

# 지표면의 SAR 영상 시뮬레이션 모델

## Model for Simulating SAR Images of Earth Surfaces

정구준 · 이성화\* · 김인섭\*\* · 오이석\*\*

Goo-Jun Jung · Sung-Hwa Lee\* · In-Seob Kim\*\* · Yisok Oh\*\*

### 요 약

본 논문에서는 산악지대, 논, 채소밭, 풀밭, 도로, 수면 등을 포함하는 지표면에 대한 합성 개구면 레이더(SAR) 영상을 생성하여 주는 시뮬레이션 모델을 선보인다. 우선 토양, 수면, 논, 밭과 같은 풀 층과 나무 숲 등에서 산란 모델을 개발하였다. 그런 다음에, 표고 데이터와 지형 데이터를 이용하여 SAR 영상을 생성하였다. 이용된 지형 변수로는 토양 수분 함유량, 표면 거칠기, 초목 층 높이, 잎 넓이, 잎 길이, 잎 밀도, 가지 길이, 가지 밀도, 나무 기둥 길이, 나무 기둥 밀도를 포함하는 10개이다. 개발된 산란 모델들은 실험 데이터와 비교하는 방식으로 정확성을 증명하였고, 특정 지역에서의 SAR 영상을 생성하였다.

### Abstract

In this paper, a model for simulating synthetic aperture radar(SAR) images of earth surfaces. The earth surfaces include forest area, rice crop field, other agricultural fields, grass field, road, and water surface. At first, the backscattering models are developed for bare soil surfaces, water surfaces, short vegetation fields such as rice fields and grass field, other agriculture areas, and forest areas. Then, the SAR images are generated from the digital elevation model(DEM) and digital terrain map. The DTM includes ten parameters, such as soil moisture, surface roughness, canopy height, leaf width, leaf length, leaf density, branch length, branch density, trunk length, and trunk density, if applicable. The scattering models are verified with measurements, and applied to generate an SAR image for an area.

Key words : Earth Surfaces, Backscattering Models, Radiative Transfer Model, SAR Image Simulation

### I. 서 론

Synthetic aperture radar(SAR) 시스템의 발전으로 항공이나 위성에서의 지구 관측 정보 수집 기술이 빠른 속도로 발전하고 있다. 국내에서도 향후의 무궁화 위성에 SAR를 탑재할 계획이며 이 시스템의 운용으로 수많은 지구 관측 데이터를 수신하게 될 전망이다. 그러므로 이 SAR 영상 데이터 활용 기술의 발전이 시급하고, 활용 기술의 일환으로 마이크로파의 지표면 산란 특성을 정확하게 예측하고,

SAR 영상을 예측하는 모델 개발이 우선되어야 한다. 지표면은 매우 복잡하여 지표면 상태를 표현하기가 어렵다는 이유로 그동안 연구가 소홀히 되어 왔던 게 사실이다. 본 연구에서는 지표면의 상태를 가장 적절히 표현하고, 이 상태에서의 마이크로파 산란 특성을 예측해 주는 모델을 개발하며, 더 나아가 SAR 영상 시뮬레이션도 시도해 보려 한다.

레이더를 이용한 마이크로파 원격 탐사에 대한 연구는 30~40년 전부터 꾸준히 진행되어 왔으며<sup>[1]-[3]</sup>, 지표면에서의 연구도 병행되어 왔다. 그러나 그 모

「본 논문은 정보통신부의 정보통신기초기술연구지원사업(정보통신연구진흥원)으로 수행한 연구결과임.」

넥스원퓨처(주)(Nex1Future Co., Ltd.)

\*삼지전자(주)(Samji Electronics Co., Ltd.)

