

L, C, X-밴드 레이더 산란계 자동측정시스템을 이용한 콩 생육 모니터링

김이현* · 홍석영*† · 이훈열** · 이재은***

*농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료관리과

**강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

***농촌진흥청 국립식량과학원 전작과

Monitoring soybean growth using L, C, and X-bands automatic radar scatterometer measurement system

YiHyun Kim*, SukYoung Hong*†, Hoonyol Lee** and Jae-Eun Lee***

*Soil and Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

**Department of Geophysics, Kangwon National University

***Soil Upland Crop Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration

Abstract : Soybean has widely grown for its edible bean which has numerous uses. Microwave remote sensing has a great potential over the conventional remote sensing with the visible and infrared spectra due to its all-weather day-and-night imaging capabilities. In this investigation, a ground-based polarimetric scatterometer operating at multiple frequencies was used to continuously monitor the crop conditions of a soybean field. Polarimetric backscatter data at L, C, and X-bands were acquired every 10 minutes on the microwave observations at various soybean stages. The polarimetric scatterometer consists of a vector network analyzer, a microwave switch, radio frequency cables, power unit and a personal computer. The polarimetric scatterometer components were installed inside an air-conditioned shelter to maintain constant temperature and humidity during the data acquisition period. The backscattering coefficients were calculated from the measured data at incidence angle 40° and full polarization (HH, VV, HV, VH) by applying the radar equation. The soybean growth data such as leaf area index (LAI), plant height, fresh and dry weight, vegetation water content and pod weight were measured periodically throughout the growth season. We measured the temporal variations of backscattering coefficients of the soybean crop at L, C, and X-bands during a soybean growth period. In the three bands, VV-polarized backscattering coefficients were higher than HH-polarized backscattering coefficients until mid-June, and thereafter HH-polarized backscattering coefficients were higher than VV-, HV-polarized backscattering coefficients. However, the cross-over stage (HH > VV) was different for each frequency: DOY 200 for L-band and DOY 210 for both C and X-bands. The temporal trend of the backscattering coefficients for all bands agreed with the soybean growth data such as LAI, dry weight and plant height; *i.e.*, increased until about DOY 271 and decreased afterward. We plotted the relationship between the backscattering coefficients with three bands and soybean growth

접수일(2011년 4월 5일), 수정일(1차 : 2011년 4월 25일), 게재확정일(2011년 4월 25일).

† 교신저자: 홍석영(syhong67@korea.kr)

parameters. The growth parameters were highly correlated with HH-polarization at L-band (over $r=0.92$).

Key Words : Backscattering coefficients, L-band, C-band, X-band, Radar scatterometer, Soybean growth data.

요약 : 본 연구에서는 다편파 레이더 산란계 자동 측정시스템을 이용하여 콩 생육변화를 관측하고 레이더 시스템에서 얻어진 후방산란계수와 콩 생육인자들과의 관계분석을 통하여 콩 생육추정 가능성을 모색하고자 하였다. 2010년도 농촌진흥청 국립식량과학원 연구지역에 다편파 레이더 산란계 관측시스템 (L, C, X-밴드 안테나, 네트워크분석기, RF switch, 입사각 40°)을 구축하고 콩 파종시기에서 수확기까지 10분단위로 콩 생육변화를 자동 측정하였다. 모든 안테나 밴드, 편파에서 콩 생육초기 (6월초~7월 중순)에는 VV-편파가 HH-, HV-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났고, 그 이후 HH-편파와 다른 편파들 간의 cross-over 현상이 일어났는데 그 시기는 L-밴드가 7월 20일 (DOY 200), C-, X-밴드의 경우에는 7월 30일 (DOY 210)로 밴드에 따라 차이를 보였다. 모든 밴드 및 편파에서 9월 29일 (DOY 271)까지 후방산란계수가 증가하다가 그 이후 감소하였고 특히 종실비대기 (DOY 277, R6) 이후 감소폭이 크게 나타났는데 이 현상은 콩 생육인자 (초장, 엽면적지수, 건물중 등)변화와 일치하였다. 밴드에 따른 후방산란계수와 콩 생육인자들과의 관계를 분석한 결과 L-밴드 HH-편파에서 LAI ($r=0.93^{***}$), 초장 ($r=0.95^{***}$), 건물중 ($r=0.94^{***}$), 꼬투리중 ($r=0.92^{***}$) 등 콩 생육인자들과의 상관계수가 가장 높게 나타났고 이에 비해 X-밴드 편파에서는 콩 생육인자들과의 상관계수가 상대적으로 낮게 나타났다. 후방산란계수 (L-밴드 HH-편파)를 이용하여 콩 생육인자 추정을 위한 회귀식을 작성하였다.

1. 서론

최근 우리나라는 작물생육이 왕성한 여름철에 몬순 기후대의 영향으로 비오는 기간이 많아 날씨에 영향을 거의 받지 않는 레이더 자료의 농업적 활용에 대한 중요성이 커지고 있다. 또한 레이더 자료를 이용한 작물생육 모니터링 및 수량 추정, 토양수분 추정, 홍수·가뭄 등 자연재해 모니터링 등에 대한 연구들이 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다.

