

## 마이크로파 산란계를 이용한 벼, 콩 생육단계 추정

김이현 · 홍석영\* · 이훈열<sup>1</sup> · 이재은<sup>2</sup> · 이경도

농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과, <sup>1</sup>강원대학교 자연과학대학 지구물리학과, <sup>2</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 전작과

### Estimation of Rice and Soybean Growth Stage Using a Microwave Scatterometer

Yihyun Kim, Sukyoung Hong\*, Hoonyol Lee<sup>1</sup>, Jae-Eun Lee<sup>2</sup>, and Kyungdo Lee

<sup>1</sup>Soil and Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

<sup>2</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University

<sup>3</sup>Upland Crop Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration

Microwave radar can penetrate cloud cover regardless of weather conditions and can be used day and night. Especially a A ground-based polarimetric scatterometer operating at multiple frequencies can continuously monitor the crop conditions. We analyzed scattering characteristics of rice and soybean using pauli decomposition method. Surface scattering ( $\alpha$ ) is the dominant component over the entire stages for all bands and pauli decomposition value was the highest for L-band. Double bounce scattering ( $\beta$ ) and volume scattering ( $\gamma$ ) were approximately equal for C-band and volume scattering was higher than double bounce scattering for X-band in rice field. In soybean, double bounce scattering becomes higher than volume scattering during the R2 stage (DOY 224) and there was a significant difference between the two components after the R4 stage (DOY 242) for L-band. The maximum growth stage of soybean can also be detected using L-band double bounce scattering. The peak of double bounce effect coincides with the peak of growth biophysical variables on DOY 271. We found that pauli decomposition can provide insight on the relative magnitude of different scattering mechanisms during the rice and soybean growth cycle.

**Key words:** Microwave remote sensing, Pauli decomposition, Surface scattering, Double bounce scattering, Volume scattering

## 서 언

마이크로파 원격탐사는 에너지원이 인공발생 극초단파 (microwave)로 자체적으로 펄스신호를 내보내어 대상체 (target)로부터 되돌아오는 신호인 후방산란계수 (backscattering coefficients)를 얻는 것으로 날씨에 영향을 거의 받지 않는다. 특히 농업분야에서 레이더 기술의 장점을 살려 수확량 예측, 작물의 생육 모니터링, 관개답 면적 추정, 재해 피해 모니터링 등에 활용할 수 있다. 따라서 레이더 자료의 농업적 활용에 대한 중요성이 커지고 있다.

전 세계적으로 레이더 인공위성과 지상 레이더 자료를 이용하여 작물 생육을 모니터링하고, 추정하려는 연구가 수 년 동안 활발히 진행되고 있다 (Bahari et al., 1997; Ribbes and Le Toan, 1999; Wagner et al., 1999; Wigneron et al.,

1999; Macelloni et al., 2001; Maity et al., 2004; Xiao et al., 2005; Chen and McNairn, 2006; Bouvet and Le Toan, 2011).

마이크로파 산란계는 다중편파, 다양한 입사각도를 이용하여 연속적으로 작물생육을 모니터링을 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 마이크로파와 대상체의 작용 (interaction)에서 산란특성이 나타나는데 크게 표면 산란 (surface scattering), 이중 산란 (double bounce scattering), 체적 산란 (volume scattering)이 일어난다. 농업분야에서는 표면 산란은 토양 거칠기가 거의 없는 맨땅에서 주로 일어나고 입사각도와 반사각도가 동일한 경향을 보인다. 이중 산란은 토양과 작물 간의 반사에 의해 발생하고, 체적 산란은 토양-작물, 작물-작물 간의 상호 반사에 의해 일어나는데 복잡한 산란 메커니즘이 나타난다 (Ulaby, et al., 1982).

마이크로파 산란계는 decomposition 방법을 이용하여 산란특성에 따라 산란변이 즉 표면 산란, 이중 산란, 체적 산란을 예측하는데 유용하다. Yamaguchi et al. (2005)은

접수 : 2012. 7. 2 수리 : 2012. 8. 7

\*연락처 : Phone: +82312900344

E-mail: syhong67@korea.kr

POLSAR decomposition을 하기 위한 산란모델을 개발하였고, Junichi 와 Yoshifumi (2008)는 decomposition 방법을 이용하여 실내 포트시험을 통해 벼의 산란특성을 알아보았는데 X-밴드의 경우 표면 산란이 주로 일어났고 L-밴드는 체적 산란이 주로 나타나는 것을 확인하였다.

Decomposition은 작물 밀도, 군락 높이 등 작물 생물리학적 특성 정보를 제공해준다. 예를 들어 물에 잠긴 논벼의 군락의 특성정보를 decomposition components을 이용하여 얻을 수 있다. Decomposition에서 작물 형태나 구조가 산란 구성성분을 계산하는데 가장 중요한 인자들이다. Lee와 pottier는 산란특성정보를 알아보기 위한 목적으로 pauli decomposition을 제안하였는데 이 방법은 후방산란계수에서 표면 산란, 이중 산란, 체적 산란 값을 각각 산출할 수 있는 간단한 방법이며 직관적인(intuitive) 방법 중의 하나이다 (Lee and Pottier, 2009).

본 논문에서는 마이크로파 산란계 시스템을 이용하여 벼, 콩 두 작물을 대상으로 전체 생육시기별 작물 생육변화를 모니터링하고, 두 작물에 대해 pauli decomposition을 통해 인자값을 산출하였다. 또한, Decomposition을 통해 얻어진 인자값들과 작물생육과의 비교 분석을 통해 작물 생육단계를 추정하였다.

