

# L, C, X-밴드 다편파 레이더 산란계를 이용한 논 벼 생육인자 추정

김이현\* · 홍석영\* · 이훈열\*\*†

\*농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료관리과, \*\*강원대 자연과학대학 지구물리학과

## Estimation of Paddy Rice Growth Parameters Using L, C, X-bands Polarimetric Scatterometer

Yi-Hyun Kim\*, Suk-Young Hong\*, and Hoonyol Lee\*\*†

\*National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

\*\*Department of Geophysics, Kangwon National University

**Abstract :** The objective of this study was to measure backscattering coefficients of paddy rice using a L-, C-, and X-band scatterometer system with full polarization and various angles during the rice growth period and to relate backscattering coefficients to rice growth parameters. Radar backscattering measurements of paddy rice field using multifrequency (L, C, and X) and full polarization were conducted at an experimental field located in National Academy of Agricultural Science (NAAS), Suwon, Korea. The scatterometer system consists of dual-polarimetric square horn antennas, HP8720D vector network analyzer (20 MHz ~ 20 GHz), RF cables, and a personal computer that controls frequency, polarization and data storage. The backscattering coefficients were calculated by applying radar equation for the measured at incidence angles between 20° and 60° with 5° interval for four polarization (HH, VV, HV, VH), respectively. We measured the temporal variations of backscattering coefficients of the rice crop at L-, C-, X-band during a rice growth period. In three bands, VV-polarized backscattering coefficients were higher than hh-polarized backscattering coefficients during rooting stage (mid-June) and HH-polarized backscattering coefficients were higher than VV-, HV/VH-polarized backscattering coefficients after panicle initiation stage (mid-July). Cross polarized backscattering coefficients in X-band increased towards the heading stage (mid-Aug) and thereafter saturated, again increased near the harvesting season. Backscattering coefficients of range at X-band were lower than that of L-, C-band. HH-, VV-polarized  $\sigma^0$  steadily increased toward panicle initiation stage and thereafter decreased, and again increased near the harvesting season. We plotted the relationship between backscattering coefficients with L-, C-, X-band and rice growth parameters. Biomass was correlated with L-band hh-polarization at a large incident angle. LAI (Leaf Area Index) was highly correlated with C-band HH- and cross-polarizations. Grain weight was correlated with backscattering coefficients of X-band VV-polarization at a large incidence angle. X-band was sensitive to grain maturity during the post heading stage.

**Key Words :** Backscattering coefficients, Full polarization, L-band, C-band, X-band, Rice growth, Biomass, LAI.

접수일(2009년 1월 28일), 수정일(1차 : 2009년 2월 8일, 2차 : 2009년 2월 15일), 게재확정일(2009년 2월 19일).

† 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

**요약 :** 본 연구에서는 다편파 산란계 시스템을 이용하여 얻어진 후방산란계수의 연중 변화를 편파와 입사각에 따라 알아보고 벼 생육인자와의 관계를 통하여 생육인자를 추정하고자 하였다. 2007년도 국립농업과학원 시험포장에 다편파산란계 시스템(L, C, X-band 안테나, 네트워크분석기, RF cable, 입사각 20° ~ 60°)을 제작 구축하고 벼 이앙기에서 수확기까지 산란특성을 주기적으로 관측하였으며 레이더 방정식을 이용하여 후방산란계수를 계산하여 자료 분석에 사용하였다. 모든 안테나 밴드에서 벼 생육초기(5월말~6월 초)에는 VV-편파가 HH-, HV-편파보다 후방산란계수가 높게 나타났다. C-band의 경우 모든 입사각에서 벼가 자라면서 HH-편파 후방산란계수가 증가하다가 출수기(8월중순경)에 가장 높았고 그 이후 감소하는 경향이였다. X-band는 모든 편파의 후방산란계수가 벼 우수형성기(7월말경)까지 증가하다가 그 후 감소하였으며 등속기인 9월 중순 이후 다시 증가하는 dual-peak 현상을 보였는데, 특히 VV-편파의 경우 9월 초 순부터 후방산란계수 증가가 다른 편파에 비해 크게 나타났다. 파장별 밴드, 편파, 입사각도별 후방산란계수와 작물 생육과의 관계를 분석한 결과 L-band는 바이오매스와의 상관성이 높게 나타났고 C-band에서는 엽면적지수와 초장과의 상관성이 높게 나타났으며 X-band는 이삭 건물중과 상관성이 높게 나타났다. 후방산란계수를 이용하여 생육을 추정할 수 있는 회귀식을 작성하고 실측값과의 비교를 통하여 작물 생육 추정을 위한 최적 조건을 구명하였다.

## 1. 서론

최근 들어 인공위성을 활용하는 사례가 사회 전반적인 분야로 확대되고 있는 추세이다. 지금까지 개발된 위성의 대부분은 광학위성으로 기상조건에 많은 영향을 받기 때문에 이런 단점을 보완 할 수 있는 것으로 합성구경레이더(Synthetic Aperture Radar: SAR) 관측 기술이 개발·이용되고 있다. 농업분야에서는 여름철의 기후 특성상 비 오는 기간이 길고 일조량과 일조시수가 적어서 레이더 활용성이 점점 중요시되고 있는데 레이더 자료를 이용하여 기후변화, 농경지관리, 재해면적 추정 등에 이용 될 뿐만 아니라 의사지원이나 정책결정 등에 활용할 수 있다.

작물군락의 전체적인 형태와 배열, 질감 등에 따라 작물의 backscatter 특성이 결정된다. 캐나다 사스콰치안 지역의 단일시기 C-VV SAR 영상을 이용하여 작물을 구분한 예를 들면, 여름철 휴경상태인 밭은 건조하고 평편하여 backscatter가 거의 없어 검게 나타나고 밀과 같은 곡물이 자라고 있는 밭은 중간 밝기 색조를 나타내며 카놀라, 콩과 같은 광엽식물은 꽤 밝게 나타나 영상에서 구분할 수 있었다(Brisco *et al.*; 1998).

Macelloni *et al.*(2002)은 후방산란계수( $\sigma^0$ )를 이용하여 작물생육이나 수량을 추정하는 모델을 만들고 적합성을 검증하기 위해서는 frequency, polarization, incident angles 등 두개 이상 비교해야한다고 보고하

였다. SAR 영상자료로써 작물별로 분류하여 특히 벼의 재배면적을 추정할 경우 두 시기 이상의 영상자료를 R, G, B 등으로 합성하면 추정정확도를 향상시킬 수 있으며, SAR의 polarization과 band(P, L, C)간 비교를 통해서 엽면적 추정이 가능하였다(Paloscica, 1998).

Ground-based polarimetric scatterometer는 SAR 영상자료에 비해 full polarization, 다양한 입사각도를 통하여 연속적으로 작물모니터링 하는데 장점을 가지고 있는데 Brisco *et al.*(1990)은 Ku-, C-, L-band scatterometer 시스템을 구축하고 시계열에 따라 편파, 입사각도, 밴드파장에 따른 후방산란계수와 밀의 토양수분 및 작물수분함량과의 관계를 알아보았고, Bouman(1991)은 X-band 레이더 산란계 자료를 통하여 입사각도별(0° ~ 70°) 후방산란계수를 이용한 감자, 사탕무의 표토 토양수분을 추정하였다. 뿐만 아니라, 작물생육인자와 후방산란계수와의 관계를 분석하는 연구들이 수년 동안 진행되고 있고(Ulaby *et al.*, 1984; Paris, 1986; Wigneron *et al.*; 1999), Ulaby *et al.*(1978)이 단순산란모델(simple microwave backscattering model)을 개발한 이후 후방산란계수와 토양 및 작물생육인자와의 관계를 통해 모델링하려는 노력을 계속하고 있다(Anthony *et al.*, 1998; Le Toan *et al.*, 1997; Moran *et al.*, 1998; Prevot *et al.*, 1993; Macelloni *et al.*, 2001; Yamaguchi *et al.*; 2005).