레이더자료를 농업에 적용하는데 있어 작물의 후방산란계수 특성을 인지하는 것이 매우 중요하다. 후방산란계수의 경우 작물 생육을 관측하는데 여러 factor 즉 지표면 거칠기, 토양수분, 시스템의 안테나 주파수, 입사각, 편파 등에 영향을 받는다. 또한 산란 특성과 밴드 주파수에 따른 침투력 차이를 이해하는 것도 중요하다.

레이더영상을 이용하여 작물 생육을 모니터링하고 작물·식생변화를 정량화하는 연구들이 수년 동안 진행되고 있는데 특히 레이더 영상에서 얻어진 후방산란계수와 작물생육인자와의 관계를 분석하고 평가하는 연구

들이 활발히 이루어지고 있다(Ulaby and Bush, 1976; Brakke *et al.*, 1981; Ulaby *et al.*, 1984; Rosenthal *et al.*, 1985; Le Toan *et al.*, 1989; Bouman *et al.*, 1991; Bahari *et al.*, 1997; Kurosu *et al.*, 1997; Le Toan *et al.*, 1997; Cloutis *et al.*, 1999; Hong *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2007; Bouvet *et al.*, 2009). Ground-based polarimetric scatterometer(GBPS)는 Synthetic Apeature Radar(SAR) 영상자료에 비해 다중편파(full polarization), 다양한 입사각도를 통하여 연속적으로 작물을 모니터링을 할 수 있는 장점을 가지고 있다. GBPS를 이용한 국내외 연구결과를 살펴보면 Inoue *et al.*(2002)은 벼 생육기간 동안 레이더 자료를 이용하여 주파수와 입사각, 편파별로 벼 생육을 관측하고, 벼 생육인자와 backscatter와의 상관관계 분석을 통해 작물군락에 대한 단순산란모형과 microwave backscattering signatures와의 연관을 분석하였다. 국내에서는 Kim *et al.*(2009)이 다편파 레이더 산란계 시스템을 이용하여 벼 생육시기에 따른 후방산란계수 변화를 관측하고 밴드(L-, C-, X-밴드), 편파 및 입사각도별 후방산란

계수와 Leaf Area Index(LAI), 바이오매스, 이삭건물 중 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 산란특성을 관측할 수 있는 X-밴드 레이더 자동관측 시스템을 구축하고, 레이더 산란계에서 얻어진 후방산란계수를 이용하여 벼 생육인자를 추정하였다.

콩은 일찍이 �곡의 하나로 꼽혀 왔으며 전분식품인 쌀을 주식으로 하는 우리나라에서는 쌀에 부족한 단백질과 지방질을 보완 공급하는데 있어 가장 적합한 곡물 중에 하나이다. 또 한 간장, 된장 등 우리나라의 전통적인 식품원료로서 콩을 대체할 작물이 없으며 사료용, 가공원료로서 콩의 수요는 계속 증가하고 있다.

하지만, 국내외적으로 레이더 자료를 이용한 콩 생육 시기에 따른 후방산란계수와 콩 생육인자와의 관계를 분석한 연구결과가 많지 않고 특히 다양한 밴드 안테나를 동시에 이용하여 편파별 콩 생육변화를 시기별로 모니터링하고 콩 생육인자를 추정한 연구결과는 거의 없는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 L, C, X-band 기반의 다편파 레이더 산란계 자동 측정시스템을 구축하여 콩 생육시기에 따라 밴드 및 편파별 후방산란계수 변

화를 관측하고 후방산란계수와 콩 생육인자들과의 관계를 분석하여 콩 생육을 추정하고자 하였다.

2. 연구방법

1) 연구지역

본 연구는 농촌진흥청 국립식량과학원 시험포장(37° 15' 34.77"N, 126° 58' 32.52"E)에서 2010년에 대풍콩을 대상으로 콩 파종 전(6월 3일)부터 콩 수확기(10월 22일)까지 레이더 산란계를 이용하여 후방산란계수를 측정하였다. 시험포장의 면적은 약 800 m², 재식밀도 60×15 cm 이었고, 콩 파종일은 6월 4일, 수확일은 10월 22일이었다.

2) 콩 생육조사

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(Fig. 1). 조사방법은 생육이 고른 15주를 선택하여 초장, 생체중 등을 측정하고 60℃에서 건조하여 건물중 등을 측정하였으며 생체중과 건물중의 차이

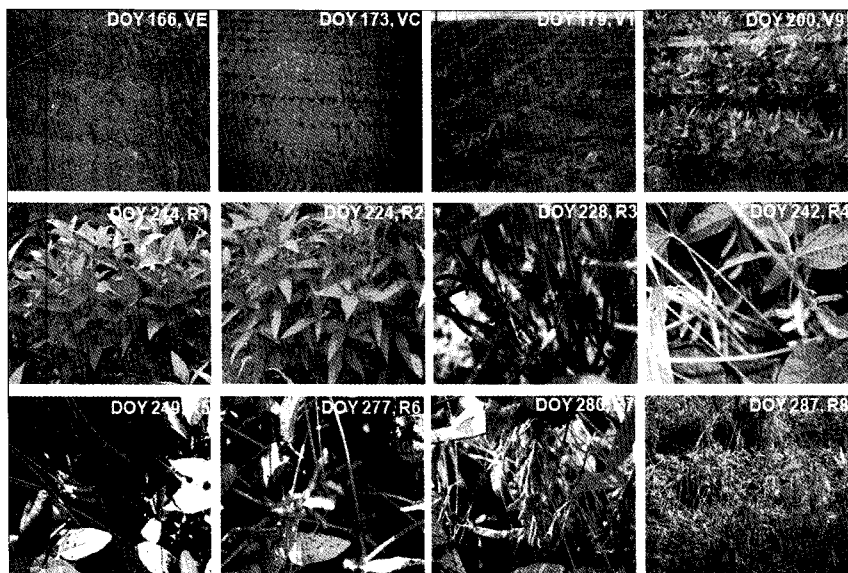


Fig. 1. Field photos of soybean in various growth stages.

