레이더 산란계 후방산란계수를 이용한 토양수분함량 추정

김이현 · 홍석영* · 이재은¹

농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료관리과, ¹농촌진흥청 국립식량과학원 전작과

Estimation of Soil Moisture Content from Backscattering Coefficients Using a Radar Scatterometer

Yihyun Kim, Sukyoung Hong*, and Jae-Eun Lee¹

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

¹Upland Crop Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration

Microwave remote sensing can help monitor the land surface water cycle, crop growth and soil moisture. A ground-based polarimetric scatterometer has an advantage for continuous crop using multi-polarization and multi-frequencies and various incident angles have been used extensively in a frequency range expanding from L-band to Ka-band. In this study, we analyzed the relationships between L-, C- and X-band signatures and soil moisture content over the whole soybean growth period. Polarimetric backscatter data at L-, C- and X-bands were acquired every 10 minutes. L-band backscattering coefficients were higher than those observed using C- or X-band over the period. Backscattering coefficients for all frequencies and polarizations increased until Day Of Year (DOY) 271 and then decreased until harvesting stage (DOY 294). Time series of soil moisture content was not corresponding with backscattering over the whole growth stage, although it increased relatively until early August (R2, DOY 224). We conducted the relationship between the backscattering coefficients of each band and soil moisture content. Backscattering coefficients for all frequencies were not correlated with soil moisture content when considered over the entire stage ($r \leq 0.50$). However, we found that L-band HH polarization was correlated with soil moisture content ($r=0.90$) when Leaf Area Index (LAI) < 2. Retrieval equations were developed for estimating soil moisture content using L-band HH polarization. Relation between L-HH and soil moisture shows exponential pattern and highly related with soil moisture content ($R^2=0.92$). Results from this study show that backscattering coefficients of radar scatterometer appear effective to estimate soil moisture content.

Key words: Microwave remote sensing, Scatterometer, Backscattering coefficients, Soil moisture content, Retrieval equations

서 언

최근 레이더 자료를 활용하여 작물 생육 및 수량, 토양수분, 재해관측 등 농업분야에 이용하려는 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 작물·식생변화를 정량화하여 활용하고 있다 (Ulaby et al., 1984; Le Toan et al., 1989; Kurosu et al., 1995; Bahari et al., 1997; Ribbes and Le

Toan, 1999; Wagner et al., 1999; Macelloni et al., 2001; Maity et al., 2004; Xiao et al., 2005; Chen and McNairn, 2006; Bouvet and Le Toan, 2011). 하지만 현재 운영되고 있는 위성영상들은 시간해상도 (time resolution)가 떨어지고 후방산란계수 (backscattering coefficients)가 작물과 반응하는 과정에서 수분함량, 풍속 등에 크게 영향을 받는데 이를 감지 (detection)하는 능력이 떨어진다.

다편파 산란계 (GBPS, Ground-based polarimetric scatterometer)는 합성개구레이더 (SAR, Synthetic Aperture Radar) 영상자료에 비해 연속적으로 작물을 모니터링할 수 있어 시간해상도가 레이더 영상에 비해 훨씬 뛰어나다. 특히 다중편파 (full polarization), 다양한 입사 각도를 통하여 여러 종류의 밴드 안테나를 동시에 이용하여 편파별 작물 생육변화를 시기별로 모니터링 할 수 있는 큰 장점을 가지고

접수 : 2012. 2. 2 수리 : 2012. 3. 27

*연락처 : Phone: +82312900344

E-mail: syhong67@korea.kr

있다. 다편파 산란계 (GBPS)를 이용한 국내외 연구결과를 살펴보면 Singh et al. (2006)은 X-밴드 지상 산란계 (9.5 GHz, HH-, VV-편파)에서 얻어진 후방산란계수와 콩 생육 인자와의 관계를 분석하였다. 생체중이 증가함에 따라 HH-편파 후방산란계수 (레이더파가 수평방향으로 대상체에 전달되어 수평방향으로 반사되는 신호값), VV-편파 후방산란계수 (레이더파가 수직방향으로 대상체에 전달되어 수직방향으로 반사되는 신호값)도 같이 증가하였고, 생체중과의 상관성이 다른 생육인자들 (초장, 엽면적지수, 토양수분) 보다 높았으며 VV-편파가 HH-편파보다 생체중과의 상관계수가 높게 나타났다. Kim et al. (2010)은 기후 등의 영향을 받지 않고 산란특성을 관측할 수 있는 X-밴드 레이더 자동 관측 시스템을 구축하고, 레이더 산란계에서 얻어진 후방산란계수를 이용하여 벼 생육인자를 추정하였다.