## 2. 연구방법

일본의 경우 Inoue *et al*(2002)이 벼의 생육기간 동안 여러 주파수와 입사각, 엽면적지수로 관측하여 작물 군락에 대한 단순 산란모형과 microwave backscattering signatures와의 연관을 분석하여 식물의 생육과 backscatter와의 관계를 분석하였다. C-와 L-밴드는 출수나 성숙과 같은 생리적인 생육변화보다는 바이오매스 생육과 더 밀접하게 관련이 있었고 이와 반대로, Ka-와 Ku-밴드는 출수기 이후 벼 낱알의 생육변화에 매우 민감하였다.

국내의 경우 Hong *et al*(2000)은 RADARSAT영상을 이용하여 벼 생육기간 동안 9시기의 자료를 standard beam mode 5 또는 6으로 취득하여 캘리브레이션 과정을 통하여 지표면의 특성을 잘 나타내는 backscattering coefficient를 산출하였는데 벼의 생육 초기 답수상태일 때 논의 backscattering coefficient의 범위는 -16 dB ~ -13 dB 이었고, 벼의 영양생장이 최대에 달했을 때 논의 backscattering coefficient는 -4.4 dB ~ -3.1 dB 범위로 생육단계별로 뚜렷한 차이를 보였다. Kim *et al*(2000)은 X-band 다편파 산란계 시스템(9 GHz, 입사각도 0° ~ 70°)을 이용하여 벼 생육 시기에 따른 후방산란계수변화를 관측하였다. 연구결과에서는 후방산란계수 최대값은 벼 이앙 후 약 60일 전후 시기에 나타났고 그 후 감소하는 경향을 보였다. 홍등(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.

국내외적으로 벼 생육시기에 따른 밴드별 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계를 분석한 결과가 많지 않고 특히 여러 밴드 안테나를 동시에 활용하여 입사각도 및 편파별 작물생육을 모니터링하고 작물생육인자를 추정하는 연구결과가 많이 발표되지 않은 상황이다.

따라서 본 연구에서는 L, C, X-band 기반의 다편파 레이더 산란계측정시스템을 구축하고 벼 생육시기에 따라 밴드, 편파 및 입사각도별 후방산란계수 변화를 관측하며 후방산란계수와 작물생육인자와의 관계를 구명하여 후방산란계수를 이용한 벼 생육인자를 추정하고자 하였다.

### 1) 시험 포장 및 처리 내용

본 연구는 국립농업과학원 시험포장(37° 15' 28.0"N, 126° 59' 21.5"E)에서 2007년에 추청벼를 대상으로 모이앙기(5월 17일)부터 벼 수확기(10월 11일)까지 레이더 산란계를 이용하여 후방산란계수를 측정하였다. 시험포장의 면적은 약 660 m<sup>2</sup>, 재식밀도는 30 × 15 cm 이고 질소의 경우 요소비료로 100 kg ha<sup>-1</sup> 처리하였고, 인산은 용과린, 칼륨은 염화칼륨을 사용하여 토양검정 시비량에 따라 처리하였다.

### 2) 시료채취 및 분석방법

후방산란계수를 측정하는 동일한 시기에 생육이 고른 벼 3주를 선택하여 초장(Plant height), 생체중(Fresh weight)등을 측정하고 70℃에서 건조하여 건물중(Dry weight)등을 측정하였다. 엽면적지수는 단위면적에 대한 군락의 엽 면적으로 정의되고 개엽을 모두 떼어내어 LI-3100(LI-COR, Inc. USA)을 이용하여 직접 측정 후 주(株) 재식밀도로 구하였다. 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계 및 추정을 알아보기 위해 SAS 프로그램(Enterprise Guide 4.0)을 이용하여 상관분석 및 회귀분석을 수행하였다.

### 3) 레이더 산란계 시스템 구축

다편파 산란계(Polarimetric Scatterometer)는 안테나, 고정 스탠드, 네트워크 분석기(Network Analyzer), GPIB(General Purpose Interface Bus)—USB, 노트북 컴퓨터 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 안테나는 X, C, L band의 Dual-Polarization Square Horn 안테

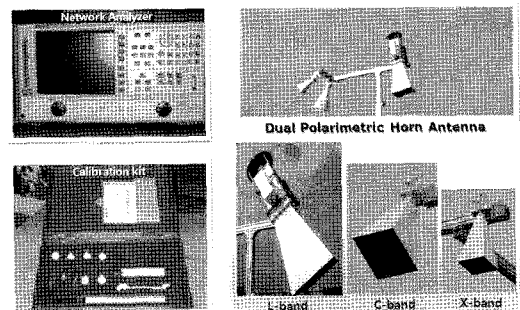


Fig. 1. Consist of polarimetric scatterometer system.

Table 1. Specification of the 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 | Dual polarimetric horn | Dual polarimetric horn |
| Antenna gain               | 12.4 dB                | 20.1 dB                | 22.4 dB                |
| Polarization               | HH, VV, HV, VH         | HH, VV, HV, VH         | HH, VV, HV, VH         |
| Incident angle             | 20° ~ 60°              | 20° ~ 60°              | 20° ~ 60°              |
| Platform height            | 4.16 m                 | 4.16 m                 | 4.16 m                 |

나를 사용하였다. 자세한 안테나의 특성은 Table 1과 같다. 고정 스탠드는 입사각과 높이를 조절할 수 있는데 이번 실험은 논바닥에서부터 스탠드의 윗부분까지 4.16 m의 높이에서 이루어졌으며 입사각은 20° ~ 60° 까지 5° 간격으로 측정하였다. 네트워크 분석기는 Agilent Technologies사의 8720D 모델을 사용하였으며 가용 가능한 주파수의 범위는 20 MHz ~ 20 GHz 이다. 네트워크 분석기에는 두 개의 포트가 있으며, 각각의 포트는 송, 수신을 할 수 있게 설계되어 있다. 이 두개의 포트는 안테나에 연결되어 S<sub>11</sub>, S<sub>12</sub>, S<sub>21</sub>, S<sub>22</sub>의 신호를 받게 되는데, 뒤에 첨자는 송신을 나타내고 앞의 첨자는 수신을 나타낸다. 안테나에는 수직편파(Vertical Polarization, V) 및 수평편파(Horizontal Polarization, H) 포트가 있으며, 이것을 네트워크 분석기와 연결하여 VV, VH, HV, HH 편파에 대한 특성을 측정하게 된다. 네트워크 분석기를 제어할 컴퓨터 프로그램은 National Instrument사의 LabVIEW™를 사용하였다. LabVIEW™를 기반으로 측정간격, 측정횟수, 측정시간을 제어할 수 있는 프로그램을 만들었고, 측정된 자료는 실시간으로 아스키(ASCII)파일로 컴퓨터에 저장될 수 있게 하였다. 이렇게 구성된 다편파 산란계는 대상체에서 산란되어 돌아오는 VV, VH, HV, HH 편파의 크기(amplitude)와 위상(phase) 정보를 동시에 얻게 된다.

4) 후방산란계수 추출

파장의 범위가 1 mm 부터 1 m 사이의 전파들을 모두 가리켜 마이크로파라 한다. 마이크로파는 빛과 거의 비슷한 성질을 갖고 있다. 이러한 마이크로파가 지표면에서 산란되면 모든 방향을 향해 퍼져 나가므로 안테나

에는 그 일부만이 도달하게 된다. 따라서 단위 면적당 파워의 크기는 가까이 있는 대상체에 의한 것보다 멀리 있는 대상체에 의한 것이 더 작다. 이렇게 수신 안테나에 도달하는 단위면적당 파워의 크기를 후방산란이라 한다.

마이크로파가 지표면에서 산란되어 안테나로 되돌아오는 신호 P<sub>r</sub>은 다음과 같은 레이더 방정식으로 표현할 수 있다(Ulaby *et al.*, 1990).

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

여기에서 P<sub>t</sub>는 지표면을 향해 송신되는 파워, G<sub>t</sub> · G<sub>r</sub>은 각각 송신 안테나와 수신 안테나의 이득, λ는 마이크로파의 파장, σ는 대상체의 후방산란 유효 면적(Radar Cross Section, RCS)이다. 그리고 R은 안테나로부터 대상체까지의 거리이다.

