

마이크로파 산란계를 이용한 밀 생육 추정

김이현 · 홍석영* · 이경도 · 장소영

농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과

Estimation of Wheat Growth using a Microwave Scatterometer

Yihyun Kim, Sukyoung Hong*, Kyungdo Lee, and Soyeong Jang

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

Microwave remote sensing can help monitor the land surface water cycle and crop growth. This type of remote sensing has great potential over conventional remote sensing using the visible and infrared regions due to its all-weather day-and-night imaging capabilities. In this paper, a ground-based multi-frequency (L-, C-, and X-band) polarimetric scatterometer system capable of making observations every 10 min was developed. This system was used to monitor the wheat over an entire growth cycle. The polarimetric scatterometer components were installed inside an air-conditioned shelter to maintain constant temperature and humidity during the data acquisition period. Backscattering coefficients for the crop growing season were compared with biophysical measurements. Backscattering coefficients for all frequencies and polarizations increased until day of year 137 and then decreased along with fresh weight, dry weight, plant height, and vegetation water content (VWC). The range of backscatter for X-band was lower than for L- and C-band. We examined the relationship between the backscattering coefficients of each band (frequency/polarization) and the various wheat growth parameters. The correlation between the different vegetation parameters and backscatter decreased with increasing frequency. L-band HH-polarization (L-HH) is best suited for the monitoring of fresh weight ($r=0.98$), dry weight ($r=0.96$), VWC ($r=0.98$), and plant height ($r=0.96$). The correlation coefficients were highest for L-band observations and lowest for X-band. Also, HH-polarization had the highest correlations among the polarization channels (HH, VV and HV). Based on the correlation analysis between backscattering coefficients in each band and wheat growth parameters, we developed prediction equations using the L-HH based on the observed relationships between L-HH and fresh weight, dry weight, VWC and plant height. The results of these analyses will be useful in determining the optimum microwave frequency and polarizations necessary for estimating vegetation parameters in the wheat.

Key words: Microwave remote sensing, Polarimetric scatterometer, Wheat, Backscattering coefficients, Growth parameters

서 언

레이더 (Radar)는 광파에 비해 구름이나 눈, 비 등을 통과할 수 있고, 밤에도 탐사할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 레이더는 여름철 장마, 연무 등 날씨에 영향을 거의 받지 않고 자료를 얻을 수 있어 농업적 활용에 대한 관심이 높아지고 있다.

레이더에서 얻어지는 후방 산란 (backscattering)은 작물의 종류, 생체량, 엽면적지수, 수분 함량, 배열과 분포에 따라 달라진다. 특히 다편파 레이더 자료를 이용하면 표면 산란 (surface scattering), 이중 산란 (double bounce scattering)

및 체적 산란 (volume scattering)의 정도를 구분하여 작물의 특성을 구별하는데 용이하다. 최근 국내의 연구동향을 살펴보면 인공위성 및 지상 레이더 자료를 이용하여 작물 생육을 모니터링하고, 추정하여 얻어진 작물생육추정모형을 이용하여 작물식생변화를 정량화하여 활용하고 있다 (Le Toan et al., 1989; Kurosu et al., 1995; Wigneron et al., 1999; Macelloni et al., 2001; Xiao et al., 2005; Chen and McNairn, 2006; Cuizhen et al., 2009; Bouvet and Le Toan, 2011). 또한 1970년대 후반 식생에 대한 단순 산란모델인 water cloud model이 개발된 이후 (Attema and Ulaby, 1978) 토양 수분, 기상 등 다양한 인자를 이용한 산란 모델 개발, 마이크로파와 작물 및 토양과의 물리적 상호관계의 이해도를 증가시킨 일반화 모델 개발이 활발히 진행되고 있다.

마이크로파 산란계는 합성구경레이더 영상자료에 비해

접수 : 2013. 1. 21 수리 : 2013. 2. 6

*연락처 : Phone: +82312900344

E-mail: syhong67@korea.kr

연속적으로 작물을 모니터링을 할 수 있어 시간해상도가 레이더 영상에 비해 훨씬 뛰어나다. 또한 다중편파 (full polarization), 다양한 입사각도를 통하여 여러 종류의 밴드 안테나를 동시에 이용함으로써 편파별 작물 생육변화를 시기별로 모니터링 할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다 (Inoue et al., 2002; Kim et al., 2011, Kim et al., 2012).