## 재료 및 방법

**연구지역** 마이크로파 산란계를 이용하여 우리나라 대표작물인 벼와 콩에 대한 작물생육변화를 관측하였다. 벼의 경우 2009년도 국립농업과학원 시험포장 (37° 15' 28.0" N, 126° 59' 21.5" E)에서 추정벼 (*Oryza sativa L. var. sativa*)를 대상으로 연구를 수행하였다. 시험포장의 면적은 22 m × 31 m 이었고, 어린 묘가 15 cm 정도 일 때 재식밀도가 30 cm × 15 cm 조건으로 벼를 이앙하였다. 벼 이앙일은 5월 18일 (Day Of Year, DOY 138), 수확일은 10월 12일 (DOY 285)이다. 마이크로파 산란계 자동관측 시스템을 구축하여 벼 이앙기 전 (2009년 5월 16일)에 연구지역에 시스템을 설치 한 후 벼 수확기 (10월 12일)까지 레이더 산란특성을 모니터링 하였다.

콩은 국립식량과학원 시험포장 (37° 15' 34.77" N, 126° 58' 32.52" E)에서 2010년에 대풍콩 (*Glycine max L. Merrill*)

을 대상으로 연구를 수행하였다. 시험포장의 면적은 25 m × 32 m, 재식밀도 60 cm × 15 cm 이었고, 콩 파종일은 6월 4일 (DOY 154), 수확일은 10월 22일 (DOY 294)이다. 마이크로파 산란계 자동관측 시스템을 구축하여 콩 파종 전 (2010년 6월 2일)에 연구지역에 시스템을 설치 한 후 콩 수확기 (10월 22일)까지 레이더 산란특성을 측정 하였다. 벼와 콩이 자라는 방향 (crop row orientation)은 밴드별 안테나의 azimuth 각도와 동일한 방향이었다.

**토양, 작물생육 조사 및 분석** 벼와 콩 작물에 대한 토양화학성 분석은 토양 및 식물체 분석법에 준하였고 (NAAS, 2010), 채취한 토양은, 풍건 후 2 mm체로 통과된 것을 분석 시료로 사용하였다. 토양 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 하여 측정하였으며, 유기물 함량은 Tyurin법으로 분석하였고, 유효인산은 Lancaster법을 이용하였다. 치환성 양이온 (K, Ca, Mg, Na)은 pH 7.0 1N CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>로 치환 후 ICP (Inductively Coupled Plasma, GBC Scientific Equipment Pty Ltd, Australia)로 분석하였고, CEC (Cation Exchange Capacity)는 pH 7.0 1N CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>로 추출한 후 kjeldahl 증류장치를 사용하여 분석하였다. 토양화학성 분석 결과는 Table 1과 같다.

콩 연구지역에서 토성 (soil texture)은 양토로 분류되었고 미사 (silt) 24.4%, 모래 (sand) 40.4%, 점토 (clay) 35.2% 포함되어있고, 용적밀도 (bulk density)가 1.26 g cm<sup>-3</sup> 이었다.

벼, 콩 생육조사는 초장 (plant height), 생체중 (fresh weight), 건물중 (dry weight), 엽면적지수 (Leaf area index) 등을 수확기까지 정기적으로 조사 (1회/주)하였으며 벼 이삭 건물중 (grain dry weight) 경우 8월 말부터 수확기까지 약 3 일 간격으로 조사하였다. 벼는 생육이 고른 3주를 선택하여 초장, 생체중, 엽면적지수를 측정하고 60°C에서 36시간 건조 후 건물중을 측정하였다. 콩은 생육이 고른 15주를 선택하여 초장, 생체중 등을 측정하고 60°C에서 건조하여 건물중 등을 측정하였다.

두 작물 엽면적지수는 단위면적에 대한 군락의 엽 면적으로 정의되고 개엽을 모두 떼어내어 LI-3100 (LI-COR, Inc. USA)을 이용하여 직접 측정된 후 주 (株) 재식밀도로 구하였다. 생체중에서 건물중을 뺀 값으로 식생 수분함량 (vegetation water content)을 얻었다.

**Table 1. Soil chemical properties of the study sites.**

Crop	pH	OM	NH <sub>4</sub> -N	Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Exchangeable cations			CEC	Available SiO <sub>2</sub>	Bulk density
					K	Ca	Mg			
	1:5	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>			mg kg <sup>-1</sup>	g cm <sup>-3</sup>	
Rice	5.9	20	9	38	0.5	6.6	1.9	18.1	143	
soybean	5.9	18	9	173	0.3	5.3	2.0	12.7	1.26	

**Table 2. Specification of the L, C and X-band automatic scatterometer system.**

Specification	L-Band	C-Band	X-band
Center frequency (GHz)	1.27	5.3	9.65
Antenna Gain (dB)	12.4	20.1	22.4
Antenna Type	Dual polarimetric square horn		
Number of Frequency points	201	801	1601
Band Width (MHz)	120	600	1000
Wavelength (m)	0.23	0.056	0.031
Slant range resolution (m)	1.23	0.25	0.15
Polarization	HH, VV, HV, VH		
Incident angle (°)	40		
Platform height (m)	4.16		
Measurement time	1 per 10 minutes		

**마이크로파 산란계 시스템 구축** 마이크로파 산란계 구성항목으로는 L, C, X-밴드 안테나 (dual polarization square horn type), 네트워크 분석기, GPIB (General Purpose Interface Bus)—USB, calibration kit, Radio Frequency (RF) cable, RF switch, 노트북 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 강우, 바람 등 기후의 영향을 최소화하기 위해 측정시스템 건물을 제작하였다. 네트워크 분석기, GPIB—USB, RF cable, RF switch, 측정 프로그램이 내장된 노트북 컴퓨터 등은 건물 내부에 설치하였고, L, C, X-밴드 안테나는 각 RF cable들과 연결되는 부분을 밀봉하여 건물 외부에 설치하였다 (Kim et al., 2011).

