

레이더 산란계 편파 차이율을 이용한 콩 생육 추정

김이현 · 홍석영*

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부

Estimation of Soybean Growth Using Polarimetric Discrimination Ratio by Radar Scatterometer

Yihyun Kim and Sukyoung Hong*

Department of Agricultural Environment, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

The soybean is one of the oldest cultivated crops in the world. Microwave remote sensing is an important tool because it can penetrate into cloud independent of weather and it can acquire day or night time data. Especially a ground-based polarimetric scatterometer has advantages of monitoring crop conditions continuously with full polarization and different frequencies. In this study, soybean growth parameters and soil moisture were estimated using polarimetric discrimination ratio (PDR) by radar scatterometer. A ground-based polarimetric scatterometer operating at multiple frequencies was used to continuously monitor the soybean growth condition and soil moisture change. It was set up to obtain data automatically every 10 minutes. The temporal trend of the PDR for all bands agreed with the soybean growth data such as fresh weight, Leaf Area Index, Vegetation Water Content, plant height; *i.e.*, increased until about DOY 271 and decreased afterward. Soil moisture lowly related with PDR in all bands during whole growth stage. In contrast, PDR is relative correlated with soil moisture during below LAI 2. We also analyzed the relationship between the PDR of each band and growth data. It was found that L-band PDR is the most correlated with fresh weight ($r=0.96$), LAI ($r=0.91$), vegetation water content ($r=0.94$) and soil moisture ($r=0.86$). In addition, the relationship between C-, X-band PDR and growth data were moderately correlated ($r\geq 0.83$) with the exception of the soil moisture. Based on the analysis of the relation between the PDR at L, C, X-band and soybean growth parameters, we predicted the growth parameters and soil moisture using L-band PDR. Overall good agreement has been observed between retrieved growth data and observed growth data. Results from this study show that PDR appear effective to estimate soybean growth parameters and soil moisture.

Key words: Soybean, Scatterometer, Polarimetric discrimination ratio, Growth parameters, Soil moisture

서 언

최근 여름철 장마, 연무 등 날씨에 영향을 거의 받지 않고 자료를 얻을 수 있는 레이더에 대한 관심이 높아지고 있고, 작물 생육 및 수량, 토양수분, 재해관측 등 농업 분야에 레이더 자료를 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 레이더 자료를 이용하여 작물생육과의 관계를 분석하는 연구는 미국, 일본, 유럽연합 등을 중심으로 수 년 동안 이루어지고 있는데 이들 국가에서는 인공위성 및 지상 레이더 자료를 이용하여 작물 생육을 모니터링하고, 추정하여 작물생육모형개발을 통해 작물식생변화를 정량화하여 활용하고 있다 (Bahari et al., 1997; Bouvet and Toan,

2010; Chen and Mcnairn, 2006; Macelloni et al., 2001; Maity et al., 2004; Ribbes and Toan, 1999; Wagner et al., 1999; Xiao et al., 2005).

레이더 자료와 작물생육과의 관계 분석 연구의 시초는 Ulaby and Bush (1976)의 마이크로파 산란계 (8-18 GHz)를 이용한 밀 생육을 관측한 연구 결과였다. 이 논문에서는 산란계에서 얻어진 후방산란계수와 밀 생육인자들과의 상관관계를 비교해 보았는데 VV-편파에서 상관성이 높았고 특히 식생수분함량과의 관계에서 상관성이 높게 나타났다 ($r=0.90$). Paris (1986)는 Ulaby et al. (1984)이 구축한 산란계 시스템을 이용하여 후방산란계수와 옥수수 군락 구조 (잎, 줄기 크기, 잎 형태)와의 관계를 알아보고 좀 더 수정된 water cloud 모델을 제시하였다. 이 결과에서 옥수수 군락의 잎 발육단계 동안 green LAI는 K-밴드의 VV-, HH-편파 후방산란계수 (입사각도 50도)와 상관성이 매우

접수 : 2011. 8. 29 수리 : 2011. 9. 30

*연락처 : Phone: +82312900344

E-mail: syhong67@korea.kr

높게 나타났다 ($r=0.99$).

1980년 후반부터 지상 산란계 뿐 만 아니라 레이더 영상을 이용한 작물생육과의 관계를 분석하고 평가하는 연구가 진행되기 시작하였다. Le Toan et al. (1989)은 X-밴드 SAR 영상 (HH-, VV-편파)을 이용하여 벼 재배지역을 생육기간동안 모니터링하고 후방산란계수 변화를 분석하였다. 벼 생육초기에서는 VV-편파가 HH-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났고 벼 군락이 형성되면서 HH-편파가 더 높게 나타났다. Kurosu et al. (1995)은 ERS-1 C-밴드 SAR 영상을 이용하여 전체 벼 생육기간을 최초로 모니터링 하였다. 레이더 영상에서 얻어진 후방산란계와 벼 생육인자를 비교해 본 결과 초장과 생체중에서 상관계수가 높게 나타났다 ($r=0.94$, $r=0.94$). Macelloni et al. (2002)은 후방산란계수를 이용하여 작물생육이나 수량을 추정하는 모델을 만들고 적합성을 검증하기 위해서는 주파수, 입사각도, 편파 등 중에 두개 이상 비교 및 분석해야한다고 보고하였다. Singh (2006)은 X-밴드 지상 산란계 (9.5 GHz, HH-, VV-편파)에서 얻어진 후방산란계수와 콩 생육인자와의 관계를 분석하였다. Kim et al. (2009)은 다편파 레이더 산란계 시스템을 이용하여 벼 생육시기에 따른 후방산란계수 변화를 관측하고 밴드 (L-, C-, X-밴드), 편파 및 입사각도별 후방산란계수와 엽면적지수, 바이오매스, 이삭 건물중 등 벼 생육인자들과의 관계를 분석하였다. 하지만 관측과정에서 안테나 선택과 각도 조절이 모두 수동으로 이루어졌고 측정이 1주일 간격으로 이루어져 강우, 바람, 습도 등 기후요인의 영향을 인해 자료 신뢰성이 제한적이었다.

