

## 원격 측정 기법을 이용한 토양 함수비의 측정

### Soil Moisture Content Estimation Using Remote Sensing Technique

이 재 수\*

Lee, Jae Soo

#### Abstract

Remote sensing technique is based on the estimation of land surface characteristics from the measurement of the emitted radiation from the earth. The hydrologically related parameters studied using this approach include surface temperature, evapotranspiration, soil moisture, precipitation and snow. This study introduces a method for estimating moisture content of a bare soil from the observed and simulated brightness temperature. In a bare soil, microwave emission depends on moisture content, soil temperature, and surface roughness. The method is based on a radiative transfer model with some modifications of Fresnel reflection coefficient to take into account the effect of surface roughness. One smooth bare field and two fields with different surface roughness are prepared for the study. The results indicate that the effect of surface roughness is to increase the soil's brightness temperature and to reduce the slope of regression between brightness temperature and moisture contents.

#### 요 지

원격 측정 방법은 지표로부터 방출된 방사선의 관측으로부터 지표면의 특성을 추정하는데 기초를 두고 있으며 이 방법을 사용하여 연구되어지는 수문학적 인자에는 지표면 온도, 증발산, 토양 함수비, 강우 그리고 강설 등이 있다. 본 연구에서는 관측된 광명온도와 모의된 광명온도로부터 피복이 안된 토양의 함수비 산정에 대한 방법을 소개한다. 피복이 안된 토양에서의 초단파 방출은 함수비, 토양의 온도와 표면 조도에 의존하게 된다. 이 방법은 표면 조도의 영향을 고려하기 위한 Fresnel 반사 계수의 수정과 함께 방사선 전달 모델(radiative transfer model)에 기본을 두고 있는데 피복이 안된 매끈한 표면과 서로 다른 표면 조도를 가진 표면에 대해 분석을 실시한다. 연구의 결과는 표면 조도의 영향이 토양의 광명온도를 증가시키고 광명온도와 함수비 사이의 감소경사를 작게함을 보여주고 있다.

#### 1. 서 론

그동안 토양 함수비(soil moisture content)의 원

격 측정법(remote sensing)에 관하여 초단파 방법(microwave technique)들이 관심있게 연구되어져 왔다. 지구 궤도를 선회하는 위성에 탑재된 초단파 원격 탐지기(sensor)는 농업, 기후 및 수문의 계획과 모델링에 있어서 많은 도움을 주는 토양 함수비의

\* 정회원 · 고려대학교 생산기술연구소 선임연구원

시간 및 공간적 분포에 대한 정보를 제공하는 잠재성을 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 토양의 함수비에 대한 원격 측정법은 넓은 지역이나 접근하기 어려운 지역에 대한 함수비의 직접적인 측정의 곤란함 때문에 상당한 관심을 모으고 있다. 예를들어 기상학자들은 대기와 토양간의 질량과 에너지 교환에 관한 연구를 위하여 넓은 지역에 대한 토양 함수비의 측정에 지대한 관심을 가지고 있고 수문 학자들은 유출의 예측을 위해 함수비 측정에 관심을 가지고 있다.<sup>(2)</sup> 원격측정을 하기 위한 초단파방법은 토양 수분이 각 초단파 주파수의 토양 방출(emission) 및 산란(backscatter)특성에 현저한 영향을 미치고 있는데 기본을 두고 있다. 피복이 안된 토양으로부터의 초단파 방출은 (1) 방사선의 주파수 및 편광(polarization), (2) 관찰자 즉 sensor의 측정각도, (3) 토양의 구성성분, (4) 토양의 수분 및 온도 profile, (5) 토양 표면의 조도(roughness) 특성, 그리고 (6) 식물 피복 상태와 같은 인자들에 의해 영향을 받고 있다.

이제까지 피복이 안된 매끈한 표면과 변화하는 토양 수분 및 온도 profile에 대한 토양으로부터의 초단파 방출에 관한 연구를 하기 위한 많은 모델들이 개발되어졌고 표면의 조도와 식물 피복에대한 효과를 고려하기 위해 매끈한 표면 모델의 수정 및 보완이 시도 되었으나 아직까지는 거친 표면의 모델링의 복잡함과 자연에서 접하는 표면 특성의 광범위한 변화 때문에 적용에 제한을 받고 있다.