마이크로파 산란계를 이용하여 후방산란계수와 벼, 콩, 옥수수 등의 작물생육인자들과의 관계를 분석하고 작물생육을 추정하는 연구들을 중심으로 작물생육을 모니터링하고 작물·식생변화를 정량화하는 연구들은 수년 동안 진행되고 있다. Brisco et al. (1990)은 X-밴드 안테나를 이용하여 시계열에 따라 입사각도에 따른 후방산란계수와 밀의 엽면적지수, 바이오매스 등 생육인자와의 관계를 분석하였고, 지상측정용 다편파 산란계를 이용하여 캐나다 평원의 작물 구분 시험을 한 결과 HV-편파 후방산란계수가 HH-, VV-편파보다 작물구분 정확도가 높게 나타났다. 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. C-와 L-밴드는 출수나 성숙과 같은 생리적인 생육 변화보다는 바이오매스 생육과 더 밀접하게 관련이 있었고 이와 반대로, Ka-와 Ku-밴드는 출수기 이후 벼 낱알의 생육변화에 매우 민감하였다. Singh (2006)은 X-밴드 지상산란계 (9.5 GHz, HH-, VV-편파)에서 얻어진 후방산란계수와 콩 생육인자와의 관계를 분석하였다. 생체중이 증가함에 따라 HH-, VV-편파 후방산란계수도 같이 증가하였고, 생체중과 상관성이 다른 생육인자들 (초장, 엽면적지수, 토양수분 함량) 보다 높았으며 VV-편파 후방산란계수가 HH-편파보다 생체중과의 상관계수가 높게 나타났다. 입사각 40도 이하일 때 토양수분과의 상관성이 높은 반면 40도 이상인 경우에는 생체중, 초장, 엽면적지수와의 상관관계가 높게 나타났다.

국내의 경우 Kim et al. (2000)은 X-band 다편파 산란계 시스템 (9 GHz, 입사각도 0° ~ 70°)을 이용하여 벼 생육시기에 따른 후방산란계수변화를 관측하였다. 연구결과에서는 후방산란계수 최대값은 벼 이앙 후 약 60일 전·후 시기에 나타났고 그 후 감소하는 경향을 보였다. Hong et al. (2007)은 마이크로파 L-밴드 (1.95 GHz)와 C-밴드 (5.3 GHz) 산란계 시스템을 이용하여 벼 생육과정에서의 후방산란계수를 측정하고, 관측한 후방산란계수와 벼 군락의 생육과의 관계를 살펴보았다. Kim et al. (2009)은 다편파 레이더 산란계 시스템을 이용하여 벼 생육시기에 따른 후방산란계수변화를 관측하고 밴드 (L-, C-, X-밴드), 편파 및 입사각도별 후방산란계수와 엽면적지수, 바이오매스, 이삭 건물중 등 벼 생육인자들과의 관계를 분석하였다. 하지만 관측과정

에서 안테나 선택과 각도 조절이 모두 수동으로 이루어졌고 측정이 1주일 간격으로 이루어져 강우, 바람, 습도 등 기후요인의 영향으로 인해 자료의 신뢰성이 제한적이었다. 이를 보완하여 Kim et al. (2010)은 기후 등의 영향을 받지 않고 벼 산란특성을 관측할 수 있는 X-밴드 레이더 자동관측 시스템을 구축하고, 레이더 산란계에서 얻어진 후방산란계수를 이용하여 벼 생육인자를 추정하였다.

본 논문에서는 레이더 산란 측정을 할 수 있는 L, C, X-밴드 기반 마이크로파 산란계 자동관측 시스템을 구축하여 연속적으로 (10분 단위) 밀 생육 변화를 모니터링 하고, 마이크로파 산란계에서 얻어진 후방산란계수와 생체중, 건물중, 초장, 식생 수분함량 등 생육인자들과의 관계 분석을 통해 밀 생육을 추정하였다.

재료 및 방법

연구지역 경기도 수원시 소재 국립식량과학원 시험포장 (37° 15' 34.77" N, 126° 58' 32.52" E)에서 금강밀 (*Triticum aestivum* L)을 대상으로 2011년, 2012년에 걸쳐 연구를 수행하였다. 시험포장의 면적은 20 m × 40 m, 밀 파종일은 2011년 11월 15일, 수확일은 2012년 6월 22일이었다. 레이더 산란계 시스템을 이용하여 밀 파종일 부터 수확일 까지 레이더 산란특성을 모니터링 하였다. 밀이 자라는 방향 (crop row orientation)은 밴드별 안테나의 방위각 (azimuth) 각도와 동일한 방향이었다.

토양, 작물생육 조사 및 분석 토양화학성 분석은 국립농업과학원 「토양 및 식물체 분석법」에 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 CH₃COONH₄로 침출여과 후 ICP (Inductively Coupled Plasma, GBC Scientific Equipment Pty Ltd, Australia)로 분석하였고, CEC (Cation Exchange Capacity)는 pH 7.0 1N CH₃COONH₄로 추출한 후 Kjeldahl 증류장치를 사용하여 분석하였다. 토양화학성 분석 결과는 Table 1과 같다.

밀 생육단계는 영양생장기 (vegetative stage), 생식생장기 (reproductive stage) 2단계로 구분되는데 영양생장기는 파종기 (seeding), 재생기 (re-emergence, 겨울철 성장을 멈춘 후 다시 자라기 시작하는 시기), 유수형성기 (panicle formation), 출수기 (heading)까지 이고, 생식생장기는 유숙기 (milk ripe), 황숙기 (yellow ripe), 수확기까지이다. 본 연구에서의 해당 밀 생육단계 시기는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Soil physico-chemical properties of the study sites.

