

토양 표면에서의 편파별 후방 산란 계수 측정을 통한 산란 모델과 Inversion 알고리즘의 검증

Verification of Surface Scattering Models and Inversion Algorithms with Measurements of Polarimetric Backscattering Coefficients of a Bare Soil Surface

홍진영 · 정승건 · 오이석

Jin-Young Hong · Seung-Gun Jung · Yisok Oh

요약

본 논문은 풀이 없는 지표면에서의 후방 산란 계수(backscattering coefficients)를 측정하고, 이 측정 결과를 이용하여 여러 표면 산란 모델들과 inversion 알고리즘의 성능을 비교, 분석하였다. 우선, R-밴드 주파수(1.7~2.0 GHz)에서 완전 편파 scatterometer를 이용하여 풀 층이 없는 지표면에 대해서 편파별로 후방 산란 계수를 측정하고, 동시에 수분 함유량과 표면 거칠기를 측정하였다. 그런 다음 측정된 지표면 변수들을 표면 산란 모델들에 입력하여 후방 산란 계수를 계산하고, 이 계산 결과를 측정 결과와 비교 분석하였다. 또한, inversion 알고리즘들을 적용하여 측정된 편파별 후방 산란 계수로부터 수분 함유량을 추출하고, 이 추출된 수분 함유량이 현장에서 측정된 수분 함유량과 잘 맞는지 여부를 확인하였다. 표면 산란 모델들 중에서 정확도가 높은 모델들을 제시하였으며, inversion 모델들의 계산 결과도 나타내었다.

Abstract

The backscattering coefficients of a bare soil surface were measured using an R-band polarimetric scatterometer, which were used to verify the validities of scattering models and inversion algorithms. The soil moisture contents and the surface roughness parameters (the RMS height and correlation length) were also measured from the soil surface. The backscattering coefficients were obtained from several scattering models with these surface parameters, and the computation results were compared with the measured backscattering coefficients. The soil moisture contents of the surface were retrieved from the measured backscattering coefficients, and compared with the measured surface parameters. This paper shows how well the scattering models agree with the measurements, and also shows the inversion results.

Key words : Surface Scattering Models, Inversion Algorithms, Backscattering Coefficient, Bare Soil Surface, Soil Moisture Content, Surface Roughness Parameters

I. 서론

최근 지구 전체에 대한 지표면의 에너지 흐름(지표 수분 함유량, 물 순환 상태 등)을 실시간으로 파악

하여 기상 예측의 정확도를 높이고, 홍수나 가뭄과 같은 자연 재해를 미리 예측하거나 감시하고자 하는 요구가 있으며, 이를 실현하기 위해 NASA의 JPL에서 위성 레이더를 이용하여 지구 표면 수분 함

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

· 논문 번호 : 20060908-107

· 수정완료일자 : 2006년 10월 30일

유량 측정을 위한 HYDROS 프로젝트를 추진하고 있다^[1]. 따라서, 지표면의 수분 함유량이나 표면 거칠기를 추출하는 inversion 알고리즘의 정확도가 요구되며, 이를 위해서 표면 산란 모델들의 정확도도 요구되고 있다.

표면 산란 모델로는 physical optics(PO) 모델, geometrical optics(GO) 모델, small perturbation method(SPM) 등의 고전적 모델들이 있고^[2], 최근에는 integral equation method(IEM)이 발표되어 많이 이용되고 있다^{[3],[4]}. 이들 이론적 모델들은 자연적 토양을 균질의 유전체 층으로 간주하고, 수식에서도 근사화를 이용하므로 정확도에 있어서 제한적이었다. 이론적 모델 외에 토양 측정데이터를 바탕으로 개발된 실험적 모델이 있고, 이들 모델들은 토양에 국한해서 일정 주파수와 일정 표면 상태에만 적용해야 하는 제약이 있으며, 대표적인 실험적 모델로는 OSU(Oh, Sarabandi and Ulaby, 2002) 모델^[5]과 Dubois, *et al.*의 모델^[6]이 있다. 이들 이론적 모델들이나 실험적 모델들을 이용하여 측정된 후방 산란 계수로부터 수분 함유량을 추출해내는 inversion 모델들도 발표되었는데, 표면 거칠기 변수의 영향을 무시하여 많은 오차를 가져 오기도 하였다. 최근에는 완전 편파 후방 산란 계수로부터 수분 함유량과 표면 거칠기를 동시에 추출하는 inversion 알고리즘들이 발표된 바 있다^{[6],[7]}.