측정시스템 구성항목별 특성은 Table 2와 같다. 네트워크 분석기는 8720D (Agilent Technologies, USA)을 사용하였는데 가용 가능한 주파수 범위는 20 MHz ~ 20 GHz 이며, 안테나의 중심 주파수를 1.27 GHz (L-밴드), 5.3 GHz (C-밴드), 9.65 GHz (X-밴드) 각각 설계하였다. 안테나 이득 (gain)은 12.4 dB (L-밴드), 20.1 dB (C-밴드), 22.4 dB (X-밴드) 이고, 안테나 파장은 각각 0.23 nm (L-밴드), 0.056 nm (C-밴드), 0.031 nm (X-밴드) 이다. 밴드별 대상체에 대한 신호 감지 범위 (footprint)는 L-밴드는 7.4 m × 3.9 m, C-밴드가 2.2 m × 1.2 m, X-밴드는 2.0 m × 1.1 m 이었다.

여름철 건물 내부에 온도가 올라가는 것을 막기 위해 내부에 냉난방기를 설치하여 측정기간 동안 20°C를 유지하였다. 시스템 calibration 및 자료 질 향상을 위해 RF switch를 이용하여 10분당 1회씩 자동으로 산란특성을 측정하도록 설계하였고, 모든 편파 (HH, VV, HV, VH)에 대한 산란특성을 측정할 수 있도록 하였다. 대상체에서 산란되어 돌아오는 HH, VV, HV, VH 편파의 크기 (amplitude)와 위상 (phase) 정보를 얻을 수 있고 이 파일을 후방산란계수 추출에 이용하였다. 밴드별 후방산란계수 산출은 레이더 방정식을 이용하였다 (Ulaby et al., 1990).

**Decomposition을 이용한 산란특성 분석** Lee와 Pottier는 산란특성정보를 알아보기 위한 목적으로 Pauli decomposition을 제안하였다 (Lee and Pottier, 2009). 본 연구에서는 Pauli decomposition을 이용하여 벼, 콩에서 얻어진 후방산란계수에서 표면 산란, 이중 산란, 체적 산란 값을 각각 추출하였다.

Pauli decomposition은 scattering matrix [S]로 표현될 수 있는데 일반적으로 식 (1) ~ 식 (4)에서 산출된다 (Cameron and Leung, 1990; Lee and Pottier, 2009).

$$[S]_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$[S]_b = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$[S]_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$[S]_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

결과적으로 scattering matrix [S]는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$[S] = \begin{bmatrix} s_{hh} & s_{hv} \\ s_{hv} & s_{vv} \end{bmatrix} = \alpha [S]_a + \beta [S]_b + \gamma [S]_c \tag{5}$$

여기에서 각 항의  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 식 (6) ~ 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{S_{hh} + S_{vv}}{\sqrt{2}} \tag{6}$$

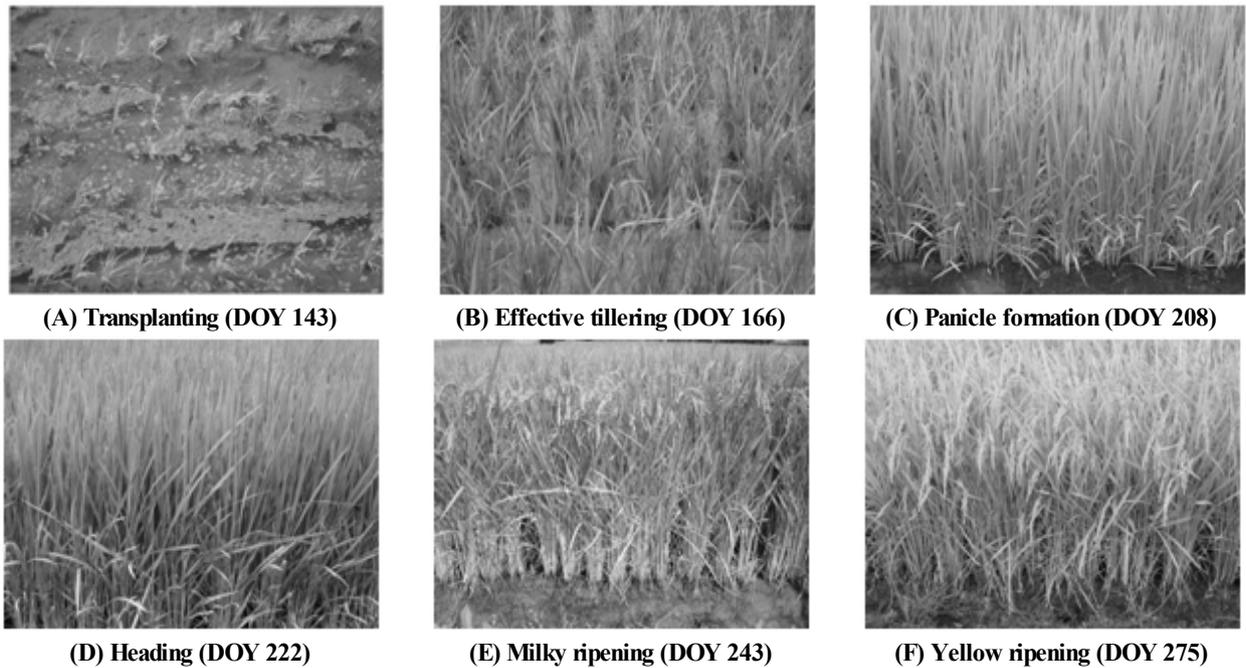


Fig. 1. Field photos of rice in various growth stages.

$$\beta = \frac{S_{hh} - S_{vv}}{\sqrt{2}} \tag{7}$$

$$\gamma = \sqrt{2} S_{hv} \tag{8}$$

[S]<sub>a</sub>는 표면 산란을 의미하고, [S]<sub>b</sub>는 이중 산란을 나타내며, [S]<sub>c</sub>는 체적 산란을 나타낸다.

