

1차 Radiative Transfer 모델의 입력 변수 민감도 조사를 통한 농림 지역의 간단한 마이크로파 산란 모델 개발

Simple Microwave Scattering Model for Agricultural Areas Using Sensitivity Examinations of Input Parameters of the 1st-Order Radiative Transfer Model

박신명 · 손성환 · 문현욱 · 유동길 · 강연덕 · 오이석*

Sinmyong Park · SungHwan Sohn · Hyun-Wook Moon · Dong-Gil Yoo · Yeon-Duk Kang · Yisok Oh*

요 약

본 논문에서는 농림지역에서 마이크로파 후방산란 계산에 사용할 수 있는 1차 RT(radiative transfer) 모델의 입력 변수 민감도 조사를 통해 입력 변수의 수를 줄여 개발한 간단한 마이크로파 산란 모델을 제시한다. 먼저 1차 RT 모델을 사용하여 다양한 초목과 표면 조건에 대한 광범위한 마이크로파 후방산란 계수 데이터베이스를 생성한다. 이 데이터베이스는 COSMO-SkyMed SAR(synthetic aperture radar)와 HPS(Hongik polarimetric scatterometer)에 의해 획득된 농림 지역의 후방산란 계수와 기존 산란 모델에 의해 계산된 후방산란 계수와 현장 실측 데이터로 구성된다. 현장 실측 데이터를 기반으로 초목이 가질 수 있는 입력 변수의 최소와 최대값을 설정하여 그에 따른 후방산란 계수를 계산하였다. 또한 GSA(global sensitivity analysis) 기법을 사용하여 입력 변수의 민감도를 조사하였다. 초목과 표면, 주파수 등 32개 입력 변수의 다양한 범위에 대해 계산된 민감도를 기반으로 총 32개의 입력 변수 중 12개의 입력 변수를 선택하였다. 선택된 12개의 입력 변수만을 사용하여 1차 RT 모델로 후방산란 계수를 계산하였으며, 측정 데이터와 비교하였다. 측정 데이터와 기존 1차 RT 모델 간의 RMSE(root mean square error)는 약 0.91 dB이며, 간단한 산란 모델 간의 RMSE는 약 0.95 dB이다. 간단한 산란 모델의 입력 변수는 약 1/3로 줄었지만 정확도는 유지되는 것을 확인할 수 있다.

Abstract

This paper presents a simple microwave backscattering model achieved by reducing the number of input parameters, based on sensitivity examinations of the input parameters of the 1st-order radiative transfer(RT) model. The proposed model can be used to compute the microwave backscattering coefficients in agricultural areas. First, we generated an extensive database of microwave backscattering coefficients corresponding to various vegetation and surface conditions, using the 1st-order RT technique. This database comprises the backscattering coefficients of agricultural areas acquired via COSMO-SkyMed synthetic aperture radar and the Hongik polarimetric scatterometer and also the backscattering coefficients computed using existing scattering models and in-situ measured ground-truth data corresponding to radar data. Subsequently, we examine the sensitivity of the input parameters based on the difference between backscattering coefficients and global sensitivity analyses. Among a total of 32 input parameters, based on the sensitivities calculated for various vegetation types, frequencies, and ranges, 12 input parameters of the RT model exhibited the highest sensitivity.

LIG 넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

*홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· Manuscript received February 3, 2020 ; Revised March 18, 2020 ; Accepted March 19, 2020. (ID No. 20200203-009)

· Corresponding Author: Sinmyong Park (e-mail: sinmyong.park@lignex1.com)

Thereafter, we verified the accuracy of the proposed simple scattering model for agricultural areas. The root mean square error(RMSE) between the measurement data and the simple model is approximately 0.95 dB, whereas the RMSE between the measurement data and the 1st-order RT model is 0.91 dB. Although the number of input parameters for the simple model is reduced by approximately one third, the accuracy of the scattering model is maintained.