토양수분은 수문 및 환경모델링에 가장 주요한 인자 중 하나로 가뭄, 홍수, 산사태, 산불 등의 재해관리 뿐만 아니라 지하수, 지표수 등의 수자원 관리와 이용 등 많은 분야에서 활용되고 있다. 레이더는 지표뿐만 아니라 수분에 민감하기 때문에 전통적으로 토양수분 모니터링에 많이 이용되고 있다. 레이더파의 토양표면에서 산란되는 전파의 크기는 토양의 유전율의 증가에 따라 커지게 되고, 그 유전율은 다시 토양의 수분함량에 따라 증가하는 관계를 갖는다 (Ulaby et al., 1982; Hallikainen et al., 1985).

레이더 시스템을 이용하여 토양수분을 측정하는 연구는 1970년대부터 연구되기 시작하였으며 (Ulaby, 1974), 센서 기술의 발전으로 항공이나 위성 Synthetic Aperture Radar (SAR, 합성개구 레이더) 출현으로 이들 센서를 이용하여 원격으로 토양 수분함량을 탐지하는 연구는 활발히 수행되기 시작하였다 (Schmugg, 1978; Jackson et al., 1981; Dobson and Ulaby, 1986). Ram et al. (1995)은 ERS-1, JERS-1, ALMAZ SAR 데이터를 수분함량 알고리즘을 기초로 개발된 neural-network를 이용하여 토양수분함량을 추출하였다. Bindlish and Barros (2001)는 토양수분함량 실측값과 토양수분함량 추정 모형인 Integral Equation Model (IEM)에서 얻어진 추정값 비교를 통해 Integral Equation Model (IEM, 적분 방정식 모델) 모형 유효성을 검증하였다. Moran et al. (2004)은 토양수분모형의 하나인 Soil Vegetation Atmosphere Transfer (SVAT, 토양-식생-대기 순환) 모형에 SAR 후방산란계수를 이용한 인자를 반영할 수 있도록 하였고, 후방산란계수의 시간적 변화를 Normalized radar

Backscatter soil Moisture Index (NBMI, 정규화 레이더 후방산란계수 토양수분 지수)를 이용하여 분석하였다. Bartsch et al. (2007)은 VV-편파모드의 ENVISAT ASAR 영상을 이용하여 지중해 여름철 가뭄발생 지역에 대해 토양수분의 시간적 변화를 모니터링 하고 토양수분지도를 작성하였다.

레이더 자료를 이용한 토양수분 측정에 있어서 토양 거칠기 (roughness), 식생피복 (vegetation cover) 영향이 크기 때문에 전통적으로 식생발달이 적은 건조지역이나 나지 등을 대상으로 연구가 진행되었고, 최근 제한적이거나 식생이 발달한 지역에 대한 토양수분 관측 연구가 C-band나 L-band 영상을 위주로 진행되고 있으나 아직까지 보편적인 규칙을 제안하지는 못하고 있다. 따라서 레이더 자료를 이용한 토양수분 관측에 대한 꾸준한 기술 축적과 연구가 필요하다. 또한 선행 연구들이 단일 안테나만을 이용하여 실험을 하였기 때문에 밴드별 침투력에 따른 토양수분 감지능력의 차이를 확인할 수 없었다.

본 논문에서는 기후 등의 영향을 받지 않고 3개의 안테나 (L, C, X-밴드)를 보유한 레이더 산란계 자동측정시스템을 이용하여 이 시스템에서 얻어진 편파별 후방산란계수와 토양수분함량과의 상관성을 분석하고, 상관관계가 높게 나타난 후방산란계수를 이용하여 토양수분함량을 추정하였다.

재료 및 방법

연구지역 국립식량과학원 시험포장 (Latitude 37.2597, Longitude 126.9757)에서 2010년에 대풍콩 (*Glycine max* (L.) Merrill)을 대상으로 레이더 산란특성 측정을 콩 파종 전 (6월 3일)부터 콩 수확기 (10월 22일)까지 수행하였다. 시험포장의 면적은 25 m × 32 m, 재식밀도 60 cm × 15 cm 이었고, 콩 파종일은 6월 4일, 수확일은 10월 22일 이었다. 시험 전 토양분석 결과는 Table 1에서 보는 바와 같다.