로 식생수분함량을 구하였다. 엽면적지수는 단위면적에 대한 균락의 엽 면적으로 정의되고 개엽을 모두 떼어내어 LI-3100(LI-COR, Inc. USA)을 이용하여 직접 측정 후 주(株) 재식밀도로 구하였다. 후방산란계수와 콩 생육인자와의 관계 및 추정을 알아보기 위해 SAS 프로그램(Enterprise Guide 4.2)을 이용하여 상관분석 및 회귀분석을 수행하였다.

3) L, C, X-밴드 레이더 산란계 자동 측정시스템 구축

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. 자동 측정시스템 설치는 콩 파종기전(6월 3일)에 하였고, 강우, 바람 등 기후의 영향을 최소화하기 위해 측정시스템 건물을 제작하였다(Fig 2). 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.

측정시스템 구성항목별 특성은 Table 1과 같다. 네트워크 분석기는 8720D(Agilent Tech.)을 사용하였는데

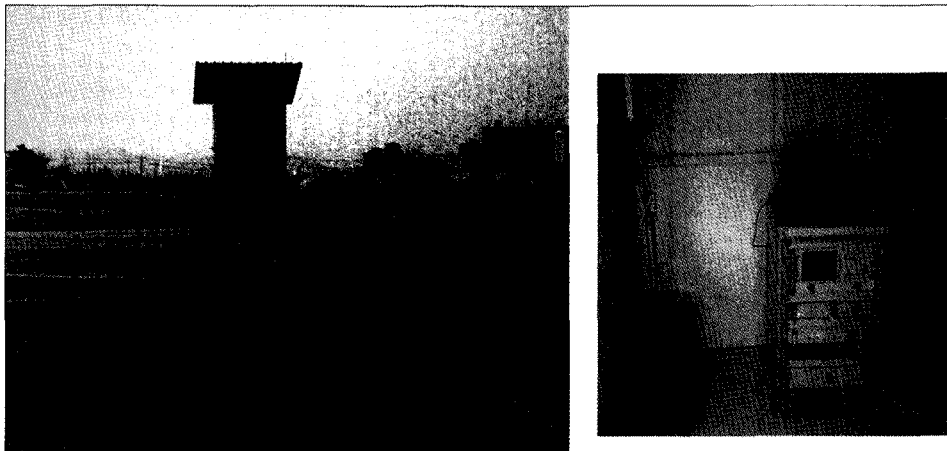


Fig. 2. Field view automatic radar scatterometer system ;(left) The Shelter installed in the experimental soybean upland with an L, C, X-band looking at the 40 degree ;(right) RF systems inside the shelter with network analyzer, RF cable, RF switch and a computer that controls frequency, polarization and data storage.

Table 1. Specification of the L, C, and X-band automatic scatterometer system.

Specification	L-Band	C-Band	X-Band
Center frequency	1.27 GHz	5.3 GHz	9.65 GHz
Bandwidth	0.12 GHz	0.6 GHz	1 GHz
Number of frequency points	201	801	1601
Antenna type	Dual polarimetric horn		
Antenna gain	12.4 dB	20.1 dB	22.4 dB
Range resolution	1.25 m	0.25 m	0.15 m
Wavelength	0.23 m	0.056 m	0.031 m
Polarization	HH, VV, HV, VH		
Incident angle	40°		
Platform height	4.16 m		
Measurement time	1 per 10 minutes		

가용 가능한 주파수 범위는 20 MHz~20 GHz 이다. Calibration Kit(SMA, 85052D)을 이용 시스템 Calibration을 하였고 안테나는 dual-polarization square horn 안테나를 사용하였다(Kim *et al.*, 2010). 안테나의 중심 주파수를 1.27 GHz(L-밴드), 5.3 GHz(C-밴드), 9.65 GHz(X-밴드) 각각 설계하였는데 그 이유는 현재 운영되고 있는 레이더 위성 안테나들과 중심주파수를 동일하게 제작하여 향후 레이더 영상에 적용하고 농업적으로 활용하기 위해서이다. L-밴드 안테나 중심주파수는 Advanced Land Observing Satellite(ALOS), C-밴드 안테나 중심주파수는 Envisat 과 Radarsat 그리고 X-밴드 안테나 중심주파수는 KOMPSAT-5, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed 와 각각 일치한다. 안테나 이득은 1.24 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.