이를 보완하여 Kim et al. (2010)은 기후 등의 영향을 받지 않고 벼 산란특성을 관측할 수 있는 X-밴드 레이더 자동 관측 시스템을 구축하고, 레이더 산란계에서 얻어진 후방산란계수를 이용하여 벼 생육인자를 추정하였다. 이 논문에서는 Kim et al. (2009)이 관측한 결과와 비교하였을 때 모든 편파별 후방산란계수가 벼 유수형성기 (7월 말경)까지 증가하다가 그 후 감소 한 후 9월 초순이후 다시 증가하는 dual-peak 현상이 뚜렷이 나타났다. X-밴드 후방산란계수를 이용하여 벼 생육인자를 추정 결과 VV-편파 후방산란계수를 이용한 벼 이삭중 추정 모형 결정계수가 0.89였고, 이삭중 추정값과 실측값을 비교한 결과 비교적 작은 오차를 보였다 ($RMSE=0.35 \text{ g m}^{-3}$). 또한 Kim et al. (2011)은 발작물 레이더 시스템을 구축하여 콩 생육변화를 관측하고 레이더 시스템에서 얻어진 후방산란계수와 콩 생육인자들

과의 상관성을 분석하였는데 L-밴드 HH-편파 후방산란계수에서 엽면적지수 ($r=0.93$), 초장 ($r=0.95$), 건물중 ($r=0.94$), 꼬투리중 ($r=0.92$) 등 모든 콩 생육인자들과 상관계수가 가장 높게 나타났다.

마이크로파의 편파는 대상체의 크기, 형태, 방향에 대해 민감하게 반응하는데 편파에서 수평편파는 산란 요소에서 수평면을 측정하고 수직편파는 대상체의 수직면을 측정한다. 발작물에서 마이크로파를 이용할 때는 작물 생육인자 뿐 만 아니라 토양수분, 토양 거칠기 등 토양인자들도 고려되어야 한다 (Ulaby et al., 1986). Singh et al. (2003)은 발작물에서 작물생육인자와 토양특성인자의 산란특성을 분리하기 위해 편파차이 비율 (Polarimetric discrimination ration, PDR)을 개발하였다. 그 이후 PDR를 이용하여 작물 생육인자와의 관계를 분석하고 생육을 추정하는 연구결과가 발표되었다 (Prasad, 2009; Singh, 2006).

하지만 예전 연구들에서는 입사각도 조절이 수동으로 이루어졌고, 10일 이상의 간격을 두고 측정이 이루어져서 자료의 정확성이 제한적이고, 단일 안테나 (X-밴드)만을 이용하여 실험을 하였기 때문에 밴드별 침투력에 따른 작물생육특성을 정확히 파악하기가 힘들다. 따라서 본 논문에서는 기후 등의 영향을 받지 않고 3개의 안테나 (L, C, X-밴드)를 장착한 레이더 산란계 자동측정시스템을 이용하여 이 시스템에서 얻어진 편파 차이 비율인 PDR과 콩 생육인자들과의 관계를 분석하고 콩 생육을 추정하였다.

재료 및 방법

연구지역 레이더 산란특성 측정은 국립식량과학원 시험 포장 (37° 15' 34.77" N lat, 126° 58' 32.52" E long)에서 2010년에 대풍콩 (*Glycine max* (L.) Merrill)을 대상으로 콩 파종 전 (6월 3일)부터 콩 수확기 (10월 22일)까지 수행하였다. 시험포장의 면적은 약 800 m², 재식밀도 60 x 15 cm 이었고, 콩 파종일은 6월 4일, 수확일은 10월 22일 이었다. 시험 전 토양이화학성은 Table 1에서 보는 바와 같다.

콩 생육조사 콩 생육단계는 영양생장과 생식생장기로 크게 나눌 수 있는데 영양생장은 발아기 (자엽이 지상에 나타나는 시기, VE), 자엽기 (초생엽이 전개되는 시기, VC), 초생엽기 (초생엽이 완전히 전개된 시기, V1), 복엽기 (복엽이 전개되고 완전히 전개된 시기, Vn)로 구분되며

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

pH	OM	NH ₄ -N	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation			CEC	Bulk density	Soil texture
				K	Ca	Mg			
(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----		Mg m ⁻³	Loam
5.9	18.3	9	173	0.3	5.3	2.0	12.7	143	

생식생장기는 개화시 (꽃이 피기 시작하는 시기, R1), 개화성기 (꽃이 활짝 피는 시기, R2), 착협시 (꼬투리가 생성되는 시기, R3), 착협성기 (꼬투리 길이 생장이 완료되는 시기, R4), 종실비대시 (꼬투리의 종실이 생성되는 시기, R5), 종실비대기 (종실크기 생장이 완료되는 시기 R6), 종실성숙시 (종실 색깔이 황갈색으로 변하는 시기, R7), 종실성숙기 (종실 색깔이 95% 이상 황갈색으로 변한 시기, R8)로 구분된다 (Fehr and Caviness, 1977). 본 연구에서의 해당 콩 생육단계 시기는 Table 2와 같다. 초장 (Plant height), 엽면적지수 (Leaf Area Index), 생체중 (Fresh weight), 건물중 (Dry weight), 식생수분함량 (Vegetation water content), 꼬투리중 (Pod weight) 등 콩 생육조사를 수확기까지 정기적으로 조사 (1회/주)하였다. 먼저 생육이 고른 15주를 선택하여 초장, 생체중 등을 측정하고 60°C에서 건조하여 건물중 등을 측정하였으며 생체중과 건물중의 차이로 식생수분함량을 구하였다. 엽면적지수는 단위면적에 대한 군락의 엽 면적으로 정의되고 개엽을 모두 떼어내어 LI-3100 (LI-COR, Inc.)을 이용하여 직접 측정한 후 주(株) 재식밀도로 구하였다. 표토층 (5 cm)에 토양수분센서 (Echo-5 TE probe,