본 논문은 레이더 지표면 산란 모델들을 측정 데이터와 비교 분석함으로써 모델들의 적용 범위와 정확성을 파악하고 후방 산란 계수 측정 데이터에서 수분 함유량을 추출하는 inversion 기법을 실행하고자 한다. 우선, 측정 지역을 선정한 후에 지표면의 수분 함유량과 표면 거칠기 변수들을 측정하고, R-밴드 scatterometer로는 그 지표면의 레이더 후방 산란 계수를 측정하였다. 지표면 변수들을 기존의 산란 모델들에 입력하여 후방 산란 계수를 계산하고, 이 값들을 측정된 후방 산란 계수들과 비교하였고, 이 결과로부터 산란 모델들의 정확성을 검토하였다. 마지막으로는 측정된 완전 편파 후방 산란 계수를 기존의 inversion 알고리즘들에 입력하여 지표면 특성 변수들(표면 거칠기와 수분 함유량)을 추출하고, 이 추출된 지표면 특성 변수들을 현장에서 측정한 지표면 특성 변수들과 비교하고, 정확성을 검토하였다.

II. 지표면 특성 측정

지표면에 대한 후방 산란 계수 측정을 위해서는 보정된 레이더 시스템에 의한 정확한 후방 산란 계수 측정뿐만 아니라 토양 수분 함유량, 표면 높이 자기 상관 함수(surface-height autocorrelation function)의 형태와 표면 RMS 높이, 표면 상관 길이(correlation length) 등과 같은 지표면 특성(ground truth)을 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 지표면 후방 산란 모델에는 검증된 이론적인 모델들과 실험적인 모델들이 있으며, 이 모델들은 지표면 특성(ground truth)이 입력 변수이며 주파수와 입사각에 따라 후방 산란 계수를 계산하는 방식이다. 입력 변수 중 지표면의 상대 유전율(dielectric constant)은 직접 측정을 통해 구할 수도 있으나, 보통은 지표면 수분 함유량을 측정된 후에 실험식을 통해 상대 유전율을 얻는 방법을 이용하며 본 논문에서도 실험식을 이용하였다^[8].

우선, 지표면 토양의 거칠기를 나타내는 표면 높이 특성의 확률 밀도 분포(PDF: Probability Density Function)와 자기 상관 함수(autocorrelation function)를 얻기 위해서는 일정 거리만큼의 지표면 높이를 정확하게 측정해야 함으로, 이를 위해 지표면 높이 측정기(surface profiler)를 제작하였다. 제작된 surface profiler는 실제 지표면의 높이를 측정하는 장비로서 전체의 길이가 1.1 m이며, 이 길이의 알루미늄 사각봉에 1.1 m×30 cm의 플라스틱 판과 이를 지지하는 지지대를 연결하였다. 알루미늄 사각봉에는 0.5 cm 간격으로 201개의 구멍이 뚫려 있고, 이 구멍들에는 20 cm의 길이와 1 mm 지름을 갖는 끈고 단단한 철사가 오르내릴 수 있도록 하였다. 플라스틱 판에는 모눈 종이를 붙이고, 철사의 윗부분이 모눈 종이를 배경으로 하여 높낮이를 수치로 읽을 수 있도록 했다. 측정하고자 하는 지표면에 profiler를 수평으로 내려놓으면 철사들이 지표면과 같은 높낮이로 나열되게 된다. 이를 디지털 카메라로 찍은 후 그 영상에서 높이를 숫자로 얻을 수 있고, profiler를 일렬로 연속해서 5번 반복 측정함으로써 5 m의 지표면 높이 데이터를 정확하게 얻을 수 있었다. 지표 높이 데이터로부터 분포 함수(PDF)를 얻고, 이 PDF의 표준 편차를 구하면 s (RMS 높이)를 얻게 된다. 또한, 측정된 데이터의 정

규화된 자기 상관 함수(normalized autocorrelation function)를 계산한 후 이 함수의 $1/e$ 에 해당하는 값이 상관 길이(correlation length) l 을 의미한다^[2]. 측정된 지표면 profile로부터 0.0235 m의 s (RMS 높이)와 0.35 m의 l (correlation length)을 얻었다.

지표면 산란 모델의 입력 변수인 토양의 상대 유전율을 구하기 위해서는 토양의 수분 함유량뿐만 아니라 토양의 성분도 알아야 한다. 우선, 측정 지역의 토양 수분 함유량을 측정하기 위해 지표면 깊이 0~5 cm의 토양 샘플 3개씩을 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 계산하였다^[9]. 측정된 토양의 밀도는 대략 $1.2(\text{g}/\text{cm}^3)$ 이었으며 측정 기간 동안의 측정된 수분 함유량은 $0.17\sim 0.34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 의 범위 내의 값이었다. 비가 온 후의 매우 젖은 토양의 상태가 대략 $0.34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 에 해당하고, 보통 정도로 마른 토양의 수분 함유량은 대략 $0.17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 이 된다. 약 한 달간의 측정 기간 동안 수 차례 비가 내림으로써 바짝 마른 상태의 토양에 대한 측정은 하지 못했다.

