

지표면 산란 계수 예측을 위한 정확한 지표면 거칠기 변수 측정 방법 및 오차 분석

Precise Measurement Method and Error Analysis with Roughness Variables for Estimation of Scattering Coefficients

권순구 · 황지환 · 오이석 · 홍성욱*

Soon-Koo Kweon · Ji-Hwan Hwang · Yisok Oh · Sungwook Hong*

요 약

지표면의 후방 산란 계수를 계산하는 지표면 산란 모델의 입력 변수로는 크게 수분함유량과 지표면 거칠기가 있고, 산란 계수 계산에 있어 지표면 거칠기의 영향이 수분함유량의 영향보다 크다. 본 연구에서는 지표면 거칠기의 정확한 측정 방법을 제시하고, 측정 오차를 분석한다. 이를 위하여 대표적인 지표면 거칠기 측정 장치인 pin-board profiler(1 m, 0.5 cm 간격)와 laser profiler(1 m, 0.25 cm 간격)를 이용하여 실제 지표면을 측정하였다. 두 측정 장치의 평균 차이는 유효 높이(RMS height)가 0.097 cm, 상관 길이(correlation length)가 1.828 cm이었다. 그리고 상관 함수, 상대오차를 분석한 결과, laser-profiler의 반복 측정에 대한 장치의 안전성이 더 좋았다. 두 측정 장치의 차이가 후방 산란 계수에 미치는 영향을 분석하기 위해 지표면 산란 모델을 이용하여 비교한 결과, 입사각 20~60°에서 1 dB 이하의 차이를 보였다.

Abstract

The input parameters of scattering models for computing the backscattering coefficients of earth terrains are mainly soil moisture and surface roughness. The backscattering coefficients of soil surfaces are more sensitive to surface roughness than soil moisture. In this study, we propose a precise measurement method for roughness parameters and analyze measurement errors. We measured surface roughness using a pin-board profiler(1 m, 0.5 cm interval) and a laser profiler(1 m, 0.25 cm interval). The measurement differences between two profilers in an average sense are 0.097 cm for root-mean-square (RMS) height and 1.828 cm for correlation length. The analysis of the correlation functions and relative errors shows that the laser measurements are more stable than the pin-board measurements. The differences of the calculated backscattering coefficients using a surface scattering model between pin-board and laser profiler measurements are less than 1 dB.

Key words : Surface Roughness, RMS Height, Correlation Length, Scattering Coefficients

I. 서 론

위성 SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템을 이용

하여 측정한 지표면의 후방 산란 계수 데이터를 분석하기 위해서 다양한 지표면 산란 모델을 개발하고 사용한다. 이러한 지표면 산란 모델은 수분함유량,

「본 논문은 국가기상위성센터의 위성자료의 예보 및 응용기술개발을 위한 기술개발과제 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

*국가기상위성센터(National Meteorological Satellite Center)

· Manuscript received October 17, 2012 ; Revised December 11, 2012 ; Accepted December 26, 2012. (ID No. 20121017-116)

· Corresponding Author : Yisok Oh (e-mail : yisokoh@hongik.ac.kr)

지표면 거칠기 등 지표면 정보 추출을 위해 사용된다. 그러므로 정확한 산란 계수를 구하기 위해선 정확한 입력 변수 측정이 동반되어야 한다.

산란 모델 중 나지(bare soil)에서의 산란 모델의 입력 변수는 일반적으로 수분함유량과 지표면 거칠기가 있다. 지표면 거칠기는 상관 함수(correlation function) 형태, 유효 높이(RMS height)와 상관 길이(correlation length) 변수로 정의된다^[1]. 지표면의 수분함유량의 경우, 흙을 채취하거나 전자 probe를 이용해 유전율을 측정하는 등 다양한 측정 방법 및 장비가 존재하며, 정확도 또한 매우 높은 편이다. 반면에 지표면 거칠기는 측정 길이 및 장치 오차에 의해 정확도가 떨어진다.