후방산란계수(σ<sup>0</sup>)는 단위면적(A)의 RCS 중 안테나로 되돌아오는 양으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A} \tag{2}$$

네트워크 분석기를 사용하기 위하여 먼저 calibration kit을 이용하여 각 band마다 calibration을 한 후 측정하였다. 각도 별로 8회씩 측정하여 평균하였으며, 벼에서 산란되어 돌아오는 VV, VH, HV, HH 편파의 크기(amplitude)와 위상(phase) 정보를 동시에 얻었다. 이렇게 얻은 정보는 수학적으로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_i = a_i e^{j\phi_i} \tag{3}$$

식 (1)은 오일러 공식에 의해 식 (4)으로 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 8회씩 측정한 것을 평균하였다. 여

기서  $a$ 는 amplitude,  $\phi$ 는 phase를 뜻한다.

$$Z = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (a_i \cos \phi_i + j a_i \sin \phi_i) \quad (4)$$

산란계 실험을 통해 측정된 대상체에서 산란되어 되 돌아오는 신호의 크기( $U$ )는 송신 마이크로파 파워( $P_t$ )에 대한 수신 마이크로파 파워( $P_r$ )의 비로써 다음식과 같이 나타낸다.

$$U^2 = \left( \frac{V_r}{V_t} \right)^2 = \frac{P_r}{P_t} \quad (5)$$

후방산란계수( $\sigma^0$ )는 레이더방정식 (1)과 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다. 먼저, 식 (1)을 dB로 환산하면 다음과 같다.

$$10 \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) = 20 \log U = 10 \log \left[ \frac{G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \right] \quad (6)$$

$$\therefore \sigma(\text{dB}) = 10 \log \sigma = 20 \log U - G_t(\text{dB}) - G_r(\text{dB}) - 20 \log \lambda + 30 \log 4\pi + 40 \log R$$

이번 연구에서 사용된 안테나는 송신안테나와 수신 안테나가 동일하기 때문에  $G_t$ 와  $G_r$ 의 값은 같다. 식 (2)의  $A$ 값은 산란계의 수평해상도에 따른 산란체의 면적으로 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$A = \frac{\Delta R}{\cos \theta_i} \cdot l \quad (7)$$

이 때,  $\Delta R$ 은 안테나의 거리 해상도로서  $\Delta R = c/2B$ ( $c$ :빛의 속도,  $B$ :band 폭)이고,  $\theta_i$ 는 입사각이며  $l = R \cdot \theta$ ( $R$ :대상체의 거리,  $\theta$ :안테나의 빔폭)이다.

식 (7)과 식 (8)을 다시 정리하면 각 band별 후방산란 계수를 구하기 위해 다음과 같은 식이 사용된다.

$$\begin{aligned} L\text{-band: } \sigma^0(\text{dB}) &= 20 \log U + 21.35(\text{dB}) + 30 \log R + 10 \log \cos \theta_i \\ C\text{-band: } \sigma^0(\text{dB}) &= 20 \log U + 30.27(\text{dB}) + 30 \log R + 10 \log \cos \theta_i \\ X\text{-band: } \sigma^0(\text{dB}) &= 20 \log U + 32.21(\text{dB}) + 30 \log R + 10 \log \cos \theta_i \end{aligned}$$

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 1) 벼 생육시기에 따른 밴드, 입사각도 및 편파별 후방산란계수 변화

다편파 산란시스템 구축을 통한 레이더 산란계 측정 은 모이양기(5월 17일)부터 벼 수확기(10월 11일)까지 28회 측정하였고, 측정시 마다 네트워크 분석기의 8회

측정한 것을 평균하여 대표 값으로 하였다.

이번 연구에서 입사각이 작은 경우 시스템의 장비설 치 문제로 인하여 고정스탠드 아래 테이블의 간섭영향을 받아 L-band에서는  $20^\circ \sim 35^\circ$ , C-band에서는  $20^\circ$  일 때의 data는 신뢰도가 낮아 이용하기가 힘들었다. X-band의 경우에는 다른 band에 비해 안테나의 빔 폭이 작아 간섭의 영향을 거의 받지 않았다.

벼 생육기간동안 L-, C-, X-band의 후방산란계수 범위는 각각  $-55 \text{ dB} \sim 0 \text{ dB}$ ,  $-50 \text{ dB} \sim 0 \text{ dB}$ ,  $-50 \text{ dB} \sim -10 \text{ dB}$ 이었다. 모든 안테나 밴드에서 벼 생육초기(5월말~6월초)에는 VV-polarization이 HH-, HV-polarization보다 후방산란계수가 높게 나타났다. 벼 생육시기에 따른 L-band의 후방산란계수변화를 알아 본 결과가 Fig. 2와 같다. L-band의 HH편파는 입사각도에 따라 벼 출수기(DOY229)까지 증가하다가 감소하는 경향을 보였지만 VV편파는 출수기 후에도 큰 변화가 없었다. HV-, VH편파에서도 벼 출수기까지 후방산란 계수가 증가하다가 그 이후 saturation 현상을 보였고 특히 벼 수확기가 가까워올수록 증가하였다.

Fig. 3은 벼 생육시기에 따른 입사각도 및 편파별 C-band 후방산란계수 변화를 보여주고 있다. C-band의 후방산란계수 변화는 모든 입사각에서 HH편파 후방산란계수가 벼 생육단계에 따라 증가하다가 출수기에 정점을 이루고 그 이후 감소하였다. VV편파는 입사각도가  $40^\circ$  이상인 경우 유수분화기(DOY210)까지 후방산란계수가 증가하다가 그 이후 감소하였고, cross-polarization의 경우  $50^\circ$  이상의 입사각도가 클 때 유수분화기까지 증가한 후 큰 변화가 없다가 벼 황숙기(현미의 푸른색이 사라지고 현미 본래의 색을 나타내는 시기, (DOY270) 이후 다시 증가하는 모습을 보였다.

벼 생육시기에 따른 입사각도 및 편파별 X-band 후방산란계수변화를 알아본 결과가 Fig. 4와 같다. X-band는 HH-, VV-polarization 후방산란계수가 유수형성기까지 증가한 후 감소하다가 수확기가 가까워오는 9월 하순 ~ 10월 초순에 다시 증가하는 현상을 보였고, HV, VH편파의 경우 입사각도가  $50^\circ$  이상일 때 동일 현상이 나타났다. X-band에서 후방산란계수는 물에 의한 전반사로 인해 모내기 직후에는 그 값이 매우 낮게 나타났다. 하지만 벼가 자람에 따라 벼 군락의 밀도가 커지면서 유수형성기까지 후방산란계수가 계속해서 증

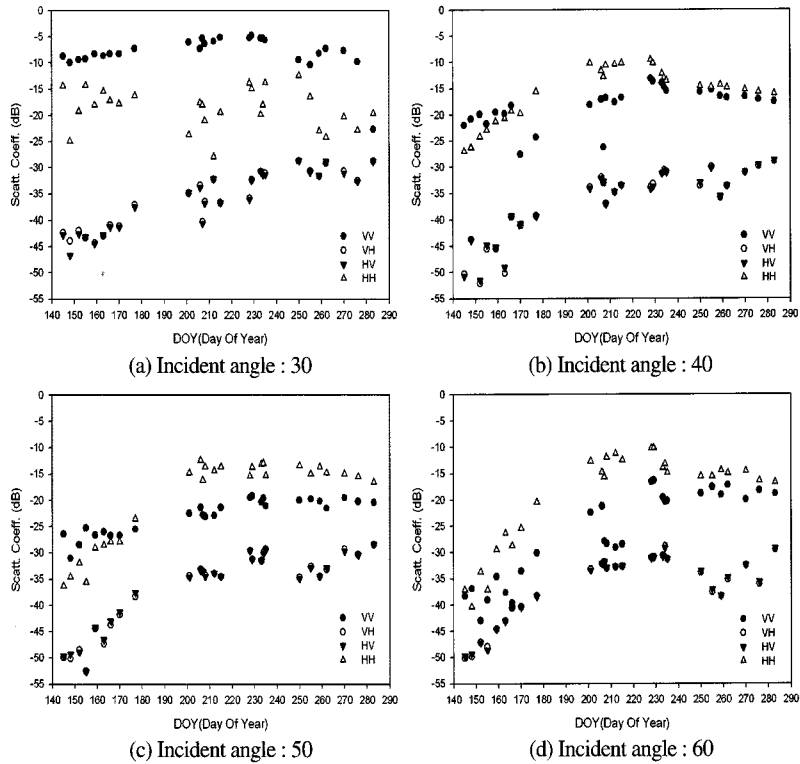


Fig. 2. Temporal variations of backscattering coefficients at polarization and incident angle 30° ~ 60° for the L-band.