Decagon Devices, Inc.)를 설치하여 콩 생육기간동안 토양 수분함량변화를 관측하였다. 밴드별 PDR과 콩 생육인자들과의 상관분석 및 회귀분석은 SigmaPlot 프로그램 (SigmaPlot ver.10, Systat Software Inc.) 수행하였다.

후방산란계수 편파차이 비율 (PDR) 변화 관측 콩 생육시기에 따른 레이더파의 편파 차이 비율 변화를 측정하기 위해 레이더 산란계 자동관측시스템을 이용하였다. 산란계 자동관측시스템의 구성항목별 특성은 Table 3과 같다. 레이더 산란계 자동 측정시스템 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. 안테나는 dual-polarization square horn 안테나를 사용하였고 Calibration Kit (SMA, 85052D)을 이용 시스템 Calibration을 하였다.

네트워크 분석기는 8720D (Agilent Tech.)를 사용하였는데 가용 가능한 주파수 범위는 20 MHz~20 GHz이다. 안테나 이득은 1.24 dB (L-밴드), 20.1 dB (C-밴드), 22.4 dB

Table 2. Soybean growth stages.

Vegetative stages	Reproductive stages
VE-emergence(DOY 166)	R1-beginning bloom(DOY 214)
VC-cotyledon(DOY 173)	R2-full bloom(DOY 224)
V1-first trifoliolate(DOY 179)	R3-beginning pod(DOY 228)
V2-second trifoliolate(DOY 183)	R4-full pod(DOY 242)
Vn-nth trifoliolate (DOY 183 ~ DOY 213)	R5-beginning seed(DOY 249)
	R6-full seed(DOY 277)
	R7-beginning maturity(DOY 280)
	R8-full maturity(DOY 287)

Table 3. Specification of the L, C and X-band automatic scatterometer system.

Parameters	L-Band	C-Band	X-band
Frequency (GHz)	1.27 ± 0.06	5.3 ± 0.3	9.65 ± 0.5
Beam Width	E-Plane (Deg.)	11.15-15.72	35.11-41.73
	H-Plane (Deg.)	14.62-19.36	40.88-49.22
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 10minutes		

(X-밴드)이고, 안테나 파장은 각각 0.23 nm (L-밴드), 0.056 nm (C-밴드), 0.031 nm (X-밴드)이다. 자동측정시스템은 모든 편파 (HH, VV, HV, VH)에 대한 산란특성을 측정할 수 있도록 하였고, 시스템 Calibration 및 자료 질 향상을 위해 RF switch를 이용하여 10분당 1회씩 자동으로 산란특성을 측정하도록 설계하였다 (Kim et al., 2011).

안테나별 후방산란계수는 레이더 방정식을 이용하여 산출하였다 (Ulaby and Elachi, 1990). PDR은 작물생육인자와 토양특성인자의 산란특성을 분리하기 위해 개발된 정규화된 지수이다. PDR은 다음식과 같다.

$$PDR = \frac{\sigma^{\circ}_{VV} - \sigma^{\circ}_{HH}}{\sigma^{\circ}_{VV} + \sigma^{\circ}_{HH}} \quad (1)$$

여기에서 σ_{VV} , σ_{HH} 는 VV-, HH-편파 후방산란계수를 의미하며 PDR 범위는 $-1 \leq PDR \leq 1$ 이다.

결과 및 고찰

생육시기에 따른 밴드별 PDR 변화 분석 콩 생육시기에 따른 L, C, X-밴드 PDR과 생육인자 변화를 분석하였다. 밴드별 PDR 범위는 각각 L-밴드가 $-0.02 \sim 0.49$, C-밴드는 $-0.03 \sim 0.22$, X-밴드는 $-0.03 \sim 0.10$ 로 L-밴드 후방산란계수 편파 차이 비율로 얻어진 PDR이 다른 밴드에서 추출한 PDR보다 높게 나타났다. 이 결과는 Kim et al. (2011)이 밴드별 후방산란계수 범위 조사에서 L-밴드가 후방산란계수 최대값이 가장 높게 나온 결과와 일치한다.