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	Loam	
6.0	19.1	9	169	0.9	7.8	3.2	13.7		1.24

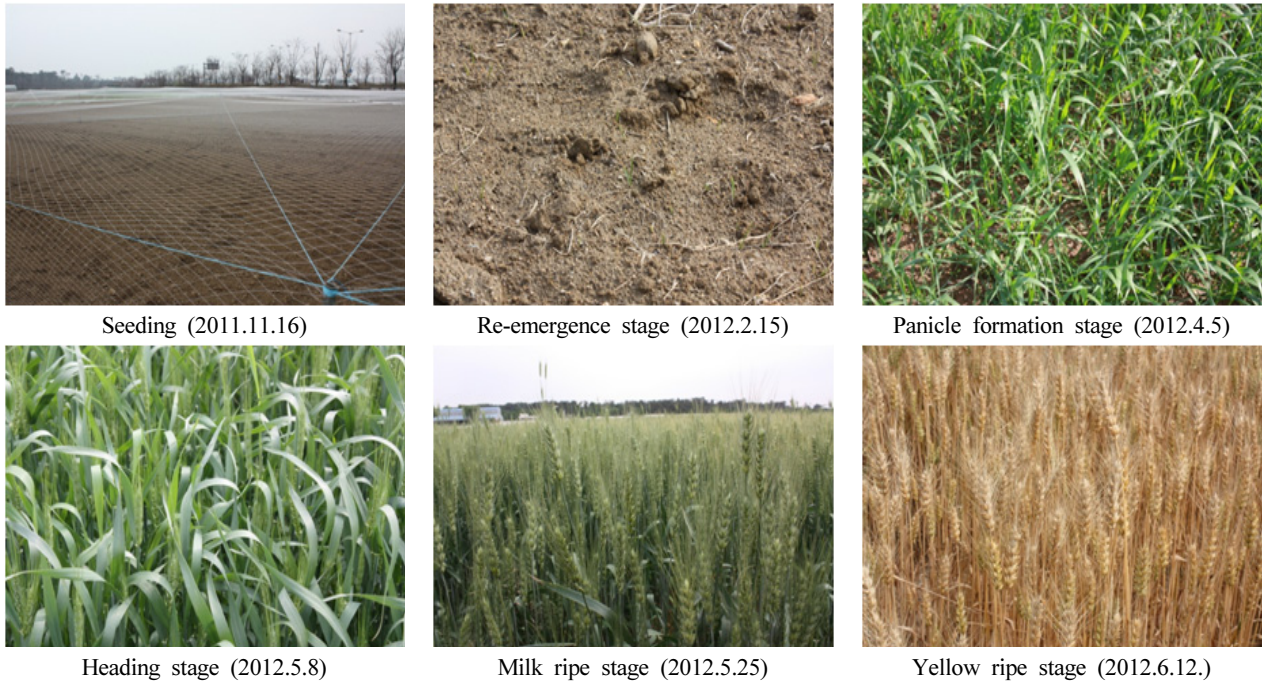


Fig. 1. Field photos; wheat in various growth stages.

밀은 산파 (broadcast planting) 재배를 하였고, 3월 중순 (Day Of Year, DOY 83)부터 6월 중순 (DOY 164)까지 초장 (plant height), 생체중 (fresh weight), 건물중 (dry weight), 식생수분함량 (vegetation water content) 등을 정기적으로 조사 (1회/주)하였다. 생육조사는 직사각형틀 (60 cm x 50 cm)을 이용하여 틀 안의 시료를 채취하여 초장, 생체중 등을 측정하고 60°C에서 건조하여 건물중 등을 측정하였다. 생체중에서 건물중을 뺀 값으로 식생 수분함량을 얻었다. 밴드별 후방산란계수와 밀 생육인자들과의 상관분석 및 회귀분석은 SigmaPlot 프로그램 (SigmaPlot ver.10, Systat Software Inc.)을 이용하였다.

레이더 산란계 시스템 레이더 산란계 시스템 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 (Fig. 2). 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 cable

들과 연결되는 부분을 밀봉하여 건물 외부에 설치하였다. 측정시스템 구성항목별 특성은 Table 2와 같다 (Kim et al., 2011). 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 파장은 각각 0.23 m (L-밴드), 0.056 m (C-밴드), 0.031 m (X-밴드) 이다. 여름철 건물 내부에 온도가 올라가는 것을 막기 위해 내부에 냉난방기를 설치하여 측정기간 동안 20°C를 유지하였다. 산란측정주기는 10분당 1번씩 자동측정이 되며, LabVIEW (National Instrument, ver. 8.3)를 이용하여 자동측정 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. GPIB-USB 커넥터를 이용하여 네트워크 분석기와 노트북 컴퓨터에 장착된 제어프로그램을 연결하였다. 밴드별 후방산란계수 산출은 레이더 방정식을 이용하였다 (Ulaby et al., 1990).