### 결과 및 고찰

생육시기에 따른 밴드별 후방산란계수와 벼, 콩 생육인자 변화 분석 벼 생육단계는 크게 영양생장기 (vegetative stage), 생식생장기 (reproductive stage) 2단계로 구분된다. 본 실험에서 영양생장기는 모이앙기 (A: DOY 143, 5월 22일)부터 유효분얼기 (B: DOY 166, 6월 16일), 유수형성기 (C: DOY 208, 7월 26일), 출수기 (D: DOY 222, 8월 10일)까지 이고, 생식생장기는 출수기부터 유숙기 (E: DOY 243, 8월 31일), 황숙기 (F: DOY 275, 10월 2일), 벼 수확기 (DOY 285, 10월 12일)까지 이다 (Fig. 1).

벼 생육시기에 따른 생육인자들의 변화를 관측한 결과 생체중, 초장, 엽면적지수는 모이앙기 이후 계속 증가하다가 벼 출수기 (DOY 222)를 정점으로 수확기까지 감소하였고 이삭 건물중은 벼 출수기부터 수확기까지 계속 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 2).

콩 생육단계는 영양생장기와 생식생장기로 크게 나눌 수 있다. 영양생장기는 발아기 (A: DOY 166, 6월 16일), 자엽

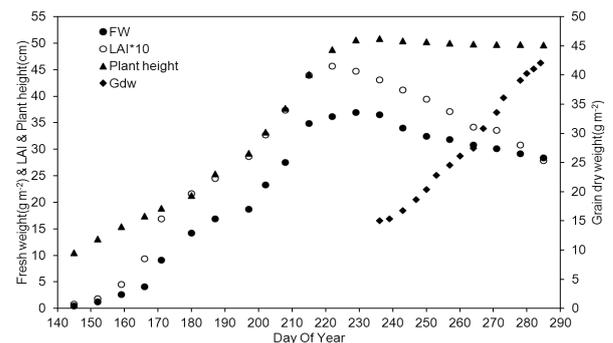


Fig. 2. Temporal variations of rice growth biophysical variables: fresh weight (FW), LAI, plant height and grain dry weight (Gdw).

기 (B: DOY 173, 6월 23일), 초생엽기 (C: DOY 179, 6월 29일), 복엽기 (D: DOY 200, 7월 20일)로 구분된다.

생식생장기는 개화시 (E: DOY 214, 8월 3일), 개화성기 (F: DOY 224, 8월 13일), 착엽시 (G: DOY 228, 8월 17일), 착엽성기 (H: DOY 242, 8월 31일), 종실비대시 (I: DOY 249, 9월 7일), 종실비대기 (J: DOY 277, 10월 5일), 종실성숙시 (K: DOY 280, 10월 8일), 종실성숙기 (L: DOY 287, 10월 15일)로 구분된다 (Fig. 3).

콩 생육인자들의 변화를 관측해 본 결과 엽면적지수, 생체중, 건물중, 식생 수분함량은 콩 파종 이후 계속 증가하다가 R5에서 R6 시기로 넘어가는 9월 28일 (DOY 270)에 최대값을 보인 후 급속히 감소하였고, 녹색을 띠는 꼬투리의 종실은 R6 (DOY 249) 시기까지 증가함으로 이 시기에 꼬투리중이 최대값을 보였고 그 이후 수확기 (DOY 294) 까지 감소하였다 (Fig. 4).