Figure 1은 L-밴드 PDR과 콩 생육인자 변화를 보여주고 있다. L-밴드 PDR은 콩 생육이 진행됨에 따라 일정하

게 증가하다가 9월 29일 (DOY 271)에 최대값을 보인 후 급격히 감소하였다. 엽면적지수, 식생수분함량, 생체중, 초장 등 콩 생육인자들도 콩 파종 이후 계속 증가하다가 R5에서 R6 시기로 넘어가는 9월 28일 (DOY 270)에 최대값을 보인 후 급속히 감소하였는데 콩 생육인자들이 최대값을 보인시기 (DOY 270)와 L-밴드 PDR이 최대값인 시점 (DOY 271)이 거의 일치하였다. 콩 생육기간동안 토양수분함량 범위는 15.9~36.1%이었다. L-밴드 PDR과 토양수분변화 관계 비교에서 토양수분은 콩 생육인자들과 다른 경향을 보였다. 전체 콩 생육 기간에서 토양수분 변이가 다른 콩 생육인자들에 비해 크게 나타났는데 생육초기에는 PDR이 증가함에 따라 토양수분도 증가하는 경향을 보였지만 8월 중순 이후 (DOY 230) 토양수분 변이가 크게 나타났으며 9월 하순 (DOY 265) 이후 수확기까지는 변화가 크지 않았다. 따라서 작물생육인자들과 달리 토양수분은 L-밴드 PDR과 전체 생육기간에서는 서로 상관성이 높지 않음을 볼 수 있었다. 하지만 8월 초순 (DOY 220)까지 L-밴드 PDR과 토양수분이 증가하는 경향이 비슷하게 나타났는데 이 시기의 엽면적지수가 2였다. 발작물은 해당 작물이 균락이 형성되고 있는 시기까지는 레이더 파는 토양 거칠기, 토양수분에 영향을 많이 받지만 균락이 형성된 이후에는 토양수분의 영향을 적게 받는다 (Fung, 1994; Paris, 1986; Ulaby et al., 1986). 따라서 본 연구에서는 밴드별 PDR과 토양수분과의 관계를 작물 균락형성의 지표인 엽면적지수를 이용하여 생육시기에 따라 두 변수간의 상관성을 분석하였다 (Table 4).

C-밴드 PDR과 콩 생육인자 변화를 관측한 결과는 Fig. 2와 같다. C-밴드 PDR은 10월 1일 (DOY 273)에 최대값을 보인 후 감소하였고 콩 생육초기에 증가폭이 L-밴드 PDR보다 낮았다. 특히 L-밴드 PDR이 개화시 (R1, DOY 214)이

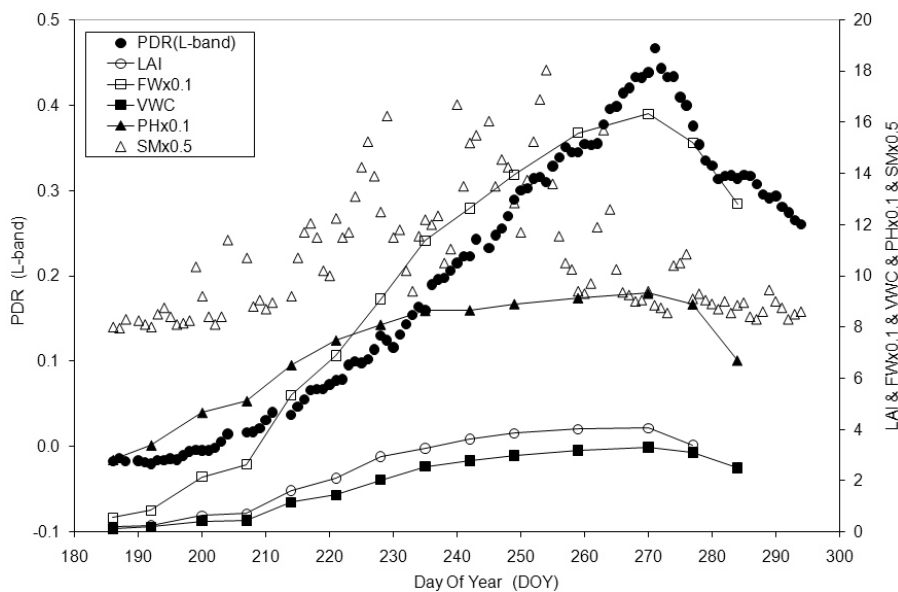


Fig. 1. Comparison between L-band PDR and soybean growth data during whole growth stage.

Table 4. Correlation coefficients between polarimetric discrimination ratio in each band and soybean growth parameters during growth periods.

	L-band PDR	C-band PDR	X-band PDR
Total fresh weight [†]	0.96***	0.91***	0.85**
Leaf area index [‡]	0.91***	0.86**	0.83**
Vegetation water content [§]	0.94***	0.90***	0.87**
Soil moisture [¶]	0.47	0.34	0.32
Soil moisture [‡]	0.86**	0.77**	0.72*

[†]during whole growth stage, [‡]during whole growth stage, [§]during whole growth stage, [¶]during whole growth stage, [‡]during until R2 stage (full bloom).

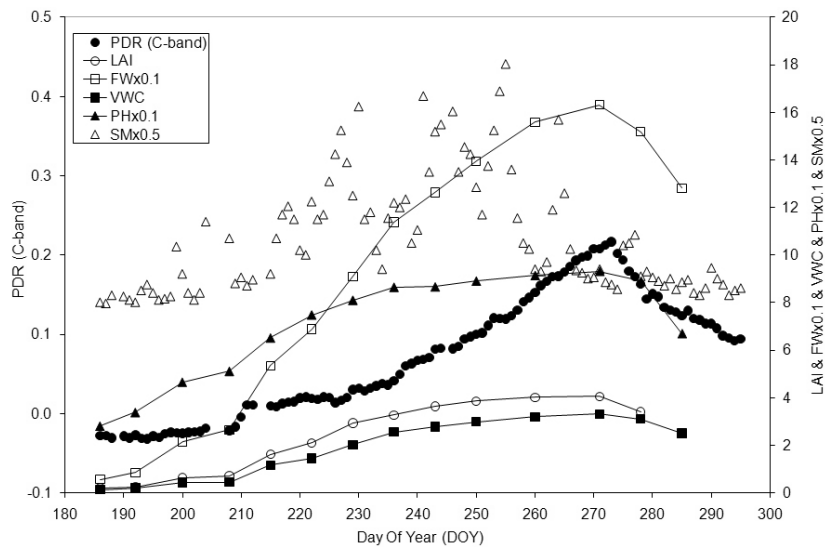


Fig. 2. Comparison between C-band PDR and soybean growth data during whole growth stage.