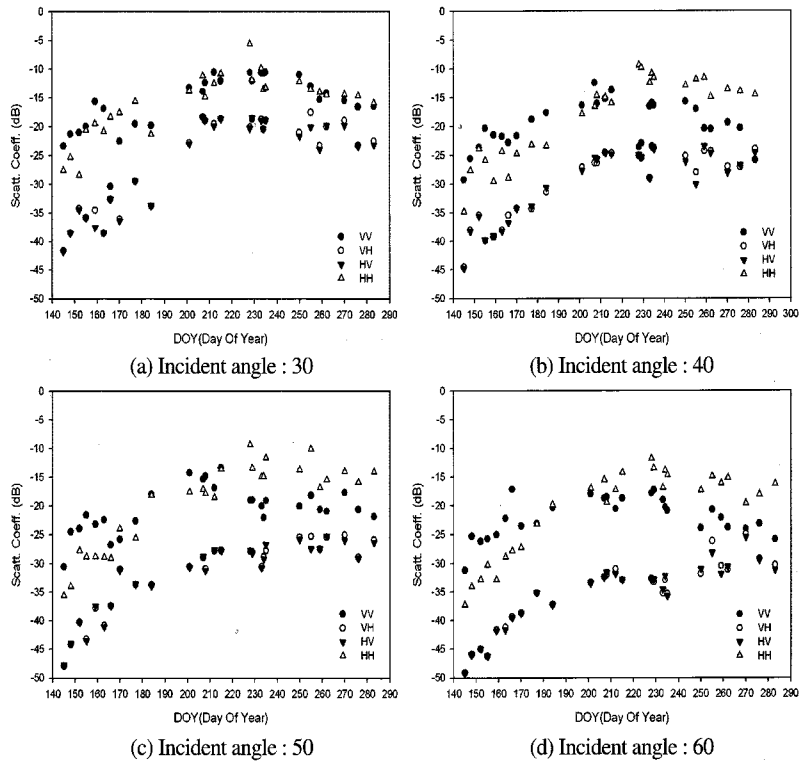


Fig. 3. Temporal variations of backscattering coefficients at polarization and incident angle 30° ~ 60° for the C-band.

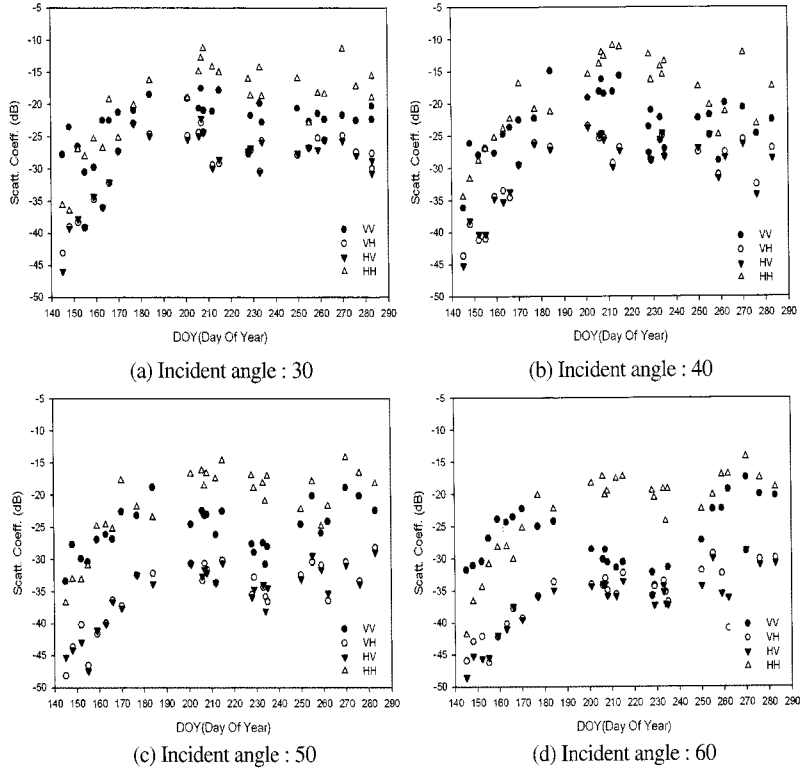


Fig. 4. Temporal variations of backscattering coefficients at polarization and incident angle 30° ~ 60° for the X-band.

가하다가 벼의 균락이 형성된 유수형성기부터 체적산란보다는 표면산란이 많이 발생하여 후방산란계수가 감소하였다. 출수기 이후 생체중이 감소되고 벼 이삭이 익어가면서 외부에 노출되는 과정에서 파장이 짧은 고주파 X-band는 이삭에 대한 감지도가 높아 벼 수확기에 가까울수록 후방산란계수가 증가하였다.

2) 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계분석

벼 생육기간동안의 초장, 생체중, 엽면적지수, 이삭 건물중 등 벼 생육인자의 시계열 변화를 각각 알아보았다(Fig. 5, 6, 7, 8). 초장, 생체중, 엽면적지수의 경우 벼 출수기(DOY229)까지 증가하다가 그 이후 감소하였고 특히 엽면적지수는 벼 출수기이후 감소폭이 크게 나타났다. 벼 수량과 밀접한 관련이 있는 이삭 건물중은 벼 출수기 이후 벼 수확기 까지 계속 증가하는 경향을 보였다.

밴드별 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계를 분석해보았는데 Table 2는 벼 생육시기에 따른 L-band와 벼 생육인자와의 상관관계를 보여주고 있다. 입사각

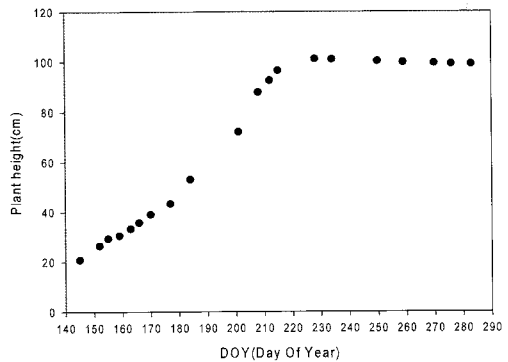


Fig. 5. Temporal variation in rice plant height.

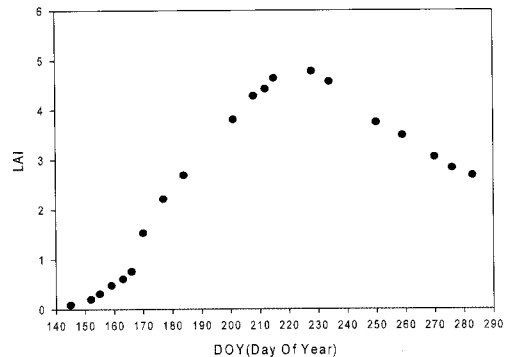


Fig. 6. Temporal variation in rice Leaf Area Index.

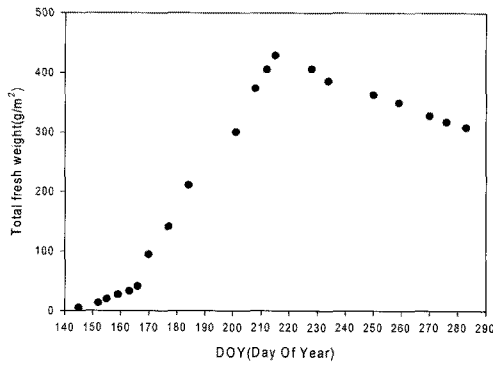


Fig. 7. Temporal variation in rice fresh weight.