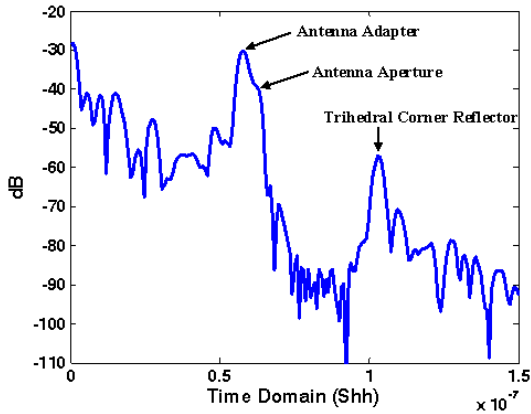
토양의 성분은 모래(sand)와 미사(silt), 점토(clay)로 나눌 수 있으며 각각의 성분을 추출하는 방법으로는 비중계(hydrometer)를 이용하여 측정하는 방법이 있다. 우선 비이커에 적당량의 흙(예를 들면, 100 g)과 물을 넣어 섞고, 메스 실린더에 부은 후에 1 리터가 되도록 물로 채운 후에 분산제를 넣어 잘 저어줘서 흙 알갱이들이 서로 붙지 않고 흩어지도록 만든다. 잘 저은 직후 비중계를 넣어 눈금을 재고, 40 초 경과 후 비중계 눈금과 2시간 경과후의 눈금을 각각 측정한다. 이는 40초 이전에 가라 앉은 것은 모래(sand)로, 40초 이후부터 2시간 이내에 가라 앉은 것은 미사(silt)로 간주하고, 점토는 2시간 이후에도 가라 앉지 않는 것으로 간주한다. 이 비중계 눈금들을 이용하여 토양비(모래, 미사, 점토)를 100분율로 나타내게 되고, 수분 함유량에서 토양의 상대 유전율을 얻을 때에 이 토양비를 이용하게 된다. 비중계를 얻기 어렵거나, 비중계의 눈금을 읽기 어려운 경우에는 위의 원리를 이용하여 약식으로 토양의 성분비를 구할 수도 있다. 측정 지역에서 채취한 토양 성분의 비는 모래 33.9 %, 미사 42.9 %, 점토 23.2 %이었으며, 이 토양은 loam으로 판명되었다^[9].

III. 후방 산란 계수 측정

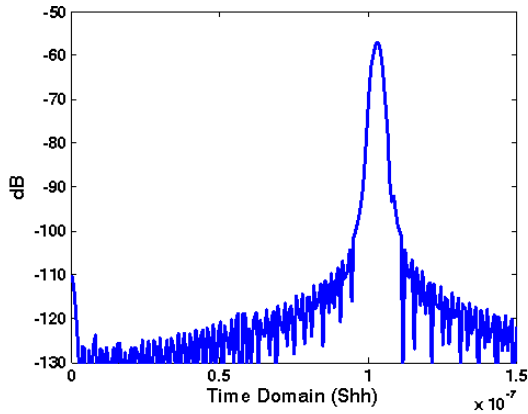
편파별 후방 산란 계수를 측정하기 위해 R-밴드 (1.7~2.6 GHz, cut-off 주파수=1.372 GHz) scatterometer 시스템을 구현하였다. Scatterometer의 송수신기로는 네트워크 분석기(HP8753D)를 사용하였고, R 밴드 표준 혼 안테나 두 개를 동축선으로 송수신기에 연결하여 간단하게 full polarimetric scatterometer 시스템을 구성하였다. 측정 주파수로는 1.85 GHz를 중심으로 500 MHz의 대역폭에서 측정함으로써, Fourier 변환을 이용하여 time gating 기능을 이용할 수 있었고, 이 기능으로 맨땅에 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 한강생태공원의 지표 지형으로 선정하였고, 여기에 타워(3.6 m)를 설치하였으며, 안테나 세트를 삼각대에 고정하여 타워 위에 설치한 후 각도 별(30°, 40°, 50°, 60°)로 독립적인 지표면 측정 샘플을 얻기 위해 30번씩 안테나를 회전하면서 vv-, hh-, vh-, hv-편파별로 측정하였다. 30도 이내의 각도(0, 10, 20도)에서는 타워의 구조와 지면에서의 직접 반사파 때문에 측정이 어려웠고, 70도 이상(70, 80도)에서는 준비된 지표면 바깥에서의 산란과 때문에 정확한 측정 결과를 얻기 어려워서 이 각도 범위(30°, 40°, 50°, 60°)에서만 측정값을 얻었다. 지표면에서 안테나까지의 높이(h)는 4.8 m이었으며 30°~60°의 입사각의 변화에서 후방 산란 계수를 한번 측정하였고, 입사각을 고정(40°)시키고 여러 번에 걸쳐 토양의 수분 함유량 변화에 따른 후방 산란 계수를 측정하였다. 보정용 target으로는 trihedral 전파 반사기(corner reflector)를 사용하였다.