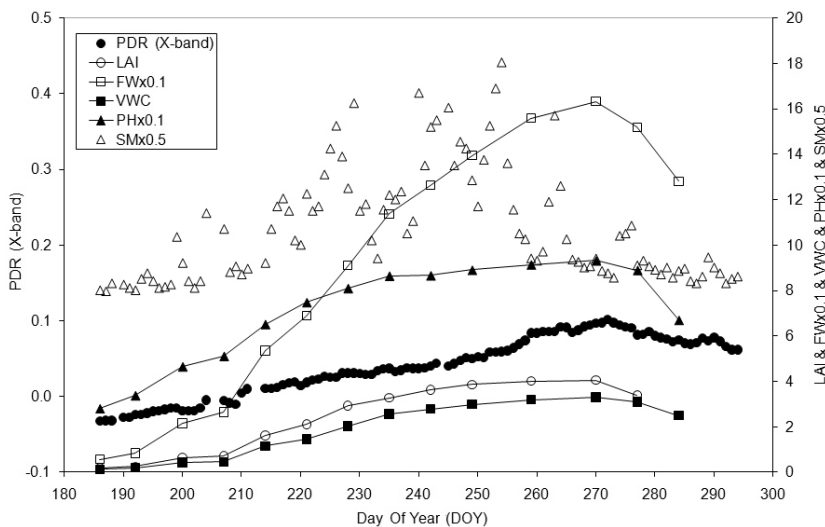


Fig. 3. Comparison between X-band PDR and soybean growth data during whole growth stage.

후 증가폭이 큰 반면 C-밴드 PDR은 착엽성기 (R4, DOY 242) 이후 증가폭이 크게 나타났다. Figure 3은 생육기간 동안 X-밴드 PDR과 콩 생육인자 변화를 보여주고 있다. L, C-밴드에 비해 PDR값이 낮게 나타났는데 그 이유는 상대적으로 작물 균락과 토양에 침투하는 능력이 떨어지기 때

문인 것으로 판단된다 (Ulaby et al., 1986). 착엽성기 (R4, DOY 242) 이후 본격적으로 증가하기 시작하였고, 10월 1일 (DOY 273)에 최대값을 보인 후 감소하는 경향을 보였다. PDR 변화를 볼 때 L, C-밴드에 비해 콩 생육인자등과의 상관성이 낮음을 확인할 수 있었다.

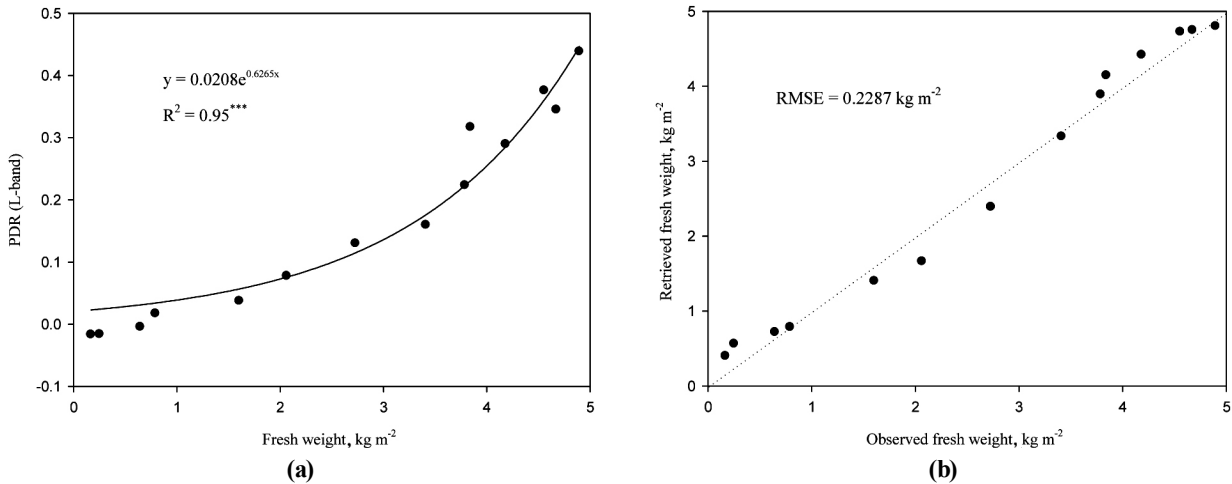


Fig. 4. (a) Relationship between PDR (L-band) and fresh weight. (b) Comparison between observed and retrieved fresh weight.

밴드별 PDR과 콩 생육인자 상관성 분석 생육시기에 따른 밴드별 PDR과 콩 생육인자와의 변화를 분석한 결과를 바탕으로 PDR과 생체중, 엽면적지수, 식생수분함량, 토양수분 등 콩 생육인자들과의 상관관계를 분석하였다. Table 4는 각 밴드에 따른 PDR과 콩 생육인자와의 상관계수를 보여주고 있다. 밴드별 PDR과 콩 생육인자 및 토양수분과의 관계를 분석해 본 결과 L-밴드 편파특성에서 얻어진 PDR이 모든 인자에서 상관계수가 가장 높게 나타났다. L-밴드에서 얻어진 PDR이 생체중과 상관계수가 가장 높게 나타났다 ($r=0.96$). 엽면적지수와 상관성 비교에서는 L-밴드 PDR, C-밴드 PDR, X-밴드 PDR 순으로 상관계수가 높게 나타났으며 식생수분함량과의 비교해서도 L-밴드 PDR에서 상관성이 가장 높았다 ($r=0.94$). PDR과 토양수분과의 관계에서는 L-밴드, C-밴드, X-밴드 순으로 상관계수가 높았지만 모든 밴드에서 PDR과 토양수분함량과의 상관관계가 낮게 나타났다 ($r \leq 0.47$). 전체 생육기간동안 PDR과 토양수분함량과의 상관성이 낮았지만 8월 초순 (DOY 220) 까지 PDR과 토양수분이 증가하는 경향이 비슷하게 나타났다.