Fig. 2. Field view automatic radar scatterometer system ; (left) The shelter installed in the experimental wheat 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 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		

* Horizontal transmit and Horizontal receive polarization

† Vertical transmit and Vertical receive polarization

‡ Horizontal transmit and Vertical receive polarization

§ Vertical transmit and Horizontal receive polarization

결과 및 고찰

밴드별 후방산란계수와 밀 생육인자 변화 분석 밀 생육시기에 따른 생육인자들의 변화를 관측해 본한 결과 생체중, 건물중, 초장, 식생수분함량은 5월 16일 (DOY 137) 최대값을 보인 후 정체되거나 감소하는 추세를 보였다. 생육시기동안 L, C, X-밴드의 후방산란계수 범위는 각각 -47 dB ~ -3 dB, -50 dB ~ -8 dB, -53 dB ~ -14 dB로 L-밴드에서 후방산란계수가 가장 높게 나타났다 (Fig. 3 ~ 5). Fig. 3은 L-밴드 편파별 후방산란계수 변화를 보여주었고 있다. 모든 편파에서 생육초기에는 VV-편파가 HH-, HV-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났지만 3월 28일 (DOY

88) 이후 L-밴드 HH-편파가 다른 편파들보다 높게 나타나기 시작하였고, 이런 경향은 수확기 (6월 22일, DOY 174)까지 지속되었다. 또한 출수기 (5월 8일, DOY 129) 이후 HH-편파와 VV-편파 후방산란계수 차이가 다른 밴드에 비해 크게 나타났다. 이 결과는 Kim et al. (2012)이 벼와 콩에서 조사하여 발표한 결과와 일치한다. Kim et al. (2012)은 pauli decomposition (산란 분해기법)을 이용하여 벼, 콩 생육단계를 추정하였는데 L-밴드 벼 산란특성 추출 결과에서 벼 출수기 이후 HH-편파와 VV-편파 후방산란계수 차이가 크게 나타났고, 콩의 경우 꼬투리길이 생장이 완료되는 시기인 착형성기 이후 두 편파간의 값 차이가 크게 나타났다.

C-밴드 편파별 후방산란계수 변화를 알아본 결과는 Fig.

4와 같다. HH-편파 후방산란계수는 우수형성기 (4월 5일, DOY 96)에 가까운 DOY 93 (4월 2일)부터 VV, HV-편파 후방산란계수보다 높게 나타나기 시작하였다. Fig. 5는 X-밴드 편파별 후방산란계수 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 93 (4월 2일) 이후부터 HH-편파가 VV-편파보다 후방산란계수가 높았다. 이런 경향은 C-밴드와 동일하다.

HH-편파가 VV-편파보다 후방산란계수가 높게 나타나는 시기는 밴드에 따라 차이를 보였다. Kim et al. (2011)도 이와 비슷한 결과를 발표하였는데 콩 생육시기에 따른 밴드 및 편파별 후방산란계수를 변화를 관측한 결과에서 L-밴드

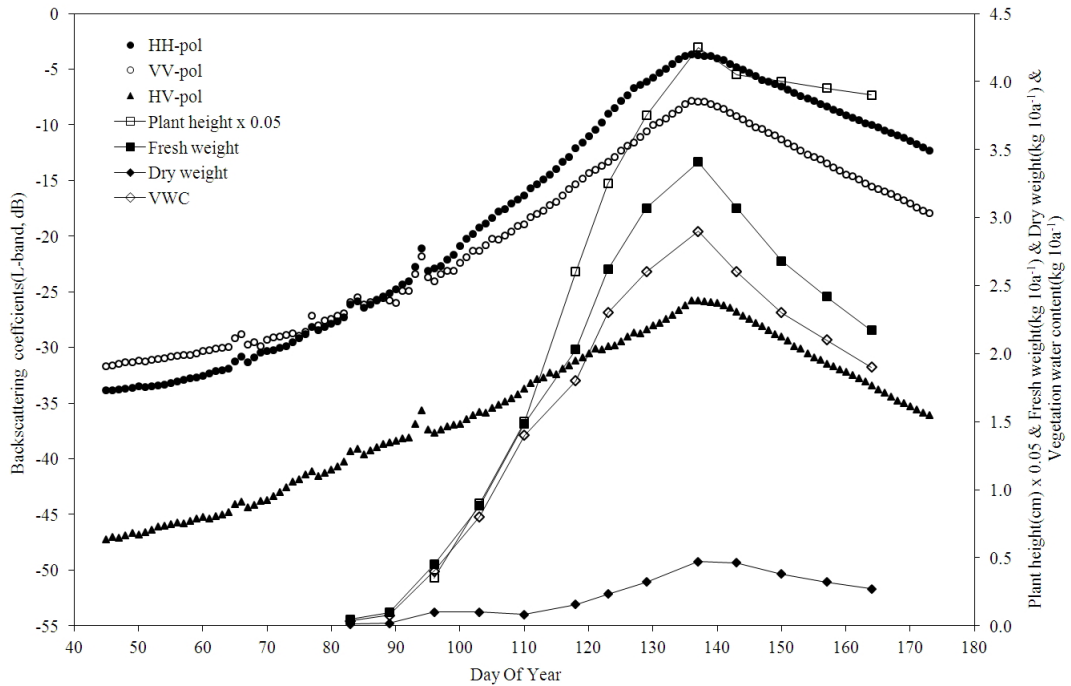


Fig. 3. Comparison between L-band backscattering coefficients and growth parameters during the wheat growth period.