입사각도는 40°로 고정해서 측정하였는데 그 이유는 기존 연구결과에서 입사각도별로 후방산란계수와 작물 생육인자와의 비교에서 40°에서 가장 상관관계가 높게 나타났기 때문이다(Kim *et al.*, 2009). 여름철 건물 내부에 온도가 올라가는 것을 막기 위해 내부에 냉난방기를 설치하여 측정기간 동안 20℃를 유지하였다. 자동측정시스템은 모든 편파(HH, VV, HV, VH)에 대한 산란 특성을 측정 할 수 있도록 하였고, 시스템 Calibration 및 자료 질 향상을 위해 RF switch를 이용하여 10분당 1회씩 자동으로 산란특성을 측정하도록 설계하였다.

대상체에서 산란되어 돌아오는 HH, VV, HV, VH 편파의 크기(amplitude)와 위상(phase) 정보를 얻을 수 있고 이 파일을 후방산란계수 추출에 이용하였다(Kim *et al.*, 2010). 밴드별 후방산란계수 산출은 레이더 방정식을 이용하였다(Ulaby *et al.*, 1990).

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

여기에서 P_r 는 지표면을 향해 송신되는 파워, $G_t \cdot G_r$ 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. 자료량이 많고 효율적으로 자료

를 관리하기 위해 Visual Basic에서 Excel Automation 기능을 이용 후방산란계수 산출프로그램을 개발하여 활용하였다. 각 band별 후방산란계수를 구하기 위해 다음과 같은 식이 사용하였다.

$$L\text{-band} = 20 \log U + 21.35(\text{dB}) + 30 \log R + \log \cos \theta_i \quad (2)$$

$$C\text{-band} = 20 \log U + 30.27(\text{dB}) + 30 \log R + \log \cos \theta_i \quad (3)$$

$$X\text{-band} = 20 \log U + 32.21(\text{dB}) + 30 \log R + \log \cos \theta_i \quad (4)$$

3. 연구결과 및 고찰

1) 콩 생육시기에 따른 밴드별 후방산란계수와 생육인자 변화 관측

콩 생육단계는 영양생장기와 생식생장기로 크게 나눌 수 있는데 영양생장기는 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 생식생장기는 개화시(꽃이 피기 시작하는 시기, R1), 개화성기(꽃이 활짝 피는 시기, R2), 착형시(꼬투리가 생성되는 시기, R3), 착형성기(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 Carviness, 1977).

콩 생육시기에 따른 L, C, X-밴드 편파별 후방산란계수와 콩 생육인자 변화를 측정하고 그 결과를 분석하였다. 콩 생육기간동안 L, C, X-band의 후방산란계수 범위는 각각 -46 dB~-2 dB, -49 dB~-7 dB, -52 dB~-12 dB로 L-밴드에서 후방산란계수가 가장 높게 나타났다(Fig 3, 4, 5). Fig 3은 L-밴드 편파별 후방산란계수와 콩 생육인자 변화를 보여주고 있다. 모든 편파에서 콩 생육초기(DOY 155~DOY 199)에는 VV-편파가 HH-, HV-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났지만 7월 20일(DOY 200, V9) 이후 L-밴드 HH-편파가 다른 편파들보다 높게 나타나기 시작하였고, 이런 경향은 콩 수확기(DOY 294)까지 지속되었다. 또한 콩 생육이 왕성하게 진행되는 시기(8월 17일, DOY 228, R3)부

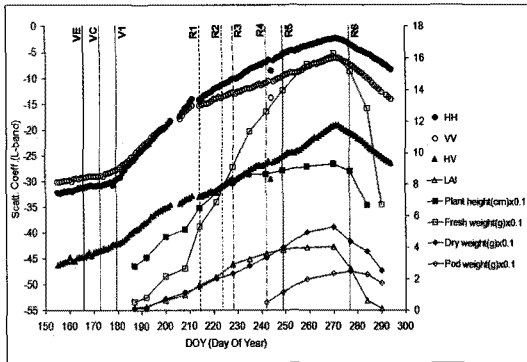


Fig. 3. Comparison between L-band backscattering coefficients and soybean growth data.

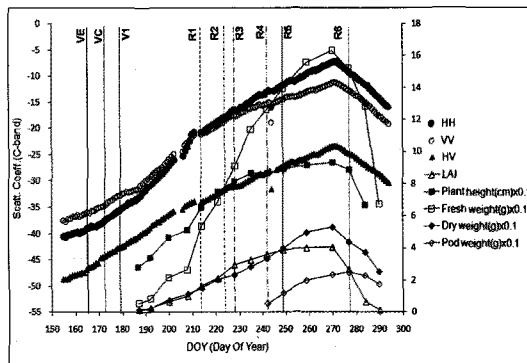


Fig. 4. Comparison between C-band backscattering coefficients and soybean growth data.

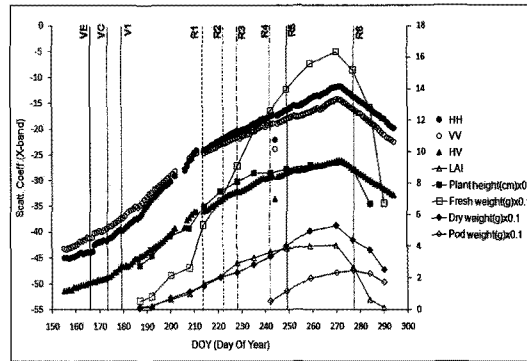


Fig. 5. Comparison between X-band backscattering coefficients and soybean growth data.