따라서 근락 형성의 지표인 엽면적지수 변화에 따른 PDR과 토양수분과의 상관성을 분석하였다. 엽면적지수 2 이하일 때 (DOY 220) 모든 밴드에서 PDR과 토양수분과의 상관계수가 전체 생육단계에서 조사한 것 보다 높게 나타났다. L-밴드 PDR이 상관계수가 가장 높게 나타났고 ($r=0.86$), 다른 밴드 PDR에서도 전체 생육기간에서의 상관계수에 비해 상관관계가 높게 나타났다.

즉 모든 밴드에서 PDR은 생체중, 엽면적지수, 식생수분함량 등 콩 생육인자들과의 관계 분석에서 비교적 상관성이 높게 나타난 반면 ($r > 0.83$), 토양수분과의 비교에서는 상대적으로 상관계수가 낮게 나타났다. 이 결과는 Wagner et al. (1999), Prasad (2009)가 발표한 결과와 일치한다. 이들

논문에서는 콩 실험에서 엽면적지수가 높아질수록 PDR은 토양수분과의 상관성이 낮아진다고 발표하였다. 본 연구결과에서도 콩 생육기간 중 엽면적지수가 낮은 경우 (LAI<2)에는 PDR이 토양에 영향을 많이 받았지만 엽면적지수가 높아질수록 (LAI>2) 토양에 대한 영향이 감소되었다.

PDR를 이용한 콩 생육 추정 밴드별 PDR과 콩 생육인자 및 토양수분함량과의 상관성 분석에서 얻은 결과를 바탕으로 L-밴드 PDR을 이용하여 콩 생육인자 및 토양수분함량 추정을 위한 회귀식을 작성하였다. L-밴드 PDR을 이용한 콩 생체중과의 비교에서 결정계수가 0.95로서 좋은 추정식을 구할 수 있었다 (Fig. 4). 이 추정 경험 모형을 이용하여 생체중 실측값과 생체 추정모형을 비교해 본 결과 적은 오차를 보였다 ($RMSE=0.2287 \text{ kg m}^{-2}$).

Figure 5는 L-밴드 PDR을 이용하여 엽면적지수를 추정된 결과이다. 회귀분석의 결정계수가 높게 나타났고 ($R^2=0.89$), 엽면적지수 실측값과 추정값을 비교해 본 결과 RMSE가 0.2004로 비교적 오차가 작았다. 식생수분함량과 상관관계가 가장 높은 L-밴드 PDR를 이용하여 식생수분함량을 추정하였는데 식생수분함량과 L-밴드 PDR의 결정계수가 0.93으로 좋은 추정식을 구할 수 있었다 (Fig. 6-a). 이 추정 경험 모형을 이용하여 식생수분함량 실측값과 식생수분함량 추정 모형을 비교해 본 결과 $RMSE=0.1481 \text{ kg m}^{-2}$ 으로 비교적 작은 오차를 보여 식생수분함량 추정 모형의 유효성이 높다는 것이 증명되었다 (Fig. 6-b).

L-밴드 PDR 이용한 토양수분함량 추정을 위한 회귀식을 작성하였다(Fig. 7). 1차식이 성립되었고 ($PDR=0.0098$ (soil moisture)-0.1614), 결정계수가 0.75였다. 이 경험 모형을 이용하여 토양수분함량 실측값과 추정값을 1:1 선상에서 비교해 본 결과 $RMSE=0.0009\%$ 로 추정 경험모형식의 정확성이 증명되었다.