측정 길이 오차는 짧은 지표면 거칠기 측정거리에 의한 오차로 측정 길이를 정의하기 위해서 임의의 지표면을 생성한 후 길이에 따른 유효 높이(h_{rms})와 상관 길이(l)의 변화를 계산한 결과, 유효 높이의 경우 40 l 이상, 상관 길이의 경우 200 l 이상의 측정 길이가 필요한 것을 알 수 있었고^[2], 실제 지표면 정보 측정을 통해 측정 길이에 따른 지표면 거칠기 변수 변화를 관측하여 측정 길이에 따른 오차를 분석하였다^[3]. 또한 측정 길이가 짧을 경우에 발생하는 오차에 대한 후방 산란 계수 변화를 계산하는 등 수집 길이에 대해 많은 연구가 이루어진 것을 알 수 있다^[4].

측정 장치 오차는 그림 1과 같이 대표적인 지표면 거칠기 측정 장치인 pin-board profiler의 오차와 laser profiler의 오차로 나누어 설명한다. Pin-board profiler를 이용하여 측정하는 경우에는 핀에 의해 토양이 파손되거나 카메라를 이용하여 핀의 높이를 측정하는 과정에서 사진 왜곡과 기울기 등의 오차 또한 무시할 수 없다. Laser profiler의 경우, 매우 거친 지표면이나 마른 풀 등 장애물로 인한 다중 반사에 의한 오차와 돌 등의 다른 매질에 의해 반사율이 변하여 발생하는 오차 등이 있다. 이러한 측정 장치에 의한 오차는 수집 길이에 의한 오차와는 달리 장치의 설계 방식과 사용자 등에 의해 변하며, 많은 오차 요인들로 인해 정확한 정리가 어렵다.

본 연구에서는 laser profiler와 pin-board profiler 장비 구성과 측정 방법에 대해 간략히 설명하고, 실제 다양한 지표면에서 지표면 거칠기를 측정하고, 장비별 측정 오차 분석 및 보정 방법에 대해 설명한다.



(a) Pin-board profiler 사진
(a) Photo of pin-board profiler



(b) Laser profiler 사진
(b) Photo of laser profiler

그림 1. 지표면 거칠기 측정 장치
Fig. 1. Equipments for roughness measurements.

그리고 두 측정 장치의 결과를 산란 모델을 이용하여 후방 산란 계수 오차를 예측해 본다.

II. 지표면 거칠기 변수와 측정 장치 비교

2-1 지표면 거칠기 변수

지표면 거칠기 상태를 표현하는 변수는 유효 높이와 상관 길이로 유효 높이는 수직 방향 거칠기를 표현하며, 상관 길이는 수평 방향 거칠기를 표현한다. 다음의 식은 N 개의 높이 데이터(z_i)로 구성되어 있는 직선 지표면 거칠기 정보로부터 유효 높이를 계산하는 수식이다^[1]. 일반적으로 유효 높이가 증가할수록 후방 산란 계수는 증가하며, 입사각이 증가함에 따른 후방 산란 계수 감소율이 줄어들게 된다.

$$h_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\left(\sum_{i=1}^N z_i^2 \right) - N \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \right)^2 \right]} \quad (1)$$

상관 길이(l)는 정규화된 상관 함수(normalized correlation function)의 크기가 $1/e$ (≈ 0.368)가 되는 변위를 의미한다. 이러한 상관 길이의 확률 분포는 지수(Exponential) 함수 또는 가우시안(Gaussian) 함수로 표현할 수 있으며, 지표면의 경우에 대략적으로 지수함수에 가까운 형태를 갖는다^[4]. 상관 길이의 경우, 계산은 매우 간단하지만 정확한 값을 구하기에

어려움이 있다^[5]. 여기서 발생하는 오차는 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 측정 길이에 의한 오차와 측정 장치 오차가 있다. 측정 길이 오차의 경우, 많은 연구를 통해 영향을 분석하였지만, 장치 오차는 모든 장치가 수직, 수평 해상도 등 성능이 다르고 측정 시 사용자에게 의해 발생하는 오차 또한 무시하지 못하기 때문에 장치 오차에 대한 정확한 분석이 필요하다.

