHz ~ 20 GHz 이다. 네트워크 분석기에는 두 개의 포트가 있으며, 각각의 포트는 송, 수신을 할 수 있게 설계되어 있다. 이 두개의 포트는 안테나에

Table 2. Specification of the X-band automatic scatterometer system.

Specification		X-band
Frequency (GHz)		9.65 ± 0.5
Beam Width	E-Plane (Deg.)	11.15 ~ 15.72
	H-Plane (Deg.)	14.62 ~ 19.36
Antenna Gain (dB)		22.4
Antenna Type		Dual polarimetric horn
Number of Frequency points		1601
band Width (MHz)		1000
Wavelength (m)		0.031
Slant range resolution (m)		0.15
Polarization		HH, VV, HV, VH
Incident angle (°)		45
Platform height (m)		4.16
Measurement time		1 per 10minutes

연결되어 S₁₁, S₁₂, S₂₁, S₂₂의 신호를 받게 되는데, 뒤에 첨자는 송신을 나타내고 앞의 첨자는 수신을 나타낸다. 안테나에는 수직편파 (Vertical Polarization, V) 및 수평편파 (Horizontal Polarization, H) 포트가 있으며, 이것을 네트워크 분석기와 연결하여 VV, VH, HV, HH 편파에 대한 특성을 측정하게 된다. 안테나는 X-밴드의 Dual-Polarization Square Horn 안테나를 사용하였고 입사각도는 45° 로 고정해서 측정하였다. 입사 각도를 45° 로 고정한 이유는 기존 연구결과에서 입사각도별로 후방산란계수와 벼 생육인자 와의 비교에서 45° 에서 가장 상관관계가 높게 나왔기 때문이다 (Kim et al., 2009). 여름철 고온으로 건물 내부에 온도가 올라가는 것을 막기 위해 내부에 냉난방기를 설치

하여 20℃를 유지함으로써 산란 측정과정에서 관측 시스템이 오류 없이 지속적으로 측정될 수 있도록 하였다.

안테나 이득은 22.4 dB 이고, 중심주파수는 9.65 GHz로 설계하였는데, 이는 2010년도 발사예정인 아리랑5호의 X-밴드 중심주파수와 동일하게 설계하여 측정함으로써 향후 아리랑5호 위성에 적용하고 농업적으로 활용할 수 있도록 하기 위함이다.

또한 시스템 Calibration 및 자료 질을 향상을 위해 측정주기는 10분당 1번씩 자동으로 산란특성을 측정하도록 National Instrument사의 LabVIEW™를 이용하여 프로그램을 만들었다. 이렇게 구성된 다편파 산란계는 대상체에서 산란되어 돌아오는 VV, VH, HV, HH 편파의 크기 (amplitude)와 위상 (phase) 정보를 얻을 수 있고 실시간으로 아스키 (ASCII)파일로 컴퓨터에 저장될 수 있게 하였으며, 이 파일을 후방산란계수 추출에 이용하였다.

후방산란계수 산출 레이더파가 지표면에서 산란되면 모든 방향을 향해 퍼져 나가므로 안테나에는 그 일부분이 도달하게 된다. 따라서 단위 면적당 파워의 크기는 가까이 있는 대상체에 의한 것보다 멀리 있는 대상체에 의한 것이 더 작다. 이렇게 수신 안테나에 도달하는 단위면적당 파워의 크기를 후방산란이라 한다. 마이크로파가 지표면에서 산란되어 안테나로 되돌아오는 신호 P_r 은 다음과 같은 레이더 방정식으로 표현 할 수 있다 (Ulaby et al. 1990).

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \tag{1}$$

여기에서 P_t 는 지표면을 향해 송신되는 파워, G_t , G_r 은 각각 송신 안테나와 수신 안테나의 이득, λ 는 마이크로파의 파장, σ 는 대상체의 후방산란 유효 면적 (Radar Cross Section, RCS)이다. 그리고 R 은 안테나로부터 대상체까지의 거리이다. 후방산란계수 (σ^0)는 단위면적 (A)의 RCS 중 안테나로 되돌아오는 양으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A} \tag{2}$$

산란계 실험을 통해 측정된 대상체에서 산란되어 되돌아오는 신호의 크기 (U)는 송신 마이크로파 파워 (P_t)에 대한 수신 마이크로파 파워 (P_r)의 비로써 다음 식과 같이 나타낸다.

$$U^2 = \left(\frac{V_r}{V_t} \right)^2 = \frac{P_r}{P_t} \tag{3}$$

후방산란계수는 레이더방정식 (1)과 식 (2)을 이용하여 구할 수 있다. 먼저, 식 (1)을 dB로 환산하면 다음과 같다.

$$10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} \right) = 20 \log U = 10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \right] \tag{4}$$

$$\therefore \sigma (dB) = 10 \log \sigma = 20 \log U - G_t (dB) - G_r (dB) - 20 \log \lambda + 30 \log 4\pi + 40 \log R$$

안테나는 송신안테나와 수신안테나가 동일하기 때문에 G_t 와 G_r 의 값은 같다. 식 (2)의 A 값은 산란계의 수평해상도에 따른 산란체의 면적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{\Delta R}{\cos \theta_i} \cdot l \tag{5}$$

이 때, ΔR 은 안테나의 거리 해상도로서 $\Delta R = c/2B$ (c =빛의 속도, B =band 폭)이고, θ_i 는 입사각이며 $l = R \cdot \theta$ (R =대상체의 거리, θ =안테나의 빔폭)이다.