Key words: Backscattering Coefficient, Vegetation Field, SAR, The First-Order Radiative Transfer Model

I. 서 론

농림 지역의 후방산란 계수의 정확한 계산에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 초목층 상태의 지속적인 관찰과 탐지는 원격 탐사의 중요한 응용 분야 중 하나이며^[1], 후방산란 계수를 사용하여 바이오매스(bio-mass)와 농업 생산량을 빠르고 정확하게 추정할 수 있다^{[2]~[4]}. 또한 초목 층 아래 토양의 수분함유량을 추출하기 위해서 초목 층에 대한 정확한 산란모델이 필요하다. 토양의 수분함유량은 폭우, 홍수 예측 및 육지에서 증발하는 물의 양을 나타내는 지표로 사용되며^[5], 이를 통해 환경 모니터링 시스템을 구축할 수 있다. 또한 표적탐지를 위한 클러스터 환경^[6]을 정확하게 구축하기 위해서는 정확한 산란 모델이 필요하다. 그러나 초목으로 덮인 표면에서 후방산란 계수를 정확하게 예측하는 것은 맨 땅과 달리 어렵고 복잡하다^[7]. 초목 층에 대한 일반적인 산란모델은 WCM(Water-Cloud Model), RT(Radiative Transfer) 모델, coherent 모델 및 수치해석 모델 등이 있다^{[8]~[11]}.

WCM 모델은 구 모양의 산란체가 랜덤하게 분포하고 있다고 가정하고, 산란체로부터의 직접 산란과 표면으로부터의 직접 산란을 조합하여 산란계수를 계산한다. 산란체의 모양을 구 모양으로 가정하기 때문에 계산이 간단하지만 정확도가 낮다. Coherent 모델 및 수치해석 모델은 산란체의 실제 형상에 대한 모델링이 필요하며, 매우 높은 정확도를 갖지만 매우 복잡한 계산과 많은 계산량, 계산시간이 필요하다. RT 모델은 원기둥과 원판모양의 산란체가 랜덤하게 분포하고 있다고 가정하여 산란계수를 계산한다. 산란체로부터의 직접 산란과 산란체와 표면의 다중 산란, 지표면으로부터의 직접 산란을 조합하여 산란계수를 계산하므로 WCM에 비해 정확도가 비교적 높지만 많은 입력 변수가 필요하며 계산이 매우 복잡하다. 따라서 RT 모델의 많은 입력 변수를 얻기 위한 시간과 노

력을 줄이기 위해 각 입력 변수의 민감도를 계산하였다. 다양한 입력 변수에 따른 후방산란 계수를 1차 RT 모델을 사용하여 계산하고, 각 경우에 대한 후방산란 계수의 차이와 GSA(Global Sensitivity Analysis) 기법을 사용하여 입력 변수의 민감도를 분석하였다.

SA(Sensitivity Analysis) 기법은 수학적 모델을 연구하는 도구로 많이 사용되어 왔고^[12], 최근 산란모델에 SA를 적용하여 입력변수의 영향을 분석하는 연구도 많이 진행되고 있다^[13]. 대부분의 산란 모델은 비선형 모델이며, LSA(Local Sensitivity Analysis)는 특정 입력 변수에 대한 결과 값을 분석하기 때문에 비선형 모델을 분석하기에 어렵다. GSA 기법은 랜덤한 입력변수가 가질 수 있는 모든 범위에서 모델의 결과에 갖는 영향을 분석할 수 있다. GSA 기법의 결과로는 각 입력변수만으로 인한 총 결과 값에 대한 기여도를 나타내는 1차 민감도와 입력변수들 간의 상호 작용 등으로 인한 결과 값에 대한 기여도를 나타내는 2차 민감도 등이 있다. 본 논문에서는 각 입력변수가 후방산란 계수(결과 값)에 갖는 영향을 분석하고자 1차 민감도를 사용하였다.

본 논문에서는 1차 RT 모델의 입력 변수를 분석하여 후방산란 계수에 영향을 많이 갖는, 즉 민감도가 큰 입력 변수를 선택하여 입력 변수의 수를 줄인 간단한 RT 모델을 개발하고 정확도를 검증한다. 첫번째로, 다양한 입력 변수 조건을 갖는 데이터베이스를 생성하였다. 데이터베이스에는 1차 RT 모델을 사용하여 생성한 후방산란 계수와 COSMO-SkyMed SAR(Synthetic Aperture Radar) 데이터, HPS(Hongik-Polarimetric Scatterometer) 시스템을 이용한 측정 데이터와 각 데이터를 얻은 날 측정된 실제 토양과 초목 층에 대한 현장 실측 데이터가 포함된다. 두번째로, 생성된 데이터베이스를 토대로 다음과 같이 각 입력 변수의 민감도를 조사하였다. 1) 현장 실측 데이터를 기반으로 하여 계산한 후방산란 계수의 최소값과 최대값

계산, 2) GSA 기법을 사용하여 입력 변수가 후방산란 계수에 갖는 영향도 분석, 마지막으로 입력 변수의 민감도 분석 결과를 토대로 1차 RT 모델의 32개 입력 변수 중 12개의 입력 변수를 선정하였다. 선정된 12개의 입력 변수를 사용하여 후방산란 계수를 계산하여 측정 데이터와 비교하고 정확도를 검증하였다.