2-2 Pin-Board Profiler 측정 장치

Pin-board profiler는 1 m 길이에 0.5 cm 간격으로 총 201개의 핀과 핀 뒤에는 높이 20 cm의 격자 판으로 구성되어 있다. 측정하고자 하는 지표면에 201개의 핀을 세우고 사진을 촬영하고 디지털화하여 높이 정보를 추출한다. Pin-board profiler 측정 시 발생하는 오차로는 핀을 지면에 올리는 과정에서 발생하는 지표면 훼손, 사진 촬영과 디지털화 과정에서 왜곡과 각도 및 수평 기울기에 의한 오차가 있다^[6].

2-3 Laser Profiler 측정 시스템

Laser 센서를 이용하여 거리를 측정하는 Laser profiler는 길이 1.5 m의 알루미늄 레일 위를 이동하는 독립적인 몸체 형태이다. 스텝 모터와 휠은 레일 양쪽에 고정되어 있는 줄을 따라 몸체를 이동시켜 주며, 무선으로 동작하도록 블루투스 통신 모듈과 DC 5 V, 16 V 전압을 제공하는 배터리를 탑재하여 길이 조절이 자유롭도록 하였다. 몸체 옆면은 양쪽으로 모터 드라이브와 시스템 컨트롤 보드와 바닥면에 Sharp社의 거리 측정 센서를 삽입하였다. 센서의 수직 해상도는 1 mm 이하로 신뢰도 높은 높이 정보를 제공한다. 레일 양쪽 끝에는 삼각대를 사용하여 지면으로부터 레일을 지탱하도록 하였다. 그림 2는 laser profiler 몸체의 구성도이다.

Laser profiler는 1 m를 0.25 cm 간격(401 point)으로 측정하도록 설정하였으며, laptop 컴퓨터를 이용하여 profiler를 컨트롤하고, 지표면 거칠기를 측정하여 실시간으로 유효 높이와 상관 길이 데이터를 획득할 수 있다. 이와 같이 pin-board profiler는 후처리가 필요하므로 데이터 처리에 많은 시간이 걸리지만, laser profiler는 빠른 데이터 획득이 가능하고 후처리가 불필요하므로 후처리 과정에서 발생하는 오차도 없다.

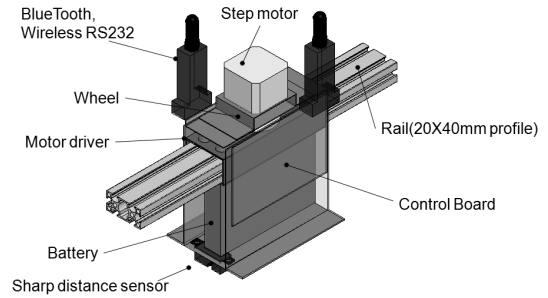


그림 2. Laser profiler 몸체
Fig. 2. Laser profiler body.

반대로 laser profiler의 단점은 전압 레벨에 의한 노이즈가 존재하므로 지표면 거칠기가 작을 경우 유효 높이는 크고, 상관 길이는 짧아지고, 동일한 매질이 아닌 경우 반사율이 변하므로 마른 풀 등에 의해 오차가 발생한다. 그리고 매우 거친 지표면이나 풀 등의 장애물이 있는 경우 빔의 경로(beam path)가 변하여 오차가 발생한다.

III. 지표면 거칠기 측정

지표면 거칠기 측정은 다양한 종류의 자연 상태의 지표면이 있는 수원시 농업과학기술원 발작물연구소에서 수행하였다. 거칠기가 다른 4종류의 지표면에서 pin-board profiler와 laser profiler를 이용하여 12~20회씩 다른 위치에서 측정하여 총 66개의 데이터를 획득하였다. 그림 3은 측정한 지표면(field A~field D)의 사진이다. Field A와 Field D는 거칠기가 작은 땅이고, Field B와 Field C는 상대적으로 거칠기가 큰 땅이다.