식 (4)과 식 (5)를 다시 정리하면 X-밴드 후방산란계수를 구하기 위해 다음과 같은 식이 사용하였다 (Kim et al., 2009).

X-band :

$$\sigma^0 (dB) = 20 \log U + 32.21 (dB) + 30 \log R + 10 \log \cos \theta_i$$

결과 및 고찰

생육시기에 따른 X-밴드 후방산란계수와 벼 생육 인자의 변화 관측 벼 생육시기별 X-밴드 편파별 후방산란계수변화와 바이오매스, 엽면적지수, 초장, 이삭 건물중 등 벼 생육인자의 변화를 관측하였는데 전체 생육시기의 X-밴드 편파별 후방산란계수 범위는 - 50 db ~ -5 dB 이었고 동일편파 (HH-, VV-편파)가 교차편파 (HV-, VH-편파)보다 후방산란계수가 높았다 (Fig. 2).

벼 군락 형성되지 않은 생육초기에는 VV-편파가 HH-, HV/VH-편파 보다 후방산란계수가 높게 나타났지만 유효분얼기인 6월 중순 (DOY 168) 부터 HH-편

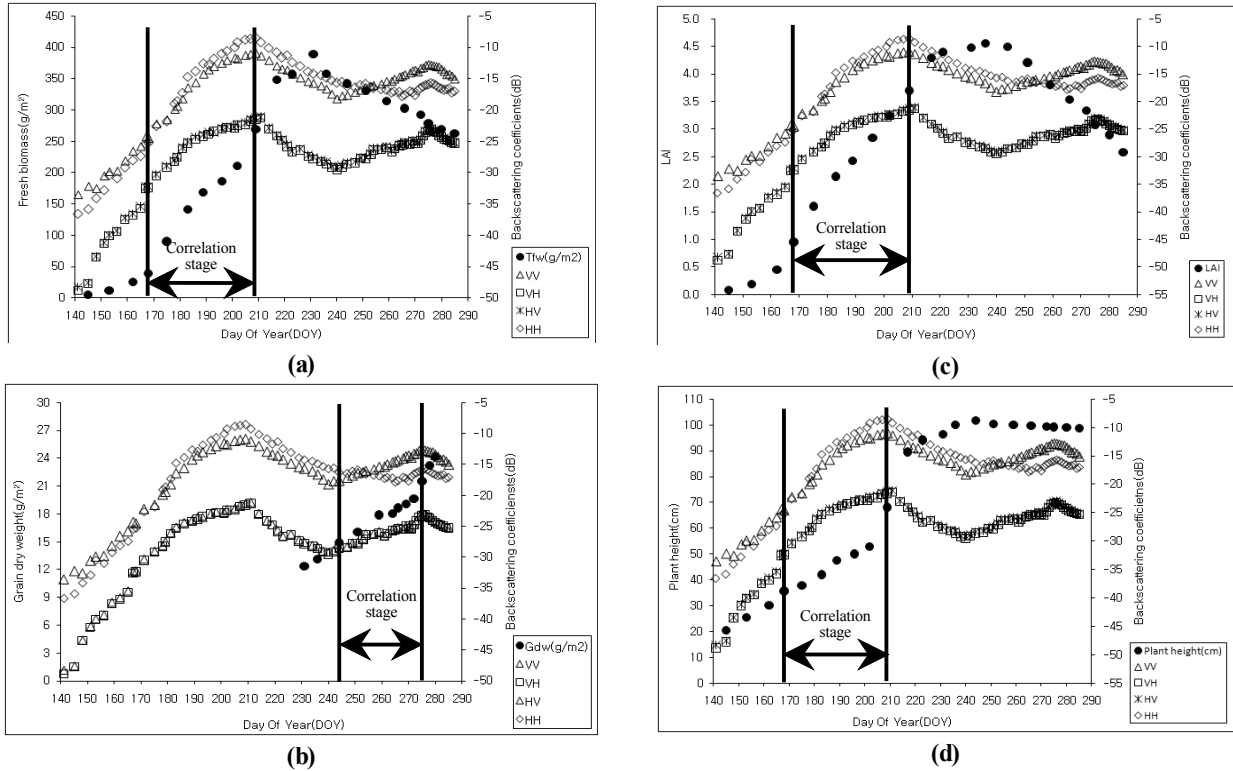


Fig. 2. (a) Temporal variations of fresh biomass and backscattering coefficients in X-band during rice growth. (b) Temporal variations of grain dry weight and backscattering coefficients in X-band during rice growth. (c) Temporal variations of LAI and backscattering coefficients in X-band during rice growth. (d) Temporal variations of plant height and backscattering coefficients in X-band during rice growth.