\*\*홍익대학교 전파통신공학과(Department of Radio Science and Communication Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20050418-045

· 수정완료일자 : 2005년 5월 24일

델들의 적용 범위가 제한적이라서 정확성에 한계가 있어 왔다. 예를 들면, 토양에서의 마이크로파 산란 모델들로 *small perturbation method*(SPM), *physical optics*(PO) 모델, *geometrical optics*(GO) 모델들이 주로 사용되어져 왔는데, 그들 모델들의 적용 범위가 각각 다르고, 그 적용 범위에서도 측정 데이터와 잘 맞지 않는 문제점을 안고 있다<sup>[4]</sup>. 한편으로는 비교적 정확하게 지표면 마이크로파 산란을 계산해 주는 모델이 개발되기도 했지만, 사용이 복잡하고, 입력 변수가 매우 많아 사용이 어려운 문제점을 갖고 있기도 한다<sup>[5]</sup>. 본 연구에서는 정확성을 어느 정도 유지하면서 사용이 간편한 지표면 산란 모델을 개발하려 한다.

## II. 지표면 산란 모델

자연 상태의 지표면은 불규칙적인 거칠기를 갖는 토양 위에 풀이나 나무가 자란 형태이며, 크게 토양에서의 산란과 초목 층에서의 산란으로 나눌 수 있고, 초목 층에서의 산란에는 초목과 토양 사이의 다중 산란이 포함된다.

### 2.1 산란 모델 개발

SPM, PO, GO 방법 등의 고전적인 모델들 외에도 *integral equation method*(IEM) 등의 최신 이론적 모델들이 있지만<sup>[6]</sup>, 이 모델들에서는 토양을 균질의 유전체로 가정하기 때문에 실제의 토양 특성에는 잘 맞지 않는다. 반면에 실험 데이터를 이용하여 만들어진 산란 모델은 비교적 측정 결과와 잘 맞는 장점이 있다. 대표적인 실험 모델은 참고문헌 [7]에서 제안한 *polarimetric semi-empirical model*(PSEM)을 이용하였다.

초목 층에서의 전파 산란은 잎, 줄기, 기둥 등이 불규칙하게 분포되어 있다고 가정하고, 이들 산란 개체에서의 에너지 세기 흡수, 투과, 산란 등의 특성을 계산해내는 *radiative transfer method*(RTM)가 주로 사용된다<sup>[1]~[3]</sup>. 이 방식은 우선 잎, 가지, 줄기 등의 산란 개체들의 크기와 모양에 대하여 임의의 입사 및 산란 각도에서의 산란 행렬(*scattering matrices*)을 계산한다. 이 산란 행렬을 이용하여, 이 산란 개체들이 임의의 위치에 임의의 방향으로 위치해 있는 경우의 위상 행렬(*phase matrices*)을 계산하고, 이 위상 행렬로부터 여러 형태의 산란 특성(*scattering mecha-*

*nism*)을 고려하여 최종적인 산란 계수를 계산해 낸다.

식물 층을 구성하는 각 산란 개체에 대한 산란 모델은 파장에 비해서 크고 작은 것에 따라서 구분되어 왔다. 즉, 파장에 비해 큰 앞에는 PO 모델을 사용하고, 파장에 비해 작은 앞에는 *generalized Rayleigh-Gans*(GRG) 모델을 사용해 왔는데, 나뭇잎과 같이 두께가 아주 얇은 손실이 있는 유전체 판에서는 잎의 크기에 상관없이 두 모델이 다 정확도를 유지한다는 것을 알았다<sup>[9]</sup>. 본 연구에서는 잎을 *resistive sheet*으로 가정하고 PO 방식을 적용한 모델을 이용하였다. 실제 활엽수 잎은 모양과 크기가 가지각색이어서, 모든 종류에 맞게 모델을 설정하면 너무 복잡해지므로, 모델의 단순화를 위해서 사각형 모양의 등가 *resistive sheet*로 단순화하고, 크기만 조절하도록 했다. 여기서 잎의 유전율은 잎의 수분 함유량을 이용하여 참고문헌 [10]에서 제공한 실험식을 이용하였다. 편이상 가지와 줄기의 유전율도 이 실험식을 이용하여 계산한 값을 이용하였다. 침엽수의 잎, 가지, 줄기, 기둥 등의 실린더 형태의 산란 개체에 대한 산란 행렬은 무한 길이를 가정하여 표면 전류를 계산하고, PO 모델을 이용하여 산란 행렬을 계산하였다.