토양수분함량 및 작물생육 관측 콩 생육단계는 영양생장과 생식생장으로 크게 나눌 수 있는데 영양생장은 발아기 (자엽이 지상에 나타나는 시기, VE, **A**), 자엽기 (초생엽이 전개되는 시기, VC, **B**), 초생엽기 (초생엽이 완전히 전개된 시기, V1, **C**), 복엽기 (복엽이 전개되고 완전히 전개된 시기, V9, **D**)로 나누어지며, 생식생장은 개화시 (꽃이 피기 시작하는 시기, R1, **E**), 개화성기 (꽃이 활짝 피

Table 1. Results in soil analysis of the study site.

pH	OM	NH ₄ -N	Available P ₂ O ₅	Exchangeable cations			CEC	Bulk density	Soil texture
				K	Ca	Mg			
(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹				g cm ⁻³	
5.9	18.3	9	173	0.3	5.3	2.0	12.7	1.26	Loam

는 시기, R2, **F**), 착엽시 (꼬투리가 생성되는 시기, R3, **G**), 착엽성기 (꼬투리 길이 생장이 완료되는 시기, R4, **H**), 종실 비대시 (꼬투리의 종실이 생성되는 시기, R5, **I**), 종실비대기 (종실크기 생장이 완료되는 시기 R6, **J**), 종실성숙시 (종실 색깔이 황갈색으로 변하는 시기, R7, **K**), 종실성숙기 (종실 색깔이 95% 이상 황갈색으로 변한 시기, R8, **L**)로 나뉜다 (Fehr and Caviness, 1977). 본 연구에서의 해당 콩 생육 단계 시기는 Fig. 1과 같다.

토양수분함량 측정은 표토층 (5 cm)에 토양수분센서 (Echo-5 TE probe, Decagon Devices, Inc.)를 설치하여 콩 생육기간 동안 토양수분함량변화를 관측하고 용적 수분함량을 계산하였다. 이와 함께 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. 조사방법은 생육이 고른 15주를 선택하여 초장, 생체중 등을 측정하고 60℃에서 건조하여 건물중 등을 측정

하였으며, 엽면적지수는 단위면적에 대한 군락의 엽 면적으로 정의되고 개엽을 모두 떼어내어 LI-3100 (LI-COR, Inc. USA)을 이용하여 직접 측정한 후 주(株) 재식밀도로 구하였다. 밴드별 후방산란계수와 토양수분과의 상관분석 및 회귀분석은 SigmaPlot 프로그램 (SigmaPlot ver.10, Systat Software Inc.)을 이용하였다.

밴드별 후방산란계수 변화 관측 레이더 산란계 자동관측시스템을 이용하여 콩 생육시기에 따른 L, C, X-밴드별 후방산란계수 변화를 관측하였다. 강우, 바람 등 기후의 영향을 최소화하기 위해 측정시스템 건물을 제작하였다. 네트워크 분석기, General Purpose Interface Bus (GPIB)—USB, Radio Frequency (RF) cable, 레이더 주파수 변환장치 (Radio Frequency switch), 측정 프로그램이 내장된 노트북 컴퓨터는 건물 내부에 설치하였고, L, C, X-밴드 안테나는 각 RF cable들과 연결되는 부분을 밀봉하여 건물 외부에 설치하였다.

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

산란계 자동관측시스템의 구성항목은 Table 2와 같다. 레이더 산란계 자동 측정시스템은 L, C, X-밴드 안테나, 네트워크 분석기, GPIB-USB, calibration kit, RF cable, RF switch, 노트북 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. Calibration Kit (SMA, 85052D)을 이용하여 네트워크분석기와 안테나 사이 cable 간의 내부 calibration을 하였고, corner reflector를 이용하여 안테나로 들어오는 noise를 제거하고 calibration 하였다.

안테나는 dual-polarization square horn 안테나를 사용하였고, 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, RADARSAT, 그리고 X-밴드 안테나 중심주파수는 KOMPSAT-5, COSMO-SkyMed과 각각 일치하다.