터 HH-편파와 VV-편파 간의 차이가 다른 밴드에 비해 크게 나타났다.

한편, 콩 생육시기에 따른 생육인자들의 변화를 관측해 본 결과 초장, 엽면적지수, 생체중, 건물중, 식생수분 함량은 콩 파종 이후 계속 증가하다가 R5에서 R6 시기로 넘어가는 9월 28일(DOY 270)에 최대값을 보인 후

급속히 감소하였는데 R5는 종실(seed)이 생성되는 시기로 많은 양분과 수분이 필요하며 R5에서 R6으로 전환되는 시점에 초장이 최대값을 나타내며 양분 축적이 콩잎에서 꼬투리 종실로 옮겨가고 건물중 축적이 중단되면서 이후 인체 바이오매스 감소가 크게 증가하였다. 하지만 녹색을 띄는 꼬투리의 종실은 R6 시기까지 증가하므로 이 시기에 꼬투리중이 최대값을 보였고 그 이후 감소하였다(Fehr and Carviness, 1977). 초장, 엽면적지수, 건물중이 최대값을 보인시기(DOY 270)와 L-밴드 편파별 후방산란계수가 최대값인 시점(DOY 271)이 거의 일치하였다.

C-밴드 편파별 후방산란계수와 콩 생육인자 변화를 알아본 결과가 Fig. 4와 같다. 콩 생육초기(DOY 155~DOY 190)에는 VV-편파와 HH 편파와의 후방산란계수 차이가 동일 시기의 L-밴드에 비해 높게 나타났다. HH-편파 후방산란계수는 개화시(R1, DOY 214)에 가까운 DOY 210(7월 30일)에 VV, HV-편파 후방산란계수보다 높게 나타나기 시작하였다. 또한 이 시점은 엽면적지수가 1.0으로 군락이 형성되는 시기 시작하는 시점에서 이후 표면산란보다 체적산란에 더 영향을 받은 것으로 분석된다. 이와 비교하여 L-밴드는 HH-편파가 VV-편파보다 후방산란계수가 높아지기 시작하는 시기(DOY 200, V9)의 엽면적지수가 0.6이었다.

Fig. 5는 생육기간동안 X-밴드 편파별 후방산란계수와 콩 생육인자 변화를 보여주고 있다. L, C-밴드에 비해 상대적으로 고주파에 의한 침투력 차이로 인해 편파별 후방산란계수가 낮게 나타났다. L, C-밴드 후방산란계수 변화와 같이 생육초기에는 VV-편파가 HH-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났고 DOY 209 이후부터 HH-편파가 VV-편파보다 후방산란계수가 높았는데 이런 경향은 C-밴드와 동일하였다. 또한 종실비대기(R6, DOY 277) 이후 HH/VV 편파 후방산란계수차이가 L, C-밴드에 비해 낮게 나타났다.

Kim et. al(2009)은 밴드별 후방산란계수와 벼 생육인자와의 변화를 관측하였는데 모든 밴드(L, C, X-밴드)에서 6월 중순(DOY 168)부터 HH-편파가 다른 편파들에 비해 후방산란계수가 높게 나타났고 이때의 엽면적지수가 1.0이었다. 벼와 달리 콩에서는 안테나 밴드에 따라 HH-편파가 다른 편파들보다 높게 나타나기 시작하는 시기가 다른데 그 이유는 벼는 눈에 물이 잠겨있

어 토양 요인을 거의 받지 않지만 콩은 균락이 형성되고 있는 시기에 토양 거칠기, 토양수분등에 영향을 많이 받는다. L-밴드가 C, X-밴드에 비해 침투력이 강하고 특히 토양수분에 민감하게 반응하므로 다른 밴드들에 비해 좀 더 빠른 시기에 HH-편파가 다른 편파들보다 후방산란계수가 더 높게 나타나는 것으로 판단된다. 하지만 콩, 옥수수 등의 발작물은 토양이 작물 생육시기동안 레이더 산란특성에 영향을 크게 주며, 특히 토양수분은 강우, 토양온도와 연관성을 보이기 때문에 벼 보다 더 복잡한 레이더 산란특성 기작을 가지고 있다. 따라서 후방산란계수와 작물 생육인자, 토양수분간의 관계 분석을 통한 좀 더 세밀한 연구가 필요하다.

2) 밴드별 후방산란계수와 콩 생육인자와의 상관관계 분석

SAS 프로그램(Enterprise Guide 4.2)을 이용하여 밴드 및 편파에 따른 후방산란계수와 콩 생육인자(초장, 엽면적지수, 식생수분함량, 건물중, 꼬투리중)들과의 상관관계를 분석하였다. Table 2는 각 밴드에 따른 편파별 후방산란계수와 콩 생육인자와의 상관계수를 보여주고 있다. 초장과 밴드별 후방산란계수의 관계를 알아본 결과 L-밴드 HH-편파에서 상관계수가 가장 높게 나타났고($r=0.95$), VV-, HV-편파에서도 상관계수가 높게 나타났으며($r=0.90$, $r=0.88$), 다른 밴드의 편파에서도 상관성을 보였다($>r=0.80$). 엽면적지수의 경우 L-밴드 모든 편파에서 상관계수가 높았고($>r=0.87$), X-밴드 편파에서는 L, C-밴드에 비해 상관관계가 낮게 나타났다. L-밴드 HH-편파에서 식생수분함량과의 상관계수가 높았고($r=0.94$), L-밴드 다른 편파들과 C-밴드

모든 편파에서도 상관성을 보였다($>r=0.80$).