RTM을 적용하기 위해 일반적인 지표면을 그림 1처럼 가정하였다. 1차 다중 산란만을 포함할 경우에 산란 방식은 5가지가 된다. 즉, (1) 토양 반사 후 산란 개체에서 후방 산란 후 토양 반사를 거치는 산란, (2) 토양 반사 후에 산란 개체에서 전방 반사하는 산란이나 그 반대 경로로 산란, (3) 산란 개체에서 직접 후방 산란, (4) 토양 반사 후에 나무 기둥 전방 반사,

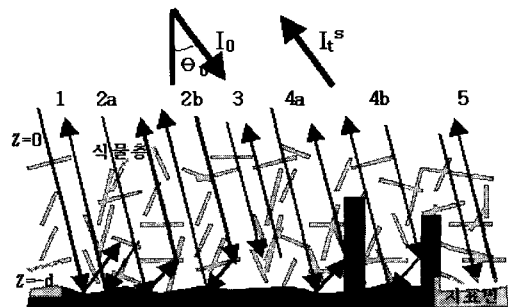


그림 1. 일반적인 지표면에서의 후방 산란 방식들  
Fig. 1. Scattering mechanisms for wave scattering from a typical earth surface.

또는 그 반대 경로로 산란, (5) 지표면에서의 후반 산란이다. 각 산란 경로에서는 식물 층에서의 전파 감쇠가 고려된다.

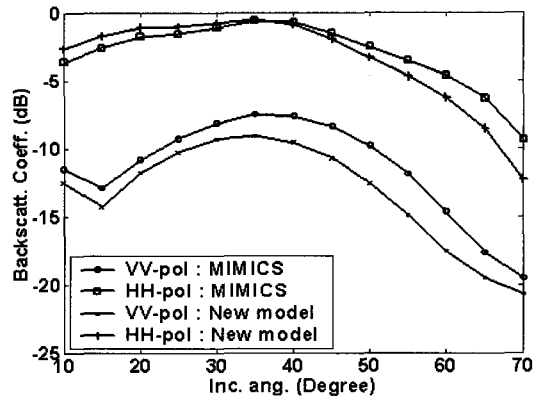
그림 1은 일반적인 나무 숲에 해당되고 다른 경우에는 산란 형태를 감하면 된다. 가령, 초목이 없는 토양은 그림 1에서 식물 층이 없다고 가정하여 산란 형태 (5)만 고려하면 되고, 논과 밭은 그림 2에서 나무 기둥이 없다고 가정하여 산란 형태 (4)를 빼주면 된다. 실제 식물 층에서의 산란은 무한대의 다중 산란까지 포함하지만<sup>[11]</sup> 수식의 복잡성과 계산 과정의 어려움 때문에 1차 다중 산란까지만 포함하였다.

후방 산란하는 전체 전파의 세기는 각 산란 방식에 의해 산란된 전파 세기의 합(coherent summation)으로 계산한다. 그림 1에서  $I_0$ 는 식물 층에 입사하는 전파의 세기이고,  $I'_s$ 는 후방 산란하는 전체 전파의 세기이다. 여기서 식물 층으로부터의 후방 산란 계수는 산란 방식 (1), (2a), (2b), (3), (4a), (4b), (5)에 해당하는 위상행렬(phase matrix)과 산란특성행렬을 이용하여 계산할 수 있다<sup>[3],[5]</sup>.