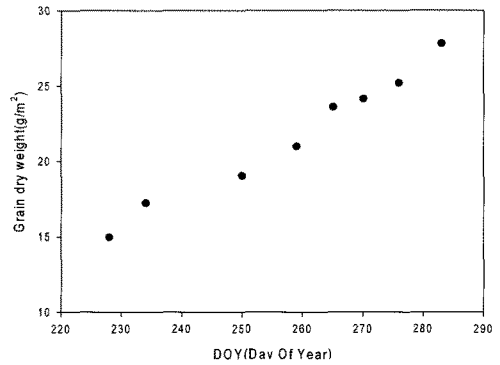


Fig. 8. Temporal variation in rice grain dry weight.

Table 2. Correlation coefficients between backscattering coefficients and rice growth parameters at L-band

| Incident angle | VV                  |                     |                         |                         | HH                  |                     |                         |                         | HV                 |                    |                         |                         |
|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
|                | Plant height (cm)   | LAI                 | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) | Plant height (cm)   | LAI                 | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) | Plant height (cm)  | LAI                | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) |
| 20             | -0.93***            | -0.81**             | -0.90***                | -0.87***                | -0.56*              | -0.20 <sup>ns</sup> | -0.37 <sup>ns</sup>     | -0.32 <sup>ns</sup>     | 0.21 <sup>ns</sup> | 0.38 <sup>ns</sup> | 0.29 <sup>ns</sup>      | 0.32 <sup>ns</sup>      |
| 25             | -0.53*              | -0.20 <sup>ns</sup> | -0.37 <sup>ns</sup>     | -0.32 <sup>ns</sup>     | 0.24 <sup>ns</sup>  | 0.44*               | 0.38 <sup>ns</sup>      | 0.38 <sup>ns</sup>      | 0.76**             | 0.85**             | 0.81**                  | 0.81**                  |
| 30             | -0.01 <sup>ns</sup> | 0.28 <sup>ns</sup>  | 0.15 <sup>ns</sup>      | 0.18 <sup>ns</sup>      | -0.39 <sup>ns</sup> | -0.38 <sup>ns</sup> | -0.42*                  | -0.40 <sup>ns</sup>     | 0.91***            | 0.77**             | 0.85**                  | 0.82**                  |
| 35             | -0.49*              | -0.63*              | -0.58*                  | -0.62*                  | 0.40 <sup>ns</sup>  | 0.25 <sup>ns</sup>  | 0.31 <sup>ns</sup>      | 0.28 <sup>ns</sup>      | 0.89***            | 0.71**             | 0.80**                  | 0.78**                  |
| 40             | 0.81**              | 0.58*               | 0.70*                   | 0.68*                   | 0.74**              | 0.73**              | 0.76**                  | 0.72**                  | 0.89***            | 0.81**             | 0.86***                 | 0.85**                  |
| 45             | 0.92***             | 0.78**              | 0.87***                 | 0.85**                  | 0.94***             | 0.89***             | 0.92***                 | 0.91***                 | 0.90***            | 0.91***            | 0.90***                 | 0.86***                 |
| 50             | 0.87***             | 0.63*               | 0.75**                  | 0.73**                  | 0.94***             | 0.91***             | 0.97***                 | 0.98***                 | 0.92***            | 0.86***            | 0.90***                 | 0.89***                 |
| 55             | 0.85**              | 0.62*               | 0.75**                  | 0.73**                  | 0.93***             | 0.90***             | 0.93***                 | 0.91***                 | 0.90***            | 0.88***            | 0.92***                 | 0.92***                 |
| 60             | 0.87***             | 0.74**              | 0.81**                  | 0.79**                  | 0.86***             | 0.88***             | 0.89***                 | 0.87***                 | 0.84**             | 0.90***            | 0.91***                 | 0.91***                 |

Tfw : Total fresh weight, Tdw : Total dry weight

<sup>ns</sup> : Non significance

\* : level of significance p<0.05

\*\* : level of significance p<0.01

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

이 45° ~ 55°에서 HH편파 후방산란계수가 초장, 생체중(biomass), 엽면적지수와 상관관계가 높게 나타났고 특히 50°에서 생체중과의 상관계수가 다른 입사각도에 비해 높게 나타났다.

VV편파 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계에서는 HH편파 후방산란계수에 비해 벼 생육인자와의 상관관계가 뚜렷하게 나타나지 않았는데 그 이유로는 벼 군락 형성으로 인해 HH편파에 비해 VV편파의 반사율이 낮게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. HV편파는 입사각도별 초장과의 상관관계가 높았다.

입사각도 및 편파별 C-band 후방산란계수와 벼 생육인자와의 상관관계를 분석한 결과가 Table 3과 같다. 엽면적지수는 입사각도가 25° ~ 40°일 때 HV편파 후

방산란계수와 상관관계가 높게 나타났고, HH편파 후방산란계수의 경우 입사각도가 45° 이상일 때 상관계수가 높았다. VV편파 후방산란계수는 HH-, HV편파에 비해 초장, 엽면적지수, 생체중과의 상관계수가 높지 않았다.

Table 4는 X-band의 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계를 보여주고 있다. 고주파수인 X-band는 L-, C-band에 비해 상대적으로 생체중, 엽면적지수 등과의 상관성이 낮게 나타났다. 하지만 밴드별 후방산란계수와 벼 이삭 건물중과의 관계를 비교해본결과 X-band가 다른 밴드에 비해 이삭 건물중과의 관계가 높았고 특히 VV편파(45°)에서 이삭 건물중과의 상관계수가 높게 나타났다(Table 5). 벼 수확기에는 노엽화가 진행되고 벼 군락 밀도가 낮아지는 기간이므로 이삭이 외부에 노



Table 3. Correlation coefficients between backscattering coefficients and rice growth parameters at C-band

| Incident angle | VV                 |         |                         |                         | HH                |         |                         |                         | HV                |         |                         |                         |
|----------------|--------------------|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------------------|-------------------------|
|                | Plant height (cm)  | LAI     | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) | Plant height (cm) | LAI     | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) | Plant height (cm) | LAI     | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) |
| 20             | -0.94***           | -0.74** | -0.84**                 | -0.83**                 | -0.84**           | -0.67*  | -0.76**                 | -0.75**                 | 0.81**            | 0.67*   | 0.74**                  | 0.71**                  |
| 25             | 0.74**             | 0.72**  | 0.75**                  | 0.74**                  | 0.48*             | 0.48*   | 0.46*                   | 0.48*                   | 0.85**            | 0.92*** | 0.90***                 | 0.90***                 |
| 30             | 0.82**             | 0.78**  | 0.82**                  | 0.81**                  | 0.86***           | 0.83**  | 0.84**                  | 0.85**                  | 0.83**            | 0.92*** | 0.91***                 | 0.92***                 |
| 35             | 0.67*              | 0.70*   | 0.67*                   | 0.68*                   | 0.93***           | 0.84**  | 0.90***                 | 0.89***                 | 0.88***           | 0.91*** | 0.89***                 | 0.88***                 |
| 40             | 0.38 <sup>ns</sup> | 0.55*   | 0.50*                   | 0.50*                   | 0.95***           | 0.87*** | 0.92***                 | 0.91***                 | 0.91***           | 0.92*** | 0.88***                 | 0.87***                 |
| 45             | 0.38 <sup>ns</sup> | 0.64*   | 0.56*                   | 0.58*                   | 0.90***           | 0.91*** | 0.93***                 | 0.93***                 | 0.95***           | 0.88*** | 0.90***                 | 0.87***                 |
| 50             | 0.64*              | 0.76**  | 0.74**                  | 0.73**                  | 0.94***           | 0.95*** | 0.93***                 | 0.93***                 | 0.90***           | 0.85**  | 0.88***                 | 0.87***                 |
| 55             | 0.56*              | 0.70*   | 0.68*                   | 0.67*                   | 0.93***           | 0.90*** | 0.92***                 | 0.92***                 | 0.88***           | 0.83**  | 0.86***                 | 0.84**                  |
| 60             | 0.38 <sup>ns</sup> | 0.46*   | 0.44*                   | 0.43*                   | 0.92***           | 0.92*** | 0.91***                 | 0.92***                 | 0.91***           | 0.83**  | 0.88***                 | 0.86***                 |