네트워크 분석기는 8720D (Agilent Tech.)를 사용하였는데 가용 가능한 주파수 범위는 20 MHz~20 GHz 이다. 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. 자동 측정시스템은 모든 편파 (HH, VV, HV, VH)에 대한 산란특성을 측정 할 수 있도록 하였고, 레이더 주파수 변환장치 (Radio Frequency switch)를 이용하여 10분당 1회씩 자동으로 산란특성을 측정하도록 설계함으로써 자료의 질을 향상 시켰다 (Kim et al., 2011). 안테나별 후방산란계수는 레

이더 방정식을 이용하여 산출하였다 (Ulaby and Elachi, 1990).

결과 및 고찰

생육시기에 따른 밴드별 후방산란계수와 토양수분 함량 변화 분석 본 연구에서는 L, C, X-밴드 후방산란계수와 토양수분함량 변화를 측정하고 그 결과를 분석하였다 (Fig. 2-4). L-밴드가 C-, X-밴드 보다 후방산란계수가 높게 나타났다. L-밴드 편파별 후방산란계수와 토양수분함량 변화는 Fig. 2와 같다. 모든 편파에서 콩 생육초기에는 VV-편파가 HH-, HV-편파 (레이더파가 수평방향으로 대 상체에 전달되어 수직방향으로 반사되는 신호값) 보다 후방

Fig. 2. Temporal variation of L-band backscattering coefficients and soil moisture content during the soybean growth period.

Table 2. 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
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		

* Horizontal transmit and Horizontal receive polarization.

† Vertical transmit and Vertical receive polarization.

‡ Horizontal transmit and Vertical receive polarization.

§ Vertical transmit and Horizontal receive polarization.

산란계수가 높게 나타났지만 7월 20일 (Day Of Year(DOY) 200) 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)부터 HH-편파와 VV-편파 간의 차이가 다른 밴드에 비해 크게 나타났다. Kim et al. (2011)이 발표한 연구결과에서 모든 안테나 편파별 후방산란계수가 9월 29일 (DOY 271)에 최대값을 보였고 그 이후 수확기 까지 감소하였는데 초장, 엽면적지수, 건물중 등 콩 생육인자들에 서로 동일한 경향이 나타났다.

콩 생육기간동안 토양수분함량 범위는 15.9~31.1% 이었다. 토양수분함량 변화는 전체 콩 생육기간에서 변화가 크게 나타났다. 콩 생육초기에는 토양수분함량이 대체로 증가하는 경향을 보이다가 콩 생육 후기에는 정체되는 경향을 보였다. 즉 전체 생육기간에서는 후방산란계수와 토양수분함량 간에 상관성이 나타나지 않았다. 하지만 콩 생육시기별로 L-밴드 편파별 후방산란계수와 토양수분함량 변화 관계를 알아본 결과 R2 (개화성기, DOY 224) 까지 두 변수 간의 변화 경향이 비슷하게 나타났는데 이 시기의 엽면적지수가 2였다. 발작물은 해당 작물이 군락이 형성되고 있는 시기 까지는 레이더 파는 토양 거칠기, 토양수분함량에 영향을 많이 받지만 군락이 형성된 이후에는 토양수분함량의 영

향을 적게 받는다 (Paris, 1986; Fung, 1994). 따라서 본 연구에서는 밴드별 후방산란계수와 토양수분함량과의 관계를 작물 군락형성의 지표인 엽면적지수를 이용하여 생육시기에 따라 두 변수간의 상관성을 분석하였다 (Table 3).

Figure 3은 C-밴드 후방산란계수와 토양수분함량 변화를 관측한 결과이다. L-밴드 후방산란계수와 같이 콩 생육 초기에는 VV-편파가 HH-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났고, HH-편파 후방산란계수는 개화시 (R1, DOY 214)에 가까운 DOY 210 (7월 30일)에 VV, HV-편파 후방산란계수보다 높게 나타나기 시작하였다. C-밴드 HH-편파와 VV-편파 간의 차이는 착륙성기 (R4, DOY 242) 이후 증가폭이 크게 나타났다. C-밴드 모든 편파 후방산란계수는 콩 파종 이후 증가하다가 콩 생육인자들이 최대값을 보인 9월 28일 (DOY 270) 이 후 수확기까지 감소하였는데 이런 경향은 L, C-밴드에서도 동일하게 나타났다. 이에 비해 토양수분함량 변화는 콩 생육초기에는 토양수분함량이 대체로 증가하는 경향을 보이다가 R2 (개화성기, DOY 224) 이후에는 토양수분함량 변화 크게 나타났고 생육후기에는 정체되는 경향을 보였다. 콩 생육시기별로 C-밴드 편파별 후방산란계수와 토양수분함량 변화 관계를 알아본 결과 L-밴드와 같이 R2 시기 까지 두 변수 간에 변화가 비슷하게 나타났다.