표면의 조도는 토양 표면에서의 방출(emissivity) 또는 광명온도에 상당한 영향을 미치고 있으며 이를 고려하기 위한 모델들은 대기-토양사이의 산란과정(scattering processes)을 포함하고 있는데 거친 표면에 의한 산란의 정확한 양적 계산을 하기 위해서는 통계학적 표면 인자(statistical surface parameters)에 대한 인식이 중요함을 보여주고 있다. 관측된 광명온도의 토양 수분 의존에 대한 표면 조도의 영향을 연구하기 위한 단순한 모델이 연구되어졌는데 Fresnel 반사(reflectivity)의 변형에 의해 표면 조도의 영향이 계산에 고려되어진다. 본 연구의 목적은 원격 측정법의 초단파 방법을 기본으로한 기존의 방사선 전달 모델식들을 사용하여 매끈한 표면과 임의로 발생시킨 거친 표면에 대한 토양 함수비의 산정방법을 보이고 두 표면에 대한 결과를 비교하는데 있다.

## 2. 매끈한 표면의 토양 함수비 산정

### 2.1 성층 토양으로부터의 초단파 방출에 대한 단순 모델

본 연구에서 피복이 안된 토양으로부터 초단파 방출로 인한 광명 온도 계산을 위해 사용되어진 모델은 비 점착 방사선 전달 모델(non-coherent radiative transfer model)이다. 비 점착 모델에 있어서 방사선의 강도들은 직접적으로 고려되어진다. 즉 점착 모델과는 달리 층 경계를 통한 전기장의 경계조건들을 방사선 강도 계산시 사용하지 않는다. 방사선 모델에서 사용되는 여러 단순화한 가정들은 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

- (a) 방사선은 비 점착성을 가지고 있다.
- (b) 지표면과 관측 안테나 사이에 감쇠(attenuation)나 방출(emission)은 없다.
- (c) 하늘의 밝기는 등방성(isotropic)이고 L과 K bands(21 cm와 2.8 cm)에서 5 °K를 가지고 있다.
- (d) 토양 수분이나 온도는 오직 토양 깊이 만의 함수이다.
- (e) 토양의 부전도(dielectric)나 온도의 특성은 유한 두께층을 통하여 균일하다.
- (f) 토양의 표면은 매끈하다.

성층화된 토양의 종단면이 그림 1에서 보여지고 있으며 각 층의 두께는  $\Delta z_j$ 이며 각 층의 두께가 동일할 필요는 없다. j번째 층은 위로 j번째의 표면과 아래로 j+1번째의 표면으로 경계되어지고 있고 j번

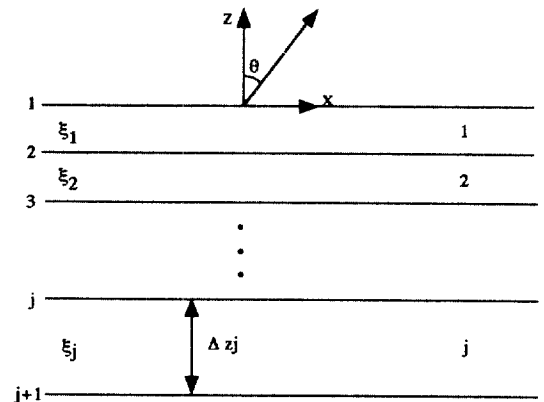


Fig. 1. A cross section of stratified soil used in the radiative transfer model.

제와  $j-1$ 번째 층 사이의 경계에서 방사선이 부분적으로 반사(reflect)되고 투과(transmit)되어진다.  $j$ 층으로 되 반사된 수평 및 수직 편광과 함께 투사 전기장(incident electric field)의 부분(fraction)이 Fresnel계수들로부터 구해질수 있다.

$$\rho_{Hj} = \frac{k_{zj} - k_{zj-1}}{k_{zj} + k_{zj-1}} \quad (2.1)$$

$$\rho_{Vj} = \frac{\xi_{j-1}k_{zj} - \xi_j k_{zj-1}}{\xi_{j-1}k_{zj} + \xi_j k_{zj-1}} \quad (2.2)$$