II. 1차 RT 모델의 정확도 검증과 데이터 생성

농림 지역에서 사용할 수 있는 산란 모델 중 비교적 정확한 1차 RT 모델의 경우, 다른 산란 모델에 비해 정확도가 높지만 입력 변수가 많고 수학적으로 계산이 복잡하다는 단점이 있다. 각 입력 변수는 생물의 생육 정도와 토양의 상태에 따라 변화하고, 실제 측정을 통해 수집해야 하므로 매우 번거롭고 어렵다. 초목 층에서의 산란은 식물 상태와 입사각, 토양의 수분함유량에 많은 영향을 받는다^[14]. 입사각, LAI(Leaf Area Index), 토양의 수분함유량을 포함하여 현재 사용하고 있는 1차 RT 모델의 입력 변수는 식물 상태와 토양 상태, 주파수 등을 포함하여 약 30개가 넘는다. 1차 RT 모델의 이러한 단점을 줄이기 위해 각 입력 변수의 민감도를 조사하여 후방산란 계수에 영향도가 큰 입력 변수만을 이용한 간단한 산란모델 개발이 가능하다.

첫번째로, 민감도 조사에 사용할 1차 RT 모델의 정확도 검증을 위해 1차 RT 모델을 이용하여 계산된 후방산란 계수와 잘 보정된 scatterometer를 사용하여 측정된 농림 지역의 후방산란 계수를 비교하였다. 그림 1은 옥수수밭의 후방산란 계수 측정에 사용된 HPS 시스템의 사진이다. HPS 시스템은 L-, C-, X- 밴드에서 완전편파 산란계수를 얻기 위한 OMT(orthogonal mode transducer) horn 안테나와 입사각을 조절하기 위한 모터 제어 부분과 데이터를 얻기 위한 네트워크 분석기와 시스템을 제어하기 위한 자동화 프로그램으로 구성되어 있다^[15]. 옥수수밭의 후방산란 계수를 얻기 위해 사용된 C-밴드(5.3 GHz) horn 안테나의 H-plane HPBW(half-power beam width)는 32°, E-plane HPBW는 25°이다.

그림 2는 옥수수밭에서 측정된 후방산란 계수를 보여준다. 그림 2에서 Meas.는 HPS 시스템으로 측정된 후방

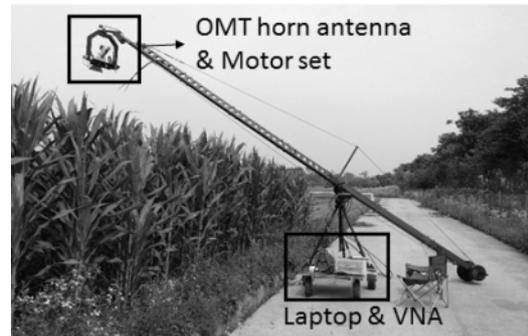
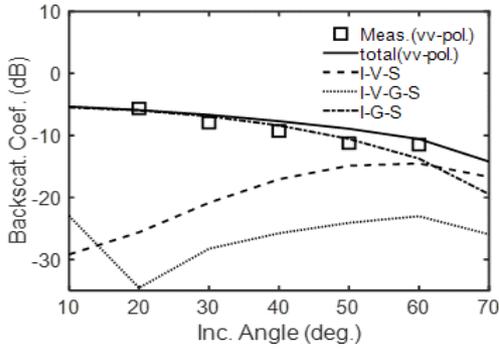


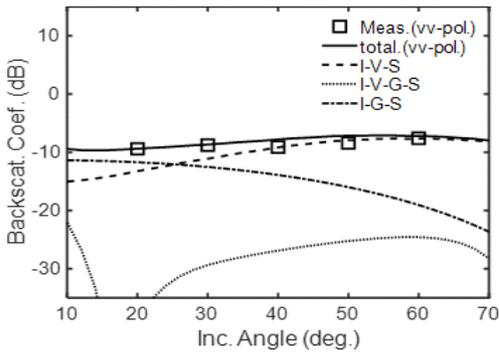
그림 1. 산란계수 측정을 위한 HPS 시스템
Fig. 1. HPS system for scattering coefficient measurements.