건물중과 후방산란계수와의 상관관계를 분석해 본 결과 L-밴드 HH-편파에서 상관계수가 가장 높았고($r=0.94$), L-밴드 VV/HV-편파, C-밴드 HH/VV/HV-편파에서도 대체로 상관성이 높았다($>r=0.80$). 콩 꼬투리중과 후방산란계수를 비교해보았을 때 L-밴드 HH-편파에서 상관관계가 높게 나타났고($r=0.92$), VV-편파에서도 상관성이 나타났고($r=0.82$). C-밴드 편파에서는 꼬투리중과의 상관관계가 초장, 엽면적지수, 식생수분함량, 건물중에 비해 낮게 나타났고 특히 X-밴드 편파에서 꼬투리중과의 상관계수가 낮았다.

밴드에 따른 편파별 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계를 분석한 연구결과(Kim *et al.* 2009; Kim *et al.* 2010)에서 벼 수량과 관련이 높은 이삭중의 경우 X-밴드 VV-편파에서 상관계수가 가장 높았고($r=0.94$), L, C-밴드에서는 상관성이 낮은 결과를 보였다. 9월 초순부터 벼 수확기(10월 상순)로 갈수록 노엽화가 진행되고 벼 균락의 밀도가 낮아지면서 이삭이 외부로 노출되기 쉬어 파장이 짧은 X-밴드에서 signal이 벼 이삭에 쉽게 접근할 수 있어 상관관계가 높았지만, 본 연구에서는 콩 생육이 왕성한 대부분 기간 동안(R1~R6) 균락이 형성되어 잎이 꼬투리를 덮고 있는 상황에서 X-밴드 편파가 하단부인 꼬투리까지 전달되기 어려운 것을 판단된다. 이들 결과들을 통해 L-밴드는 작물 균락이 형성된 상태에서는 줄기, 뿌리 까지 편파가 전달되기 쉬어 작물 줄기, 뿌리 등을 고려한 바이오매스, 엽면적지수등 과의 관계를 비교하고 이들 생육인자들을 추정하는데 효과적이며 또한 HH-편파가 VV-편파보다 작물 균락에 좀 더 효과적으로 침투하는

Table 2. Correlation coefficients between backscattering coefficients at L, C, and X-band and soybean growth parameters.

	L-band			C-band			X-band		
	HH	VV	HV	HH	VV	HV	HH	VV	HV
Plant height(cm)	0.95 ^{***}	0.90 ^{***}	0.88 ^{***}	0.89 ^{***}	0.89 ^{***}	0.86 ^{**}	0.86 ^{**}	0.83 ^{**}	0.89 ^{**}
Leaf Area Index	0.93 ^{***}	0.88 ^{***}	0.87 ^{**}	0.86 ^{**}	0.83 ^{**}	0.80 ^{**}	0.76 ^{**}	0.75 ^{**}	0.72 ^{**}
Vegetation water content(%)	0.94 ^{***}	0.87 ^{***}	0.84 ^{**}	0.84 ^{**}	0.83 ^{**}	0.81 ^{**}	0.72 ^{**}	0.70 ^{**}	0.69 [*]
Dry weight(g)	0.94 ^{***}	0.89 ^{***}	0.85 ^{**}	0.84 ^{**}	0.82 ^{**}	0.81 ^{**}	0.70 ^{**}	0.68 [*]	0.67 [*]
Pod weight(g)	0.92 ^{***}	0.82 ^{**}	0.78 ^{**}	0.76 ^{**}	0.73 ^{**}	0.69 [*]	0.66 [*]	0.52 [*]	0.48 ^{ns}

^{ns} : Non significance

* : level of significance $p<0.05$

** : level of significance $p<0.01$

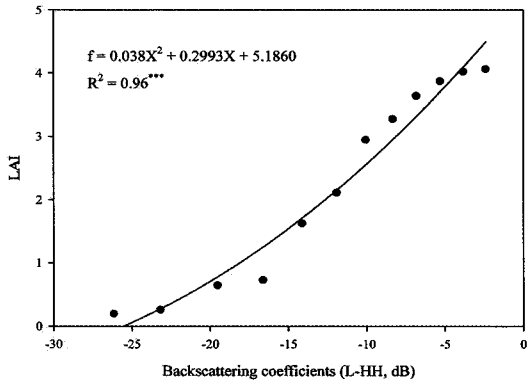
*** : level of significance $p<0.001$

것으로 판단된다.