여기서

$$k_{zj} = \beta_{zj} + i\alpha_{zj} \quad (2.3)$$

$$\beta_{zj} = \left\{ \frac{1}{2} \epsilon_{Rj} - \sin^2 \theta_{0j} \right\} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{\epsilon_{Ij}^2}{(\epsilon_{Rj} - \sin^2 \theta_{0j})^2} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

$$\alpha_{zj} = \frac{\epsilon_{Ij}}{2\beta_{zj}} \quad (2.5)$$

$$\xi_j = \epsilon_{Rj} + i\epsilon_{Ij} \quad (2.6)$$

$\theta_{0j}$  = 표면의 수직에 대한 토양으로부터의 방사선의 방출 각도( $0^\circ \sim 90^\circ$ )

따라서  $\beta_{zj}$ ,  $\alpha_{zj}$ ,  $\rho_{Hj}$ 와  $\rho_{Vj}$ 들은 모두 복소 부전도 상수(complex dielectric constant)와 토양으로부터의 방사선의 방출 각도  $\theta_{0j}$ 로부터 구할 수 있다.

이제 성층화된 토양으로부터 방출된 방사선을 나타낼 수 있는 방사선 전달 공식을 세울 수가 있는데 첫번째 토양층 안에서의 방사선 전달 공식은 다음과 같다.

$$\frac{dI_\omega}{dz} = -\gamma_1 I_\omega + \gamma_1 J_\omega \quad (2.7)$$

여기서  $\gamma$ 는 보통 밀도와 단색 질량 흡수 계수(monochromatic mass absorption coefficient)의 곱으로 표현되어지는데 Poynting 이론을 사용하여  $\gamma_1 = 2\omega\alpha_{z1}(\theta_{0j})/c$ 와 같이 표현할 수 있으며, 여기서  $\omega$ 는 주파수(radian/sec)이고  $c$ 는 광속이다.<sup>(3)</sup>  $I_\omega$ 는 진동수  $\omega$ 에서의 방사선 강도이고  $J_\omega$ 는 Planck 방출 함수로서 등방성이고 편광과는 무관하므로 방향을 설정할 필요가 없으며 초단파 진동수 범위내에서 Planck 방출

법칙은 Rayleigh-Jeans 공식으로 대체 되어질 수 있고 이때  $J_\omega$ 는 매체 T의 온도에 비례한다.<sup>(4)</sup>  $I_\omega$ 에 대해 비슷한 단위법칙(scaling rule)을 채택함으로써  $I_\omega$ 에 직접적으로 비례하는 유효 온도  $T_p$ 를 정의할 수 있고  $T_p$ 는 p편광 상태에서의 진동수  $\omega$ 에 가까운 범위에서의 강도를 의미한다. 토양의 첫번째 층에서의 방사선 전달 공식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dT_p}{d(\gamma_{1z})} = -T_p + T_1 \quad (2.8)$$

이 식은 표면의 바로 아랫 부분부터 첫번째 층과 두번째 층 사이의 경계면 바로 윗부분까지 적분되어질 수 있다. 각 층을 통하여 부전도 특성들이 일정하다고 가정하였으므로

$$T_p(1^-) = T_1(1 - e^{-\gamma_{1\Delta z_1}}) + T_p(2^+)e^{-\gamma_{1\Delta z_1}} \quad (2.9)$$

여기서  $N(+, -)$ 는 N번째 경계층의 바로 윗부분(+)과 아랫부분(-)에서 계산이 이루어짐을 나타내고 있다. 식 2.9의 오른쪽 첫번째 항은 첫번째 층 내에서 방출되어 직접적으로 표면에 도달하는 방사선을 고려한 것이고 두번째 항은 첫번째 층의 바닥으로부터 오는 방사선을 나타내고 있다. 이 방사선은 다음과 같은 두가지 요소로 구성되어 있는데 첫째로 첫번째 층에서 방출된 방사선이 첫째와 두번째층의 경계면에서 반사된 것이고 두번째는 밑의 층들로부터 전달된 방사선이다.

$$T_p(2^+) = R_{p2}T_1(1 - e^{-\gamma_{1\Delta z_1}}) + T_p(2^-)(1 - R_{p2}) \quad (2.10)$$