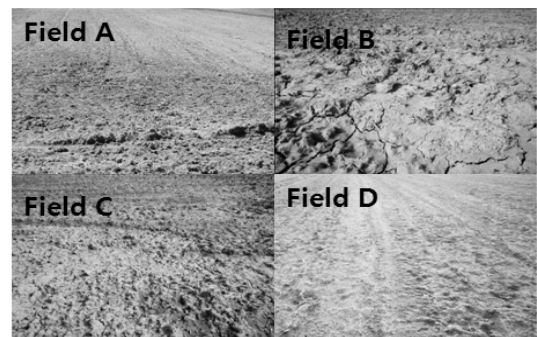


그림 3. 실험 지표면 사진들
Fig. 3. Photos of test sites.

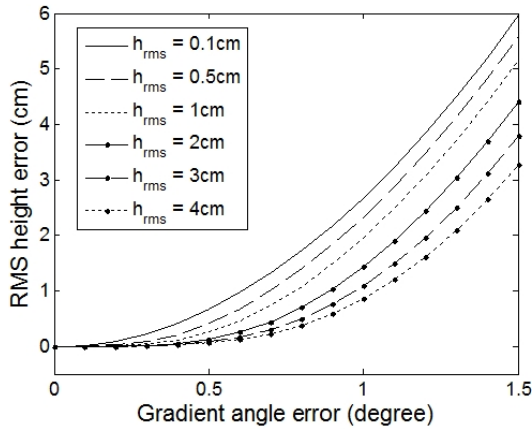


그림 4. 기울기 오차에 의한 지표면 거칠기 오차
Fig. 4. The roughness error for gradient angle.

지표면 거칠기 측정 데이터들의 오차를 최대한 줄이기 위해 pin-board profiler로 측정한 데이터는 렌즈에 의한 사진 왜곡을 보정하였으며, 좌우 기울기에 의해 발생하는 오차를 수정하기 위해 자동화된 높낮이 보정 프로그램을 제작하여 사용하였다. 좌우 기울기에 의한 오차는 지표면의 경사에 의해 발생하는 것이기 때문에 경사계(inclinometer)를 사용해서 제거할 수 없다. 경사계에 의존한다면 실제보다 높은 유효 높이와 상관 길이 값을 갖게 되는 경우가 많다.

그림 4는 가상의 지표면을 생성하여 기울기 각도에 의한 지표면 거칠기 변수 변화를 보여준다. 여기서 생성한 지표면은 상관 길이 5 cm의 지표면으로 유효 높이의 변화에 따른 오차를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 유효 높이가 작을수록 지표면 기울기에 따른 유효 높이 오차가 심하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

기울기 오차의 보정은 유효 높이 계산으로 구할 수 있다. 분석 결과를 토대로 유효 높이는 오차가 적을수록 감소하므로 측정 데이터의 각도를 조절해가며 유효 높이가 최소가 되는 값을 구하였다. 또한 pin-board profiler로 측정한 데이터는 사진 왜곡을 보정하였다. 그림 5는 pin-board profiler와 laser profiler를 이용하여 측정한 지표면의 유효 높이와 상관 길이를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 유효 높이와 상관 길이는 상관성이 높으며, 일반적인 지표면에서 유효 높이가 증가할수록 상관 길이 역시 증가한다.

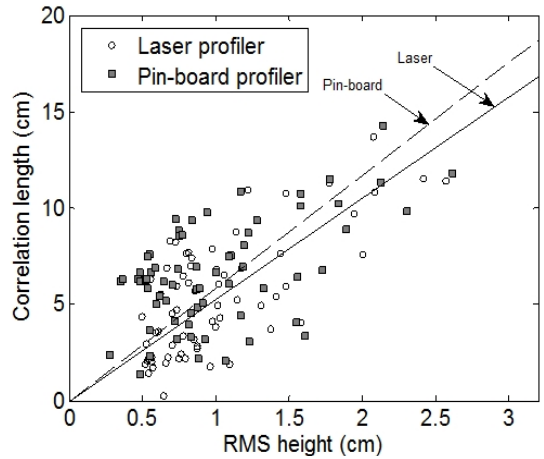


그림 5. 유효 높이와 상관 길이의 관계
Fig. 5. Relationship between RMS height and correlation length.