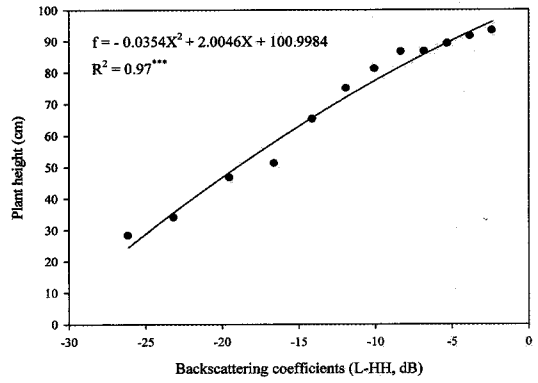
3) 후방산란계수를 이용한 콩 생육인자 추정

밴드 및 편파별 후방산란계수와 콩 생육인자들과의 상관분석 결과 상관계수가 가장 높은 후방산란계수를

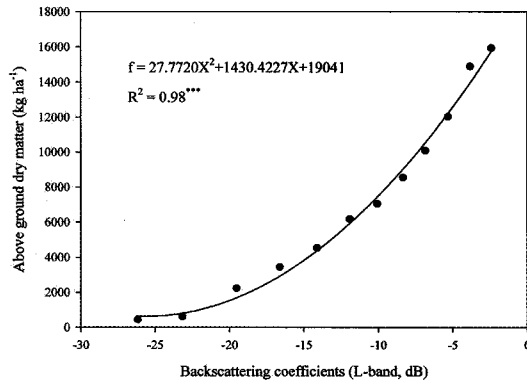
이용하여 콩 생육을 추정하였다(Fig. 6). L-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 콩 엽면적지수를 추정한 결과 결정계수(R^2)가 0.96 이었고($f=0.0038x^2+0.2993x+5.1860$, Fig. 6-a), 초장의 경우 결정계수(R^2)가 0.97로 초장변이의 97%를 설명할 수 있었다



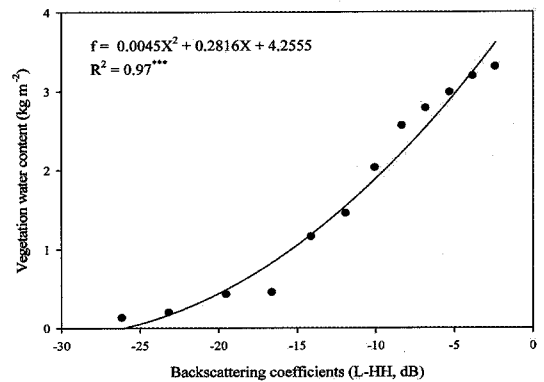
(a)



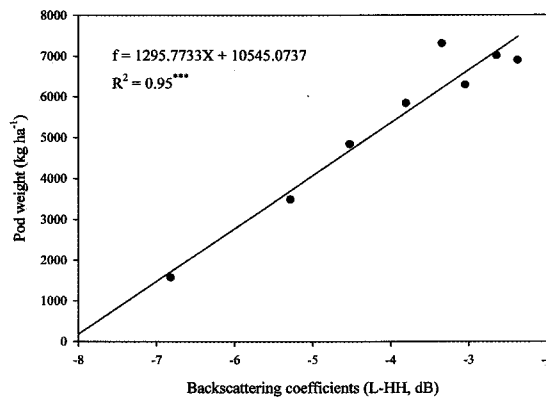
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6. Relationship between backscattering coefficients(L-band, HH-polarization) and soybean growth data ; (a) LAI, (b) Plant height (c) Dry matter, (d) Vegetation water content (e) Pod weight.

($f=-0.0354x^2+2.0046x+100.9984$, Fig. 6-b).

L-밴드의 HH-편파조건에서의 후방산란계수가 건물중과 상관관계가 가장 높아 이 결과를 바탕으로 건물중을 추정해 보았는데 Fig 6-c 와 같이 L-band의 HH-편파 후방산란계수와 건물중과의 관계가 높게 나타났다($y=27.7720x^2+1430.4227x+19041$, $R^2=0.98$). L-band의 HH-편파후방산란계수를 이용하여 식생수분함량과의 관계를 알아본 결과 2차 다항식 관계가 성립되었고($f=0.0045x^2+0.2816x+4.2555$), 결정계수(R^2)가 0.97로써 식생수분함량 변이의 약 97%를 설명할 수 있었다(Fig. 6-d). 또한 L-밴드의 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 꼬투리중을 추정한 결과 Fig. 6-e 와 같이 1차 다항식 관계가 성립되었고 결정계수가 높게 나타났다($f=1295.7733x+10545.0737$, $R^2=0.95$). 후방산란계수를 이용한 벼 생육 추정에 관한 연구(Kim *et al.* 2010)에서도 본 연구와 비슷한 결과를 보였다.

본 연구에서는 다편파 레이더 산란계 자동 측정시스템 관측을 통해 10분 단위로 얻어진 후방산란계수를 이용하여 밴드별 편파에 따른 후방산란계수와 콩 생육인자들과의 관계를 분석하고 상관성이 높게 나타난 후방산란계수를 이용 콩 생육을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 하지만 레이더자료를 이용한 콩 생육 예측을 위해서는 후방산란계수와 작물 생육인자와의 관계 뿐만 아니라, 토양 거칠기, 토양수분 등 토양인자들에 대한 연구가 이루어져야한다. 즉, 레이더 자료를 이용하여 콩 생육예측을 하기 위해서는 후방산란계수, 작물식생, 토양 세 인자들 간의 상호관계 분석이 필요하다. 이를 위해 현재 레이더 산란계에서 얻어진 후방산란계수와 토양수분과의 관계를 분석하고, 기존에 개발된 토양수분 모형을 콩 생육 추정에 적용하는 방안에 대한 연구를 수행하고 있다. 또한 지상레이더 산란계에서 얻어진 결과를 레이더 위성(COSMO-SkyMed 등)에 적용하려는 연구를 진행하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 콩 생육시기에 따른 생육변화를 모니터링하기 위해 기후 등의 영향을 받지 않고 10분 단위로

레이더 산란 측정을 할 수 있는 L, C, X-밴드 레이더 산란계 자동측정시스템을 구축하였다. 이 시스템을 이용하여 콩 생육시기에 따른 밴드 및 편파별 후방산란계수와 콩 생육인자 변화를 관측하고 후방산란계수와 콩 생육인자들과의 관계분석을 통해 콩 생육 추정 가능성을 확인하고자 하였다.