파가 VV-편파 보다 후방산란계수가 더 높게 나타났는데 그 이유는 벼 군락이 형성되면서 표면산란보다 체적산란에 더 영향을 받은 것으로 분석된다. 모든 편파별 후방산란계수가 벼 유수형성기인 7월 하순 (DOY 209)까지 증가한 후 감소하다가 9월 초순 (DOY 244)에 다시 증가하는 dual-peak 현상을 보였고, 이런 현상은 VV-, HV/VH-편파에서 뚜렷이 나타났다. 또한 VV-편파의 경우 9월 초순부터 후방산란계수 증가가 다른 편파에 비해 크게 나타났다. Kim et al. (2009)이 수동관측조건에서 얻은 결과와 비교해보았을 때 본 연구 결과는 10분단위로 자동 측정함으로써 3-7일 간격으로 측정된 수동관측조건자료에 비해 편파별 후방산란계수 변화 경향이 생육인자 변화와 더불어 생육시기에 따라 명확히 나타나 자료의 질이 높았음을 확인할 수 있었고, 특히 7월 하순과 10월 초순을 두 시기를 정점으로 dual-peak 현상이 수동관측 조건에 비해 뚜렷이 나타났음을 확인할 수 있었다. 이 현상은 X-밴드 후방산란계수가 벼 출수기 이후 이삭두께와 상관관계를 보여주고 있고, 특히 이삭이 익어 가면서 외부에 노출되는 과정에서 파장이 짧은 고주파 X-밴드는 이삭에 대한 감지도가 높아 후방산란계수가 증가하는 것으로 분석된다. 이런 결과는 밀의 출수기 이후부터 X-밴드 후방산란계

수가 증가하였던 이전 결과의 경향과 일치 한다 (Ulaby et al., 1976).

한편 벼 생육시기에 따른 생육인자들의 변화를 관측한 결과 생체중의 경우 모 이삭기 이후 계속 증가하다가 벼 출수기인 8월 19일 (DOY 231)을 정점으로 수확기까지 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 2(a)). 편파별 후방산란계수와 변화 분석한 결과 모든 편파별 후방산란계수가 7월 28일 (DOY 209) 이후 감소되었다가 9월 초순에 다시 증가한 반면 생체중은 8월 중순까지 증가하다가 그 이후 감소되어 벼 출수기 이후 생체중과 편파별 후방산란계수는 상관성이 높지 않음을 볼 수 있었다. 하지만 6월 중순 (DOY 168) 부터 7월 하순 (DOY 209) 까지 두 변수가 모두 증가하는 경향을 보여 이 시점에서는 상관성을 볼일 것으로 생각 되었다. 이삭 건물중과 편파별 후방산란계수 변화를 본 결과 이삭 건물중은 분석을 실시한 8월 중순이후 수확기 까지 계속 증가하였고, 편파별 후방산란계수는 9월 초순 (DOY 244) 부터 10월 초순 (DOY 276) 까지 증가하였는데 특히 후방산란계수의 VV-, HV/VH-편파의 경우 다른 편파에 비해 9월 초순부터 10월 초순까지 증가하는 경향이 이삭 건물중과 동일하게 나타나 이 기간에 두 변수가 유효한 상관을 보일 것으로 생각 되었다 (Fig.

2(b)). 생육시기에 따른 엽면적지수와 후방산란계수와와의 변화 관측에서는 엽면적지수는 8월 22일 (DOY 234)에 최대값을 나타냈고 그 이후 감소했지만 편파별 후방산란계수는 7월 말과 9월 말에 dual peak 현상이 일어남으로 전체 생육기간에서는 서로 상관성이 높지 않음을 확인할 수 있었다 (Fig. 2(c)). 하지만 생체중과 마찬가지로 6월 중순 (DOY 168) 부터 7월 하순 (DOY 209) 까지 엽면적지수와 편파별 후방산란계수가 증가하는 경향이 동일하게 나타나 이 시기를 중심으로 두 변수간의 상관관계를 확인해보았다 (Table 4). 초장과 후방산란계수와의 변화 관측 결과 초장은 생육시기에 따른 증가하다가 8월 30일 (DOY 242)을 정점으로 감소하여 벼 출수기 이후에는 생체중, 엽면적지수 와 같이 후방산란계수 변화 경향과 상관성을 높지 않았지만 6월 중순 (DOY 168) 에서 7월 말 (DOY 209) 까지는 두 변수가 서로 증가하는 경향이 동일하게 나타났다 (Fig. 2(d))

편파별 후방산란계수와 벼 생육인자와의 상관관계 분석 생육시기별 후방산란계수와 벼 생육인자의 변화 분석 결과를 바탕으로 SAS 프로그램 (Enterprise Guide 4.0)을 이용하여 입사각도 45도 조건에서 후방산란계수와 초장, 생체중, 건물중, 엽면적지수 등 벼 생