측정 데이터들의 경향을 보면 laser profiler보다 pin-board profiler가 상대적으로 유효 높이는 낮게 상관 길이는 높게 측정하는 것을 확인할 수 있다. 식 (2)는 유효 높이와 상관 길이의 관계식을 나타낸다. Laser profiler의 경우, 상관 길이는 유효 높이의 5.3배이며, pin-board profiler의 경우 5.8배이다.

$$l_{laser} = 5.3h_{rms}; l_{pin} = 5.8h_{rms} \quad (2)$$

상관 길이 오차는 표 1에서 알 수 있듯이 거칠기가 낮은 지표면에서 주로 나타나며, 이러한 이유는 laser profiler의 신호 레벨의 노이즈가 지표면 변화가 적을 경우 상대적으로 크게 작용한 것으로, 유효 높이보다 수평해상도에 해당하는 상관 길이에 영향을 미치기 때문이다. 66개의 데이터 오차를 분석한 결과, 두 측정 장치의 평균 차이는 유효 높이가 0.097 cm이며, 상관 길이가 1.828 cm 오차를 보였다.

표 1. 지표면 거칠기 측정 결과
Table 1. Measurement result with surface roughness.

Field	Pin-board		Laser	
	$h_{rms}(cm)$	$l(cm)$	$h_{rms}(cm)$	$l(cm)$
A	0.648	6.058	0.713	4.502
B	1.279	5.844	1.229	5.916
C	1.403	7.649	1.418	6.946
D	0.679	7.115	0.699	4.655

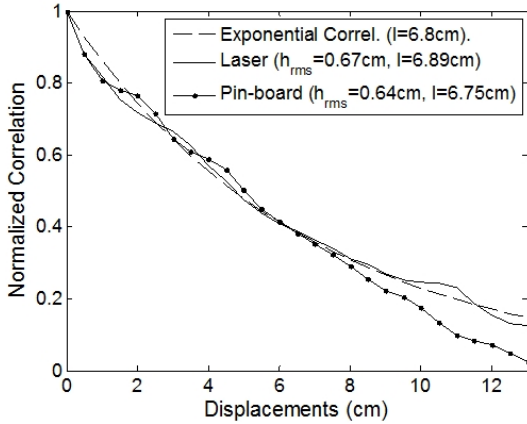


그림 6. 측정 장치에 따른 자기 상관 함수 비교
Fig. 6. Autocorrelation functions of the pin-board and laser profiler.

IV. 지표면 거칠기 오차 분석

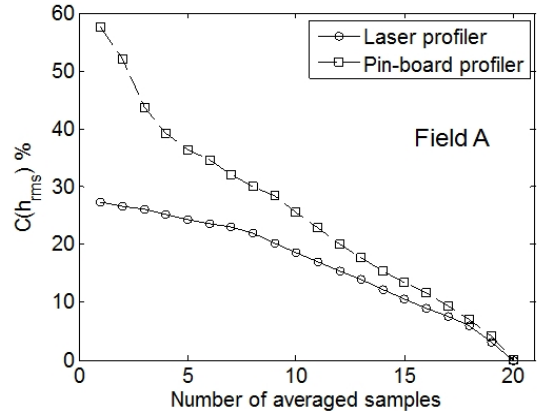
두 측정 장치의 측정 결과를 바탕으로 데이터의 안정성 및 유사성을 확인하기 위해 유효 높이와 상관 길이를 분석하였다. 그림 6은 측정 데이터 중 유효 높이와 상관 길이 차이가 적은 지표면에서 laser profiler와 pin-board profiler의 정규화된 자기 상관 함수를 지수 함수와 비교한 그림이다. 이 때, laser profiler의 상관 길이는 6.89 cm, pin-board profiler의 상관 길이는 6.75 cm이고, 지수함수의 상관 길이는 6.8 cm이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 측정 장치의 자기 상관 함수가 모두 지수 함수와 유사하며, laser profiler가 pin-board profiler보다 조금 더 지수 함수에 가까운 것을 알 수 있다.

