

식물층에서의 편파별 후방 산란 측정과 산란 모델의 비교

Comparison between Measurements and Scattering Model for Polarimetric Backscattering from Vegetation Canopies

홍진영 · 오이석

Jin-Young Hong · Yisok Oh

요약

본 논문은 후방 산란 계수 및 지표면 특성(ground truth)에 대한 측정 방법을 기술하며 후방 산란 계수 측정값과 radiative transfer 이론을 적용하여 개발된 산란 모델을 비교함으로써 산란 모델의 정확성을 검증한다. R 밴드(1.7~2.0 GHz)의 주파수 대역에서 polarimetric scatterometer 시스템으로 한강생태공원의 수풀 지형에서의 후방 산란 계수를 입사 각도의 변화와 지표면 수분 함유량의 변화에 따라 측정한다. 이 측정 결과를 지표 산란 모델과 비교한 결과 동일 편파의 경우 비교적 잘 일치하며 교차 편파의 경우 보정을 해줌으로써 산란 모델의 정확성을 얻을 수 있다.

Abstract

In this paper, we describe a measurement technique for the backscattering coefficient and ground truth of a vegetation canopy in detail. A simple microwave backscattering model for vegetation canopies is verified by being compared with this measurement. An R-band(1.7~2.0 GHz) scatterometer system is used to measure the backscattering coefficient of a vegetated area in the Han-river park for various incidence angles and a wide range of the soil moisture contents. It is found that the model agrees quite well with the measurements for co-polarized radar backscatter, and needs a correction for cross polarized radar backscatter.

Key words : Polarimetric Scatterometer System, Radiative Transfer Theory, Backscattering Coefficient

I. 서론

지표면은 일반적으로 맨땅, 수풀 지형, 숲 등과 같은 다양한 환경으로 이루어져 있으며 이로 인한 전자파의 복잡한 상호 작용을 계산하는 산란 모델을 만드는데 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문의 목적은 radiative transfer 이론을 적용하여 개발된 지표면 산란 모델을^[1] 수풀 지형의 후방 산란 계수 측정값과 비교함으로써 산란 모델의 정확성을 검증하고자 한다. 기존의 지표면 측정 데이터들이 많이 발표되어 있지만^[2], 편파별 측정 데이터들이 아니든지,

지표면 데이터(ground truth)가 충분하지 않아서 이용하기에 문제점이 있고, 본 연구실의 측정 데이터가 일부 있지만^{[1],[3]}, 여러 입사각과 여러 수분 함유량 정도에 따른 데이터가 필요하였기에 본 측정이 필요하게 되었다.

우선, 측정을 위해 R-밴드 polarimetric scatterometer 시스템을 구성했으며 한강 생태 공원의 수풀 지형을 한 달간 2~3일 간격으로 측정하였다. 입사 각도는 30°~60°까지이며 1.7~2.0 GHz의 주파수 대역에서 측정하였다. 측정 잡음을 제거하기 위해 time gating 방법을 적용했으며 보정 target은 자체 제작한

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

· 논문 번호 : 20060417-040

· 수정완료일자 : 2006년 7월 31일

Trihedral corner reflector를 사용하였다. 또한, 지표면의 특성(ground truth)을 측정하기 위해 surface profilometer를 제작하여 지표면의 거칠기 변수인 RMS 표면 높이 s 와 표면 상관길이 l 을 측정하였고, 토양 샘플을 취득하여 토양의 수분 함유량을 측정하였으며, 여러 종류의 식물 층 샘플을 취득하여 잎의 밀도, 길이, 폭, 수분 함유량 등을 측정하였다^[4]. 입사각도의 변화와 지표면 수분 함유량의 변화에 따른 후방 산란 계수 측정값을 얻을 수 있었으며 지표 산란 모델과 비교한 결과 동일 편파의 경우 비교적 잘 일치했으며 교차 편파의 경우 보정을 해줌으로써 산란 모델의 정확성을 얻을 수 있었다.