육인자의 상관관계를 분석하였다. Table 3은 2007-08년 전 벼 생육기간 동안의 편파에 따른 후방산란계수와 벼 생육인자와의 상관계수 (correlation coefficient, r)를 보여주고 있다. 2008년도 결과 HH-편파 후방산란계수와 엽면적지수와와의 상관계수 (r=0.81)를 제외하고는 편파별 후방산란계수와 초장, 생체중, 엽면적지수와의 상관성이 낮게 나타났는데 2007년도 결과에서도 생체중과의 상관관계를 제외하고는 본 연구결과와 비슷한 경향을 보였다. 벼 출수기 이후 수확기 까지 이삭 건물중과 편파별 후방산란계수와의 관계를 알아본 결과 VV-편파 후방산란계수와 이삭 건물중의 상관계수가 높게 나타났고 (r=0.91), HH, HV/VH-편파 후방산란계수의 경우 이삭 건물중과의 관계가 높지 않았다. 또한 VV-편파 후방산란계수와 이삭 건물중의 상관관계가 2007년의 결과 (Kim et al., 2009) 보다 높게 나타났으며 HH-편파는 상관계수가 낮았다.

하지만 Fig. 2 결과에서 보는바와 같이 초장, 생체중, 엽면적지수의 경우 유효분얼기 이후 유수형성기까지 편파별 후방산란계수와 증가하는 경향이 동일하게 나타나 이 시기를 중심으로 벼 생육인자와 후방산란계수 관계를 분석하였다. Table 4는 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계에서 생육시기에 증가하는 경향을 보이는 동일한

Table 3. Correlation coefficients between backscattering coefficients at X-band and rice growth parameters during rice growth stage in 2007-2008.

Parameters (year)	LAI		Tfw [†]		Gdw [‡]		Plant height	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Polarization								
HH	0.80 ^{**§}	0.81 ^{**}	0.81 ^{**}	0.73 ^{**}	0.59 [*]	0.46 [*]	0.74 ^{**}	0.55 [*]
VV	0.55 [*]	0.64 [*]	0.52 [*]	0.64 [*]	0.87 ^{***}	0.91 ^{***}	0.53 [*]	0.59 [*]
HV	0.74 ^{**}	0.60 [*]	0.64 [*]	0.54 [*]	0.58 [*]	0.43 [*]	0.62 [*]	0.42 [*]
VH	0.74 ^{**}	0.61 [*]	0.64 [*]	0.54 [*]	0.58 [*]	0.44 [*]	0.62 [*]	0.44 [*]

[†]Tfw : Total fresh weight [‡]Gdw : Grain dry weight

^{*} : level of significance p<0.05, ^{**} : level of significance p<0.01, ^{***} : level of significance p<0.001.

Table 4. Correlation coefficients between backscattering coefficients at X-band and rice growth parameters during various rice growth stages.

Parameters	LAI [†]	Tfw [‡]	Gdw [§]	Plant height [¶]
Polarization				
HH	0.92 ^{***}	0.90 ^{***}	0.43 [*]	0.83 ^{**}
VV	0.86 ^{***}	0.85 ^{**}	0.94 ^{***}	0.89 ^{***}
HV	0.80 ^{**}	0.83 ^{**}	0.85 ^{**}	0.80 ^{**}
VH	0.80 ^{**}	0.83 ^{**}	0.85 ^{**}	0.79 ^{**}

[†]Rice stage : From mid-June (DOY168) to late-July (DOY209)

[‡]Rice stage : From mid-June (DOY168) to late-July (DOY209)

[§]Rice stage : From early-september (DOY244) to early-October (DOY276)

[¶]Rice stage : From mid-June (DOY168) to late-July (DOY209).

시기에 대해 변수들 간의 상관관계를 분석한 결과이다. 벼 유효분얼기 (DOY 168)에서 유수형성기 (DOY 209)의 편파별 후방산란계수와 엽면적지수, 생체중, 초장과의 관계를 각각 알아본 결과, 먼저 엽면적지수의 경우 HH-편파와 상관계수가 높게 나타났고 ($r=0.92$), 다른 편파 후방산란계수도 전체 벼 생육시기보다 상관계수가 높게 나타났다. 생체중은 HH-편파와 상관계수가 가장 높았고 ($r=0.90$), 다른 편파 후방산란계수들도 대체로 상관성이 높았으며 초장은 VV-편파 후방산란계수와 상관성이 높게 나타났다 ($r=0.89$). 생체중, 엽면적지수 등 다른 생육인자와 마찬가지로 이삭 건물중의 경우에도 9월 초순 (DOY 244) 부터 10월 초순 (DOY 276)까지 증가하는 경향이 VV-, HV/VH-편파 후방산란계수와 동일하게 나타나 이 시기에 변수들 간의 상관관계를 분석하였다. 9월 초순 (DOY 244) 에서 10월 초순 (DOY 276) 사이에 편파별 후방산란계수와 이삭 건물중

과의 관계에서 VV-편파 후방산란계수가 높은 상관계수를 보인 반면 ($r=0.94$), HH-편파는 상관성이 낮게 나타났다 ($r=0.43$). 벼 수확기로 갈수록 잎의 노엽화가 진행되고 벼 군락 밀도가 낮아지는 기간임으로 이삭이 외부에 노출되기 쉬우므로 파장이 짧은 X-밴드에서 민감한 반응을 보이는 것으로 판단된다.