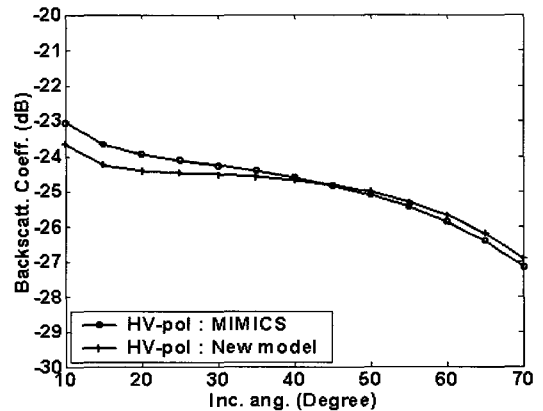
### 2-2 산란 모델 적용과 검증

위에서 얻은 지표면 산란 모델을 실제의 지표면에 적용시키기 위해서는 지표면의 상태(ground truth)를 정확하게 알아야 한다. 기존의 지표면 산란 모델인 michigan microwave canopy scattering model (MIMICS)은 입력 변수가 무려 60개가 넘는다<sup>[5]</sup>. 이러한 변수를 알기도 어려운 뿐만 아니라, 이 입력 변수를 이해하고 입력하는 것도 쉬운 일이 아니다. 본 연구에서는 위 산란 모델을 이용하여 가장 중요하고 지대한 영향을 끼치는 입력 변수 10개를 선정하였다. 이 10개의 입력 변수들은 토양 수분 함유량, 표면 거칠기, 초목 층 높이, 잎 넓이, 잎 길이, 잎 밀도, 가지 길이, 가지 밀도, 나무 기둥 길이, 나무 기둥 밀도이다. 여기서 생략된 입력 변수는 고정 값을 이용하거나, 10개의 주요 입력 변수에서 유도하였다. 예를 들면, 잎의 두께는 측정치의 평균인 0.04 cm로 고정하였고, 식물의 수분 함유량은 0.45~0.7 g/cm<sup>3</sup> 범위에서 토양의 수분 함유량에서 유도하였으며, 줄기와 가지의 지름은 각각의 길이에서 유도하였다.

60여개의 입력 데이터를 입력하여 MIMICS로 계



(a) 동일 편파  
(a) Co-polarizations



(b) 교차 편파  
(b) Cross-polarizations

그림 2. 산란 모델과 MIMICS 모델 비교  
Fig. 2. Comparison between this model and the MIMICS model.

산한 L-밴드 데이터와 이 중에서 10개의 입력 데이터만을 이용하여 본 모델로 계산한 결과를 비교하였다. 그림 2(a)와 (b)는 각각 동일 편파와 교차 편파에서의 비교 결과를 보이는데, 1~3 dB 이내의 차이를 보이고 있다. 이는 본 모델이 적은 입력 변수로도 60여개 이상의 입력변수를 가지는 모델과 비슷한 결과 값을 계산해 낼 수 있음을 보여준다.

다음에는 본 모델로 JPL/NASA 항공 SAR로 측정하여 얻은 영상에서 산란 계수를 추출하여 본 모델의 계산 결과와 비교하였다. 그림 3은 JPL/NASA의 AirSAR로 실시한 Pacific-Rim Experiment-2(PAC-RIM2)에서 얻은 논산 지역의 영상에서 임야 한 군데

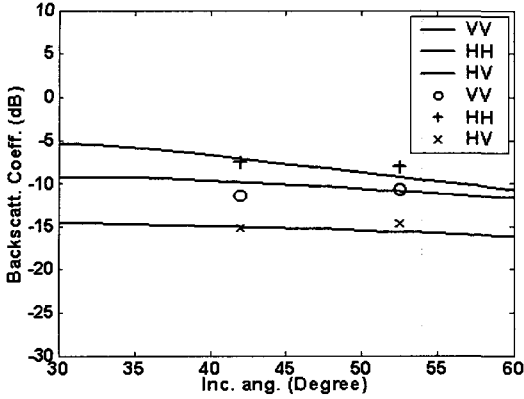


그림 3. 나무 숲의 계산 결과와 SAR 측정 값 비교  
 Fig. 3. Comparison between computation results and the measured SAR data for a forest area.