산란 계수이며, total은 계산된 후방산란 계수, I-V-S는 입사 진행-초목 층 후방 산란-산란방향 감쇠 진행, I-V-G-S는 입사 진행-초목 층 전방 산란-지면 반사-산란방향 감쇠 진행, I-G-S는 입사 진행-지면 후방산란-산란방향 감쇠 진행 메커니즘을 뜻한다. 그림 2(a)의 경우, 옥수수의 생육 초반부에 측정하여 초목 층의 밀도가 낮기 때문에 입사각에 따라 토양 층 산란의 영향(I-G-S)이 매우 크며, 그림 2(b)의 경우, 옥수수의 생육 후반부에 측정하여 초목 층의 밀도가 높기 때문에 입사각이 증가할 때, 토양 층 산란보다 초목 층 산란의 영향(I-V-S)이 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 1차 RT 모델을 이용하여 계산한 후방산란 계수 결과는 측정데이터에서 나타나는 경향이 잘 반영되고 있는 것을 확인할 수 있다.

각 변수의 민감도를 조사하기 위해 현장 실측 데이터를 기반으로 변수가 가질 수 있는 최소, 평균, 최대를 설정하여 후방산란 계수 데이터베이스를 생성하였다. 민감도 조사에 사용된 입력 변수의 종류는 표 1과 같다. 현장 실측 데이터를 기반으로 한 콩밭의 입력 변수 최소값, 평균값, 최대값 또한 한 예로 표 1에 표시하였다. 데이터베이스를 생성하기 위해 사용된 식물의 종류는 콩, 옥수수, 밀이며, 밀과 옥수수의 경우에는 줄기와 잎은 있으나 가지가 없었고, 콩밭의 경우에는 잎, 줄기와 가지가 모두 있었다. 민감도 조사의 입력 변수 개수를 줄이기 위해 줄기와 가지의 평균 지름과 길이의 표준 편차와 잎의 평균 길이와 너비의 표준 편차에 대한 민감도 조사를 먼저 진행하였고, 평균 지름과 길이의 표준편차 값은 최소 1%, 최



(a) 생육 초반부
(a) The early stage of growth



(b) 생육 후반부
(b) The fully-grown stage

그림 2. 옥수수 생육에 따라 측정된 vv-편파 후방산란 계수
Fig. 2. Measured vv-polarized backscattering coefficients of corn fields.

대 20 %로 설정하였으며, 잎의 경우에도 평균 길이와 너비의 표준편차 값은 최소 1 %, 최대 20 %로 설정하였다.

총 32개의 변수 중 후방산란 계수 계산에 갖는 영향이 약 0.2 dB 이하로 매우 작은 변수 8개(토양 상관길이, 줄기, 가지, 잎의 크기에 대한 표준편차들 6개, 줄기굽힘지수)를 제외한 24개의 변수에 대한 데이터베이스를 생성하여 민감도 조사를 수행하였다.

III. 입력 변수의 민감도 조사

3-1 후방산란 계수 차이에 따른 민감도 조사

1차 RT 모델을 이용하여 다양한 변수에 대한 후방산란 계수를 계산하고, 각 계산 결과의 오차를 편파에 따라 식

표 1. 1차 RT 모델의 입력 변수(콩 밭)

Table 1. Input parameters of 1st RT model(bean field).