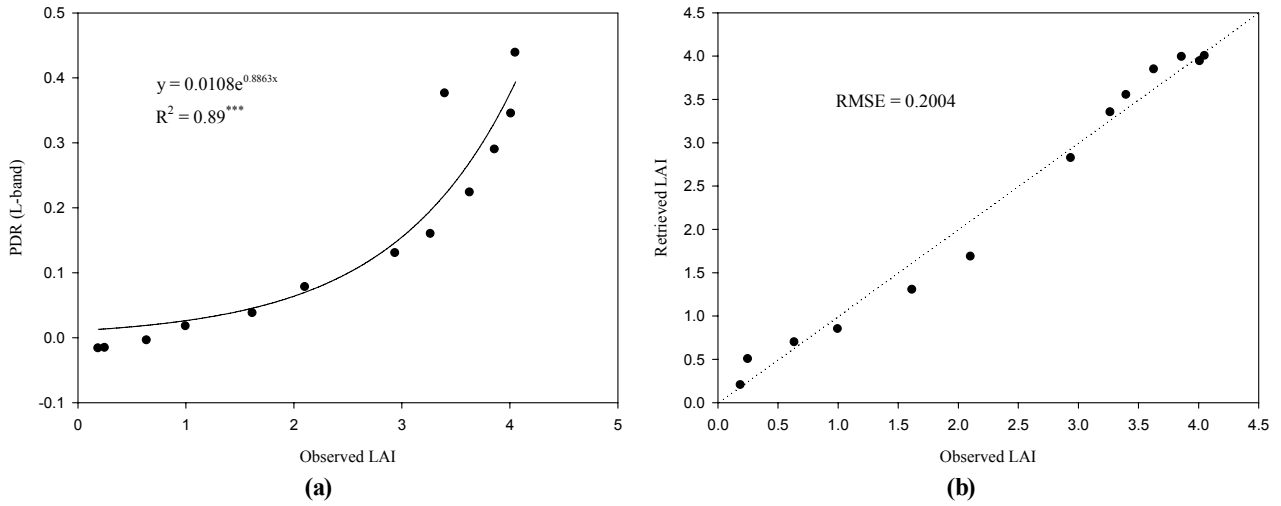


Fig. 5. (a) Relationship between PDR (L-band) and LAI. (b) Comparison between observed and retrieved LAI.

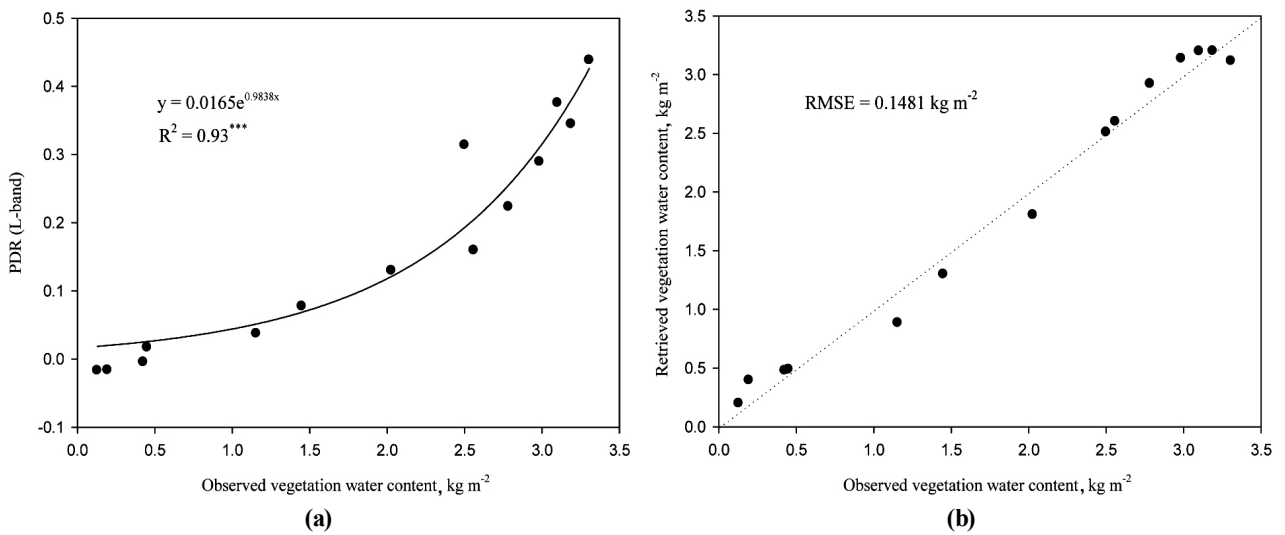


Fig. 6. (a) Relationship between PDR (L-band) and vegetation water content. (b) Comparison between observed and retrieved vegetation water content.

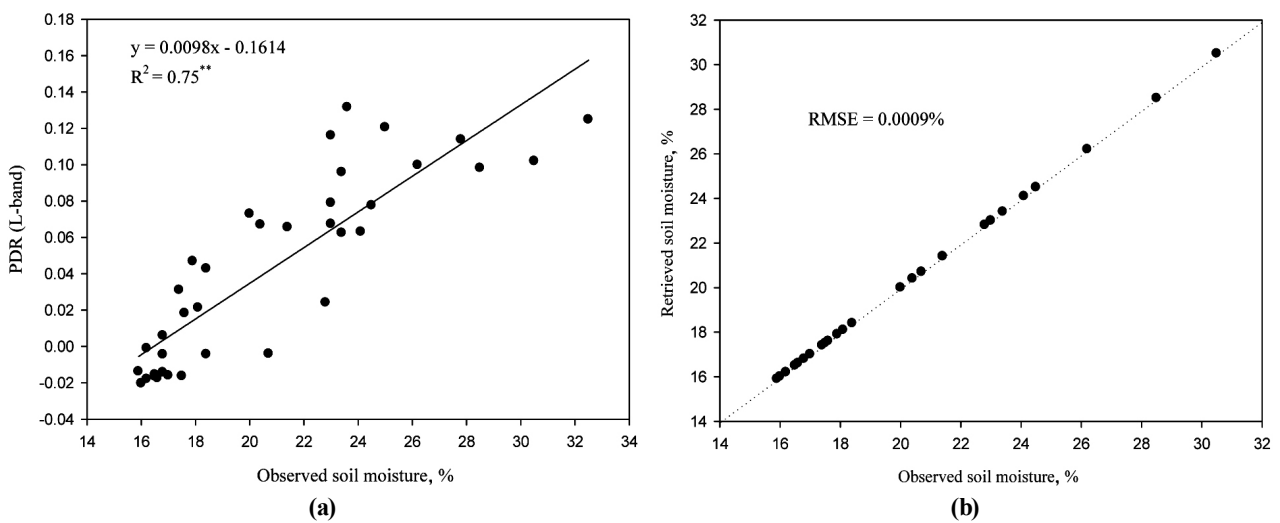


Fig. 7. (a) Relationship between PDR (L-band) and soil moisture. (b) Comparison between observed and retrieved vegetation water content.