그리고 측정 장치의 안전성을 분석하기 위해서 동일한 지표면에서 측정 샘플 수에 따른 유효 높이의 상대 오차(relative error)를 계산하였다. 상대 오차는 모든 샘플 데이터의 평균값과 일부 샘플의 평균값과의 차이를 퍼센트(%) 오차로 나타낸 것으로 다음의 식 (3)과 같다^[6].

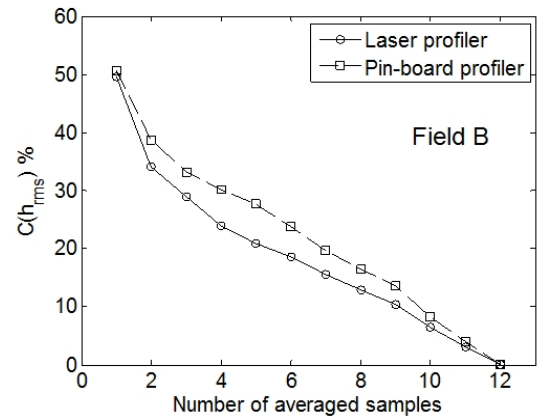
$$\bar{h}(N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{h}(i)$$

$$C\% = \frac{\bar{h}(N) - \bar{h}(k)}{\bar{h}(N)} \times 100, k = 1 : N-1 \quad (3)$$

여기서, h 는 각 샘플의 유효 높이이고, N 은 총 샘플 수이다.



(a) Field A의 상대 오차
(a) The relative error of field A



(b) Field B의 상대 오차
(b) The relative error of field B

그림 7. 유효 높이의 상대 오차 비교
Fig. 7. The relative error of the RMS height.

그림 7은 pin-board profiler와 laser profiler의 상대 오차를 비교한 그림이다. 그림 7(a)는 비교적 평평하고 거칠기가 일정한 땅인 field A이고, 그림 7(b)는 거친 땅인 field B의 경우에 상대 오차를 보여준다. Field A의 샘플 수는 총 20개이고, field B의 샘플 수는 총 12개이다. 샘플들은 유효 높이가 낮은 값부터 높은 값 순으로 나열하여 계산하였으며, 그림 7(a)와 그림 7(b) 모두 샘플의 수가 늘어날수록 상대 오차는 줄어든다. Laser profiler와 pin-board profiler의 상대 오차의 차이는 크지 않지만 laser profiler가 pin-board profiler보다 샘플 수에 따른 평균값이 항상 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 곧 pin-board profiler보다 laser profiler의 측정 방법이 더 안정적이라는 것을 의미한다.

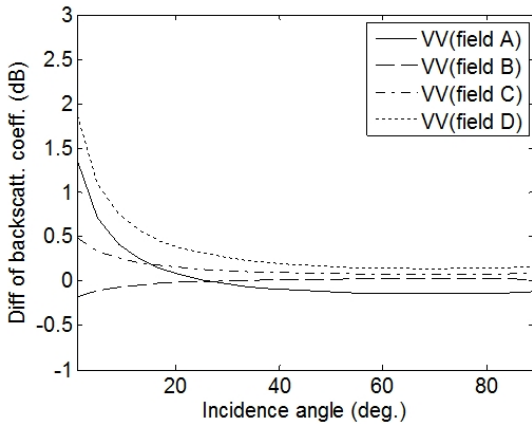


그림 8. 입사각에 따른 후방 산란 계수 차이 비교
 Fig. 8. Difference of backscattering coefficients by incidence angle.

Pin-board profiler와 laser profiler로 측정된 유효 높이와 상관 길이의 차이가 실제 후방 산란 계수에서 어떤 차이를 보이는지 확인하기 위해서 4종류 지표면의 평균 측정값을 입력 변수로 하여 후방 산란 계수를 계산하였다. 후방 산란 계수 분석에 사용한 지표면 산란 모델은 대표적인 실험적 산란 모델인 Oh 모델(2002)이다^[7].