생육기간동안 X-밴드 편파별 후방산란계수와 토양수분

Table 3. Correlation coefficients between backscattering coefficients and soil moisture content.

Growth stage	L-band			C-band			X-band		
	HH	VV	HV	HH	VV	HV	HH	VV	HV
Entire period	0.50 ^{ns*}	0.46 ^{ns}	0.45 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.31 ^{ns}
LAI<2	0.90 ^{****†}	0.86 ^{**‡}	0.84 ^{**}	0.78 ^{**}	0.77 ^{**}	0.75 ^{**}	0.71 ^{*§}	0.70 [*]	0.67 [*]

* Non significance.

† level of significance $p<0.001$.

‡ level of significance $p<0.01$.

§ level of significance $p<0.05$.

Fig. 3. Temporal variation of C-band backscattering coefficients and soil moisture content during the soybean growth period.

Fig. 4. Temporal variation of X-band backscattering coefficients and soil moisture content during the soybean growth period.

함량 변화는 Fig. 4와 같다. L, C-밴드에 비해 상대적으로 고주파에 의한 침투력 차이로 인해 편파별 후방산란계수가 낮게 나타났다. L, C-밴드 후방산란계수 변화와 같이 생육 초기에는 VV-편파가 HH-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났고 DOY 210 이후부터 HH-편파가 VV-편파보다 후방산란계수가 높았는데 이런 경향은 C-밴드와 동일하였다. 또한 종실비대기 (R6, DOY 277) 이후 HH-편파와 VV 편파 후방산란계수 차이가 L, C-밴드에 비해 낮게 나타났다.

밴드별 후방산란계수와 토양수분함량과의 상관성 분석 콩 전체 생육기간동안 밴드별 후방산란계수와 토양수분함량과의 상관성을 분석하였다 (Table 3). L-밴드, C-밴드, X-밴드 순으로 상관계수가 높았고, L-밴드 HH-편파에서 상관계수가 가장 높았다 ($r=0.50$). 하지만 모든 밴드에 따른 편파별 후방산란계수가 토양수분함량과 상관관계가 낮게 나타났다.

전체 생육기간동안 밴드별 후방산란계수와 토양수분함량과의 상관성이 낮았지만 8월 초순 (DOY 224, R2) 까지 후방산란계수와 토양수분함량이 증가하는 경향이 비슷하게 나타났다. 즉 밴드별 후방산란계수와 토양수분함량 변화 관측에서 엽면적지수가 2 이하 일 때 두 변수간에 상관성이 전체기간보다 높게 나타났다. 따라서 군락 형성의 지표인 엽면적지수 변화에 따른 후방산란계수와 토양수분함량의 상관성을 분석하였다 (Table 3). 엽면적지수 2 이하 일 때 모든 밴드 및 편파에서 토양수분함량과의 상관계수가 전체 생육단계에서 조사한 것 보다 높게 나타났다. L-밴드 HH-편파가 상관계수가 가장 높게 나타났고 ($r=0.90$), L-밴드 다른 편파에서도 상관성이 나타났다 ($r \geq 0.84$). C-밴드에서는 모든 편파에서 상관계수가 비슷하게 나타났고 ($r=0.78-0.75$), L-밴드보다 토양수분함량과의 상관성이 낮았다. X-밴드의 경우 HV-편파에서 토양수분함량과의 상관성이 가장 낮게 나타났고 ($r=0.67$), 다른 밴드에 비해 상관계수가 낮았다 ($r \leq 0.71$).