윗 식에서  $R_{p2}$ 는 p 편광에 대한 Fresnel 계수의 절대치의 제곱이다. 표면 바로위의 방사선은 표면 바로밑의 값에 투과율(transmittance)( $1 - R_{p1}$ )을 곱함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_p(1^+) &= (1 - R_{p1})T_p(1^-) \\ &= (1 - R_{p1})[T_1(-e^{-\gamma_{1\Delta z_1}}) + (1 + R_{p2}e^{-\gamma_{1\Delta z_1}}) \\ &\quad + (1 - R_{p2})T_p(2^-)e^{-\gamma_{1\Delta z_1}}] \end{aligned} \quad (2.11)$$

방사선 전달식은 다시  $T_p(2^-)$ 를 계산하기 위해 적분되어지고 N층에 대하여 이 과정을 되풀이 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T_p(1^+, \theta_0) = \prod_{i=1}^N [T_i(1 - e^{-\gamma_i(\theta_0)\Delta z_i}) (1 + R_{p,i+1}(\theta_0)e^{-\gamma_{i+1}(\theta_0)\Delta z_{i+1}})H] \quad (2.12)$$

여기서

$$H = \prod_{j=1}^i [1 - R_{p,j}(\theta_0)] \exp\left\{-\sum_{j=2}^i \gamma_{j-1}(\theta_0)\Delta z_{j-1}\right\} \quad (2.13)$$

안테나에 의해 측정된 광명온도는 토양으로부터 방출된 방사선과 반사된 하늘의 밝기의 합이다. 즉

$$T_{B,p}(\theta_0) = T_{sky}R_{p,1}(\theta_0) + T_p(1^+, \theta_0) \quad (2.14)$$

## 2.2 토양 수분과 온도의 Profile

원격 측정법에서 유용한 모델이 되기 위해서는 역으로서의 역할을 하여야 하는데 이러한 역할로서의 기능을 하기 위해서는 가상의 장(pseudo-fields)에 대한 광명온도가 계산되어야 한다. 즉 기존의 함수비와 광명온도의 관계를 사용하여 비행기에 탑재된 radiometer로부터 측정된 광명온도를 이용하여 이에 상응하는 함수비를 구할 수 있어야 한다. 본 연구에서 사용된 가상의 토양 조건은 Burke 등이 미국 Arizona주 Phoenix 근처의 경작지에 대해 구한 다음과 같은 값들을 기본으로 하였다. 토양층의 두께는 각 0~1, 1~2, 2~5, 5~9, 그리고 9~15 cm, 온도 profile은  $T_1=303^\circ$ ,  $T_2=301^\circ$ ,  $T_3=299^\circ$ ,  $T_4=297^\circ$ ,  $T_5=295^\circ$ 이고, 토양 함수비 profile은  $PM(1)=M$ ,  $PM(2)=M+2$ ,  $PM(3)=M+7$ ,  $PM(4)=M+14$ ,  $PM(5)=M+16$ 이다. 여기서 M은 1%부터 25% 사이의 값이며 각 층에서의 함수비는 30%를 초과하지 않는다고 본다.

## 2.3 부전도 상수(dielectric constants)

토양의 부전도 특성에 대한 측정은 토양 수분에 따른 부전도 상수의 변화가 토양의 종류에 관계 있음을 보여주고 있으며 관찰된 부전도 상수는 변이점(transition point)까지 함수비와 함께 천천히 증가한다. 변이점을 지나서는 함수비와 함께 부전도 상수는 급격하게 증가하며 변이 지역에서 수분량은 토양의 종류에 따라 변함을 볼 수 있는데 모래가 많은 토양보다 점토가 많은 토양이 더 높음을 알 수 있다.<sup>(5)</sup> 토양의 광명 온도 또는 초단파 방출은 부전도 상수와 관련이 있으므로 부전도 상수의 측

정이 광명 온도의 계산에 있어 대단히 중요하다. 본 연구에서 사용된 부전도 상수는 주파수 1.4 GHz(L band, 21 cm)에 대해 Dobson 등<sup>(6)</sup>의 경험 다항식으로부터 구하였다.