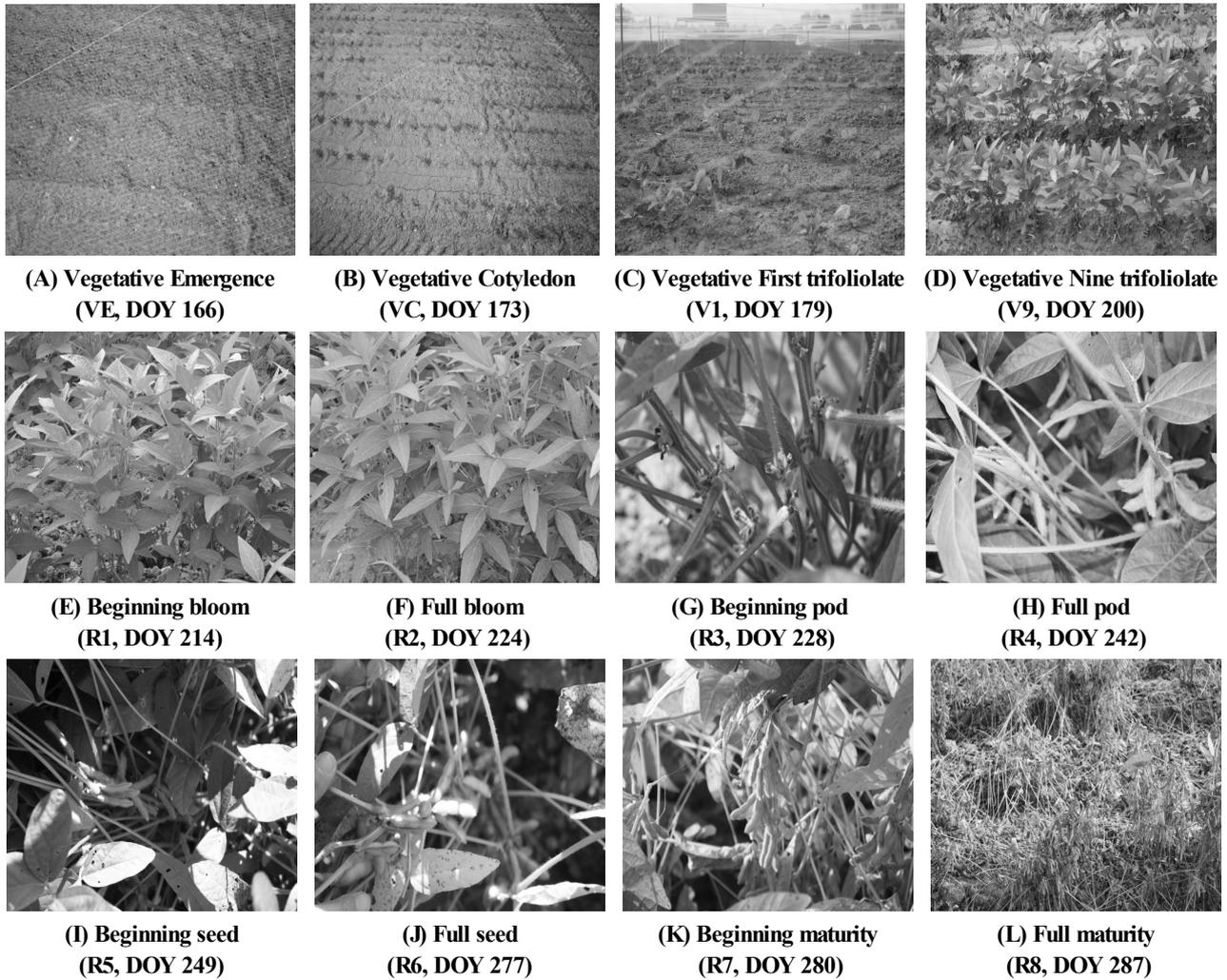


Fig. 3. Field photos of soybean in various growth stages.

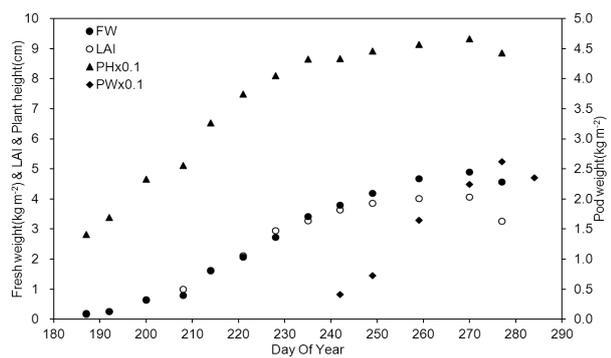


Fig. 4. Temporal variations of soybean growth biophysical variables: fresh weight (FW), LAI, plant height (PH) and pod weight (PW).

**Decomposition 방법을 이용한 생육시기에 따른 벼, 콩 산란특성 분석** Pauli decomposition 방법을 이용한 벼 산란특성 추출 결과는 Fig. 5와 같다.  $\alpha$ 는 표면 산란을 의미하는데 편파가 벼 군락 표면에서 산란되는 정도가 많을수록  $\alpha$  값이 증가한다.  $\beta$ 는 이중 산란을 의미하고  $\gamma$ 는 체적

산란을 의미하는데 벼 군락 내부에서 산란되는 즉 체적산란이 많을수록 값이 증가한다.

Pauli decomposition value는 L-, C-, X-밴드 순으로 높게 나타났다. L-밴드 벼 산란특성 추출 결과에서는 표면 산란 최고값 (peak)이 DOY 219 (8월 7일)에 나타났으며 이 시기는 L-밴드 후방산란계수가 최대값이 나타난 시기 (DOY 220)와 일치한다 (Fig. 5(a)). 이중 산란의 decomposition 값이 체적 산란보다 높아지는 시기는 분얼기 단계 (DOY 182, 7월 1일)에서 나타났고, 특히 벼 출수기 (DOY 222, 8월 10일) 이후 이중 산란 효과가 크게 나타났다.

C-밴드의 경우 표면 산란 최고값이 DOY 219 (8월 7일)에 나타났으며 이 시기는 C-밴드 후방산란계수가 최대값이 나타난 시기 (DOY 220)와 역시 일치하였다. C-밴드는 생육기 간동안 이중 산란과 체적 산란의 decomposition 값이 거의 같았다 (Fig. 5(b)). X-밴드 벼 산란특성 추출 결과에서는 표면 산란 최고값이 DOY 206 (7월 24일)에 나타났으며 이 시기는 후방산란계수가 최대값을 보인 시점 (DOY 206)과 일치한다. 또한 벼 생육기간동안 체적 산란 decomposition

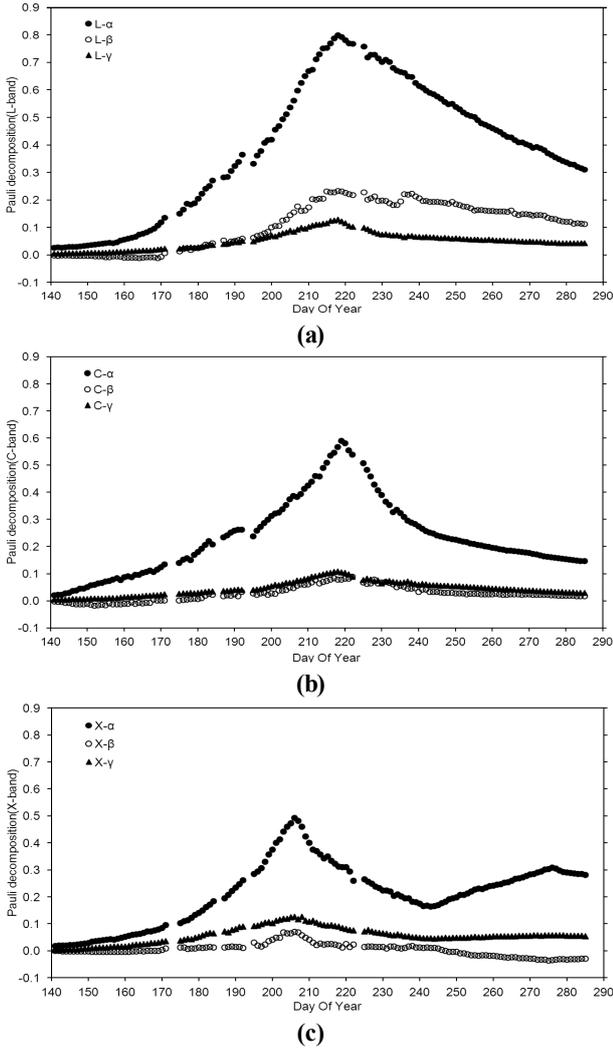


Fig. 5. Components of pauli decomposition ( $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$ ) in (a) L-band, (b) C-band and (c) X-band at the rice field.