후방산란계수를 이용한 벼 생육인자 추정

X-밴드 편파별 후방산란계수와 벼 생육인자와의 상관분석 결과 시기별 가장 상관계수가 높은 후방산란계수를 이용하여 벼 생육을 추정하였다. Figure 3은 벼 유효분얼기 (DOY 168)에서 유수형성기 (DOY 209) 시기에 HH-편파 후방산란계수를 이용 엽면적지수를 추정한 결과이다. 회귀분석의 결정계수가 높게 나타났고 ($R^2=0.85$), 엽면적지수 실측값 (2007년도)과 추정 경험 모형 (2008년도)을 비교해 본 결과 제곱근평균제곱오차 (RMSE)가 0.43으로 비교적 오차가 작았다. 생체중과 상관관계가 높은 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 생체중을 추정하였는데 생체중과 HH-편파 후방산란계수는 결정계수가 0.82 로서, 비교적 좋은 추정식을 구할 수 있었다 (Fig. 4). 2007년도 생체중 실측값과 생체중 추정 모형 (2008년도)을 비교해 본 결과 RMSE=41.0 $g\ m^{-2}$ 으로 비교적 작은 오차를 보여 생체중 추정 모형의 유효성이 높다는 것이 증명되었다. 초장의 경우 VV-편파 후방산란계수를 이용하여 초장과의 관계를 분석하고 실측값과 추정값을 비교해 본 결과 결정계수가 0.81로 나타났다 (Fig. 5). 이 결과를 바탕으로 2007년도 초장 실측값과 2008년도 초장 추정 모형을 비교해 본 결과 비교적 작은 오차를 보였다 (RMSE=6.93 cm). 벼 출수기가 지나 결실기로 접어드는 9월 초순부터 벼 수확기에 가까운 10월 초순 시기에 이삭 건물중과 상관관계가 높게 나타난 VV-편파 후방산란계수를 이용하여 이삭 건물중을 추정하였고 그 결과는 Fig. 6과 같다. VV-편파 후방산란계수를 이용한 이삭 건물중 추정 경험 모형의 결정계수는 0.89로 나타났고 (Fig. 6(a)), 이 모형을 이용하여 2008년도 이삭건물중을 추정하고 이를 2007년도 실측값과 비교한 결과 RMSE=0.35 $g\ m^{-2}$ 을 보여 이삭 건물중 추정모형의 유효성이 높다는 것이 증명되었다 (Fig. 6(b)). 본 연구는 Kim et al. (2009)이 일정한 간격을 두고 수동조건으로 관측한 결과와 비교해서 벼 생육시기에 따른 편파별 후방산란계수 변화 경향이 뚜렷하게 나타났고, 이 후방산란계수를 이용하여 벼 생육인자와의 관계 및 추정 결과에서도 기존 결과보다 상관관계 및 생육추정 모형 유효성이 높게 나타났다.

본 연구결과를 통해 벼 생육을 추정하는데 편파별 후방산란계수와 생육인자와의 관계분석을 통해 최적조건을

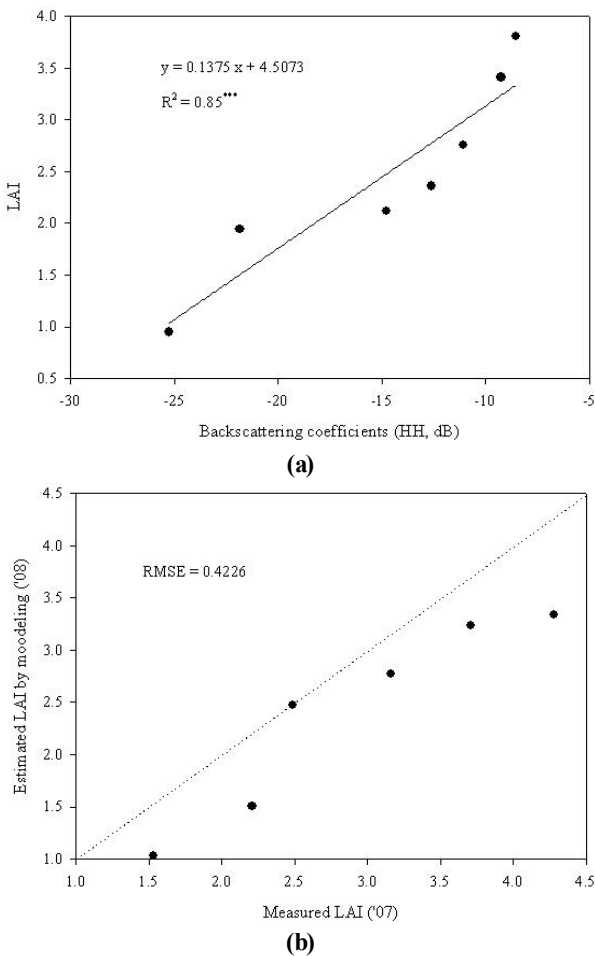


Fig. 3. (a) Relationship between backscattering coefficients in X-band (HH, 45°) and LAI for the duration from tillering effect stage (DOY 168) to panicle formation stage (DOY 209). (b) Comparison between measured (2007yr data) and estimated LAI by modeling (2008yr data).