를 선정하여 polarimetric한 L-밴드 SAR 측정값과 산란 모델 계산 결과를 비교한 것이다. 지표면 ground truth 데이터를 정확하게 얻지 못한 것에 비하면 아주 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

### III. SAR 영상 시뮬레이션

#### 3-1 지형 데이터 이용 방법

본 연구에서 개발한 지표면 산란 모델을 실제 지형에 적용하기 위해서는 digital elevation model(DEM) 데이터와 digital terrain map(DTM) 데이터가 있어야 한다. 우선, DTM 데이터는 입력 변수 10개를 추출할 수 있는 정도의 데이터를 필요로 한다. 이들 입력 변수의 단위는 다음과 같이, 토양수분 함유량  $m_v$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), 표면 거칠기 rms 높이  $s$ (cm), 초목 층 높이  $H_c$ (m), 앞 넓이  $W$ (cm), 앞 길이  $L$ (cm), 앞 밀도  $D_f$ ( $\text{개}/\text{m}^3$ ), 가지 길이  $L_b$ (m), 가지 밀도  $D_b$ ( $\text{개}/\text{m}^3$ ), 나무 기둥 길이  $L$ (m), 나무 기둥 밀도  $D$ ( $\text{개}/\text{m}^2$ )이다.

기울기를 갖는 지표면은 기울기가 없는 지표면과 다른 입사각을 갖기 때문에 DEM 데이터로부터 지표면의 기울기를 구하고 그 기울기에 따른 입사각의 변화를 계산하여 후방 산란에 대한 정확한 산란 계수를 계산해야 한다. DEM을 사용하여 세 점으로부터 두 개의 벡터를 구할 수 있고 이 두 개의 벡터는 하나의 픽셀 면을 구성할 수 있다. 두 벡터와 노말 벡터의 내적이 0이 되는 것을 이용하여 노말 벡터를

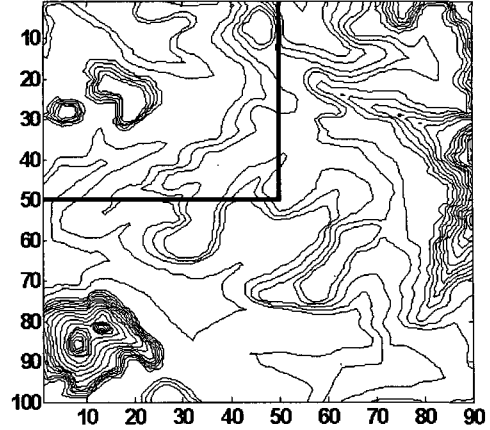


그림 4. 등고선도로 나타낸 DEM 데이터  
 Fig. 4. DEM data in contour diagram.

구할 수 있고 수식  $-\hat{n} \cdot \hat{k}_i = \cos \theta_i$ 를 이용하여 실제 지면에서의 입사각을 계산하였다. 이렇게 얻어진 실제 입사각을 시뮬레이터의 레이더 변수로 입력하여 각각의 픽셀에 대하여 후방 산란 계수를 계산한다.

그림 4는 시뮬레이션을 위해 논산 일부 지역에서 얻은  $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  해상도의 DEM 데이터를 이용하여 나타낸 등고선도이다. 그림 4에서 수직, 수평 축의 숫자는 pixel 수를 나타낸다. 좌상에서 박스로 표시된 지역이 대략적으로  $1.0 \times 1.5 \text{ km}$ 의 면적에 해당한다. 상업적으로 구할 수 있는 DTM 데이터는 한계가 있어서 이 지역의 DTM 데이터를 얻기 위해 현장 답사를 수행하여 그림 5와 같은 대략적인 DTM 데이터를 얻었다.