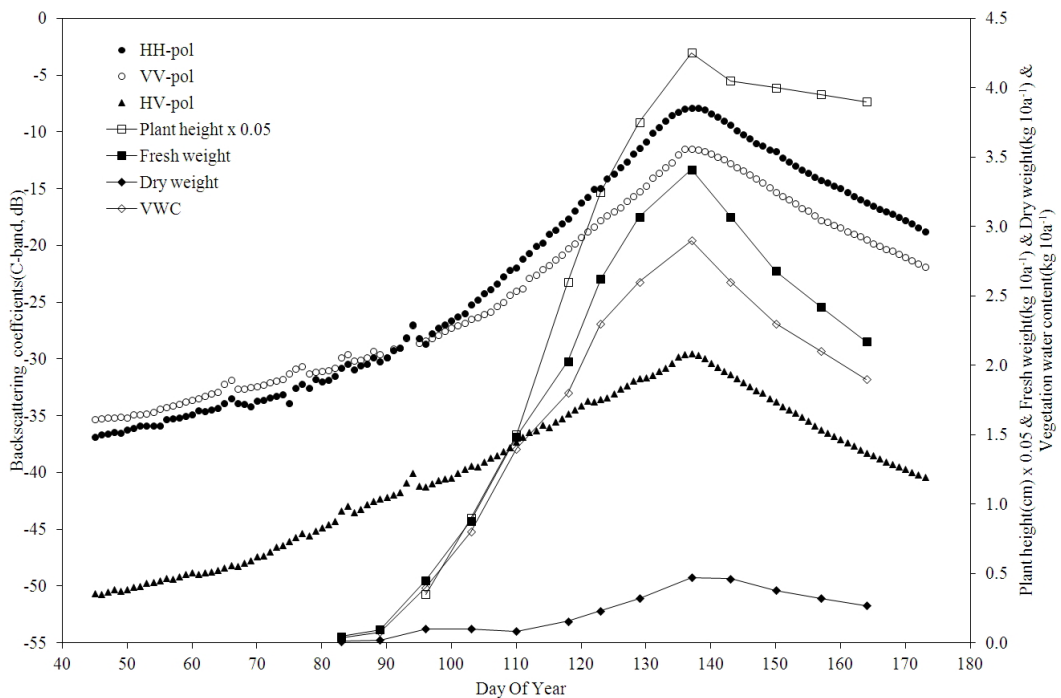


Fig. 4. Comparison between C-band backscattering coefficients and growth parameters during the wheat growth period.

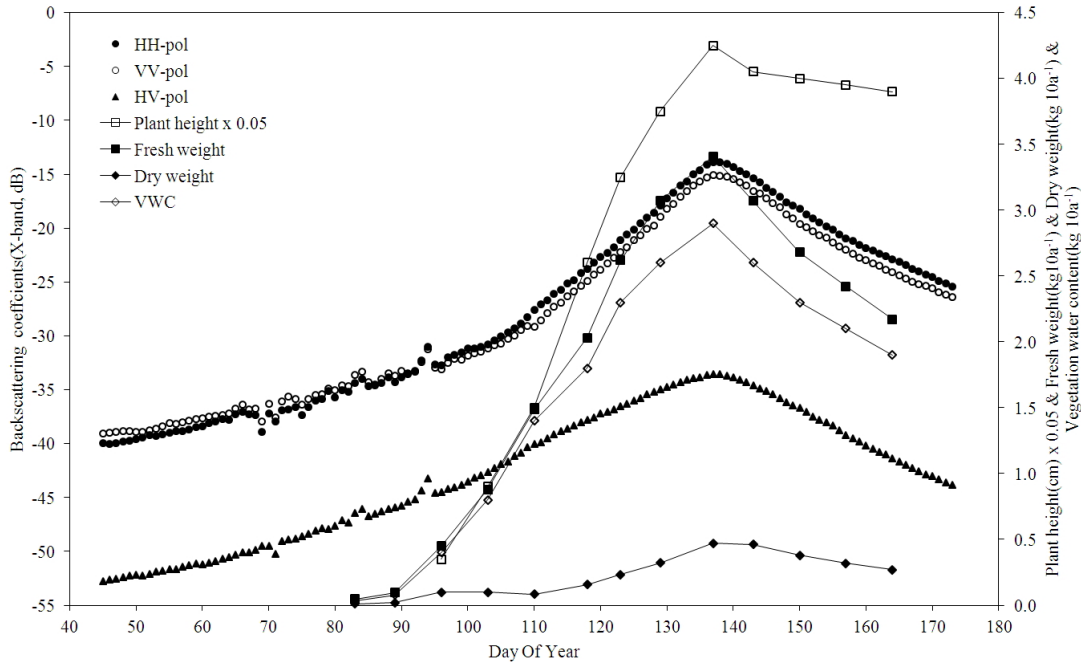


Fig. 5. Comparison between X-band backscattering coefficients and growth parameters during the wheat growth period.