No.	Group	Input parameters	Min.	Avg.	Max.
1	Surface	Soil moisture contents(cm ³ /cm ³)	0.03	0.15	0.3
2		RMS height(cm)	0.5	1	1.5
3		Correlation length(cm)	20	20	20
4	Stem	-			
5		Canopy height(cm)	20	52.5	85
6		Number of stems	200	650	1,100
7		Moisture contents(g/cm ³)	0.5	0.6	0.7
8		Average diameter(cm)	0.5	0.65	0.8
9		Average length(cm)	3	3.5	4
10		Std. of diameter	0.007	0.065	0.13
11		Std. of length	0.035	0.35	0.70
12		Vertical angle(deg.)	30	40	50
13		Std. of vertical angle	0	5	10
14		Curvature	0.4	0.5	0.6
15		Branch	Number of branches	50	200
16	Moisture contents(g/cm ³)		0.6	0.675	0.75
17	Average diameter(cm)		0.08	0.12	0.16
18	Average length(cm)		7.5	16.5	25.5
19	Std. of diameter		0.001	0.012	0.024
20	Std. of length		0.165	1.65	3.3
21	Vertical angle(deg.)		20	25	30
22	Std. of vertical angle		5	10	15
23	Leaf	Curvature	0.4	0.5	0.6
24		Number of leaves	150	550	950
25		Moisture contents(g/cm ³)	0.58	0.63	0.68
26		Average width(cm)	3	4.5	6
27		Average length(cm)	3	8.5	12
28		Std. of width	0.045	0.45	0.9
29		Std. of length	0.085	0.85	1.7
30		Thickness(mm)	0.1	0.2	0.3
31		Vertical angle(deg.)	40	50	60
32		Std. of vertical angle	20	30	40
33	Curvature	0.1	0.4	0.7	

(1), (2)와 같이 계산하였고, 결과는 그림 3과 같다.

$$\Delta \sigma_{vv}^0 = \langle \sigma_{vv.max}^0 - \sigma_{vv.min}^0 \rangle_{\theta_i = 20, 30, 40, 50, 60^\circ} \quad (1)$$

$$\Delta \sigma_{hh}^0 = \langle \sigma_{hh.max}^0 - \sigma_{hh.min}^0 \rangle_{\theta_i = 20, 30, 40, 50, 60^\circ} \quad (2)$$

여기서, Δ 는 각 계산결과에의 오차, σ_{pp}^0 는 pp-편파의 후방산란계수, pp는 vv, hh를 나타내고, max는 최대값, min은 최소값을 나타낸다.

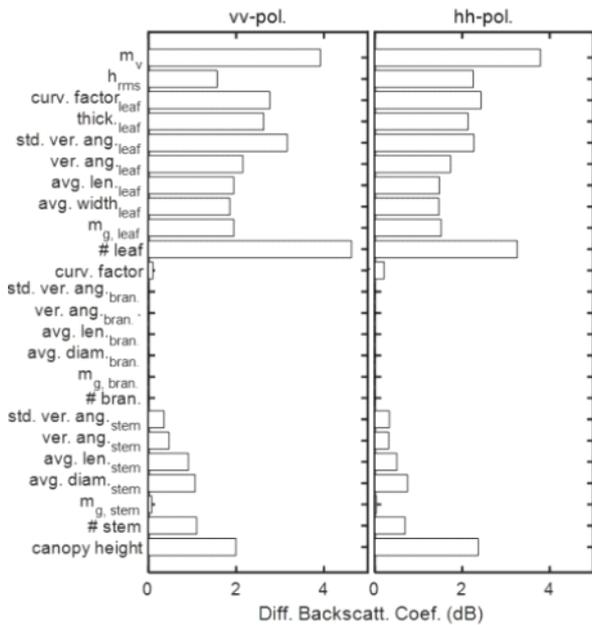


그림 3. 입력변수 변화에 따른 후방산란 계수 변화(민감도)
 Fig. 3. Difference of the backscattering coefficients between maximum and minimum input parameters.

식물 종류에 따라 입력 변수가 갖고 있는 최소값과 최대값이 다르고, 발에 따라 잎과 줄기, 가지가 갖는 특성이 다르기 때문에 민감도 조사에 의미가 있으며, 이를 통해 간단한 산란 모델 개발이 가능하다. 농림 지역에서 식물 층은 줄기나 가지보다 잎의 밀도가 크기 때문에 후방산란 계수 계산에서 갖는 영향이 더 크다. 잎에 관련된 대부분의 입력 변수가 후방산란 계수 계산에 갖는 영향이 크며, 토양의 수분함유량과 유효 높이 또한 후방산란 계수 계산에 큰 영향을 갖는 것을 확인할 수 있다. 잎의 수직 각도와 표준편차 값은 줄기나 가지와 다르게 후방산란 계수 계산에 큰 영향을 주는데, 줄기와 다르게 잎은 식물의 종류에 따라 수직 각도가 다양하고, 식물 생육 단계에 따라 변하기 때문이다.