II. 후방 산란 계수 측정

후방 산란 계수를 측정하기 위해 우선 R 밴드 scatterometer 시스템을 구현하였다. 본 scatterometer의 송수신기로는 네트워크 분석기(HP8753D)를 사용하였고, R 밴드 표준 혼 안테나 두 개를 동축선으로 송수신기에 연결하여 간단하게 full polarimetric scatterometer 시스템을 그림 1과 같이 구성하였다. 측정 주파수로는 1.85 GHz를 중심으로 0.5 GHz의 대역폭에서 측정함으로써, Fourier 변환을 이용하여 time gating 기능을 이용할 수 있었고, 이 기능으로 수풀에 대한 후방 산란 이외의 잡음(안테나 어댑터, 안테나 지지대 등에서의 반사파들)을 제거하여 마치 전파 무반향실 측정과 같은 효과를 볼 수 있었다.

측정 장소로는 측정이 용이하고 비교적 한적한 강산 생태 공원의 수풀 지형으로 선정하였고, 여기

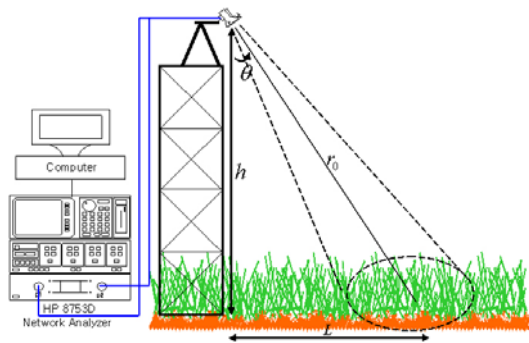


그림 1. Scatterometer 시스템
Fig. 1. Polarimetric scatterometer system.

에 타워를 설치하였으며, 안테나 세트를 삼각대에 고정하여 타워 위에 설치한 후에 각도 별로 30번씩 다른 지역들에서의 전파 산란을 vv-, hh-, vh-, hv- 편파별로 측정하였다. 지표면에서 안테나까지의 높이 (h)는 4.8 m이었으며 입사각 30°, 40°, 50°, 60°에서 측정하였다. 보정용 target으로는 Trihedral 전파 반사기를 사용하였으며 전파 반사기 측정은 잡음을 제거하기 위해 스티로폼 위에 올려놓고 빔이 지면에 도달하는 중심 거리(r_0) 만큼의 거리에서 측정하였다.

그림 2는 수풀에 대한 각도별 hh(horizontal to horizontal)-편파 측정값의 한 예를 시간 영역에서 나타낸 그림이다. 수풀 지면에 대한 각도별 시간 영역에서의 응답을 확인하기 위해 안테나의 방향을 허공(air)으로 향하여 측정한 결과를 기준으로, 40°, 50°, 60°의 입사 각도별로 측정한 시간 영역에서의 측정 결과를 함께 보여주고 있다. 안테나 어댑터에서의 반사가 62.5 ns에서 나타나는 것을 볼 수 있으며 입사각을 40°로 하고 거리를 시간으로 환산하였을 경우, 지면까지의 왕복거리($2r_0$)는 104 ns이고 또한, 안테나 패턴을 고려한 footprint는 97~122 ns이다. 입사각 50°, 60°에서도 같은 방법으로 시간 영역을 예측할 수 있으며 그림 2에서 예측값과 측정값이 같음을 확인할 수 있었다. Footprint를 확인한 후 네트워크 분석기의 time gating 기능으로 지면 산란 이외의 잡음을 제거하여 측정함으로써 보다 정확한 데이터를 얻을 수 있었다.

측정 데이터 보정은 계산의 편의성을 위해 위상

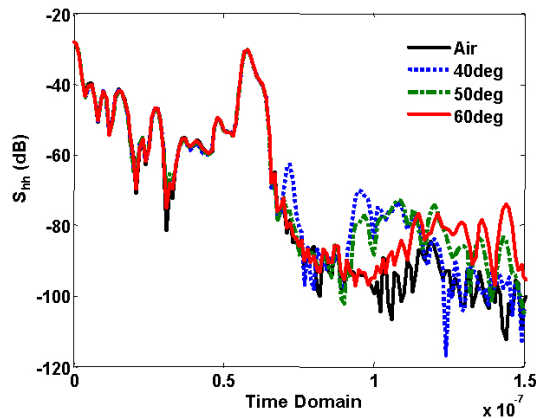


그림 2. 시간 영역에서의 측정 데이터(hh-편파)
Fig. 2. Measured data at time domain(hh-pol.).