## 3. 거친표면의 토양 함수비 산정

### 3.1 거친 표면에서의 초단파 방출 모델

앞에서 고찰한 방사선 전달모델은 토양이 이상적으로 매끈한 표면에서의 광명온도를 계산하기 위한 모델이다. 그러나 토양 함수비의 산정을 위해 초단파 관측이 행해지는 전형적인 경작지의 표면은 일반적으로 매끈하지가 않다. 이러한 지역의 조도 특성은 경작습성과 관련이 있는데 어떠한 지역은 작은 기복과 흠덩이를 가진 비교적 평탄한 표면을 가지고 있고 또 어떤 지역의 표면은 흠덩이 외에 크고 작은 불규칙적인 기복을 가지고 있다. 이러한 표면의 조도 특성은 정량화 하기가 어렵고 초단파 토양 수분 원격측정의 실제 적용에 있어서 일반적으로 측정되지 않는다. 따라서 표면 조도를 모델링하기 위한 어려운 작업이 실험 검증에 있어서의 어려움을 내포하고 있다.

광학의 기하학적인 특성에 의해 부전도가 불연속인 곳에 투사된 방사선은 투사각과 같은 각도로 반사(specular reflection)되어진다. 매끈한 표면에 있어서 표면의 수직선은 표면의 모든 점에서 평행하므로 평행하게 투사된 방사선은 반사된 후에도 평행할 것이다. 이러한 표면의 반사는 Fresnel 공식에 의해 주어진다. 거칠은 표면에 있어서 표면의 수직선은 모든 점에서 평행하지가 않고 표면 반사는 더이상 Fresnel 공식으로부터 구할 수가 없다. 이러한 거친 표면에서 평행하게 투사된 방사선은 여러 방향으로 반사가 되고 에너지 보존법칙에 의해 반사 방향에서의 반사도는 Fresnel 반사도 보다 작을 것이다. 최근의 연구<sup>(7)</sup>는 매끈한 표면의 반사도가  $\exp(-h \cos^2\theta)$  정도로 작음을 보여주고 있는데 여기서 h는 인자 특성 높이이다. 표면 조도의 존재는 또한 토양으로부터의 초단파 방출의 공식화에 있어서 고려되는 전자기파의 소극(depolarization)을 야기시킨다. 거친 표면에 대해 편광 상태에서의 방사선이 매끈한 표면의 수평 및 수직편광의 방사선의 선형 조합으로 표현될 수 있다고 가정하면 거친 표면에서의 수평

및 수직 반사도  $R_H^R(\theta)$ 와  $R_V^R(\theta)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.<sup>(8,9)</sup>

$$R_H^R(\theta) = [(1-Q)R_H(\theta) + QR_V(\theta)] \exp(-h \cos^2 \theta) \quad (3.1)$$

$$R_V^R(\theta) = [(1-Q)R_V(\theta) + QR_H(\theta)] \exp(-h \cos^2 \theta) \quad (3.2)$$

여기서  $R_H(\theta)$ 와  $R_V(\theta)$ 는 Fresnel 반사도이며  $Q$ 는 표면 거칠음에 따른 편광의 혼합에 대한 인자이다. 거칠음 높이  $h$ 는 다음과 같이 주어진다.<sup>(7)</sup>

$$h = 4\sigma^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \quad (3.3)$$

여기서  $\sigma$ 는 표면 높이의 표준편차이다. 따라서 거친 표면에 대한 광명온도는 식 (3.1)과 (3.2)를 식 (2.12)와 (2.14)에 적용함으로써 구할 수가 있게 된다.

### 3.2 토양 표면 인자

점(x, y)에서의 높이가 z(x, y)인 x-y 평면에서의 표면을 생각하자. 원점이 중심인 가로 세로 길이  $L_x$ ,  $L_y$ 인 표면에 대해 표면의 평균 높이와 2차 모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{z} = \frac{1}{L_x L_y} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} z(x, y) dx dy \quad (3.4)$$

$$\bar{z}^2 = \frac{1}{L_x L_y} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} z^2(x, y) dx dy \quad (3.5)$$