의 경우 7월 20일 (DOY 200), C, X-밴드는 7월 31일 (DOY 211)부터 HH-편파가 다른 편파들 보다 후방산란계수가 높게 나타났다. 반면에 Kim et al. (2009년)은 벼 생육기간동안 후방산란계수와 생육인자와의 변화를 관측하였을 때 모든 밴드 (L-, C-, X-밴드)에서 6월 중순 (DOY 166)부터 HH-편파가 다른 편파들에 비해 후방산란계수가 높게 나타났다. 그 이유는 벼는 생육기간동안 대부분 물에 잠겨있어 토양 요인을 거의 받지 않지만 발작물인 콩, 밀은 생육초기부터 균락이 형성되는 시기에 토양 거칠기, 토양수분 등에 영향을 많이 받으며, 작물 간의 구조의 차이로 인해 편파별 후방산란계수 변화 값이 차이가 발생한다. 또한, L-밴드가 C, X-밴드에 비해 침투력이 강하고 특히 토양수분 함량에 민감하게 반응하므로 다른 밴드들에 비해 좀 더 빠른 시기에 HH-편파가 다른 편파들보다 후방산란계수가 더 높게 나타나는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 모든 안테나 편파별 후방산란계수가 5월 16일 (DOY 137)에 최대값을 보였고, 그 이후 수확기까지 감소하였는데 초장, 생체중, 건물중 등 밀 생육인자들에서도 동일한 경향이 나타났다.

후방산란계수를 이용한 밀 생육 추정 밴드 및 편파에 따른 후방산란계수와 밀 생육인자들과의 상관관계를 분석하였다 (Table 3). 생체중과 후방산란계수와의 상관관계를 분석해 본 결과 L-밴드 HH-편파에서 상관계수가 가장 높았고 ($r=0.98$), L-밴드, C-밴드의 다른 편파들에서도 상관성이 높았다 ($r \geq 0.84$). X-밴드 편파에서는 L, C-밴드에 비해 상관계수가 낮았다 ($r \leq 0.78$).

건물중과 후방산란계수를 비교해보았을 때 L-밴드 HH-편파에서 상관계수가 가장 높았고 ($r=0.96$), 다른 편파에서도 상관성이 나타났다 ($r \geq 0.86$). C-밴드 편파에서는 건물중과의 상관관계가 초장, 생체중, 식생수분함량에 비해 낮게 나타났고, 특히 X-밴드 모든 편파에서 건물중과의 상관계수가 낮았다 ($r \leq 0.75$). L-밴드 HH-편파 조건에서 식생수분함량과의 상관계수가 가장 높게 나타났고 ($r=0.98$), C-, X-밴드 모든 편파에서도 상관성이 나타났다 ($r \geq 0.80$). 초장과 밴드별 후방산란계수의 관계를 알아본 결과 L-밴드 HH-편파에서 상관계수가 가장 높게 나타났고 ($r=0.96$), VV-, HV-편파에서도 상관계수가 높게 나타났으며 ($r \geq 0.89$), 다른 밴드의 모든 편파에서도 상관성을 보였다 ($r \geq 0.84$).

밴드에 따른 편파별 후방산란계수와 콩 생육과의 관계를 분석한 연구결과 (Kim et al., 2011)에서도 L-밴드 HH-편파 후방산란계수가 콩 생육인자 (생체중, 건물중, 엽면적지수, 식생수분함량, 꼬투리중)들과의 상관계수가 가장 높게 나타났다 ($r \geq 0.92$). 이들 결과들을 통해 파장이 긴 L-밴드 마이크로파는 밀 줄기, 뿌리까지 신호 (signal)가 전달되므로 L-밴드를 이용하여 생체중, 엽면적지수 등 체적산란특성 (volumetric characteristics) 정보를 얻을 수 있다. 또한 편파별 후방산란계수와 생육인자와의 상관성 분석결과 HH-편파가 다른 편파들보다 작물 균락에 좀 더 효과적으로 침투하는 것을 확인 할 수 있었다.

밴드 및 편파별 후방산란계수와 밀 생육인자와의 상관분석에서 상관계수가 가장 높은 후방산란계수를 이용하여 생육을 추정하였다. L-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 생체중을 추정한 결과는 Fig. 6(a)와 같다. 생체중과 L-

Table 3. Correlation coefficients between backscattering coefficients at L, C, and X-band and wheat growth parameters. The maximum correlation are highlighted in bold character for each wheat growth parameter and radar channels.