이 결과는 Prevot et al. (1993), Prasad (2009)가 발표한 결과와 일치한다. 이들 논문에서는 콩 실험에서 엽면적지수

가 높아질수록 후방산란계수가 토양수분함량과 상관성이 낮아진다고 발표하였다. 즉 콩 생육기간 중 엽면적지수가 낮은 경우에는 후방산란계수가 토양에 영향을 많이 받지만 엽면적지수가 높아질수록 토양에 대한 영향은 감소된다. 또한 본 연구에서는 HH-편파가 다른 편파들에 비해 토양수분함량과의 상관성이 높게 나타났는데 작물 군락 뿐 만 아니라 토양에서도 다른 편파들에 비해 더 효율적으로 표면에 침투하는 것으로 판단된다.

후방산란계수를 이용한 토양수분함량 추정 후방산란계수와 토양수분함량과의 상관성 분석 결과를 바탕으로 토양수분함량을 추정하였다. L-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 토양수분함량을 추정한 결과 결정계수가 0.92로 높게 나타났다 (Table 4). 또한 L-밴드 VV-편파 후방산란계수를 이용하여 토양수분함량을 추정한 결과 결정계수가 0.84로 대체로 높게 나타났다. C-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용 토양수분함량을 추정한 결과 결정계수가 0.77 이었고, C-밴드 VV-편파 후방산란계수를 이용 토양수분함량을 추정한 결과 결정계수가 0.76으로 L-밴드에 비해 토양수분함량 추정값이 낮게 나타났다 (Table 4). 또한 X-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용 토양수분함량을 추정한 결과 결정계수가 0.70 이었고, VV-편파 후방산란계수를 이용하여 토양수분함량을 추정한 결과 결정계수가 0.69로 나타났다.

결론적으로, 레이더 산란계 시스템에서 얻어진 밴드별 후방산란계수를 이용하여 토양수분함량을 추정했을 때 L-밴드 > C-밴드 > X-밴드 순서로 추정값이 높게 나타났고, 추정 회귀식 형태는 exponential (지수식) 형태로 나타났다. L-밴드 HH-편파를 이용하는 것이 토양수분함량을 가장 높게 예측할 수 있었다 (Fig. 5).

본 연구에서는 다편파 레이더 산란계 자동 측정시스템 관측을 통해 10분 단위로 얻어진 후방산란계수를 이용하여 밴드별 편파에 따른 후방산란계수와 토양수분함량과의 관계를 분석하고 상관성이 높게 나타난 후방산란계수를 이용 토양수분함량을 추정할 수 있었다.

Table 4. Statistical performance of soil moisture content retrievals using regression equation extracted from backscattering coefficients of L, C, X-bands.

y	x	Regression equation	R ²
soil moisture content (%)	L-band HH [*] -polarization (dB)	$y=41.056e^{0.0405x}$	0.92 ^{***}
soil moisture content (%)	L-band VV [†] -polarization (dB)	$y=44.938e^{0.0445x}$	0.84 ^{**}
soil moisture content (%)	C-band HH-polarization (dB)	$y=43.197e^{0.0306x}$	0.77 ^{**}
soil moisture content (%)	C-band VV-polarization (dB)	$y=50.241e^{0.0373x}$	0.76 ^{**}
soil moisture content (%)	X-band HH-polarization (dB)	$y=44.808e^{0.0286x}$	0.70 [*]
soil moisture content (%)	X-band VV-polarization (dB)	$y=52.092e^{0.0344x}$	0.69 [*]

* Horizontal transmit and Horizontal receive polarization.

† Vertical transmit and Vertical receive polarization.

Fig. 5. Relationship between backscattering coefficients (L-band HH polarization) and soil moisture content.

요 약

다편파 레이더 산란계 시스템 (L, C, X-밴드 안테나)에서 얻어진 편파별 후방산란계수와 토양수분함량과의 상관성을 분석하고 후방산란계수를 이용 토양수분함량을 추정하고자 하였다. 콩 생육시기에 따른 밴드별 후방산란계수 변화 관측 결과 L-밴드 후방산란계수가 C-, X-밴드 후방산란계수보다 높게 나타났고, 모든 안테나 밴드에서 콩 생육 초기에는 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 (DOY 294)까지 감소하였다. L-밴드 HH-편파와 VV-편파 간의 차이는 꼬투리가 생성되는 착엽기 (R3, DOY 228)부터 다른 밴드에 비해 크게 나타났고, 반면에 C-밴드 HH-편파와 VV-편파 간의 차이는 착엽성기 (R4, DOY 242) 이후 증가폭이 크게 나타났다.