\* Tfw : Total fresh weight, Tdw : Total dry weight  
<sup>ns</sup> : Non significance  
 \* : level of significance p<0.05  
 \*\* : level of significance p<0.01  
 \*\*\* : level of significance p<0.001

Table 4. Correlation coefficients between backscattering coefficients and rice growth parameters at X-band

| Incident angle | VV                  |                     |                         |                         | HH                |        |                         |                         | HV                |        |                         |                         |
|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------|--------|-------------------------|-------------------------|
|                | Plant height (cm)   | LAI                 | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) | Plant height (cm) | LAI    | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) | Plant height (cm) | LAI    | Tfw (g/m <sup>2</sup> ) | Tdw (g/m <sup>2</sup> ) |
| 20             | 0.26 <sup>ns</sup>  | 0.41*               | 0.32 <sup>ns</sup>      | 0.32 <sup>ns</sup>      | 0.68*             | 0.63*  | 0.64*                   | 0.63*                   | 0.80**            | 0.83** | 0.82**                  | 0.82**                  |
| 25             | 0.62*               | 0.70*               | 0.68*                   | 0.67*                   | 0.72**            | 0.66*  | 0.68*                   | 0.67*                   | 0.73**            | 0.74** | 0.74**                  | 0.72**                  |
| 30             | 0.46*               | 0.57*               | 0.54*                   | 0.52*                   | 0.82**            | 0.82** | 0.84**                  | 0.82**                  | 0.65*             | 0.75** | 0.70**                  | 0.69**                  |
| 35             | 0.50*               | 0.67*               | 0.62*                   | 0.61*                   | 0.81**            | 0.83** | 0.80**                  | 0.83**                  | 0.71**            | 0.79** | 0.74**                  | 0.74**                  |
| 40             | 0.43*               | 0.61*               | 0.55*                   | 0.56*                   | 0.72**            | 0.83** | 0.79**                  | 0.81**                  | 0.67*             | 0.81** | 0.74**                  | 0.74**                  |
| 45             | 0.33 <sup>ns</sup>  | 0.45*               | 0.42*                   | 0.40*                   | 0.74**            | 0.80** | 0.81**                  | 0.82**                  | 0.76**            | 0.81** | 0.81**                  | 0.79**                  |
| 50             | 0.23 <sup>ns</sup>  | 0.29 <sup>ns</sup>  | 0.28 <sup>ns</sup>      | 0.24 <sup>ns</sup>      | 0.71**            | 0.77** | 0.75**                  | 0.76**                  | 0.74**            | 0.74** | 0.76**                  | 0.73**                  |
| 55             | -0.10 <sup>ns</sup> | -0.20 <sup>ns</sup> | -0.13 <sup>ns</sup>     | -0.18 <sup>ns</sup>     | 0.75**            | 0.81** | 0.80**                  | 0.80**                  | 0.82**            | 0.79** | 0.83**                  | 0.81**                  |
| 60             | -0.25 <sup>ns</sup> | -0.44*              | -0.36 <sup>ns</sup>     | -0.41*                  | 0.75**            | 0.79** | 0.79**                  | 0.78**                  | 0.81**            | 0.71** | 0.77**                  | 0.75**                  |

\* Tfw : Total fresh weight, Tdw : Total dry weight  
<sup>ns</sup> : Non significance  
 \* : level of significance p<0.05  
 \*\* : level of significance p<0.01  
 \*\*\* : level of significance p<0.001

출되기 쉽다. 그러므로 파장이 짧은 X-band에서 민감한 반응을 보이는 것으로 판단된다. X-band는 파장이 짧고, 벼 균락이 형성된 상태에서는 벼 줄기, 뿌리까지 편파가 전달되기 힘들어 벼 줄기, 뿌리 등을 고려하는 생체중, 엽면적지수등과의 관계를 예측하기가 힘든 것으로 생각된다. 이에 비해 밴드별 후방산란계수와 벼 이삭 건물중과의 관계를 알아본 결과 X-band가 L, C-

band에 비해 상관관계가 높게 나타났고, 특히 VV-편파 후방산란계수와 이삭 건물중과의 상관계수가 높게 나타났다.

### 3) 후방산란계수를 이용한 벼 생육인자 추정

후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계분석을 통해 밴드별 편파에 의한 후방산란계수와 작물생육인자와의

Table 5. Correlation coefficients between L-, C-, X-band backscattering coefficients and grain dry weight

| Incident angle | L-band             |                     |                     | C-band              |                     |                     | X-band              |                     |                    |
|----------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
|                | VV                 | HH                  | HV                  | VV                  | HH                  | HV                  | VV                  | HH                  | HV                 |
| 20             | -0.96***           | -0.85**             | -0.64*              | -0.50*              | -0.19 <sup>ns</sup> | 0.26 <sup>ns</sup>  | -0.54*              | -0.05 <sup>ns</sup> | 0.10 <sup>ns</sup> |
| 25             | -0.97***           | -0.74**             | 0.06 <sup>ns</sup>  | -0.19 <sup>ns</sup> | -0.39 <sup>ns</sup> | -0.70*              | -0.33 <sup>ns</sup> | 0.35 <sup>ns</sup>  | 0.56*              |
| 30             | -0.78**            | -0.64*              | 0.53*               | -0.55*              | -0.38 <sup>ns</sup> | -0.55*              | 0.51*               | 0.31 <sup>ns</sup>  | -0.45*             |
| 35             | 0.43*              | 0.72*               | 0.72*               | -0.81**             | -0.32 <sup>ns</sup> | 0.27 <sup>ns</sup>  | 0.70*               | -0.30 <sup>ns</sup> | -0.40*             |
| 40             | 0.61*              | 0.40*               | 0.66*               | -0.22 <sup>ns</sup> | -0.80**             | -0.32 <sup>ns</sup> | 0.78**              | -0.36 <sup>ns</sup> | -0.45*             |
| 45             | 0.75**             | 0.23 <sup>ns</sup>  | 0.63*               | -0.39 <sup>ns</sup> | -0.78**             | -0.13 <sup>ns</sup> | 0.87***             | 0.39 <sup>ns</sup>  | 0.58*              |
| 50             | 0.71*              | -0.67*              | 0.29 <sup>ns</sup>  | -0.16 <sup>ns</sup> | -0.52*              | 0.23 <sup>ns</sup>  | 0.83**              | 0.55*               | 0.65*              |
| 55             | 0.58*              | -0.29 <sup>ns</sup> | 0.07 <sup>ns</sup>  | 0.17 <sup>ns</sup>  | -0.77**             | 0.43*               | 0.80**              | 0.70*               | 0.71*              |
| 60             | 0.30 <sup>ns</sup> | 0.18 <sup>ns</sup>  | -0.10 <sup>ns</sup> | 0.67*               | -0.70*              | 0.51*               | 0.81**              | 0.74**              | 0.69*              |

<sup>ns</sup> : Non significance  
 \* : level of significance p<0.05  
 \*\* : level of significance p<0.01  
 \*\*\* : level of significance p<0.001

Table 6. Optimum condition between backscattering coefficients at and rice growth parameters

|                                     | Band   | Polarization | Incident angle | Correlation coefficient (r) |
|-------------------------------------|--------|--------------|----------------|-----------------------------|
| Plant height(cm)                    | C-band | HV           | 45             | r=0.95***                   |
| LAI                                 | C-band | HH           | 50             | r=0.95***                   |
| Biomass(g/m <sup>2</sup> )          | L-band | HH           | 50             | r=0.96***                   |
| Grain dry weight(g/m <sup>2</sup> ) | X-band | VV           | 45             | r=0.87**                    |

\*\* : level of significance p<0.01  
 \*\*\* : level of significance p<0.001

관계에서 상관계수가 가장 높은 조건 즉 최적조건을 분류하였다(Table 6). 이 결과를 바탕으로 최적조건에 따른 벼 생육인자를 추정을 해보았는데 초장의 경우 C-band의 cross polarization(입사각도 45°)에서 상관계