빔의 입사각을 40도로 했을 때 빔이 지면에 도달하는 중심거리(r_0)는 6.27 m가 되고 이를 시간 영역으로 환산하여 2배를 취해 주면 빔이 지면에서 되돌아오는 왕복시간인 41.5 ns를 얻을 수 있다. Scatterometer 시스템 보정을 위해 trihedral 전파 반사기를 1 m의 스티로폼 위에 놓고 측정함으로써 지면에서의 응답과 반사기에서의 응답을 구분하였으며 빔이 지면을 보는 것과 같은 거리인 r_0 에 반사기를 위치하고서 측정하였다. 다음 그림 1(a)는 시간 영역에서 전파 반사



(a) 시간 영역에서의 전파 반사기 측정
(a) Reflector measurement at time domain



(b) Time-gating 적용 후 시간 영역에서의 측정
(b) Time gating reflector measurement

그림 1. 시간 영역에서의 측정 데이터 (hh-편파)
Fig. 1. Measured data at time domain (hh-pol.).

기에 대한 hh(horizontal to horizontal)-편파를 측정할 것이며 안테나 어댑터에서의 반사 시간은 62.5 ns이고 전파 반사기에서는 반사 시간이 104 ns이다. 정확한 보정을 위해 time gating 기능을 사용하여 그림 1(b)와 같이 순수한 전파 반사기에서의 응답을 측정하였다.

측정 데이터의 보정 방법은 위상은 고려하지 않고 크기만을 보정하는 간단한 방법을 이용하였으며 전파 반사기의 전파 반사 측정값과 이론적인 radar cross section(RCS) 값, 지표면에서의 전파 반사 측정값과 illumination integral(Aill) 계산 값을 이용하여 지표면의 레이더 산란 계수 값을 계산하였다. Illumination integral(Aill)을 계산하기 위해서는 시스템 사

용하는 standard 혼 안테나의 모든 각도 별 이득(gain)을 얻어야 함으로 principal E-면과 H-면에서 얻은 측정 패턴들을 interpolation하여 3차원으로 안테나 이득 함수를 계산하였다. 측정결과 Standard 혼 안테나의 H-plane HPBW(Half-Power Beam-Width)는 30°이고, E-plane의 HPBW는 28°였다.

지표면 측정에서는 안테나의 빔 패턴을 고려하여 입사각이 40°일 경우 footprint는 시간 영역에서 97~122 ns 범위이며 footprint 이외의 영역은 네트워크 분석기의 time gating 기능으로 제거한 후 측정하였다. 입사각이 30°, 50°, 60°일 경우에도 각각의 각도 별로 footprint를 계산하여 해당하는 영역만을 time gating하여 측정함으로써 footprint 이외의 잡음 성분을 제거하여 정확한 데이터를 얻을 수 있었다. 측정은 독립적인 지표면 샘플을 얻기 위해 측정 타위를 중심으로 회전하면서 각도 별로 30번씩 측정하였다. 주파수의 시작 부근과 끝 부근에서는 Fourier 변환 과정에서 aliasing 효과에 의한 잡음의 영향이 있기 때문에 측정 데이터에서 1.7~2.0 GHz 대역만 선택하여 사용하였고, 30개 데이터의 평균값을 취하였다.

IV. 지표면 산란 모델

지표면 토양에서의 전파 산란 모델로는 실험적 모델인 OSU 모델, Dubois 모델과 이론적 모델인 physical optics(PO), geometrical optics(GO), small perturbation method(SPM), integral equation method(IEM) 등이 있다.

OSU 모델은 기존의 이론 모델들과 수많은 실험 데이터를 바탕으로 개발된 모델로서 풀 없는 토양의 vv-, hh-, vh-, hv-편파별 후방 산란 계수뿐만 아니라 위상 상관도(α)와 동일 편파 위상 차이(ζ)도 예측하도록 만든 모델이다^[5].

$$\sigma_{vh}^0 = 0.11 m_v^{0.7} (\cos \Theta)^{2.2} \{1 - \exp[-0.32(ks)^{1.8}]\} \quad (1)$$

$$p = 1 - \left(\frac{\Theta}{90^\circ}\right)^{0.35 m_v^{0.65}} \cdot e^{-0.4(ks)^{1.4}} \quad (2)$$

$$q = 0.10 [ks/kl + \sin(1.3\Theta)]^{1.2} \cdot \{1 - \exp[-0.9(ks)^{0.8}]\} \quad (3)$$

교차 편파(vh-편파) 후방 산란 계수와 비례 계수

p, q 로부터 다음과 같이 vv-, hh- 편파 후방 산란 계수를 얻을 수 있다.

$$\sigma_{vv}^0 = \sigma_{vh}^0 / q, \quad \sigma_{hh}^0 = p \sigma_{vv}^0 \quad (4)$$

Dubois 모델은 OSU 모델과 함께 대표적인 실험 모델로서 지표 토양에서의 동일 편파 후방 산란 계수를 지표면의 거칠기와 상대 유전율, 입사각, 주파수의 함수로 나타낸 모델이다^[6]. Dubois 모델에서 hh-, vv-편파 후방 산란 계수는 다음의 두 식 (5), (6)으로 나타내어지고, 교차 편파에 관한 식은 없고, 적용 범위 또한 한정돼 있다. 적용 가능한 범위는 주파수 1.5~11 GHz, 지표 높이 표준 편차(RMS height) 0.3~3 cm, 입사각 30°~65°의 영역이다.