3-2 GSA 기법을 이용한 민감도 조사

입력 변수가 변할 때 결과 값에 미치는 영향을 SA (Sensitivity Analysis) 기법을 수행하여 판별할 수 있다. 그 중 GSA 기법은 비선형 시스템의 민감도 조사에 많이 사

용되며, 각 입력 변수의 변화가 결과 값 분산에 얼마나 많은 영향을 미치는지 분석하거나, 각 입력 변수 간의 상호 작용 등을 분석하기 위해 사용한다. 1차 본 연구에서는 각 입력 변수가 결과 값에 갖는 영향만을 보고자 하였기 때문에 1차 민감도를 조사하였다.

그림 4는 1차 민감도 조사 결과를 보여준다. 3-1절에서 후방산란 계수의 차이로 민감도를 판별한 결과와 유사하게 잎에 관련된 대부분의 입력변수와 토양에 관련된 입력 변수가 후방산란 계수 계산에 큰 영향을 갖는 것을 확인할 수 있다. 3-1절의 결과에서 후방산란 계수 민감도 평균치가 0.5 dB 이상인 입력 변수는 *vv*-편파와 *hh*-편파 모두 12개였으며, 3-2절의 결과에서 민감도가 큰 12개의 입력 변수와 11개 일치하였다.

3-3 간단한 산란 모델의 정확도 검증

3-1절의 결과를 토대로 32개 중 12개의 입력 변수를 선택하였으며, 12개의 변수 외 20개의 변수는 현장 실측 데이터를 기반으로 평균값을 취하여 후방산란 계수를 계산하였다. 그림 5는 기존 RT 모델과 간단한 RT 모델을 이용하여 계산된 후방산란 계수와 측정데이터 비교를 보여준다. 이 간단 모델의 12개 입력변수는 토양수분함유량,

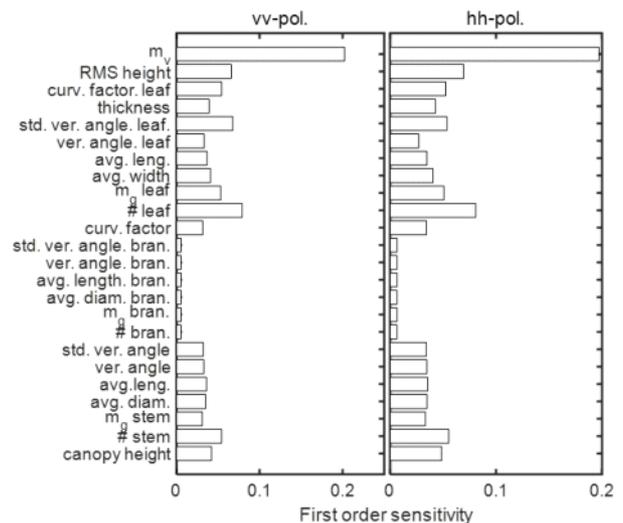


그림 4. GSA로 얻은 각 입력변수의 민감도
 Fig. 4. Sensitivities of input parameters by the GSA.