은 고려하지 않고 크기만을 보정하여 식 (1)과 같이 계산하였다. 식 (1)에서 σ_{pq}^t 는 trihedral 전파 반사기의 이론적 radar cross section(RCS) 값이고 S_{pq}^{dm} , S_{pq}^{im} 은 각각 수평 지역과 전파 반사기에 의한 전파 반사 측정 값이며 pq 는 vv, hh, vh, hv 편파를 나타낸다. Illumination integral(A_{ill})은 식 (2)에 의해 계산할 수 있고^[5] R 은 안테나와 전파반사 지점까지의 거리함수이며, $g^2(\theta, \phi)$ 는 안테나의 표준화된 이득(normalized gain) 함수인데, 적분 변수에 따라 변하는 값들이다. 식 (2)의 안테나 이득 함수는 모든 각도별로 얻어야 하므로, principal E-면과 H-면에서 얻은 측정 패턴들을 interpolation하여 3차원으로 안테나 이득 함수를 계산하였고, 그림 3은 이 3차원 안테나 패턴을 보여준다. Standard 혼 안테나의 H-plane HPBW(Half-Power Beam-Width)는 30°이고, E-plane의 HPBW는 28°이다.

$$\sigma_{pq}^0 = |S_{pq}^{dm}|^2 \frac{\sigma_{pq}^t}{|S_{pq}^{dm}|^2 r_{\sigma}^2 A_{ill}} \quad (1)$$

$$A_{ill} = \int_s \frac{g^2(\theta, \phi)}{R^4(\theta, \phi)} ds \quad (2)$$

측정은 독립적인 지표면 샘플을 얻기 위해 측정 타워를 중심으로 회전하면서 각 각도 별로 30번씩 측정하였다. 그림 4는 30번의 측정 중 한 번의 결과를 나타내는 것이며 입사각이 40°이고 time gating 후 1.6~2.1 GHz의 주파수 대역에서의 측정 결과이다. 주파수의 시작 부근과 끝 부근에서는 Fourier 변환 과정에서 aliasing 효과로 잡음의 영향이 있기 때문에 측정 데이터에서 1.7~2.0 GHz 대역만 선택하여

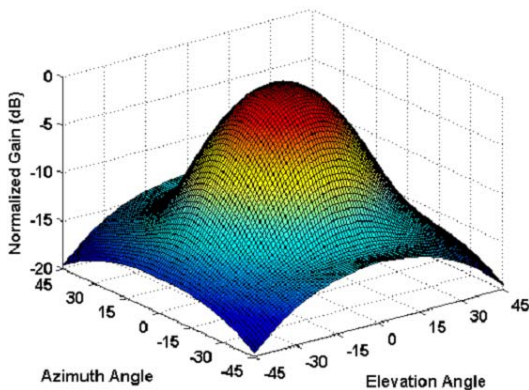


그림 3. 안테나 이득 패턴
Fig. 3. Antenna gain pattern.

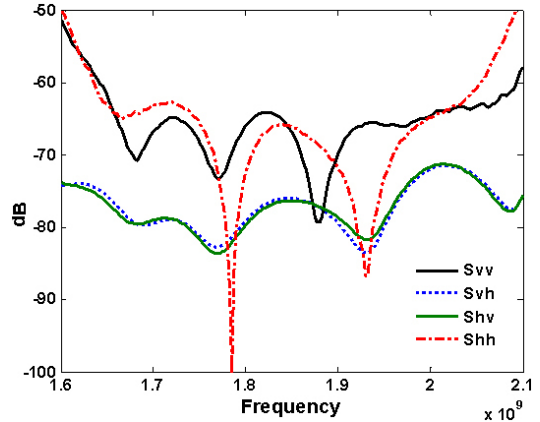


그림 4. 주파수 영역에서의 측정 데이터
Fig. 4. Measured data at frequency domain.

사용하였고 30개 데이터의 평균값을 취하였다.