Growth data	Polarization	L-band			C-band			X-band		
		HH	VV	HV	HH	VV	HV	HH	VV	HV
Fresh weight (kg m ⁻²)		0.98^{***}	0.91 ^{***}	0.86 ^{**}	0.87 ^{***}	0.86 ^{**}	0.84 ^{**}	0.78 ^{**}	0.76 ^{**}	0.77 ^{**}
Dry weight (kg m ⁻²)		0.96^{***}	0.88 ^{***}	0.86 ^{**}	0.85 ^{**}	0.83 ^{**}	0.81 ^{**}	0.75 ^{**}	0.73 ^{**}	0.69 [*]
Vegetation water content (kg m ⁻²)		0.98^{***}	0.92 ^{***}	0.88 ^{***}	0.89 ^{***}	0.85 ^{**}	0.83 ^{**}	0.81 ^{**}	0.82 ^{**}	0.80 ^{**}
Plant height (cm)		0.96^{***}	0.92 ^{***}	0.89 ^{***}	0.89 ^{***}	0.87 ^{***}	0.86 ^{**}	0.86 ^{**}	0.84 ^{**}	0.86 ^{**}

^{*}, ^{**}, ^{***} Significant at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

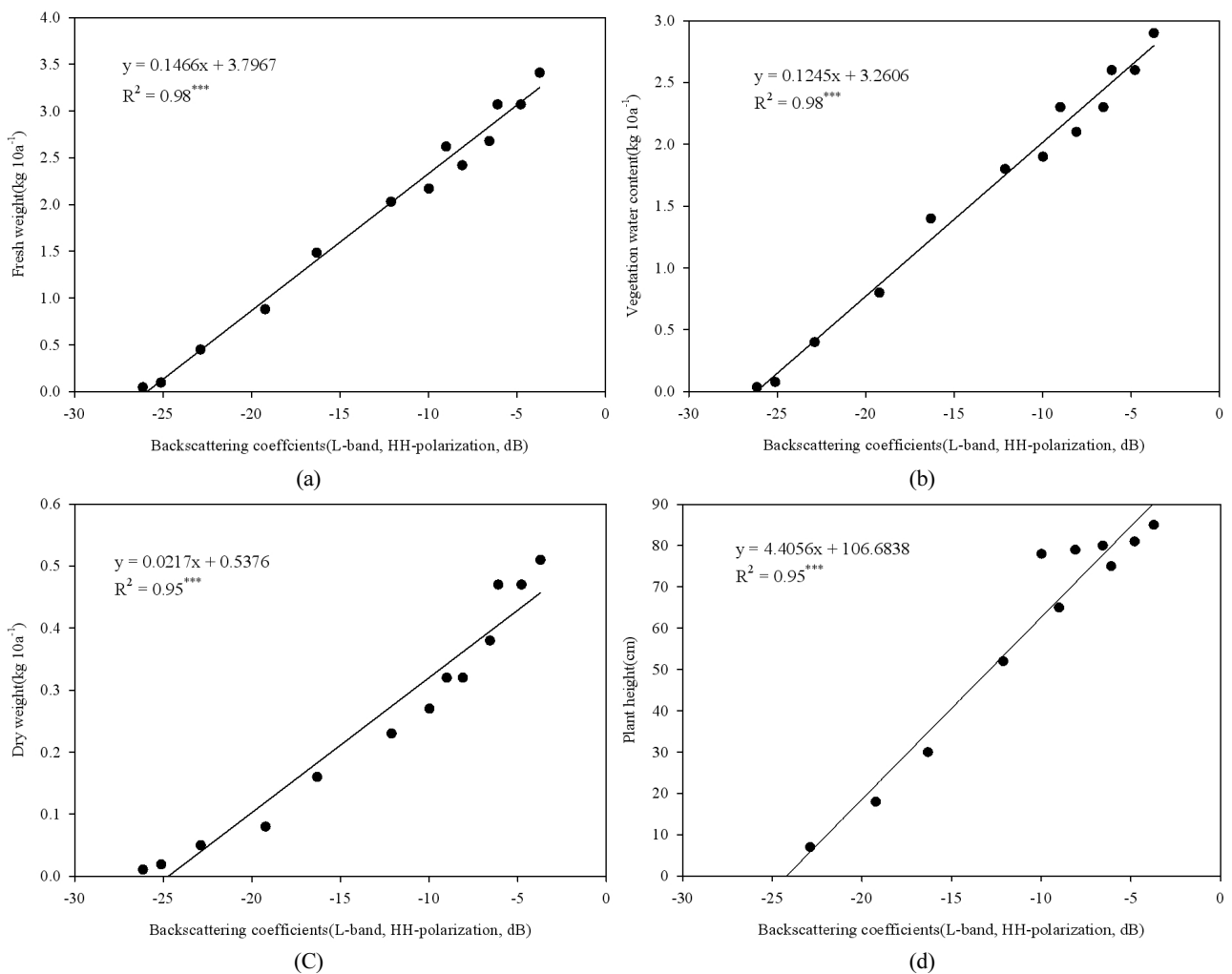


Fig. 6. Relationship between backscattering coefficients (L-band, HH-polarization) and wheat growth data ; (a) Fresh weight, (b) Vegetation water content, (c) Dry weight, and (d) Plant height.