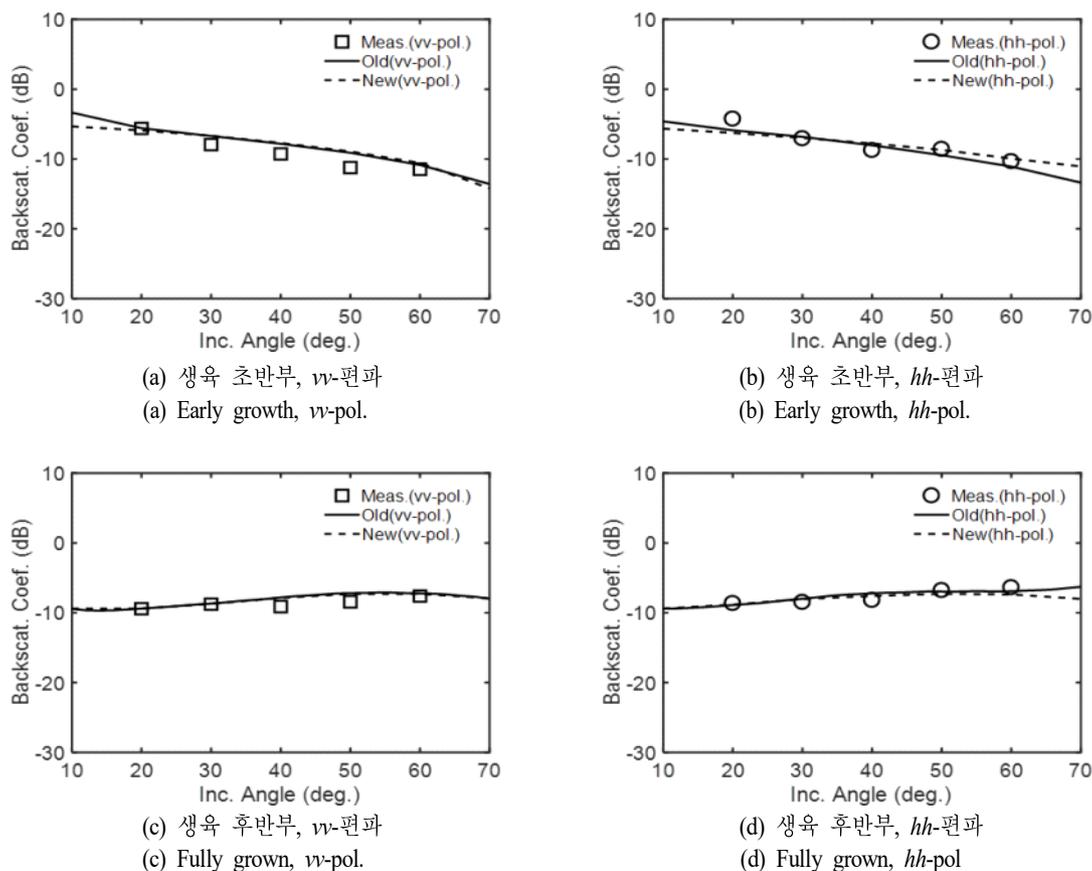


그림 5. 기존 RT 모델과 간단한 RT 모델을 이용하여 계산된 후방산란 계수와 측정데이터 비교
 Fig. 5. Comparisons for measured and calculated backscattering coefficient using the 1st-order RT model and the simple model.

토양표면유효 높이, 식물층 높이, 줄기 개수, 줄기 평균 지름, 줄기 평균 길이, 잎 개수, 잎 수분 함유량, 잎 평균 너비, 잎 평균 길이, 잎 수직 각도, 잎 굽힘 지수이다.

그림 5(a), (b)는 생육 초반부의 후방산란 계수 비교를 나타내며, 기존 RT모델과 측정데이터의 RMSE(Root Mean Square Error)는 vv-편파에서 1.31 dB, hh-편파에서 0.95 dB 이고, 간단한 RT 모델의 RMSE는 vv-편파에서 1.43 dB, hh-편파에서 1.01 dB이다. 그림 5(c), (d)는 생육 후반부의 후방산란 계수 비교를 나타내며, 기존 RT 모델과 측정데이터의 RMSE는 vv-편파에서 0.83 dB, hh-편파에서 0.56 dB였으며, 간단한 RT 모델의 RMSE는 vv-편파에서 0.76 dB, hh-편파에서 0.60 dB이다.

그림 5의 결과를 통해 후방산란 계수 계산에 입력 변수가 갖는 민감도를 분석하여 개발한 산란 모델이 간단하

면서도 정확도가 유지되는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 농림 지역에서 사용할 수 있는 비교적 정확한 모델인 1차 RT 모델을 이용하여 간단한 산란모델을 개발하기 위해 다양한 식물 조건과 토양 조건, 주파수 조건에 대한 데이터베이스를 생성하였으며, 각 입력 변수의 민감도 조사를 통해 후방산란 계수 계산에 큰 영향을 갖는 입력 변수를 선택하였고, 선택한 입력 변수만을 사용하여 간단한 산란 모델을 개발하였다. 간단한 산란 모델은 입력 변수의 개수가 1차 RT 모델에 비해 약 1/3로 감소하였으며, 정확도는 유지되는 것을 확인할 수 있다. 입력 변수의 개수가 1/3로 감소한 간단한 산란모델은 기

준 RT 모델에 비해 현장에서 수집해야 하는 실측 데이터 개수가 줄기 때문에 후방산란 모델을 사용하는 원격탐사와 지표면 수분함유량 추출 등 여러 연구 분야에서 실용적으로 사용할 수 있으며, 현장 실측 데이터베이스를 관리하기에 실용적일 것으로 예상된다.