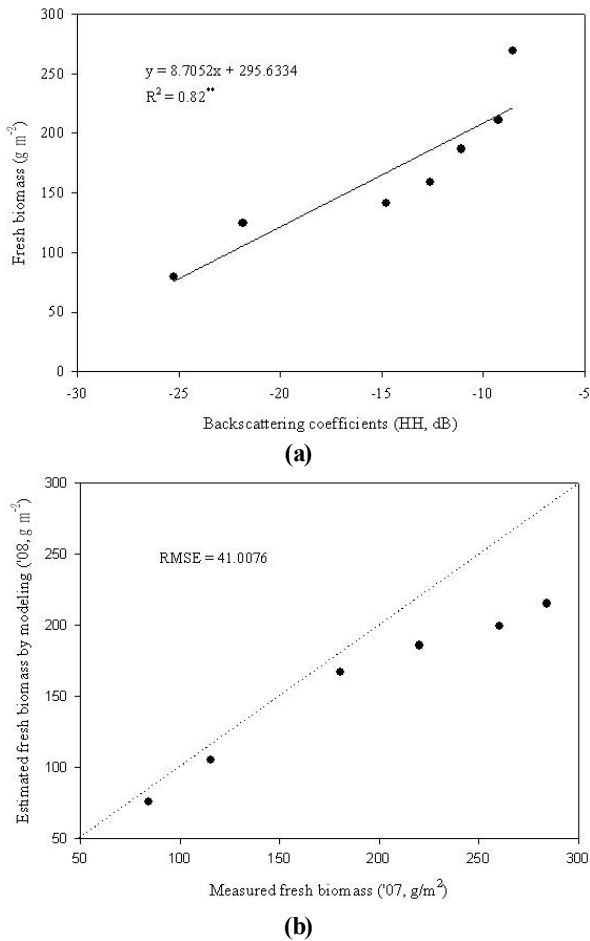


Fig. 4. (a) Relationship between backscattering coefficients in X-band (HH, 45°) and fresh biomass for the duration from tillering effect stage (DOY 168) to panicle formation stage (DOY 209). (b) Comparison between measured (2007yr data) and estimated fresh biomass by modeling (2008yr data).

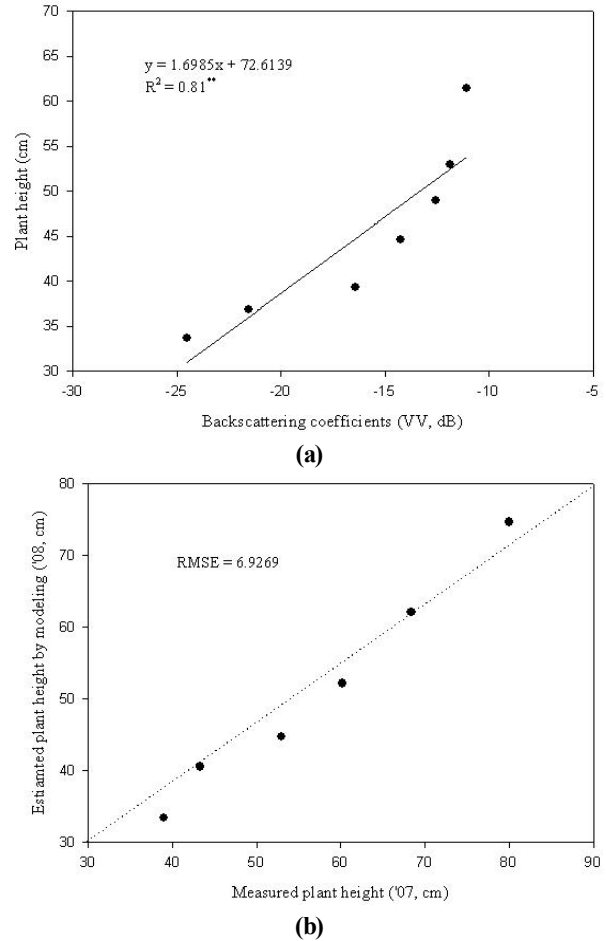


Fig. 5. (a) Relationship between backscattering coefficients in X-band (VV, 45°) and plant height for the duration from tillering effect stage (DOY 168) to panicle formation stage (DOY 209). (b) Comparison between measured (2007yr data) and estimated plant height by modeling (2008yr data).