Ⅲ. 표면 거칠기와 수분 함유량 측정

산란 모델과의 비교를 위해서는 정확한 후방 산란 계수 측정 못지 않게, 모델 입력 변수가 되는 지표면의 특성(ground truth)을 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 지표면의 특성에는 지표면 거칠기, 토양 수분 함유량과 풀 층 특성 변수들(밀도, 크기, 각도, 수분 함유량 등)이 있다. 우선, 지표면 토양의 거칠기를 나타내는 변수인 s (rms 표면 높이)와 l (표면 상관 길이)을 구하기 위해서는 일정 거리 만큼의 지표면 높이를 정확하게 측정해야 하고, 이를 위해 지표면 높이 측정기(surface profiler)를 제작하였다. 그림 5는 제작된 surface profiler를 보여주고 있다. 이는 실제 지표면의 높이를 측정하는 장비로써 전체의 길이가 1 m이며 0.5 cm 간격에 20 cm의 길이를 갖는 철사 201개로 구성되어 있다. 그림 5에는 잘 보이지 않지만, 철사의 윗부분이 보이는 면에는 모눈 종이 있어서 높낮이를 수직으로 읽을 수 있다. 디지털 카메라로 찍은 후에 그 영상에서 높이를 숫자로 얻게 되고, 일렬로 연속으로 5번 반복하면 지표면 5 m의 길이에 대해 지표면 profile을 얻는다. 이 측정된 데이터로부터 높이 분포함수(PDF)를 얻고, 이 PDF의 표준편차를 구하면 s (RMS 높이)를 얻게 된다. 다음 식 (3)과 같이 정규화된 자기 상관 함수(normalized autocorrelation function)을 구하여 그 함수의 $1/e$ 에 해당



그림 5. 지표면 높이 측정기
Fig. 5. Surface profiler.

하는 값 l (correlation length)을 구하였다^[6].

$$\rho(x') = \frac{\int_{-L_x/2}^{L_x/2} z(x)z(x+x')dx}{\int_{-L_x/2}^{L_x/2} z^2(x)dx} \quad (3)$$

여기서 $z(x)$ 는 x 의 위치에서의 지표면 높이(z)를 의미한다.

측정 지역의 토양 수분 함유량을 측정하기 위해서, 지표면 깊이 0~5 cm에서 토양 샘플 2~3개(약 200~300 g)를 채취하여 무게를 재고, 완전 건조시킨 후 무게를 재어, 물의 부피와 토양의 부피 비(ratio)인 volumetric 수분 함유량 $m_v(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 를 다음 식처럼 계산하였다^[4].

$$m_v = \frac{W_w}{W_{dry}} \rho_b = m_g \rho_b \quad (4)$$

여기서 W_w 는 물의 무게, W_{dry} 는 흙의 무게이고, m_g (g/cm^3)는 gravimetric 수분 함유량, ρ_b 는 토양의 밀도이다. 측정된 토양의 밀도는 대략 $1.2(\text{g}/\text{cm}^3)$ 이었다. 측정기간 동안의 측정된 수분 함유량은 $0.17\sim 0.38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 의 범위 내의 값이었다.

산란 모델의 입력 변수는 상대 유전율이기 때문에 수분 함유량에서 토양의 상대 유전율을 얻으려면 토양의 성분을 알아야 한다. 비중계(hydrometer)를 사용하여 토양 성분을 측정된 결과 측정 지역의 토양 성분은 모래가 33.9%, 실트가 42.9%, 점토가 23.2%인 loam 토양으로 판명되었다^[4]. 비중계 방법에서 40초 이내에 가라앉는 성분이 모래(sand), 40초부터 2시간 사이에 가라앉는 성분이 실트(silt), 2시간 이후까지 떠있는 토양 성분이 점토(clay)로 간주하였다.

본 측정 지역은 키가 큰(약 70 cm 정도) 일년생 풀들로 덮여 있는 지역이다. 측정 일자마다 토양 위에 자란 잎의 크기(길이와 넓이), 밀도, 각도, 수분 함유

량 등의 입력 변수를 얻기 위해 균일한 곳에서 30 cm×30 cm의 샘플 2곳을 선정하여, ground truth를 측정하였다. 수풀을 모두 채취한 후 무게를 재고, 완전 건조 후 무게를 비교하여 수분 함유량(m_g)을 구하였으며, 수풀의 길이, 폭, 밀도 등을 측정하였다.

IV. 지표면 산란 모델 검증

Radiative transfer 이론은 지표면 위의 풀, 나무 층에 의한 체적 산란을 계산할 때 보편적으로 사용하는 방법으로써 비교적 정확한 산란 값을 제공한다고 알려져 있다. 지표면을 구성하는 식물 층에서부터 산란되는 전파의 세기를 계산하기 위해 전파 적분 방정식을 이용하여 전자계를 직접 계산하는 대신에, 여러 요소들로 이루어진 하나의 매체(식물 층)를 통해 전달되는 전파의 세기를 이용하여 산란계수를 계산하는 방법이다^[5].