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5}\Theta}{\sin^5\Theta} 10^{0.028^\circ \tan\Theta} (ks \sin\Theta)^{1.4} \lambda^{0.7} \quad (5)$$

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3\Theta}{\sin\Theta} 10^{0.046^\circ \tan\Theta} (ks \sin^3\Theta)^{1.1} \lambda^{0.7} \quad (6)$$

이론적 모델인 PO, GO, SPM은 각 모델간 유효 영역이 존재하며 각 영역은 다음 식과 같다. 여기서 m 은 RMS slope을 나타낸다.

$$\text{SPM: } m \leq 0.3, \quad ks \leq 0.3, \quad kl \leq 3.0 \quad (7)$$

$$\text{PO: } kl \geq 6.0, \quad l^2 \geq 2.76s\lambda, \quad m \leq 0.25 \quad (8)$$

$$\text{GO: } kl \geq 6.0, \quad l^2 \geq 2.76s\lambda, \quad (2ks \cos\Theta)^2 \geq 10 \quad (9)$$

본 논문에서는 측정지역 지표면 변수인 ks 가 0.91, kl 이 13.56이므로 이 영역에 해당하는 PO 모델을 적용하였으며 상대적으로 유효 영역이 넓은 IEM 모델 또한 측정 결과와 비교하였다. PO 모델은 Kirchhoff Approximation(KA)의 적분항을 근사화시키는 한 가지 방식이며, KA는 경계 조건을 적용할 때 접선(tangent plane) 근사법을 사용한다. 다음 식은 0차 근사적 PO 모델을 나타내는 식이며 교차 편파의 산란 계수는 계산할 수 없다^[2].

$$\sigma_{aa}^0 = \frac{k_0^2}{\pi} \cos^2\Theta |R_{al}|^2 e^{(-2ks \cos\Theta)^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2sk \cos\Theta^{2n}}{n!} \cdot I \quad (10)$$

여기서 R_a 는 편파별 Fresnel 반사 계수이며, I 는 Gaussian과 Exponential 상관 함수를 Fourier 적분하여

지표면 거칠기 스펙트럼(roughness spectrum)의 형태로 표현한 것이며 다음 식 (11)과 같다.

$$I_G = \frac{\pi l^2}{n} e^{-\frac{(kl \sin\Theta)^2}{n}},$$

$$I_E = \frac{\pi n l^2}{[n^2 + 2(kl \sin\Theta)^2]^{1.5}} \quad (11)$$

IEM 모델은 tangential 표면 전계에 대한 적분식의 해를 구하는 방식으로 개발되었으며 지표면의 거칠기가 $ks < 3$ 경우는 식 (12)가 적용된다^[3].

$$\sigma_{qp}^0 = \frac{k_z^2}{2} \exp[-2(k_z s)^2] \cdot \sum_{n=1}^{\infty} |I_{qp}^n|^2 \frac{W^{(n)}(-2k_x, 0)}{n!} \quad (12)$$

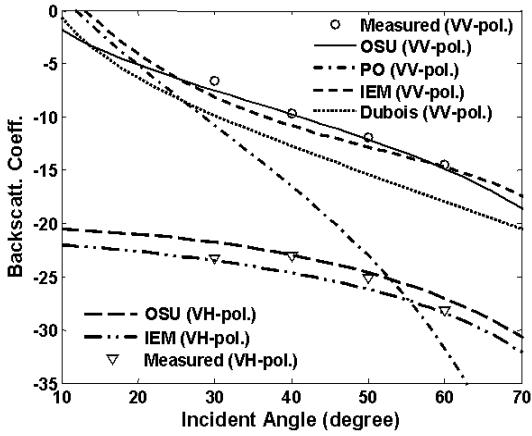
$$I_{qp}^n = (2k_z s)^n f_{qp} \exp[-(k_z s)^2] + \frac{(k_x s)^n}{2} [F_{qp}(-k_x, 0) + F_{qp}(k_x, 0)] \quad (13)$$

여기서, p 와 q 는 각각 수직 또는 수평 편파를 의미하며 $k_z = k \cos\theta$, $k_x = k \sin\theta$, $f_{vh} = 2R_v / \cos\theta$, $f_{hv} = -2R_h / \cos\theta$, $f_{vh} = f_{hv} = 0$, F_{qp} 는 [3, Appendix A]에 주어져 있으며 $W^{(n)}(-2k_x, 0)$ 은 지표면의 roughness spectrum으로 표면 높이 분포 상관함수의 Fourier 변환 형태로 Gaussian과 Exponential의 두 가지 형태로 표현된다^[4].