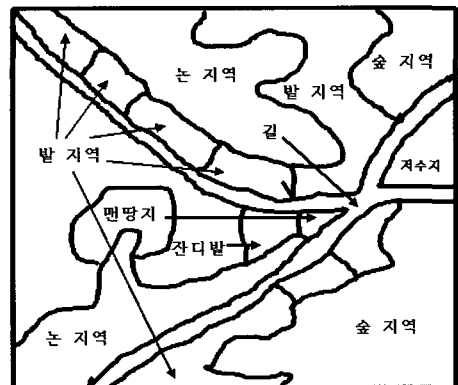


그림 5. 관심지역의 지형 분류도  
 Fig. 5. DTM of a selected area.

표 1. 초목 층의 입력변수

Table 1. Input parameters for the earth surface.

	논	잔디밭	밭	숲
$m_v$	0.4	0.15	0.15	0.2
$s$	0.1	0.3	0.5~1.5	1
$H_c$	0.8~1.2	0.2	0.3~2	8~12
$W_l$	2	0.5	2~6	5
$L_l$	60~100	10	2~40	10
$D_l$	1,000~2,000	1,000	10~200	50~500
$L_b$			0.015~2	0.5
$D_b$			2~40	4~40
$L_t$				5
$D_t$				0.05~0.2

이 지역을 대략적으로 갈아 놓은 맨땅, 채소밭(옥수수, 고구마, 콩밭 등), 논, 나무 숲, 도로, 저수지 등으로 분류하였다. 맨 땅에서의 수분 함유량은  $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 표면 거칠기 rms 높이는  $1\sim 2 \text{ cm}$ , 도로의 수분 함유량은  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 표면 거칠기 rms 높이는  $0.1 \text{ cm}$ 로 설정하였고, 물은 바람이 없는 경우로 표면 거칠기 rms 높이를  $0.01 \text{ cm}$ 로 하였다. 그 외의 지역에 대한 입력 변수는 표 1처럼 선정하였다. 영상의 textural variation을 주기 위해서 표 1에 있는 범위에서 uniform 랜덤 변수를 생성하여 입력하였다.

본 연구에서 개발한 지표면 레이더 산란 모델에 관심 지역의 DEM과 DTM 데이터를 입력하여 각 픽셀당 레이더 후방 산란 계수를 계산하고, 이 데이터로  $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  해상도의 SAR 영상을 시뮬레이션 하였다. L-밴드(1.26 GHz)와 X-밴드(9.6 GHz)의 두 개 주파수에서 각각 시뮬레이션 하였고, 40도의 입사각에서 vv-, hh-, hv-편파에 따른 SAR 영상을 얻었다.

그림 6(a)와 (b)는 각각 동일 편파(vv-pol)와 교차 편파(hv-pol)에서 L-밴드의 SAR 영상을 보이고 있고, 그림 7(a)와 (b)는 X-밴드의 SAR 영상을 보이고 있다. 여기서, hv-편파는 레이더에서 수직 편파(v-pol)로 입사하고, 그 레이더에서 수평 편파(h-pol)로 수신할 때를 의미한다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 나무 숲에서의 후방 산란 계수가 매우 높고, 도로나 수면에서의 후방 산란 계수는 매우 낮음을 알 수 있다. 교차 편파에서는 맨땅에서의 산란도 높다는 것을 알 수 있다. 그림 7에서