그림 6에서 식물 층에 입사하는 전파의 세기와 산란하는 전파의 세기를 보여주고 있고, 땅과 식물 두 개의 층으로 구성된 산란 모델 그림이다. 이 모델에서 고려한 산란 방식들에는 (1) 토양-식물-토양, (2a) 토양-식물, (2b) 식물-토양, (3) 식물, (4a) 토양-나무기둥, (4b) 나무기둥-토양, (5) 토양에서의 전파 산란들이 있으나, 본 측정에서는 나무기둥이 없으므로 그림 6에 나타난 것처럼 5개의 산란 방식만이 있다. 여기서 θ 는 입사각을 나타내고, d 는 식물 층의 두께이다^[1].

산란 세기의 비로 투과 행렬 값을 얻고, 여기서 후방 산란 계수를 계산하게 되며, 이 모델의 자세한 수식 유도는 참고문헌 [1]에 있으므로 이 논문에서는

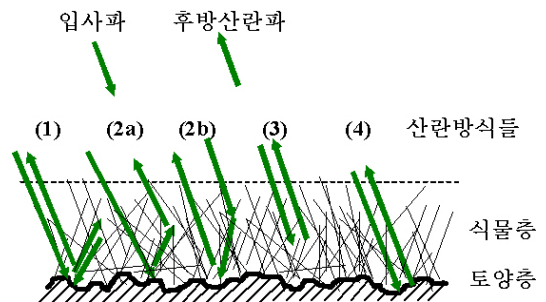


그림 6. 산란 방식들
Fig. 6. Scattering mechanisms.

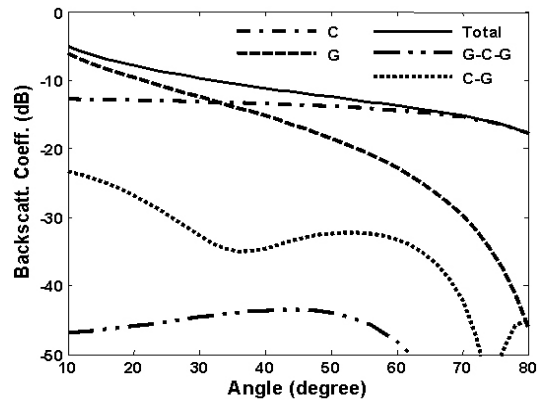
생략한다. 이 산란 모델은 단지 10개의 변수들(수분 함유량, RMS 표면 높이, 풀 층 높이, 잎의 밀도, 잎 길이, 잎 넓이, 나무 줄기 밀도, 나무 줄기 길이, 나무 기둥 밀도, 나무 기둥 길이)을 입력하면 된다. 본 연구에서는 나무가 없는 상태이므로 나무 줄기와 나무 기둥에 대한 입력 변수는 필요 없고, 단지 6개의 입력 변수만 있으면 된다.

위의 모델의 검증을 위해 측정은 두 가지 형식으로 진행하였다. 첫 번째 데이터는 일정 수분 함유량에서 여러 각도의 후방 산란 계수를 얻은 것이고, 두 번째 데이터는 일정한 각도에서 다른 수분 함유량에서의 후방 산란 계수를 얻은 것이다. 첫 번째 데이터는 하루 동안에 얻었고, 두 번째 데이터는 한 달 동안에 40°에서 11번의 측정을 수행한 것이다. 이 기간 동안에 여러 번 비가 내렸고, 토양의 젖고 마르는 과정이 있었다.

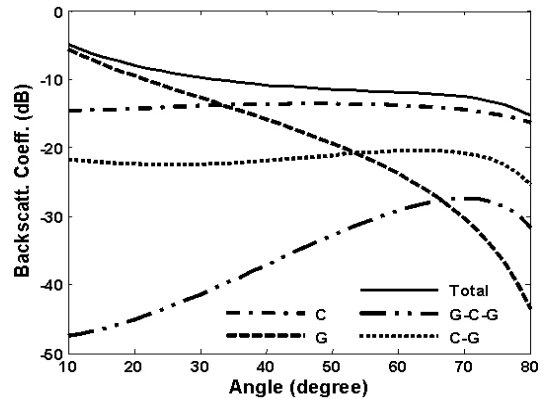
첫 번째 측정에서 얻은 측정 지역의 ground truth는 다음과 같다. RMS 표면 높이 s 는 2.35 cm, 땅의 수분 함유량(m_v)은 $0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 수풀의 높이는 72 cm, 잎의 길이는 60 cm, 잎의 폭은 2 cm, 잎의 밀도는 $800 \text{ 개}/\text{m}^3$ 이었다. 그림 7은 이상의 조건을 지표면 산란 모델에 적용하여 입사 각도에 따른 산란 계수의 변화를 계산한 결과로서, 편파 별로 전체 산란에 대한 각 산란 방식의 기여도를 나타낸 것이다. 모든 편파에서 지표면에서의 직접 산란(G)과 풀 층에서의 직접 산란(C)이 산란 계수 값을 결정하는 주요 변수임을 알 수 있었다.