값이 이중 산란 보다 높게 나타났다 (Fig. 5(c)). X-밴드는  $\alpha$  값이 우수형성기까지 증가하다가 감소한 후에 9월 초순 이후 다시 증가하는 경향을 보였다.

Pauli decomposition 방법을 이용하여 콩 생육시기별 산란특성을 분석하였다 (Fig. 6). L-밴드에서 Pauli decomposition 값이 가장 높았다. 모든 밴드에서 표면 산란 최고값 DOY 271 (9월 28일)에 나타났다. L-밴드에서는 R2 (DOY 224, 8월 13일) 시기에 이중 산란 ( $\beta$ )이 체적 산란 ( $\gamma$ )보다 높게 나타났고, R4 (DOY 242, 8월 31일) 이후로는 두 요소간의 값 차이가 크게 나타났다 (Fig. 6(a)). C-밴드는 이중 산란과 체적 산란의 decomposition 값이 거의 같았고 (Fig. 6(b)), X-밴드의 경우 체적 산란 decomposition 값이 이중 산란 보다 높게 나타났다 (Fig. 6(c)).

**산란특성을 이용한 벼, 콩 생육단계 추정** 벼 생육단계에 따라 Pauli decomposition을 통해 얻어진  $\alpha$  (표면 산란),  $\beta$  (이중 산란),  $\gamma$  (체적 산란) 값의 비율을 이용하여 벼

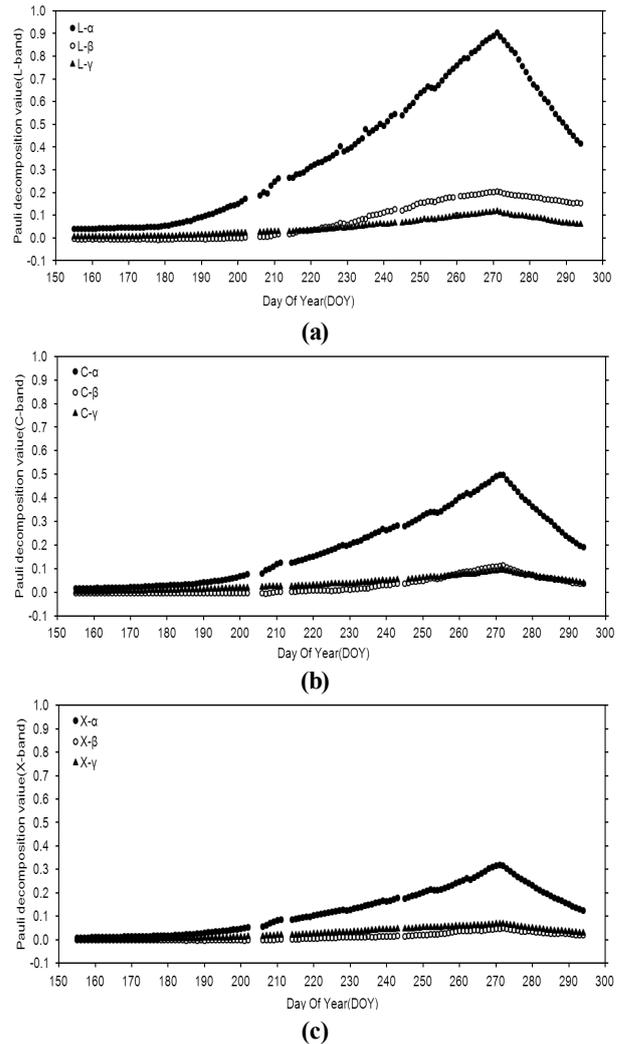


Fig. 6. Components of pauli decomposition ( $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$ ) in (a) L-band, (b) C-band and (c) X-band at the soybean field.

생육단계를 추정하였다 (Fig. 7). L-밴드는 벼 생육이 진행됨에 따라 표면 산란이 감소하고 이중 산란이 증가하였고, C-, X-밴드와 비교해 볼 때 벼 출수기 (DOY 222, 8월 10일) 이후 이중 산란이 차지하는 비율이 높았다. 이중 산란이 체적 산란보다 증가하는 시점은 DOY 182 (7월 1일)로 이 시기인 분얼기를 추정할 수 있다 (Fig. 7(a)). C-밴드는 벼 생육시기에 따라 표면 산란 감소폭이 L-밴드 보다 낮았고, 체적 산란 비율 (volum scattering ratio)은 이중 산란 비율 (double bounce scattering ratio)보다 벼 생육초기와 벼 출수기 이후에 높게 나타났다. 벼 출수기에는 두 산란값의 비율이 비슷하게 나타났다 (Fig. 7(b)). 이중 산란 비율이 벼 출수기 때에 최대값이 나타남으로 C-밴드 Pauli decomposition ratio을 이용하여 벼 출수기 추정이 가능할 것으로 생각된다.