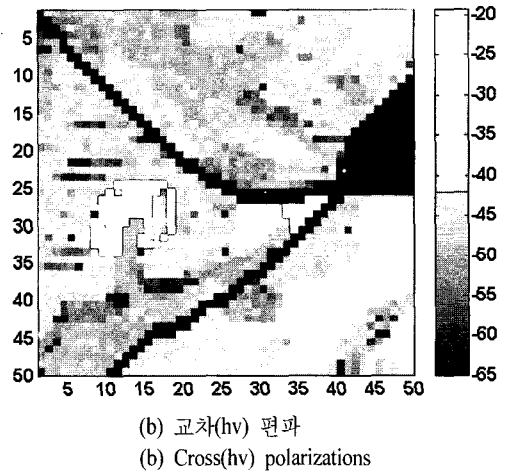
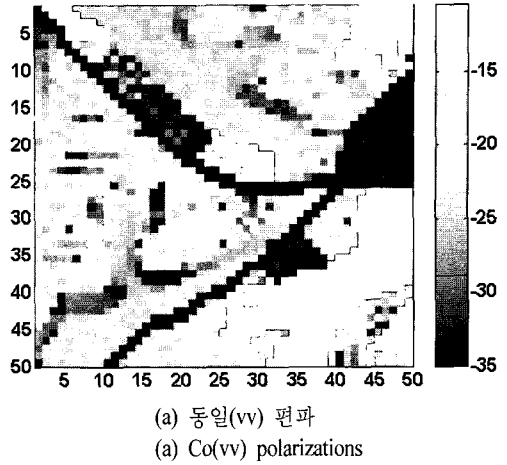


그림 6. SAR 영상 시뮬레이션(L-밴드)  
Fig. 6. Simulation of SAR images at L-band.

는 X-밴드와 같은 높은 주파수에서는 나무 숲만큼이나 채소밭에서도 높은 산란 계수를 보임을 알 수 있고, 전체적인 산란 계수값이 L-밴드의 경우보다 매우 높음을 알 수 있다.

산란 모델들의 정확도는 어느 정도 검증되었기 때문에 시뮬레이션 된 SAR 영상의 정확도는 DTM 데이터의 정확성에 달려 있다고 봐도 과언이 아니다. 본 연구에서 개발된 지표면의 SAR 영상 시뮬레이션 모델은 geographic information system(GIS)의 발전으로 양질의 DTM 데이터가 제공될 때 활용도가 더 높아질 것이다. 본 산란 모델은 SAR로 측정된 레이더 후방 산란 계수를 예측할 필요가 있을 경우에 유용할 것이며, 측정된 SAR 영상에서 지표면 상태(ground truth) 데이터를 추출하는 inversion 모델

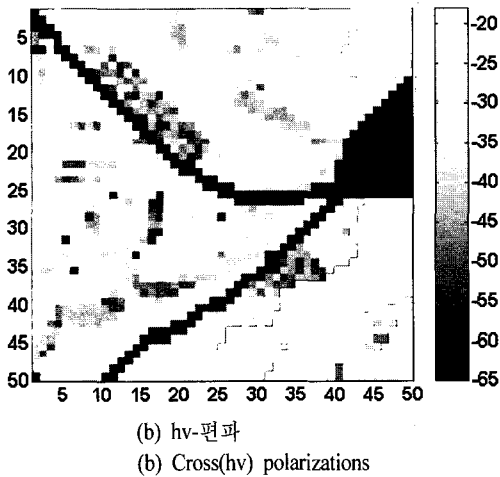
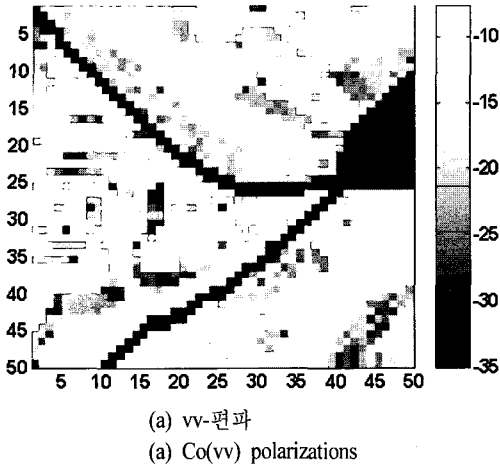


그림 7. SAR 영상 시뮬레이션(X-밴드)  
Fig. 7. Simulation of SAR images at X-band.