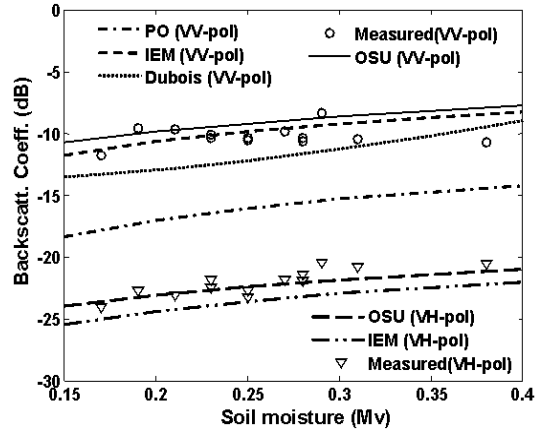
V. 측정 결과와 산란 모델 비교

R-밴드용(1.7~2.6 GHz) polarimetric scatterometer 시스템을 구현하여 한강생태공원의 풀 없는 토양에 대한 후방 산란 계수를 편파 별(vv-, vh-, hv-, hh-편파)로 측정하였으며 측정은 두 가지 형식으로 진행하였다. 첫 번째 데이터는 일정 수분 함유량에서 여러 각도의 후방 산란 계수를 얻은 것이고, 두 번째 데이터는 일정한 각도에서 수분 함유량의 변화에 따른 후방 산란 계수를 얻은 것이다. 첫 번째 데이터는 하루 동안에 얻었고, 두 번째 데이터는 한달 동안에 40°에서 13번의 측정을 수행한 것이다. 이 기간 동안에 여러 번 비가 내렸고, 토양의 젖고 마르는 과정이 있었다.

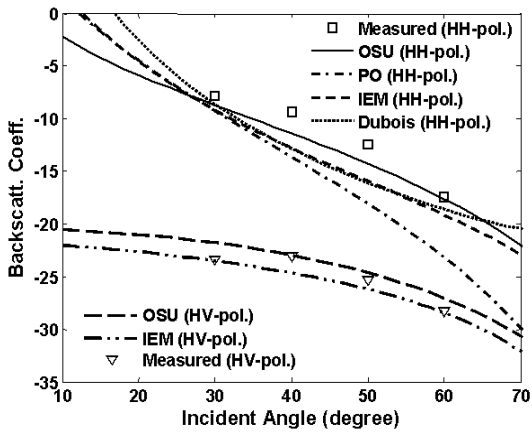
첫 번째 측정에서 얻은 측정 지역의 ground truth는 s (RMS 높이)가 2.35 cm, 상관 길이 l 은 0.35 m, 땅의 수분 함유량(m_v)은 0.21 cm³/cm³이며 토양 성분은 모래가 33.9 %, 미사가 42.9 %, 점토가 23.2 %인 loam 토



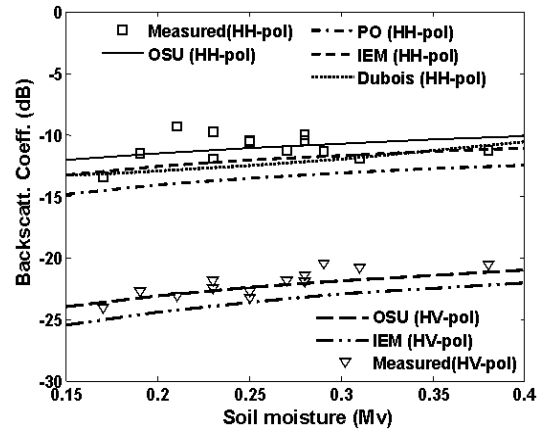
(a) VV-, VH-편파
(a) VV-, VH-polarization



(a) VV-, VH-편파
(a) VV-, VH-polarization



(b) HH-, HV-편파
(b) HH-, HV-polarization



(b) HH-, HV-편파
(b) HH-, HV-polarization

그림 2. 각도 별 측정값과 모델 비교

Fig. 2. Comparison between measurements and models at various incidence angles.

양으로 판명되었다. 그림 2(a), (b)는 입사 각도(30°, 40°, 50°, 60°)에 따른 후방 산란 계수 측정 데이터와 산란 모델을 비교한 것으로 OSU 모델과 IEM 모델은 측정 결과와 비교적 잘 맞는 것을 볼 수 있으며, PO 모델의 경우 입사 각도가 커질수록 측정값과 큰 차이를 보였으며, Dubois 모델의 경우 각도 별 최대 4 dB 정도의 측정값과 오차가 있었다. 교차편파에서는 OSU 모델과 IEM 모델 둘 다 비교적 측정값과 잘 일치하였다.

그림 3(a), (b)는 토양 수분 함유량(m_v)의 변화에 따른 후방 산란 계수 측정값과 PO, IEM, OSU, Dubois

그림 3. 수분 함유량의 변화에 따른 측정값과 모델 비교

Fig. 3. Comparison between measurements and models for various soil moisture contents.