찾아 벼 생육인자를 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 특히 X-밴드 안테나에서는 수량과 밀접한 관련이 있는 이삭 건물중과의 관계가 높게 나타나 수량의 예측 가능성을 확인하였고, 향후 X-밴드 안테나를 장착하는 아리랑 5호 레이더 영상의 농업활용에 기초 자료로 이용 될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구결과와 다른 여러 문헌에서 밴드별로 산란 (scattering) 과정에서의 작물에 대한 침투 정도의 차이가 나타났기 때문에 현재 L, C, X-밴드 자동관측 시스템을 구축하여 각 안테나 별로 생육시기에 따른 산란특성을 파악하고 작물 생육 추정 모형을 개발하는 연구를 진행하고 있다.

요 약

본 연구에서는 기상조건에 영향을 받지 않고 레이더 산란 측정을 할 수 있는 X-band 안테나 기반 자동관측

시스템을 구축하였다. 이 시스템을 이용하여 벼 생육시기에 따른 편파별 후방산란계수 변화와 벼 생육인자 변화를 관측하고, 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계를 분석을 통해 최적조건의 후방산란계수를 이용한 벼 생육을 추정하였다.

벼 생육시기에 후방산란계수 변화를 관측해 본 결과 생육초기에는 VV-편파가 HH, HV/VH-편파 보다 후방산란계수가 높게 나타났고, 모든 편파별 후방산란계수가 벼 유수형성기 (7월 말경)까지 증가하다가 그 후 감소 한 후 9월 초순이후 다시 증가하는 dual-peak 현상을 뚜렷이 나타냈다. 동시에 생육시기에 따른 생체중, 이삭 건물중, 엽면적지수, 초장 등 벼 생육인자들의 생육 변화를 관측해 보았는데 생체중, 엽면적지수, 초장은 6월 중순부터 7월 하순까지 편파별 후방산란계수와의 변화 경향이 비슷하게 나타났고, 이삭 건물중의 경우 특히 VV-편파 후방산란계수가 9월 초순에서 10월 초순까

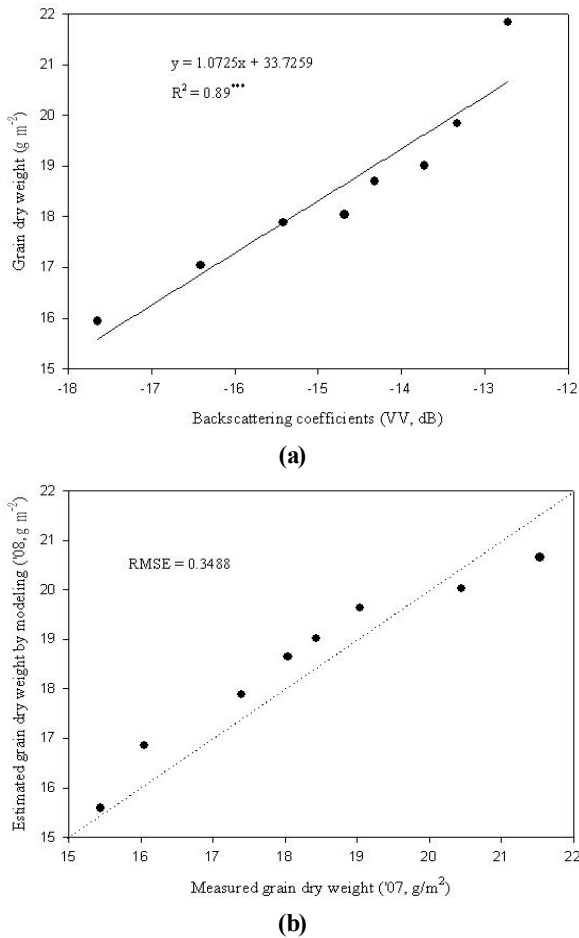


Fig. 6. (a) Relationship between backscattering coefficients in X-band (VV, 45°) and grain dry weight for the duration from early-September (DOY 244) to early-October (DOY 276). (b) Comparison between measured (2007yr data) and predicted grain weight by modeling (2008yr data).

지 변화 경향이 동일하게 나타났다.

편파별 후방산란계수와 벼 생육인자와의 상관관계를 분석한 결과 엽면적지수, 생체중은 6월 중순 (DOY 168) 부터 7월 하순 (DOY 209) 시기에 HH-편파 후방산란 계수와 상관관계가 높았고, 초장은 같은 시기에 VV-편 파 후방산란계수와 관계가 높게 나타났다. 이삭 건물중 의 경우 벼 출수기가 끝나고 결실기로 접어드는 9월 초 순 (DOY 244) 부터 10월 초순 (DOY 276) 시기에 VV-편파 후방산란계수와 상관관계가 높게 나타났다.