수가 가장 높았으므로 이 조건을 통해 초장을 추정하였다(Fig. 9). C-band의 VH-편파후방산란계수를 이용하여 벼 초장을 추정할 결과 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.92로 나타났고, 초장 실측값과 추정값을 비교한 결과 결정계수

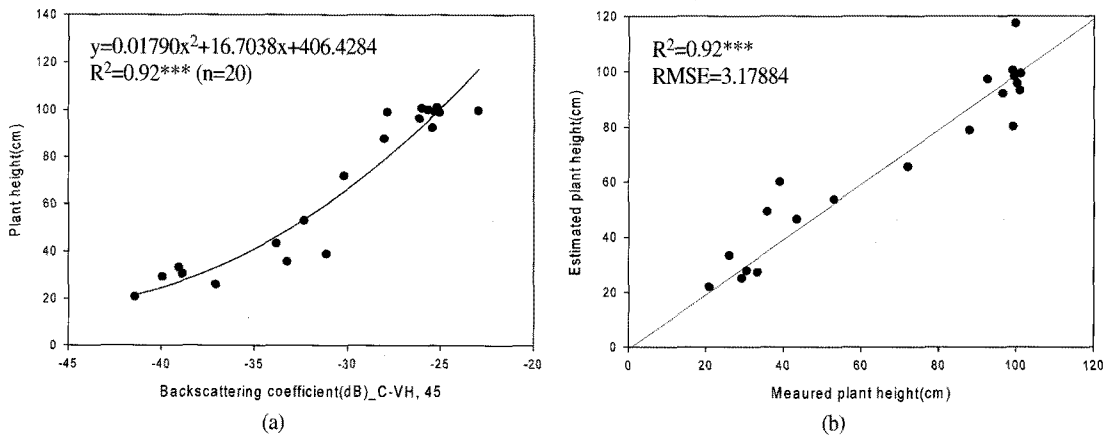


Fig. 9. (a) Relationship between backscattering coefficient in C-band(VH, 45°) and plant height during rice growth stage. (b) Relationship between Measured and estimated plant height during rice growth stage.

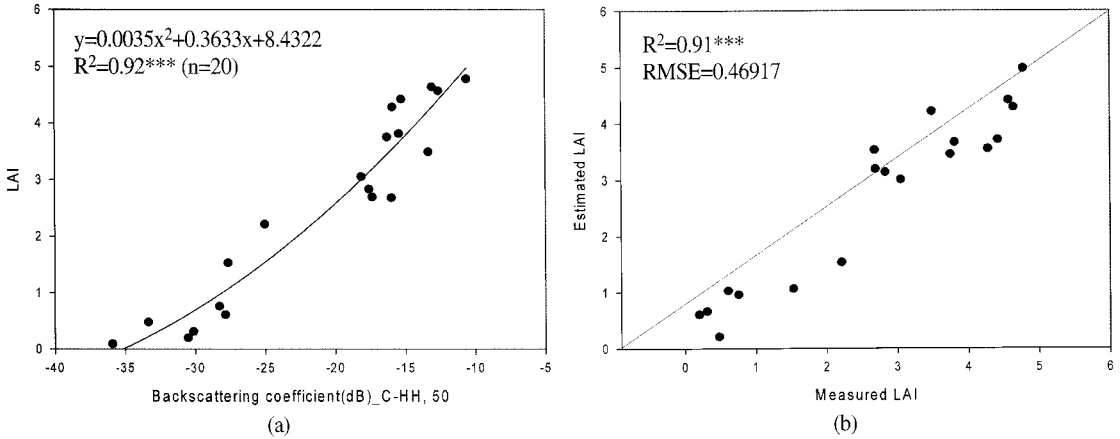


Fig. 10. (a) Relationship between backscattering coefficient in C-band(HH, 50°) and LAI during rice growth stage. (b) Relationship between Measured and estimated LAI during rice growth stage.

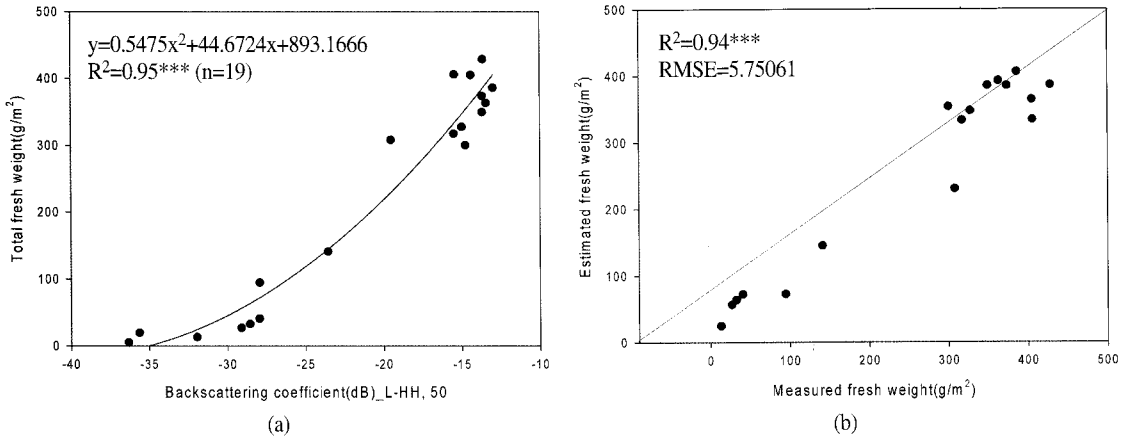


Fig. 11. (a) Relationship between backscattering coefficient in L-band(HH, 50°) and fresh weight during rice growth stage. (b) Relationship between Measured and estimated fresh weight during rice growth stage.

가 역시 0.92로 나타났다.

엽면적지수는 C-band의 HH-편파(입사각도 50°)에서 상관관계가 가장 높게 나타나 이 조건을 통해 엽면적지수를 추정할 결과는 Fig. 10과 같다. C-band의 HH-편파후방산란계수를 이용하여 엽면적지수와와의 관계를 알아본 결과 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.92로써 엽면적지수 변이의 약 92%를 설명할 수 있었고, 이 추정식을 이용하여 엽면적지수 실측값과 추정값을 비교해 본 결과 1:1 line에 근접하게 분포하였다(R<sup>2</sup>=0.91). L-band의 HH-편파(입사각도 50°)조건에서의 후방산란계수가 생체중과의 상관관계가 가장 높아 이 결과를 바탕으로 생체중을 추정해 보았다. Fig. 11과 같이 L-band의 HH-편파 후방산란계수와 생체중과의 관계가 높게 나타났고

(R<sup>2</sup>=0.95), 생체중 실측값과 추정값을 비교해 본 결과 1:1 line에 근접하게 분포하였다(R<sup>2</sup>=0.94).

이삭 건물중과 상관관계가 높게 나타난 VV-편파 후방산란계수를 이용하여 수확기 이삭 건물중을 추정하였고 그 결과는 Fig. 12와 같다. VV-편파후방산란계수는 이삭 건물중과 2차 다항식관계가 성립되는데 VV-편파 후방산란계수와 이삭 건물중과는 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.82로써 이삭 건물중 변이의 약 82%를 설명할 수 있었고 이 추정식을 이용하여 이삭 건물중 실측값과 추정값을 비교해 본 결과 1:1 line에 근접하게 분포하였다(R<sup>2</sup>=0.82).