X-밴드는 벼 생육이 진행되면서 표면 산란 비율이 감소하다가 DOY 170 (6월 19일)을 기점으로 정체된 이후 벼 유숙기 (DOY 243, 8월 31일)에 다시 증가하였다 (Fig. 7(c)). 벼 유숙기 (DOY 243) 이후 체적 산란 비율이 급격히 감소하였다. 이

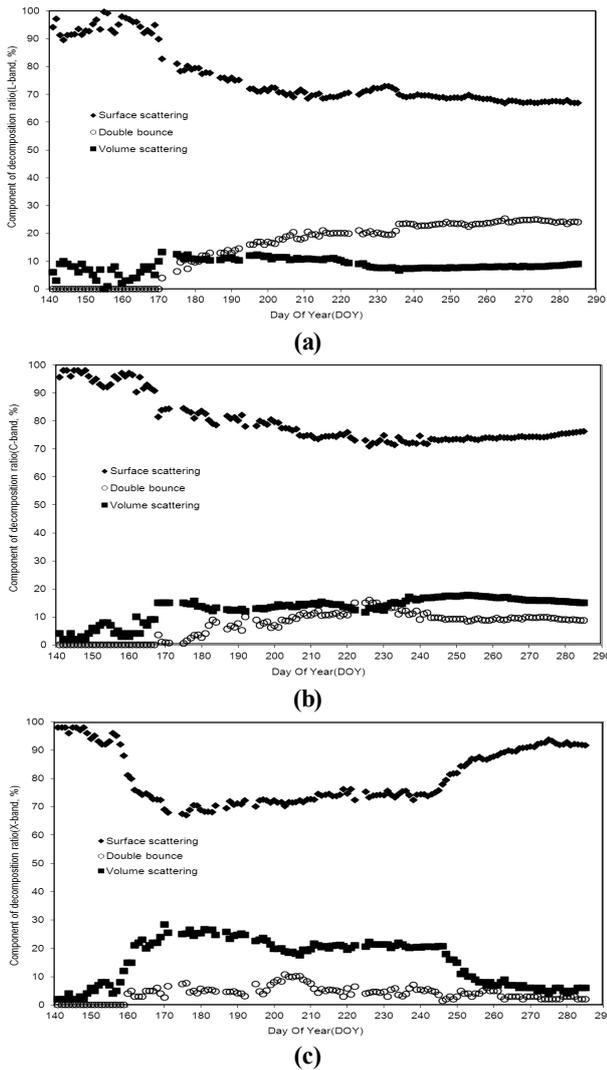


Fig. 7. Pauli decomposition ratio in (a) L-band, (b) C-band and (c) X-band at the rice field.

중 산란 비율이 최대값을 나타내는 시기는 DOY 206 (7월 24일)로 이 시기인 유수형성기 추정이 가능하다.

마이크로파 산란특성을 이용하여 콩 생육단계에서 영양생장기 (VE ~ V9)를 감지 (detection)하기는 쉽지 않다. 하지만 L, C, X-밴드 후방산란계수에서 얻어진 산란특성 정보를 이용하여 콩 생육시기에서 R2 (DOY 224, 8월 13일)가 시작되는 시점의 예측은 가능하다. 즉, L-밴드의 이중 산란이 체적 산란 보다 높아지는 시기가 R2 단계가 시작되는 시점과 일치한다. 또한 L-밴드 이중 산란을 이용하여 콩 생육이 가장 왕성할 때 (maximum growth stage)를 추정할 수 있다. L-밴드 이중 산란이 최대값을 가진 시기가 생체중, 엽면적지수 등이 최대가 될 때 (DOY 271, 9월 29일)와 일치한다 (Fig. 8(a)). 따라서 마이크로파 산란계에서 얻어진 decomposition 방법을 이용하여 콩 생육단계를 추정할 수 있음을 확인하였다.

일반적으로 산란특성은 주파수, 편파, 입사각도 등에 영

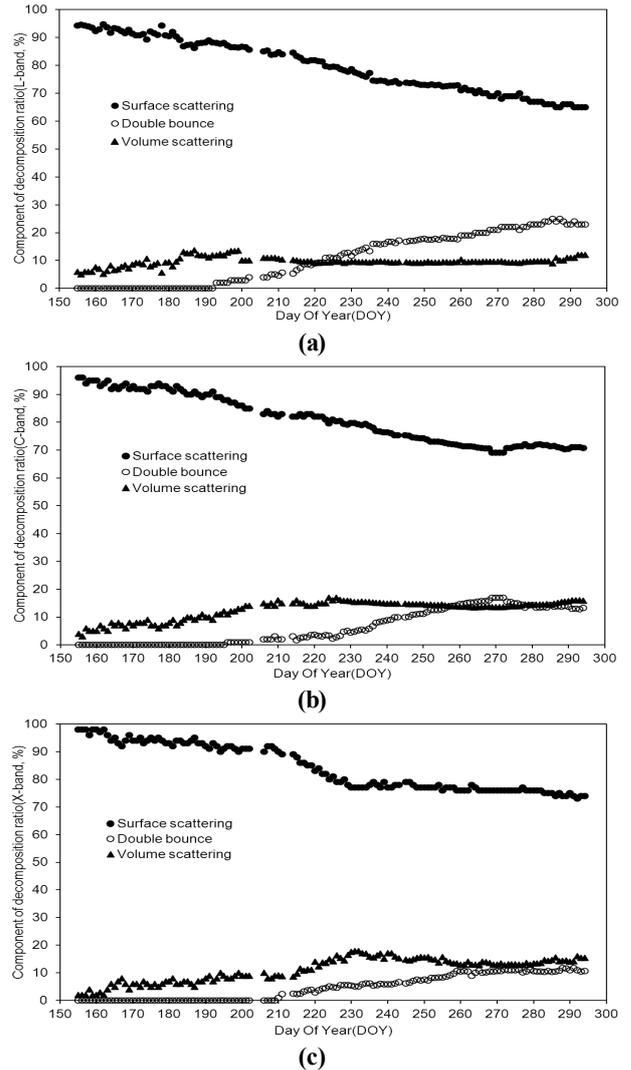


Fig. 8. Pauli decomposition ratio in (a) L-band, (b) C-band and (c) X-band at the soybean field.