밴드 HH-편파 후방산란계수는 결정계수가 0.98로 나타났고 생체중 변이의 98%를 설명할 수 있었다. L-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 식생수분함량을 추정된 결과 1차식 관계가 성립되었고 결정계수가 0.98이었다 [Fig. 6(b)]. 건물중과 L-밴드 HH-편파 후방산란계수는 결정계수가

0.95로 건물중 변이의 95%를 설명할 수 있었다 [Fig. 6(c)]. L-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용한 초장 추정에서 결정계수가 0.95로 나타났다 [Fig. 6(d)].

결론적으로 다편파 마이크로파 산란계 시스템에서 얻어진 밴드별 후방산란계수를 이용하여 밀 생육을 추정된 결과

L-밴드>C-밴드>X-밴드 순서로 추정값이 높게 나타났고, L-밴드 HH-편파를 이용하는 것이 밀 생체중, 식생수분함량, 건물중, 초장을 각각 가장 높게 추정할 수 있었음을 확인하였다.

본 연구에서는 마이크로파 산란계 자동 측정시스템 관측을 통해 10분 단위로 얻어진 후방산란계수를 이용하여 밴드별 편파에 따른 후방산란계수와 밀 생육인자들과의 관계를 분석하고 상관성이 높게 나타난 후방산란계수를 이용하여 밀 생육을 추정할 수 있음을 확인하였다.

요 약

L, C, X-밴드 마이크로파 산란계 자동측정시스템을 이용하여 밀 생육시기에 따른 밴드 및 편파별 후방산란계수와 생육인자 변화를 측정하였다. 모든 안테나 밴드에서 밀 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 3월 28일 (DOY 88), C, X-밴드는 4월 2일 (DOY 93)부터 HH-편파가 다른 편파들 보다 후방산란계수가 높게 나타났다. 모든 안테나에서 편파별 후방산란계수가 5월 16일 (DOY 137)에 최대값을 보였고 그 이후 수확기 (DOY 174, 6월 22일)까지 감소하였는데 초장, 생체중, 건물중, 엽면적지수 등 밀 생육인자들에서도 동일한 경향이 나타났다.

밴드별 후방산란계수와 밀 생육인자들과의 상관관계를 분석한 결과 L-밴드 HH-편파에서 생체중 ($r=0.98$), 건물중 ($r=0.96$), 식생 수분함량 ($r=0.98$) 초장 ($r=0.96$) 등 모든 밀 생육인자들과 상관계수가 가장 높게 나타났다. L-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용하여 밀 생육인자를 추정한 결과 생체중 ($R^2=0.98$), 건물중 ($R^2=0.95$), 식생 수분함량 ($R^2=0.98$) 초장 ($R^2=0.95$)의 결정계수가 각각 높게 나타났다. L-밴드 HH-편파 후방산란계수를 이용하는 것이 밀 생육을 가장 높게 예측할 수 있었음을 확인하였다.

사 사

이 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ009367012013) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

인 용 문 헌

Attema, E.P. and F.T. Ulaby. 1978. Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*, 13:357-364.
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.
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.
Chen, C. and H. Mcnairn. 2006. A neural network integrated approach for rice crop monitoring. *Int. J. Remote Sens.* 27: 1367-1393.
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 multi-temporal ALOS/PALSAR imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47(4):988-998.
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 Sens. Environ.* 81:194-204.
Hong, S.Y., J.Y. Hong, Y.H. Kim, and Y.S. Oh. 2007. Measurement of backscattering coefficients of rice canopy using a ground polarimetric scatterometer system. *Korean J. Remote Sens.* 23(2):145-152.
Kim, S.B., B.W. Kim, Y.K. Kong, and Y.S. Kim. 2000. Radar backscattering measurements of rice crop using X-band scatterometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38(3): 1467-1471.
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.
Kim, Y.H., S.Y. Hong, H.Y. Lee, J.E. Lee, and K.D. Lee. 2012. Estimation of rice and soybean growth stage using a microwave scatterometer. *Korean Soc. Soil Sci. Fertilizer.* 45:503-510.
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.

- National Academy of Agricultural Science, 2010. Methods of soil and crop plant analysis. National Academy of Agricultural Science, RDA.
- 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 C. Elachi. 1990. Radar Polarimetry for Geoscience Applications. Artech House Inc., Norwood, MA, USA.
- Wigneron, J.P., P. Ferrazzoli, A. Olioso, 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., S. Bole., 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.