그림 8은 입사 각도에 따른 측정값과 산란 모델의 계산 결과를 비교한 것으로서, vv 편파와 hh 편파에서는 측정값과 산란 모델 계산 값이 잘 맞는 것을 볼 수 있으며 vh 편파에서는 약 2~3 dB의 차이를 알 수 있다. 이는 산란 모델 계산에서 높은 차수의 다중 산란(multiple scattering)을 고려하지 않은 영향으로 보이며 vv 편파와 hh 편파의 경우 다중 산란에 의한 영향이 크지 않지만 vh 편파의 경우 고차 다중 산란의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다. 따라서, 지표면 산란 모델에서 교차 편파의 경우 대략 2~3 dB 정도의 보정이 필요함을 알 수 있다.

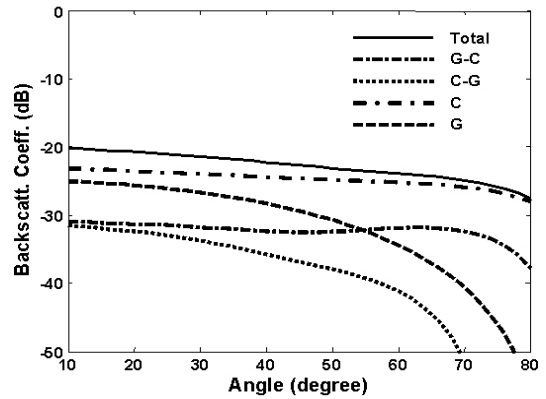
그림 9는 토양 수분 함유량(m_v)의 변화에 따른 산란 계수 측정값과 산란 모델을 비교한 것으로서, 측



(a) vv-편파
(a) vv-polarization



(b) hh-편파
(b) hh-polarization



(c) vh-편파
(c) vh-polarization

그림 7. 산란 모델의 산란 메커니즘별 후방 산란 계수 기여도

Fig. 7. Contributions of the scattering mechanisms to the backscattering coefficients.

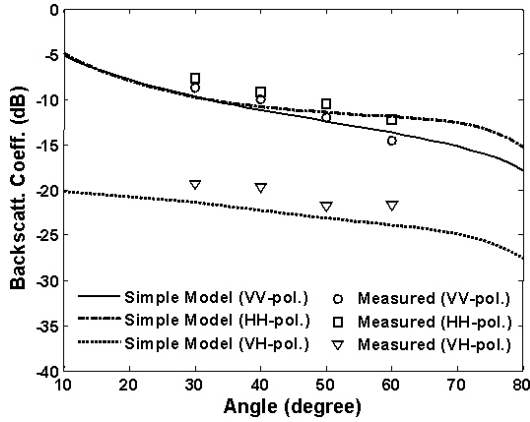


그림 8. 각도별 측정값과 모델 비교
Fig. 8. Comparison between measurements and model at various incidence angles.

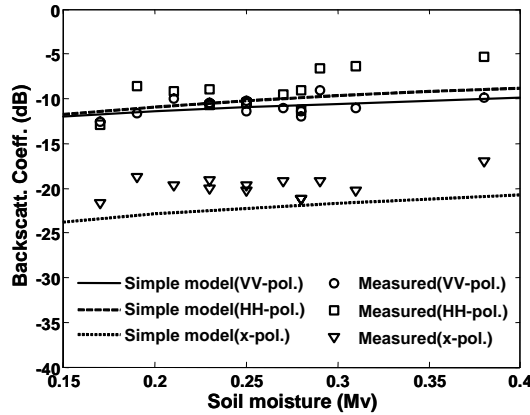


그림 9. 수분 함유량의 변화에 따른 측정값과 모델 비교
Fig. 9. Comparison between measurements and model for various soil moisture contents.