후방산란계수를 이용하여 생육을 추정할 수 있는 회귀식을 작성하고 실측값과의 비교를 통하여 작물 생육

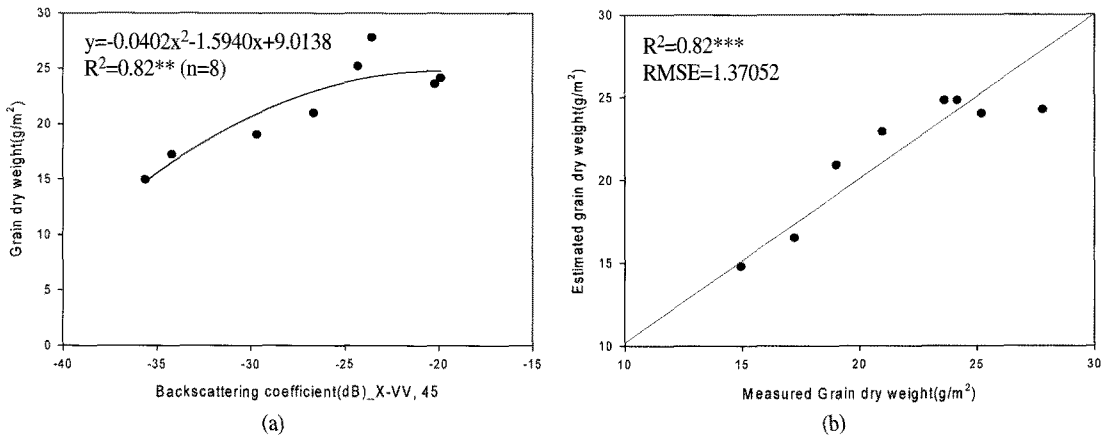


Fig. 12. (a) Relationship between backscattering coefficient in X-band(VV, 45°) and grain dry weight during rice growth stage. (b) Relationship between Measured and estimated grain dry weight during rice growth stage.

추정을 위한 최적 조건을 구명하였는데 본 연구결과를 통해 밴드, 편파 및 입사각도별 최적조건에 따라 초장, 바이오매스, 엽면적지수, 이삭 건물중 등 벼 생육인자들을 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

다편파 산란계시스템을 통한 후방산란계수 변화 관측과정에서 강우, 바람, 습도 등 기후요인이 많은 영향을 미치고, 측정시마다 calibration 과정에서의 정확도 문제 등이 발생하여 현재 관측건물을 연구지역에 설치하여 내부에 네트워크분석기, 노트북등을 두어 기후 등의 영향을 받지 않고 레이더 산란 측정을 할 수 있는 자동관측 시스템을 구축하여 실험 중에 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 레이더 산란계시스템을 이용하여 벼 생육시기에 따라 산란계로부터 얻어진 후방산란계수와 벼 생육인자와의 관계를 분석하고 상관관계가 가장 높은 최적조건을 분류하여 벼 생육인자를 추정하고자 하였다.

L, C, X-band 기반의 다편파 산란계시스템을 구축하고 벼 생육시기별 후방산란계수 변화를 관측한 결과 모든 안테나 밴드에서 벼 생육 초기에는 VV편파가 HH, HV/VH편파보다 후방산란계수가 높게 나타났다. L-, C-band HH편파에서의 후방산란계수는 벼 출수기(8월 중순)까지 증가하다가 감소하는 경향 보였고,

X-band 후방산란계수변화는 벼 유수형성기(7월말)까지 증가하다가 감소한 후 벼 수확기가 가까워지는 9월 중순 이후 다시 증가하는 dual-peak 현상이 나타났다.

밴드, 편파 및 입사각도별 후방산란계수와 작물생육인자와의 관계를 분석해본 결과 L-band는 입사각도가 크고(45° 이상) HH편파일 때 상관관계가 높았고, 엽면적지수의 경우 C-band의 HH, HV/VH편파 후방산란계수와 상관관계가 높았다. 고주파수인 X-band는 벼 균락의 침투력이 낮아 상대적으로 바이오매스, 엽면적지수와의 상관성이 낮게 나타났지만 이삭 건물중과의 관계에서는 다른 밴드에 비해 상관계수가 높게 나타났다. HH편파가 VV편파보다 벼 생육인자와의 상관성이 높았는데 벼 생육단계가 진행되면서 균락이 형성되고 그로 인해 volume scattering 효과 증대에 기인한 것으로 판단된다. 또한 HH편파가 VV편파보다 벼 균락에 좀 더 효과적으로 침투하였다는 것을 의미한다.

이 결과를 통해 작물생육인자추정을 위한 최적관측 조건을 찾아 후방산란계수를 이용한 벼 생육인자를 추정해보았다. 벼 초장의 경우 C-band의 VH편파(45°)의 후방산란계수를 통해 초장을 추정해본 결과 결정계수가 0.92로 나타났고, 엽면적지수는 C-band의 HH편파(50°)의 후방산란계수를 이용하여 엽면적지수를 추정해본 결과 엽면적지수의 변이의 약 92%를 설명할 수 있었다. 바이오매스는 L-band의 HH편파(50°)의 후방산란계수를 이용하여 바이오매스를 추정해본 결과 결정계수가 0.95였고, X-band의 VV편파(45°)의 후방산란계수

를 이용하여 이삭 건물중 추정식을 구하고 실측값과 추정값을 비교하였을 때 1:1 line에 근접하게 분포하였다 ( $R^2=0.82$ ).

본 연구결과를 통해 벼 생육인자를 추정하는데 최적 관측조건(밴드, 편파, 입사각도)을 찾고 이를 이용하여 기후, 토양 등 농업환경인자가 고려된 벼 생육인자 추정 모형 개발에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

연구과정 중 레이더 산란계 측정과정에서 많은 도움을 준 강원대 지구물리학과 박지성, 이은선님에게 감사를 드립니다. 이 논문은 한국항공우주연구원의 다목적 실용위성 5호 시스템종합개발사업의 지원으로 연구되었습니다.

## 참고문헌

홍석영, 홍진영, 김이현, 오이석, 2007. 지상관측 레이더 산란계를 이용한 벼 균락의 후방산란계수 측정. *대한원격탐사학회지*, 23(2): 1-8.

Anthony, F. and Stephen, L. Durden. 1998. A three-component scattering model for polarimetric SAR data, *Remote Sens. Environ*, 36(3): 963-973.

Attema, E. P. and F. T. Ulaby, 1978. Vegetation modeled as a water cloud, *Radio Science*, 13: 357-364.

Bouman, B. A. M., 1991. Crop Parameter Estimation from Ground-Based X-Band (3-cm Wave) Radar backscattering Data, *Remote Sens. Environ*, 37: 193-205.

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.

Brisco, B. and R. J. Brown, 1998. Agricultural applications with radar, Chapter 7 in *Principles & Applications of Imaging Radar*,

edited by F.M. Henderson and A.J. Lewis, *Manual of Remote Sensing Vol.2*, Wiley, Danvers, MA. pp.381-406.

- 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 Sensing of Environment*, 81: 194-204.
- Hong, S. Y., S. H. Hong, and S. K. Rim, 2000. Relationship between Radarsat backscattering coefficient and rice growth, *Korean J. Remote Sensing*, 16(2): 109-116.
- Kim, S. B., Y. Kong, and Y. S. Kim, 2000. Radar backscattering measurements of rice crop using X-band scatterometer, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3): 1467-1471.
- Le, Toan, T. Ribbes. F. Wang, L. Floury, N. K. 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.
- Macelloni, G., P. Palosica, R. Pampalori, F. Marliani, and M. Gai, 2001. The relationship between the backscattering coefficient and biomass of narrow and broad leaf crops, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(4): 873-884.
- Macelloni, G., S. Palosica, P., and R. Pampalori, 2002. Modelling radar backscatter from crops during the growth cycle, *Agronomie*, 22: 575-579.
- Moran, M. S., A. Vidal., D. Troufleau., Y. Inoue, and T. A. Mitchell, 1998. Ku- and C-band SAR for discriminating agricultural crop and soil conditions, *IEEE Transactions on Geoscience and*

- Remote Sensing*, 36: 265-272.
- Paloscica, S., 1998. An empirical approach to estimating leaf index from multifrequency SAR data, *International Journal of Remote Sensing*, 19(2): 359-364.
- Paris, J. F., 1986. The effect of leaf size on the microwave backscattering by corn, *Remote Sensing of Environment*, 19: 81-95.
- Prevot, L., I. Champion, and G. Guyot, 1993. Estimating surface soil moisture and leaf area index of a wheat canopy using a dual-frequency (C and X bands) scatterometer, *Remote Sensing of Environment*, 46: 331-339.
- Ulaby, 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*, Artech House Inc.
- 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 Sensing of Environment*, 69: 179-188.
- Yamaguchi, Y., T. Moriyama, M. Ishido, and H. Yamada, 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(8): 1699-1706.