이 결과를 바탕으로 벼 생육인자와 상관성이 높게 나타 난 편파별 후방산란계수를 이용하여 벼 생육을 추정하 였다. 엽면적지수는 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 2007년도 실측값과 2008년도 추정 경험 모형을 비교해 본 결과 비교적 오차가 작았고 (RMSE=0.43), 상관관 계가 높은 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 2007년 도 생체중 실측값과 생체중 추정 모형 (2008년도)을 비

교해 본 결과 RMSE가 41.0 g m⁻² 으로 비교적 작은 오차를 보여 생체중 추정 모형의 유효성이 높다는 것이 증명되었다. 또한 초장의 경우 실측값 (2007년)과 초장 추정 모형 (2008년)을 비교 분석한 결과 오차 범위가 비교적 작게 나타났고 (RMSE=6.93 cm), VV-편파 후 방산란계수를 이용해 얻은 이삭 건물중 추정 경험 모형 (2008년도)과 2007년도 이삭 건물중 실측값과의 관계 를 통해 추정식을 검증한 결과 RMSE=0.35 g/m² 을 보여 이삭 건물중 추정모형의 유효성이 높다는 것이 증 명되었다.

본 연구결과에서는 Kim et al. (2009)이 일정한 간 격을 두고 수동조건으로 관측한 결과와 비교해서 벼 생 육시기에 따른 편파별 후방산란계수 변화 경향이 뚜렷 하게 나타났고, 이 후방산란계수를 이용하여 벼 생육인 자와의 관계 및 추정 결과에서도 기존 결과보다 상관관 계 및 생육추정 모형 유효성이 높게 나타났다. 본 연구 결과를 통해 X-band 산란계 자동측정 시스템을 이용하 여 벼 생육을 예측 할 수 있음을 확인하였다.

인 용 문 헌

Attema, E.P. and F.T. Ulaby. 1978. Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*. 13:357-364.

Bouman, B.A.M. 1991. Crop Parameter estimation from ground-based X-band (3-cm Wave) radar backscattering data. *Remote Sens. Environ.* 37:193-205.

Bouvet, A., T. Le Toan, and N. Lam-Dao. 2009. Monitoring of the Rice Cropping System in the Mekong Delta Using ENVISAT/ASAR Dual Polarization Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47:517-526.

Brisco, B.R., J. Brown., J.A. Koehler., G.J. Sofko, and M.J. McKibben. 1990. The diurnal pattern of microwave backscattering by wheat. *Remote Sens. Environ.* 34: 37-47.

Cuizhen, W., W. Jiaping., Z. Yuan., P. Guangdong, and Q. Jiaguo. 2009. Characterizing L-band scattering of paddy rice in southeast china with radiative transfer model and multitemporal ALOS/PALSAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 47:988-998.

Hong, S.Y., S.H. Hong, and S.K. Rim. 2000. Relationship between Radarsat backscattering coefficient and rice growth. *Korean J. Remote Sensing.* 16:109-116.

Inoue, Y., T. Kurosu., H. Maeno., S. Uratsuka., T. Kowu., K. Dabrowska-Zielinska, and J. Qi. 2002. Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice field and their relationship with biological variables. *Remote Sensing of Environment.* 81:194-204.

- Susaki, J. and K. Yoshifumi. 2008. Decomposition of polarimetric scattering of paddy rice. in Proc. IGARSS-2008 Symposium. pp. 451-455.
- Kurosu, T., M. Fujita, and K. Chiba. 1997. The identification of rice fields using multi-temporal ERS-1 C- band SAR data. *International Journal of Remote Sensing*. 18:2953-2965.
- Kim, Y.H., S.Y. Hong, and H.Y. Lee. 2009. Estimation of paddy rice growth parameters using L, C, X-bands polarimetric scatterometer. *Korean J. Remote Sensing*. 25(1):31-44.
- Le Toan, T., H. Laur., E. Mougin, and A. Lopes. 1989. Multitemporal and dual-polarization observations of agricultural vegetation covers by X-band SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 27:709-718.
- Le Toan, T., F. Ribbes., L. Wang., N.K. Floury., J.A. Kong., M. Fujita, and T. Kurosu. 1997. Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 35:41-56.
- Lin, H., J. Chen., Z. Pei., S. Zhang, and X. Hu. 2009. Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 47:2572-2580.
- Macelloni. G.S., P.P. Paloscia., F. Marliani, and M. Gai. 2001. The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39:873-884.
- Maity, S., C. Patnaik, and S. Panigrahy. 2004. Analysis of temporal backscattering of cotton crops using a semi-empirical model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42:577-587.
- Paris, J.F. 1986. The effect of leaf size on the microwave backscattering by corn. *Remote Sensing of Environment*. 19:81-95.
- Paloscica, S. 1998. An empirical approach to estimating leaf index from multifrequency SAR data. *International Journal of Remote Sensing*. 19:359-364.
- Ulaby, F.T. and T.F. Bush. 1976. Monitoring wheat growth with radar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 42: 557-568.
- Ulaby, F.T., C.T. Allen., G. Eger, and E.T. Kanemasu. 1984. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. *Remote Sensing of Environment*. 14:113-133.
- Ulaby, F.T. and C. Elachi. 1990. *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*. Artech House Inc.
- Wigneron, J.P., P. Ferrazzoli., A. Oliso., P. Bertuzzi, and A. Chanzy. 1999. A simple approach to monitor crop biomass from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*. 69:179-188.
- Yamaguchi, Y., T. Moriyama., M. Ishido, and H. Yamada. 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 43:1699-1706.