모델을 비교한 것으로서, 측정은 지표 수분 함유량의 변화를 얻기 위해 한달 동안 2~3일 간격으로 입사각도를 40°로 고정시켜 측정한 결과이다. 수분 함유량(m_v)은 $0.17 \sim 0.38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 이었으며 이는 토양의 마른 정도가 중간에서부터 젖은 상태까지이며 마른 흙에 대해서는 측정을 하지 못하였다. 그림 3에서 측정값과 OSU, IEM 모델이 각각의 편파에 따라 비교적 잘 일치하였으며 PO 모델은 측정값과 최대 7.5 dB의 큰 오차를 보였으며, Dubois 모델의 경우 비교적 잘 일치하였으나 vv-편파의 경우 측정값과 최대 5 dB의 오차가 발생하였다.

후방 산란 계수 측정값과 산란 모델간의 비교는 많은 연구가 수행되고 있으며 일반적으로 고전적인 산란 모델들(PO, GO, SPM)은 적용 영역이 제한될 뿐만 아니라 각각의 유효 영역 내에서도 일반적으로 OSU 모델과 IEM 모델에 비해 오차가 크다고 알려져 있다^[10]. 본 논문의 측정값과 모델간 비교 결과 또한 기존의 연구 내용과 유사한 결과를 나타내었다.

VI. Inversion 기법

SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템을 이용한 측정값에서 지표면 특성(ground truth)을 추출하는 Inversion 모델에 대한 중요성이 대두되고 있다. 후방 산란 계수 측정값으로 토양의 수분 함유량(M_v)을 추출할 수 있다면 농업이나 수문학 등에 활용할 수 있고, 지표면 전체의 수분 함유량을 실시간으로 파악하여 기상 예측의 정확도 및 홍수나 가뭄과 같은 자연 재해를 미리 예측하거나 감시할 수 있다^[1].

지표면 산란 모델 중 OSU 모델과 Dubois 모델을 이용하여 수분 함유량과 s (RMS 높이)를 direct inversion 하였으며^[7] OSU 모델의 inversion 과정 순서도는 그림 4와 같고, Dubois 모델은 식 (5), (6)의 두 방정식을 연립하여 수분 함유량과 s 를 구하였다.

OSU모델의 경우, 식 (1)을 k_s 에 관해 정리하면 식 (16)과 같이 되고, 식 (14)를 식 (2)에 대입하면 다음

식 (15)와 같이 M_v 에 관한 비선형 방정식을 구할 수 있다.

$$k_s(\Theta, M_v, \sigma_{vhm}^0) = \left[-3.125 \ln \left\{ 1 - \frac{\sigma_{vhm}^0}{0.11 M_v^{0.7} (\cos \Theta)^{2.2}} \right\} \right]^{0.556} \cdot \left(\frac{\Theta}{90^\circ} \right)^{0.35 M_v^{0.65}} \cdot e^{-0.4 [k_s(\Theta, M_v, \sigma_{vhm}^0)]^{1.4}} - p_m = 0 \quad (15)$$

p_m 은 측정된 동일 편파 비이며 σ_{vhm}^0 은 측정된 교차 편파 후방 산란 계수를 의미한다. 식 (15)에 의해 M_v 를 결정하면 식 (14)에 의해 k_s 를 구할 수 있다.

표 1은 scatterometer 시스템으로 측정된 후방 산란 계수로부터 OSU 모델과 Dubois 모델을 이용한 inversion 알고리즘을 이용하여 토양 수분 함유량을 추출한 결과이다. 측정된 수분 함유량과 OSU 모델의 경우 최대 $0.11 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 의 오차를 보였으며, Dubois 모델의 경우 최대 $0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 의 측정값과 오차를 보였다. 전체적인 측정 결과와 비교했을 때 두 알고리즘 모두 정확도가 낮은 것을 알 수 있는데, 이는 inversion 알고리즘 자체에서 비롯된 오차도 있겠지

표 1. 토양 수분 함유량에 대한 계산값과 측정값 비교 Table 1. Comparison between measurements and models for soil moisture contents.

토양의 수분 함유량 (M_v)		
측정값	OSU 모델을 이용한 Inversion 결과	Dubois 모델을 이용한 Inversion 결과
0.17	0.21	0.27
0.19	0.24	0.32
0.21	0.16	0.18
0.23	0.24	0.30
0.23	0.17	0.14
0.25	0.14	0.19
0.25	0.14	0.20
0.27	0.22	0.29
0.28	0.19	0.18
0.28	0.17	0.16
0.29	0.36	0.36
0.31	0.21	0.28

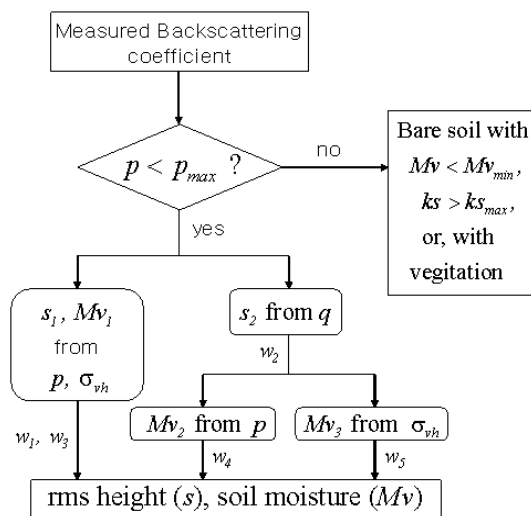


그림 4. 측정값에서 M_v 와 s 를 추출하는 순서도 Fig. 4. Flowchart for retrieving M_v and s .