콩 생육시기에 따른 L, C, X-밴드 편파별 후방산란계수와 콩 생육인자 변화를 측정한 결과 모든 안테나 밴드에서 콩 생육 초기(DOY 155~DOY 199)에는 VV-편파가 HH, HV-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났다. HH-편파가 VV-편파보다 후방산란계수가 높게 나타나는 시기는 밴드에 따라 차이를 보였다. L-밴드의 경우 7월 20일(DOY 200), C, X-밴드는 7월 30일(DOY 210)부터 HH-편파가 다른 편파들 보다 후방산란계수가 높게 나타났다. 모든 안테나 편파별 후방산란계수가 9월 29일(DOY 271)에 최대값을 보였고 그 이후 수확기 까지 감소하였는데 초장, 엽면적지수, 건물중 등 콩 생육인자들에서도 동일한 경향이 나타났다. L-밴드에서 8월 중순이후 double bounce scattering 효과가 나타났다.

밴드별 후방산란계수와 콩 생육인자와의 상관관계를 분석하였다. L-밴드 HH-편파에서 엽면적지수($r=0.93^{***}$), 초장($r=0.95^{***}$), 건물중($r=0.94^{***}$), 꼬투리중($r=0.92^{***}$) 등 모든 콩 생육인자들과 상관계수가 가장 높게 나타났다. L-밴드 VV/HV-편파, C-밴드 HH/VV/HV-편파에서도 초장, 엽면적지수, 식생수분함량, 건물중과 대체로 상관성이 높았다($>r=0.80$). X-밴드에서는 초장을 제외한 다른 생육인자들과의 상관계수가 L, C-밴드에 비해 낮게 나타났고, 특히 꼬투리중과의 상관계수가 낮게 나타났다.

콩 생육인자들과의 상관분석에서 상관계수가 가장 높은 L-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 콩 생육인자 추정을 위한 회귀식을 작성하였다. 후방산란계수와 콩 생육인자들과의 관계를 비교해 본 결과 엽면적지수($R^2=0.96$), 초장($R^2=0.97$), 건물중($R^2=0.98$), 식생수분함량($R^2=0.97$), 꼬투리중($R^2=0.95$)에서 결정계수가 높게 나타났다. 본 연구결과를 통해 L, C, X-밴드 레이더 산란계 자동 측정시스템을 이용하여 콩 생육 추정 가능성을 확인하였다.

사사

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

참고문헌

- Bahari, S., A. Tali, H. T. Chuah, and H. T. Ewe, 1997. A preliminary study of phenological growth stages of wetland rice using ERS1/2 SAR data. *Pro. of IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium*, Singapore, Aug. 3-8, 1997. 2:1069-1071.
- Bouman, B. A. M., 1991. Crop parameter estimation from ground-based X-band(3-cm Wave) radar backscattering data. *Remote Sensing of Environment*, 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47:517-526.
- Brakke, T. W., E. T. Kanemasu, J. L. Steine, F. T. Ulaby, and E. Wilson, 1981. Microwave response to canopy moisture, leaf area index, and dry weight of wheat, corn and sorghum. *Remote Sensing of Environment*, 11:207-220.
- Chen, J., H. Lin, and Z. Pei, 2007. Application of ENVISAT ASAR data in mapping rice crop growth in Southern China. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letter*, 4:431-435.
- Cloutis, E. A., D. R. Connery, and F. J. Dover, 1999. Agricultural crop monitoring using airborne multi-spectral imagery and C-band Synthetic Aperture Radar. *International Journal of Remote Sensing*, 20:767-787.
- Fehr, W. R. and E. T. Caviness, 1977. Stages of soybean development. Iowa State University of Science and Technology. pp. 9.
- Hong, S. Y., S. H. Hong, and S. K. Rim, 2000. Relationship between RADARSAT backscattering coefficient and rice growth. *Korean Journal of Remote Sensing*, 16: 109-116.
- Inoue, Y., T. Kurosu. H. Maeno. S. Uratsuka. T. Kozu. K. Dabrowka-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.
- 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 Journal of Remote Sensing*, 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 Society of Soil Science and Fertilizer*, 43:374-383.
- Kurosuet, 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.
- 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27:709-718.
- Le Toan, T., F. R-bbes, L. F. Wang, N. Floury, K. H. Ding, 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.
- Rosenthal, W. D., B. J. Blanchard, and E. T. Kanemasu, 1985. Visible/infrared/microwave agricultural classification, biomass, and plant

- height algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50:461-468.
- Ulaby, F. T. and T. F. Bush, 1976. Monitoring wheat growth with radar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42:557-568.
- Uaby, 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*, Norwood, MA, USA.