을 개발할 때에도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 산악 지대, 나무 숲, 논, 각종 채소 밭, 풀밭, 수면, 도로 등으로 구성되어 있는 지표면에 대하여 레이더 산란 계수를 계산하는 산란 모델들을 개발하고, 이 모델들을 이용하여 SAR 영상을 제작하는 시뮬레이션 모델을 제시하였다. 이 산란 모델은 토양 수분 함유량, 표면 거칠기, 초목 층 높이, 잎 넓이, 잎 길이, 잎 밀도, 가지 길이, 가지 밀도, 나무 기둥 길이, 나무 기둥 밀도의 10개 변수만을 입력하는 모델로서, 60개가 넘는 입력 변수를 필요로 하는 기존 모델과 같은 정확도를 보인다.

이 지표면 산란 모델에 지표면 DEM과 지표면 DTM(상태변수) 데이터를 입력하여 SAR 영상을 시뮬레이션할 수 있었고, 이 시뮬레이션 된 영상은 실제의 SAR 영상과 유사한 경과를 보인다. 이 SAR 영상 시뮬레이터는 지표면에서 SAR 영상을 예측하는데 사용되어질 뿐만 아니라, 위성 SAR 영상 데이터에서 지표면 특성 정보를 얻으려 할 때에도 요긴하게 활용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

DEM 데이터를 제공해 준 (주)지세정보에 감사합니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering In Random Media*, IEEE press, 1997.
- [2] F. T. Ulaby, M. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, Artech House, Norwood, MA, USA, vol. 2, 1982.
- [3] L. Tsang, J. A. Kong, and R. T. Shin, *Theory of Microwave Remote Sensing*, John Wiley & Sons, 1985.
- [4] Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, pp. 370-382, Mar. 1992.
- [5] F. T. Ulaby, K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt, and M. C. Dobson, "Michigan microwave canopy scattering model", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 11, no. 7, pp. 1223-1253, 1990.
- [6] A. K. Fung, *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Artech House, Boston, MA, 1994.
- [7] Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "Semi-empirical model of the ensemble-averaged differential mueller matrix for microwave backscattering from bare soil surfaces", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 40, no. 6, pp. 1348-1355, 2002.

[8] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Inc., 1990.

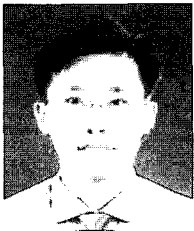
[9] Yisok Oh, "Comparative evaluation of two analytical models for microwave scattering from deciduous leaves", *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no. 1, pp. 39-46, 2004.

[10] F. T. Ulaby, M. A. El-royes, "Microwave dielectric spectrum of vegetation-Part II : Dual-dispersion mo-

del", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-25, pp. 550-557, 1987.

[11] Y. Oh, Y-M. Jang, and K. Sarabandi, "Full-wave analysis of microwave scattering from short vegetation: An investigation on the effect of multiple scattering", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2522-2526, Nov. 2002.

### 정 구 준



2001년 8월: 홍익대학교 전자전기 공학부 (공학사)  
 2004년 2월: 홍익대학교 전파통신 공학과 (공학석사)  
 2004년 9월~현재: (주)넥스원퓨처 연구원  
 [주 관심분야] 전파산란, 마이크로 파원격탐사, SAR 영상분석, 레이더 송수신 시스템

### 김 인 섭



2003년 8월: 홍익대학교 전자전기 공학부 (공학사)  
 2003년 9월~현재: 홍익대학교 전 파통신공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 전파산란, 안테나, 마이크로파회로

### 이 성 화



2002년 2월: 홍익대학교 전자전기 공학부 (공학사)  
 2004년 8월: 홍익대학교 전파통신 공학과 (공학석사)  
 2005년 5월~현재: (주)삼지전자 연구원  
 [주 관심분야] 전파산란, 안테나, 마이크로파회로

마이크로파회로

### 오 이 석



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)  
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기컴퓨터공학과 (공학 석사)  
 1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 컴퓨 터공학과 (공학박사)

1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 부교수  
 [주 관심분야] 전파산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나