그림 8에서는 X-밴드($f_0=9.6$ GHz)일 때 입사각에 따른 후방 산란 계수 차이를 실험 지표면 별로 보여 준다. 수분함유량은 일반적인 토양 수분함유량의 중간 값인 0.15로 설정하였다. 후방 산란 계수 차이는 입사각이 증가할수록 차이는 감소하는 경향을 보이며, 입사각이 20도 이하일 때 오차는 최대 약 2 dB까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 일반적으로 SAR의 입사각이 20~60°인 것을 고려할 때 차이는 1 dB 이내인 것을 확인할 수 있다. 편파는 VV-편파로 HH-편파, VH-편파 모두 유사하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 두 종류의 다른 지표면 거칠기 측정 장치인 pin-board profiler와 laser profiler의 정확한 측정 방법과 측정 오차를 비교/분석하였다. 두 측정 장치를 이용하여 지표면 거칠기가 다른 4개의 지표면에서 총 66회의 지표면 거칠기를 측정하였고, 지표면 거칠기 측정 시 발생하는 오차를 계산하여 보정하였다. 두 측정 장치의 지표면 거칠기 측정 결과,

평균 유효 높이는 0.097 cm, 상관 길이는 1.828 cm 차이를 보였다. 이 차이는 지표면 거칠기가 작을 경우에 높았으며, 지표면 거칠기가 클수록 오차가 적었다. 그리고 각 측정 장치의 유효 높이와 상관 길이를 입력 변수로 하여 후방 산란 계수 차이를 계산하여 비교한 결과, 입사각이 20~60°일 때 1 dB 이하의 오차를 보여 실제 후방 산란 계수에서는 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

저자들은 본 연구의 측정 데이터 수집에 도움을 준 홍익대학교 전파응용연구실의 주정명, 박신명에 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Artech House: Boston, MA, vol. 2, 1982.
- [2] Y. Oh, Y. -C. Kay, "Condition for precise measurement of soil surface roughness", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 36, no. 2, pp. 691-695, Mar. 1998.
- [3] N. Baghdadi, P. Pailou, G. Grandjean, P. Dubois, and M. Davidson, "Relationship between profile length and roughness variables for natural surfaces", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 17, pp. 3375-3381, Nov. 2010.
- [4] Y. Oh, J. -Y. Hong, "Effect of surface profile length on the backscattering coefficients of bare surfaces", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 45, no. 3, pp. 632-638, Mar. 2007.
- [5] M. W. J. Davidson, F. Mattia, G. Satalino, N. E. C. Verhoest, T. Le Toan, M. Borgeaud, J. M. B. Louis, and E. Attema, "Joint statistical properties of RMS height and correlation length derived from multisite 1-m roughness measurements," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 1651-1658, Jul. 2003.
- [6] F. Mattia, M. W. J. Davidson, T. Le Toan, C. M. F. D'Haese, N. E. C. Verhoest, A. M. Gatti, and M.

Borgeaud, "A comparison between soil roughness statistics used in surface scattering models derived from mechanical and laser profilers", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 1659-1671, Jul. 2003.

[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. 30, no. 6, pp. 1348-1355, Jun. 2002.

권 순 구



파 원격탐사, SAR 영상분석

2007년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2009년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로

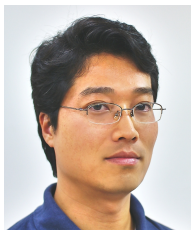
오 이 석



터과학과 (공학박사)

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

황 지 환



정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나

2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 2003년 2월: 홍익대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2003년 4월~2006년 5월: LG전자 단말연구소 연구원
 2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자

홍 성 욱



대기과학과 (이학박사)

1997년 2월: 서울대학교 지구과학 교육 (이학사)
 2000년 2월: 서울대학교 물리학 (이학석사)
 2002년 12월: Texas A & M University 대기과학과 (이학석사)
 2006년 8월: Texas A & M University 대기과학과 (이학박사)
 2006년~2008년: NOAA(미국해양대기청)/NESDIS(미국기상위성센터)
 2008년~2009년: 국립기상연구소
 2009년~현재: 국가기상위성센터
 [주 관심분야] 위성원격탐사기반 알고리즘 개발, 재해감시, 기후변화