후방산란계수와 토양수분함량과의 변화를 분석한 결과 생육기간동안 토양수분함량 변이가 컸고, 전체 생육기간에서는 모든 밴드별 후방산란계수와 토양수분함량 간에 상관성이 나타나지 않았다. 하지만 엽면적지수가 2 이하 (R2, DOY 224)일 때 후방산란계수가 증가함에 따라 토양수분함량도 증가하는 경향을 보였다.

밴드별 후방산란계수와 토양수분함량과의 상관관계를 분석하였다. 전체 생육기간에서는 모든 밴드에서 두 변수간의 상관계수가 낮게 나타났다 ($r \leq 0.50$). 반면에 엽면적지수 2 이하 일 때 모든 밴드에서 후방산란계수와 토양수분함량과

의 상관계수가 전체 생육단계에서 조사한 것 보다 높게 나타났다. L-밴드 후방산란계수가 C-, X-밴드 후방산란계수보다 토양수분함량과의 상관성이 높게 나타났고 ($r \geq 0.84$), L-밴드 HH-편파가 상관계수가 가장 높았다 ($r = 0.90$). X-밴드 후방산란계수는 L-, C-밴드 후방산란계수보다 상관계수가 낮게 나타났다 ($r \leq 0.71$).

후방산란계수를 이용하여 토양수분함량 추정 모형을 작성하였다. L-밴드 HH-편파 후방산란계수와 토양수분함량과의 관계를 비교해 본 결과 결정계수가 높게 나타났다 ($R^2 = 0.92$). 본 연구를 통해 레이더 산란계 시스템에서 얻어진 후방산란계수를 이용하여 토양수분함량을 추정할 수 있음을 확인하였다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ007753032012)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.
- Bartsch, A., C. Pathe, and W. Wagner. 2007. Relative soil moisture from C- and L-band SAR time series, The 1st Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, Kyoto, Japan. 19-23 Nov. 2007.
- Bindlish, R. and A.P. Barros. 2001. Parameterization of vegetation backscatter in radar-based soil moisture estimation. Remote Sens. Environ. 76:130-137.
- 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. 115:1090-1101.
- Chen, C. and H. McNairn. 2006. A neural network integrated approach for rice crop monitoring. Int. J. Remote Sens. 27:1367-1393.
- Dobson, M.C. and F.T. Ulaby. 1986. Active microwave soil moisture research. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 24:23-36.
- 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.
- Hallikainen, T., F.T. Ulaby., M.C. Dobson., M.A. El-Rayes, and L. Wu. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part-I: Empirical models and experimental observation. IEEE

- Trans. Geosci. Remote Sens. 23:25-34.
- Jackson, T.J., A. Chang, and T.J. Schmugge. 1981. Aircraft active microwave measurements for estimating soil moisture. Photogramm. Eng. Rem. Sens. 47:801-805.
- 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.
- 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.
- Moran, M.S., C.D. Peters-Lidard., J.M Watts, and S. McElroy. 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based. Can. J. Rem. Sens. 30:805-826.
- Paris, J.F. 1986. The effect of leaf size on the microwave backscattering by corn. Remote Sens. Environ. 19:81-95.
- Prasad, R. 2009. Retrieval of crop variables with field-based X-band microwave remote sensing of ladyfinger. Advanced in space research. 43:1356-1363.
- Prevot, L., I. Champion, and G. Guyot. 1993. Estimation surface soil moisture and leaf area index of a wheat canopy using a dual-frequency (C and X bands) scatterometer. Remote Sens. Environ. 46:331-339.
- Ram, V., M. Ali., M. Daily, J. Gabrynowicz, S. Narumalani, K. Nygard, W. Perrizo., S. Reichenbach., G.A. Seielstad, and W. White. 1995. Accessing Earth system science data and applications through high-bandwidth networks. IEEE Sel. Areas Commun. 13:793-805.
- Ribbes, F. and T. Le Toan. 1999. Rice field mapping and monitoring with RADARSAT data. Int. J. Remote Sens. 20:745-765.
- Schmugge, T. 1978. Remote sensing of surface soil moisture. J. Appl. Meteorol. Clim. 17:1549-1557.
- 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. 1974. Radar measurement of soil moisture content. IEEE Trans. Antennas Propag. 22:257-265.
- 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., 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. 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.