References

- [1] Y. Inoue, E. Sakaiya, and C. Wang, "Potential of X-band images from high-resolution satellite SAR sensors to assess growth and yield in paddy rice," *Remote Sensing*, vol. 6, no. 7, pp. 5995-6019, Jun. 2014.
- [2] E. S. Kasischke, L. L. Bourgeau-Chavez, N. L. Christensen, and M. C. Dobson, "The relationship between above-ground biomass and radar backscatter as observed on airborne SAR imagery," in *the Proceedings of the Third Airborne Synthetic Aperture Radar(AIRSAR) Workshop*, Pasadena, CA, Aug. 1991, pp. 11-21.
- [3] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, T. LeToan, A. Beaudoin, E. S. Kasischke, and N. Christensen, "Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 412-415, Mar. 1992.
- [4] S. G. Kweon, Y. Oh, "A modified water-cloud model with leaf angle parameters for microwave backscattering from agricultural fields," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 5, pp. 2802-2809, May 2015.
- [5] P. R. Houser, W. J. Shuttleworth, J. S. Famiglietti, H. V. Gupta, K. H. Syed, and D. C. Goodrich, "Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation," *Water Resources Research*, vol. 34, no. 12, pp. 3405-3420, Dec. 1998.
- [6] J. H. Choi, K. B. Kang, S. G. Sun, J. S. Lee, B. L. Cho, and Kyung-Taek Kim, "Efficient detection of small unmanned aerial vehicles in cluttered environment," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 5, pp. 389-398, May 2019.
- [7] A. J. Graham, R. Harris, "Extracting biophysical parameters from remotely sensed radar data: A review of the water cloud model," *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 27, no. 2, pp. 217-229, Jun. 2003.
- [8] E. P. W. Attema, F. T. Ulaby, "Vegetation modeled as a water cloud," *Radio Science*, vol. 13, no. 2, pp. 357-364, Mar.-Apr. 1978.
- [9] L. Tsang, J. A. Kong, and R. T. Shin, *Theory of Microwave Remote Sensing*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 1985.
- [10] F. T. Ulaby, K. Sarabandi, K. MacDonald, M. Whitt, and M. C. Bobson, "Michigan microwave canopy scattering model," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no. 7, pp. 1223-1253, 1990.
- [11] N. S. Chauhan, R. H. Lang, and K. J. Ranson, "Radar modeling of a boreal forest," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 4, pp. 627-638, Jul. 1991.
- [12] I. M. Sobol, "Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 55, no. 1-3, pp. 271-280, Feb. 2001.
- [13] C. Ma, X. Li, and S. Wang, "A global sensitivity analysis of soil parameters associated with backscattering using the advanced integral equation model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 10, pp. 5613-5623, Oct. 2015.
- [14] S. Park, S. K. Kweon, and Y. Oh, "Validity regions of soil moisture retrieval on the LAI- θ plane for agricultural fields at L-, C-, and X-bands," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, no. 6, Jun. 2015.
- [15] J. H. Hwang, S. M. Park, S. G. Kwon, and Y. Oh, "Study on the calibration of a full-polarimetric scatterometer system at X-band," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 4, pp. 408-416, Apr. 2010.

박 신 명 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0594-337X>



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2013년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2018년 8월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
 2019년 6월~현재: LIG넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 전파 산란, 레이더 신호처리

유 동 길 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7093-5093>



2011년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터공학과 (공학사)
 2013년 2월: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 (공학석사)
 2013년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원
 [주 관심분야] 표적 추적, 레이더 데이터 처리 등

손 성 환 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9401-7182>



2004년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 2006년 2월: 인하대학교 정보통신대학원 (공학석사)
 2010년 8월: 인하대학교 정보통신대학원 (공학박사)
 2011년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리 및 통제제어, 레이더 SW 등

강 연 덕 [LIG넥스원/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0002-0330-0354>



1996년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 8월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)
 2000년 9월~현재: LIG넥스원(주) 연구위원

[주 관심분야] 능동배열 다기능레이더 시스템 설계, RF 시스템 설계 등

문 현 옥 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9274-9929>



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2007년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2014년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 성능분석, 전파전파, 무선채널 모델링 등

오 이 석 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-1520-0852>



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 및 컴퓨터과학과 (공학박사)

1997년~2001년: 대한원격탐사학회 상임이사
 2001년~2008년: 한국전자과학회 상임이사
 2006년~2008년: Chair, IEEE GRS Korea Chapter
 2009년~2010년: Stanford University 방문교수
 1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 2009년~현재: IEEE Fellow
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 레이더, 안테나