정은 지표 수분 함유량의 변화를 얻기 위해 한 달 동안 2~3일 간격으로 입사 각도를 40°로 고정시켜 측정 한 결과이다. 수분 함유량(m_v)은 0.17~0.38 cm^3/cm^3 이었으며 이는 토양의 마른 정도가 중간에서부터 비 온 후의 젖은 상태까지이며 마른 흙에 대해서는 측정을 하지 못하였다. 측정값과 산란 모델의 결과는 vv-, hh-편파에서 비교적 잘 일치하며, 교차 편파는 모델이 낮은 값을 보인다. 이는 교차 다중 산란이 모델에서 배제되었기 때문이며, 이 경우에 약 2~3 dB 정도를 보정할 경우 측정 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 교차 편파에서의 정확한 보정 정도를

결정하기 위해서는 다양한 상태의 지표면에 대한 측정 데이터를 획득하든지, 몬테카를로 방식의 수치 해석적 연구를 통해 향후에 더 연구해야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 R 밴드용(1.7~2.0 GHz) polarimetric scatterometer 시스템을 구현하여 한강 생태 공원 내 수풀 지형을 후방 산란 계수를 편파 별로 측정하였다. 고정된 각도(40도)에서 다양한 수분 함유량 상태 수풀의 후방 산란 계수와 고정된 수분 함유량에서 다양한 입사 각도의 데이터를 얻었다. 이전에 개발하였던 지표면 산란 모델의 정확성을 검토하기 위해서, 정확 후방 산란 계수를 얻는 외에 지표면의 상태 특성(ground truth)을 정확하게 추출하였다. 후방 산란 계수 측정값과 산란 모델을 비교한 결과 동일 편파(vv와 hh 편파)의 데이터는 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 교차 편파의 경우 2~3 dB의 편차가 있음을 알 수 있었다. 이는 산란 모델 계산에서 교차의 다중 산란(multiple scattering)을 고려하지 않은 영향으로 보이며 vv 편파와 hh 편파의 경우 다중 산란에 의한 영향이 크지 않지만 교차 편파의 경우 다중 산란의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다. 따라서, 지표면 산란 모델 교차 편파의 경우 2~3 dB 보정을 할 경우 산란 모델의 정확성을 높일 수 있을 것이다. 교차 편파의 보정 정도를 정확하게 예측하기 위해서는 향후에 다양한 환경에서의 측정 데이터를 더 확보할 필요가 있으며, 몬테카를로 방식의 수치해석적 연구 등을 통해서 연구의 범위를 확대해 나갈 필요가 있다.

감사의 글

저자들은 본 연구의 측정 데이터 수집에 도움을 준 홍익대학교 전파응용연구실의 현중철, 최재원, 김령모, 김상근에 감사합니다. 본 연구는 국방과학연구소 지원을 받는 KAIST 전파탐지연구센터의 도움으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Yisok Oh, Jin-Young Hong, and Sung-Hwa Lee, "A

simple microwave backscattering model for vegetation canopies", *JKEES*, vol. 5, no. 4, pp. 183-188, Dec. 2005.

[2] F. T. Ulaby, M. C. Dobson, *Handbook of Radar Scattering: Statistics for Terrain*, Artech House, 1989.

[3] 이성화, 정구준, 오이석, "지표면 산란모델 개발과 JPL AirSAR 측정 데이터와의 비교", 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, pp. 129-134, 2003년 3월.

[4] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Mi-*

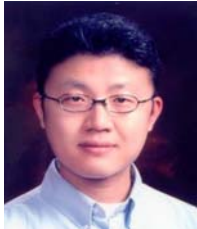
crowave Remote Sensing Active and Passive, vol. III, Artech House, 1986.

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

[6] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing Active and Passive*, vol. II, Artech House, 1986.

[7] L. Tsang, J. A. Kong, and R. T. Shin, *Theory of Microwave Remote Sensing*, John Wiley & Sons, 1985.

홍진영



2000년 2월: 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 홍익대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2002년 2월~2004년 8월: 삼성전기 중앙연구소 RF Lab.
 2003년 3월~현재: 홍익대학교 전자통신공학과 박사과정

[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나

오이석



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)

1994년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수

[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나