만, 수분 함유량 측정 과정에서 생긴 오차라든지, inversion 알고리즘에 이용된 산란 모델에서 비롯된 오차들이 포함되어 있을 것이다.

VII. 결 론

본 논문은 후방 산란 계수 측정 방법과 지표면 특성(ground truth) 측정 방법을 제시하였으며 측정은 한강생태공원의 풀 없는 지표 지형을 2~3일 간격으로 한 달간 R-밴드 polarimetric scatterometer 시스템을 구현하여 측정하였다. 고정된 각도(40도)에서 토양의 수분 함유량 변화에 따른 지표면 후방 산란 계수와 고정된 수분 함유량에서 다양한 입사 각도(30°~60°)의 변화에 따른 후방 산란 계수 측정 데이터를 얻었다. 측정 잡음을 제거하기 위해 time gating 방법을 적용했으며 보정 target은 자체 제작한 trihedral corner reflector를 사용하였다.

토양 표면 산란 모델에는 실험적 모델인 OSU 모델과 Dubois 모델, 이론적 모델인 PO, GO, SPM, IEM 모델 등이 있으며 한강생태공원의 측정 지역에 대한 후방 산란 계수 값과 산란 모델간의 비교 결과 OSU 모델과 IEM 모델은 동일 편파 및 교차 편파 모두 비교적 측정값과 잘 일치하였으며, Dubois 모델은 입사각도 및 수분 함유량의 변화에 대해 최대 5 dB의 오차가 발생하였으며, 특히 PO 모델은 입사각이 클 때에 대단히 큰 오차를 보였다.

측정된 후방 산란 계수로부터 OSU 모델과 Dubois 모델을 이용하여 토양 수분 함유량을 추출한 결과, 두 모델 모두 정확도가 낮은 것을 알 수 있었다. OSU 모델의 경우, 측정된 수분 함유량과 최대 0.11 cm³/cm³의 오차를 보였으며 Dubois 모델의 경우 최대 0.13 cm³/cm³의 오차가 발생했다. 이는 inversion 알고리즘 자체에서 비롯된 오차도 있겠지만, 수분 함유량 측정 과정에서 생긴 오차라든지, inversion 알고리즘에 이용된 산란 모델에서 비롯된 오차들이 포함되어 있을 것이다. 따라서, 이러한 오차의 원인 분석 및 오차의 범위를 좁히는 연구가 진행되고 있으며 향후 보다 정확한 알고리즘의 개발 및 ground truth 측정 방법을 개선하여 후방 산란 계수로부터 토양의 수분 함유량을 얻음으로써 농업이나 수문학 등에 활용할 수 있고 또한, 지표면 전체의 수분 함유

량을 실시간으로 파악함으로써 기상 예측의 정확도 및 홍수나 가뭄과 같은 자연 재해를 미리 예측하거나 감시하는 분야에도 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

저자들은 본 연구의 측정 데이터 수집에 도움을 준 홍익대학교 전파응용연구실의 현종철, 최재원, 김령모, 김상근에 감사한다. 본 연구는 국방과학연구소 지원을 받는 KAIST 전파탐지연구센터의 도움으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] D. Entekhabi et al., "The hydrosphere state(hydros) satellite mission: An earth system pathfinder for global mapping of soil moisture and land freeze/thaw", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, no. 10, pp. 2184-2195, Oct. 2004.
- [2] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, vol. II, Artech House, Norwood, MA, U.S.A., 1982.
- [3] A. K. Fung, *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Artech House, Boston, MA, 1994.
- [4] A. K. Fung, Aongqian Li, and K. S. Chen, "Backscattering from a randomly rough dielectric surface", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, Mar. 1992.
- [5] 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, Jun. 2002.
- [6] P. C. Dubois, J. van Zyl, and T. Engman, "Measuring soil moisture with imaging radars", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp. 915-926, Jul. 1995.
- [7] Y. Oh, "Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, no. 3, pp. 596-601,

Mar. 2004.

[8] T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, M. A. El-Rayes, and L. Wu, "Microwave dielectric behavior of wet soil. Part-I: Empirical models and experimental observation", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 23, pp. 25-34, Jan. 1985.

[9] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Micro-*

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

[10] Jin-Young Hong, Yisok Oh, "Examination of the semi-empirical polarimetric scattering model using field-measured data and existing theoretical model", models *IEEE IGARSS2005*, vol. 3, pp. 2211-2214, Jul. 2005.

홍진영



2000년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 2002년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)
 2002년 2월~2004년 8월: 삼성전기 중앙연구소 RF Lab.
 2003년 3월~현재: 홍익대학교 전파통신공학과 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 컴퓨터공학과 (공학박사)

1994년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나

정승건



2006년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)
 2006년 2월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나