본 연구결과를 통해 콩 생육 및 토양수분을 추정하는데 PDR과 인자들과의 관계분석을 통해 최적조건을 찾고 PDR를 이용하여 콩 생육인자 및 토양수분을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

요 약

본 연구에서는 레이더파 편파 차이비율에서 얻어진 밴드별 Polarimetric Discrimination Ratio (PDR)와 콩 생육인자 및 토양수분과의 관계를 분석하고 PDR를 이용하여 콩 생육 및 토양수분을 추정하고자 하였다. 기후 등의 영향을 받지 않고 10분 단위로 레이더 산란 측정을 할 수 있는 L, C, X-밴드 레이더 산란계 자동측정시스템을 이용하여 PDR와 콩 생육인자 변화를 모니터링 하였다.

콩 생육시기에 따른 밴드별 PDR과 콩 생육인자 변화를 관측한 결과 L-밴드 PDR이 C-, X-밴드 PDR보다 높게 나타났고, 밴드별 PDR이 가장 높게 보인 시기는 L-밴드 PDR (DOY 271), C-, X-밴드 PDR (DOY 273)로 거의 일치하였고, 엽면적지수, 식생수분함량, 생체중, 초장 등 콩 생육인자들도 동일한 경향을 보였는데 콩 파종 이후 증가하다가 9월 27일 (DOY 270)에 최대값을 보인 후 감소하였다. 하지만 토양수분은 콩 생육인자들과 다른 경향을 보였다. 생육기간동안 토양수분의 변이가 컸고 PDR과 상관성도 높지 않았다. 하지만 엽면적지수가 2이하 일 때 콩 PDR이 증가함에 따라 토양수분도 증가하는 경향을 보였다.

밴드별 PDR과 콩 생육인자와의 상관관계를 분석하였다. L-밴드 PDR에서 생체중 ($r=0.96^{***}$), 엽면적지수 ($r=0.91^{***}$), 식생수분함량 ($r=0.94^{***}$), 토양수분 ($r=0.86^{**}$) 등 모든 콩 생육인자들과 상관계수가 가장 높게 나타났다. C-, X-밴드 PDR에서도 토양수분을 제외한 다른 인자들과 대체로 상관성이 높았다 ($r \geq 0.83$). 전체 생육기간에서 PDR과 토양수분과의 상관성은 낮았지만 엽면적지수 2 이하 일 때 (DOY 220) 모든 밴드에서 PDR과 토양수분과의 상관계수가 전체 생육단계에서 조사한 것 보다 높게 나타났다.

콩 생육인자들과의 상관분석에서 상관계수가 가장 높은 L-밴드 PDR를 이용하여 콩 생육인자 추정을 위한 회귀식을 작성하고 생육인자 실측값과 추정값을 비교하였다. L-밴드 PDR과 생육인자들과의 관계를 비교해 본 결과 생체중 ($R^2=0.95$), 엽면적지수 ($R^2=0.89$), 식생수분함량 ($R^2=0.93$)에서 결정계수가 높게 나타났고 생육인자 실측값과 추정값을 1:1 선상에서 비교해 본 결과 작은 오차를 보여 추정 모형의 유효성이 높다는 것이 증명되었다. 본 연구를 통해 PDR를 이용하여 콩 생육 및 토양수분을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호:PJ007753032011)의 지원에 의해 이루어진 것임.

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.
- Chen, C. and H. McNairn. 2006. A neural network integrated approach for rice crop monitoring. *Int. J. Remote Sens.* 27:1367-1393.
- Fehr, W.R. and C.E. Caviness. 1977. Stages of soybean development. Iowa Agric. Home Econ. Exp. Stn, IA, USA.
- Fung, A.K. 1994. Microwave scattering and emission models and their applications. Artech House Inc., Norwood, MA, USA.
- 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 Sens.* 25:31-44.
- Kim, Y.H., S.Y. Hong, and H.Y. Lee. 2010. Construction of X-band automatic radar scatterometer measurement system and monitoring of rice growth. *Korean Soc. Soil Sci. Fertilizer.* 43:374-383.
- 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.
- Kurosu, T., M. Fujita, and K. Chiba. 1995. Monitoring of rice crop growth from space using the ERS-1 C-band SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33(4):1092-1096.
- Le Toan, T., H. Laur., E. Mougin, and A. Lopes. 1989. Multi-temporal and dual-polarization observations of agricultural vegetation covers by X-band SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 27(6):709-718.
- 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.
- Macelloni, G., S.P. Palosica, and R. Pampalori. 2002. Modelling radar backscatter from crops during the growth cycle. *Agronomie.* 22:575-579.
- 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.
- Prasad, R. 2009. Retrieval of crop variables with field-based X-band microwave remote sensing of ladyfinger. *Advanced in space research.* 43:1356-1363.
- Paris, J.F. 1986. The effect of leaf size on the microwave backscattering by corn. *Remote Sens. Environ.* 19:81-95.
- Ribbes, F. and T. Le Toan. 1999. Rice field mapping and monitoring with RADARSAT data. *Int. J. Remote Sens.* 20:745-765.
- Singh, D., Y. Yaaguchi, and H. Yamada. 2003. Retrieval of wheat chlorophyll by an X-band scatterometer. *Int. J. Remote Sens.* 24(23):4039-4051.
- Singh, D. 2006. Scatterometer performance with polarization discrimination ratio approach to retrieve crop soybean parameter at X-band. *Int. J. Remote Sens.* 27(19):4101-4115.
- 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 Sens. Environ.* 14:113-133.
- Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung. 1986. *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.
- Xiao, X., S. Boles., S. Frolking., C. Li., 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.