향을 받는데 본 결과에서도 안테나 밴드에 따라 작물 산란 특성이 다르게 나타났다. 마이크로파 산란계에서 얻어진 산란특성 결과를 이용하여 작물생육단계를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 요 약

본 연구에서는 마이크로파 산란계 시스템을 이용하여 벼, 콩 작물을 대상으로 후방산란계수와 작물생육변화를 관측하고 pauli decomposition을 통해 얻어진 인자값과 작물생육과의 비교를 통해 작물 생육단계를 추정하였다. Pauli decomposition 방법을 이용 생육시기에 따른 벼 산란특성을 분석한 결과 L-밴드는 벼 출수기 (DOY 222, 8월 10일) 이후 이중 산란 ( $\sigma_{hh} - \sigma_{vv}$ ) 효과가 크게 나타났고, C-밴드는 생육기간동안 이중 산란과 체적 산란의 decomposition

value가 거의 같았으며, X-밴드는 체적 산란이 이중 산란보다 높게 나타났다. Pauli decomposition 방법을 이용하여 콩 생육시기별 산란특성을 분석한 결과 L-밴드에서는 R2 (DOY 224, 8월 13일) 시기에 이중 산란이 체적 산란보다 높게 나타났고, R4 (DOY 242, 8월 31일) 이후로는 두 요소간의 값 차이가 크게 나타났다. Pauli decomposition ratio를 이용한 벼, 콩 생육단계를 추정하는데 있어 이중 산란이 key factor로 작용하는 것을 알 수 있었다. 벼의 경우 L-밴드에서는 이중 산란이 차지하는 비율이 체적 산란 비율보다 높아지기 시작하는 시점이 분얼기 (DOY 183, 7월 1일)이며, 이중 산란 효과가 벼 출수기 이후 지속적으로 나타나기 때문에 분얼기와 벼 출수기의 생육단계 추정이 가능하다. C-밴드는 이중 산란 비율이 최대값을 나타내는 시점이 벼 출수기와 일치하여 이 시기 추정이 가능할 것으로 판단된다. X-밴드의 경우에는 이중 산란 비율이 최대값을 가지는 시점이 유수형성기 (DOY 206, 7월 24일)로 이 시기 추정이 가능하고, 표면 산란이 다시 증가하는 시점이 유숙기 (DOY 243, 8월 31일)로 이 시기도 pauli decomposition ratio를 이용하여 추정이 가능할 것으로 판단된다. 또한 콩의 경우에는 L-밴드의 이중 산란이 체적 산란보다 높아지는 시기가 R2 (DOY 224, 8월 13일) 임으로 이 시기 예측이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 마이크로파 산란계에서 얻어진 decomposition 방법을 이용하여 벼, 콩 생육단계를 예측할 수 있음을 확인하였다.

## 사 사

이 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호:PJ007753 032012) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 인 용 문 헌

Bahari, S.A., H. Tali, T. Chuah, and H.T. Ewe. 1997. A preliminary study of phenological growth stages of wetland rice using ERS1/2 SAR data. in proc. IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium. pp.1069-1071.  
 Bouvet, A. and T. Le Toan. 2011. Use of ENVISAT/ASAR wide-swath data for timely rice fields mapping in the Mekong River Delta. Remote Sens. Environ. 115(4):1090-1101.  
 Cameron, W.L. and L.K. Leung. 1990. Feature-motivated scattering matrix decomposition. in proc. IEEE Radar

Conference, Arlington, VA, USA. pp.549-557.  
 Chen, C. and H. McNairn. 2006. A neural network integrated approach for rice crop monitoring. Int. J. Remote Sens. 27:1367-1393.  
 Junichi, S. and K. Yoshifumi. 2008. Decomposition of polarimetric scattering of paddy rice. in Proc. IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium, Boston, USA, pp.451-455.  
 Kim, Y.H., S.Y. Hong, H.Y. Lee, and J.E. Lee. 2011. Monitoring soybean growth using L, C, and X-bands automatic radar scatterometer measurement. Korean J. Remote Sens. 27(2):191-201.  
 Lee, J.S. and E. Pottier. 2009. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC, Press.  
 Macelloni, G., S. Paloscia, P. Pampaloni, F. Mariliani, 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. Panigraphy. 2004. Analysis of temporal backscattering of cotton crops using a semi-empirical model. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 42:577-587.  
 National Academy of Agricultural Science. 2010. Methods of soil and crop plant analysis, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.  
 Ribbes, F. and T. Le Toan. 1999. Rice field mapping and monitoring with RADARSAT data. Int. J. Remote Sens. 20:745-765.  
 Ulaby, F.T., M.K. Moore. and A.K. Fung. 1982. Microwave Remote Sensing-Active and Passive. Artech House Inc., Norwood, MA, USA.  
 Ulaby, F.T. and C. Elachi. 1990. Radar Polarimetry for Geoscience Applications. Artech House Inc., Norwood, MA, USA.  
 Wagner, W., G. Lemoine, M. Borgeaud, and H. Rott. 1999. A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 37:938-948.  
 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 Sens. Environ. 69(2):179-188.  
 Xiao, X., Boles, S., Frolking, S., Li, C., J.Y. Babu. and W. Salas. 2005. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. Remote Sens. Environ. 100:95-113.  
 Yamaguchi, Y., Y. Yajima, and H. Yamada. 2005. Our-component scattering model for SAR image decomposition. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 43(8):1699-1706.