표면 높이의 표준편차  $\sigma$ 는

$$\sigma = (\bar{z}^2 - \bar{z}^2)^{1/2} \quad (3.6)$$

만일 z(x, y)가 x-y 평면에서 방위각과 통계학적으로 무관하다면 위 식은 일차원으로 간략화 할 수 있다. 일차원 표면 profile에 대해 표준편차  $\sigma$ 는 적당한 간격  $\Delta x$ 로 profile을  $z(x_i)$ 로 분할함으로써 구할 수가 있다. 만일 수평거리  $\Delta x$ 에 상응하는 높이 변화  $\Delta z$ 이 투사파의 파장  $\lambda$ 보다 훨씬 적으면 높이의 변화  $\Delta z$ 는 거리  $\Delta x$ 의 표면에 의한 반사에 큰 영향을 미치지 못한다. 일반적으로 거리  $\Delta x$ 는  $0.1\lambda$ 보다 작은 값으로 채택된다.<sup>(10)</sup> 이산형 일차원에 대한 표준편차  $\sigma$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma = \left[ \frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^N (z_i)^2 - N(\bar{z})^2 \right) \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

여기서

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (3.8)$$

$N$ 은 표본의 수이다.

## 4. 분석 결과 및 토의

본 연구에서 사용되어진 주파수는 1.4 GHz(L band, 21 cm)이고 복소 부전도 상수를 구하기 위해 경험 모델<sup>(6)</sup>을 사용하였으며 그림 2에 토양 함수비에 따른 부전도 상수의 실수부와 허수부가 나타나 있는데 이 부전도 상수를 구하기 위해 사용된 토양의 모래와 점토 비율은 1 : 1이다. 그림 3에는 건조한 조건( $m_v = 10\%$ )과 습한 조건( $m_v = 30\%$ )에 대해 광명온도가 투사각  $\theta_0$ 의 함수로 나타나 있으며 투사각  $\theta_0 = 0^\circ$ 에서 습한 토양보다 건조한 토양의 광명온도가 더 높음을 알 수가 있고 수직하게 편광된 광명온도가 관찰각  $\theta_0 = 70^\circ$ 까지는 증가하고  $\theta_0 = 90^\circ$ 에서는 0이되게 감소한다.

사용되어진 주파수 L band(1.4 GHz)에서 관찰각  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 에 대한 수직 및 수평 광명온도가 그림 4에 토양 상층부 PM(1)의 함수비의 함수로 표현되고 있다. 토양 수분의 원격 측정법의 궁극적 목적이 radiometer로부터 관측된 광명온도를 함수비로 환산하는데 있으므로 그림 4가 본 연구에 사용되어진 특정한 조건에 대해서 환산에 이용되어질 수가 있다.

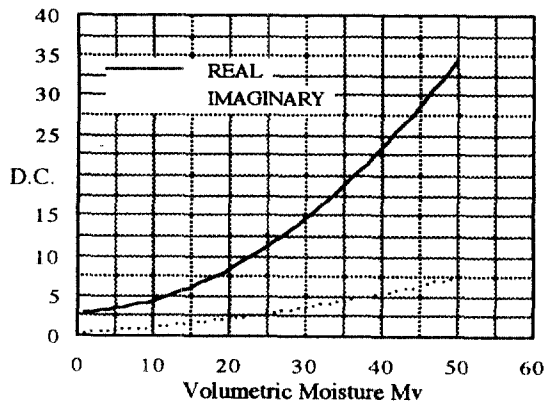


Fig. 2. Real and imaginary part of dielectric constant (frequency 1.4 GHz, sand : clay = 1 : 1).

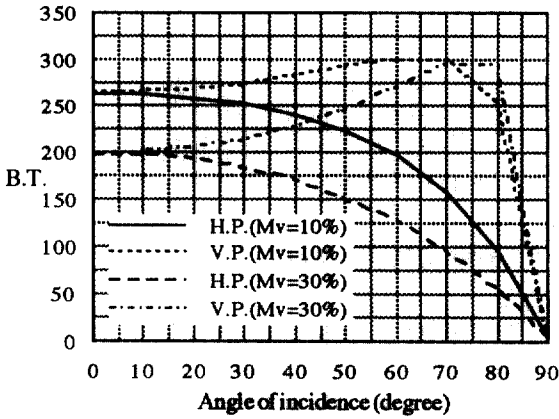


Fig. 3. Brightness temperature ( $^{\circ}\text{K}$ ) as a function of incident angle.

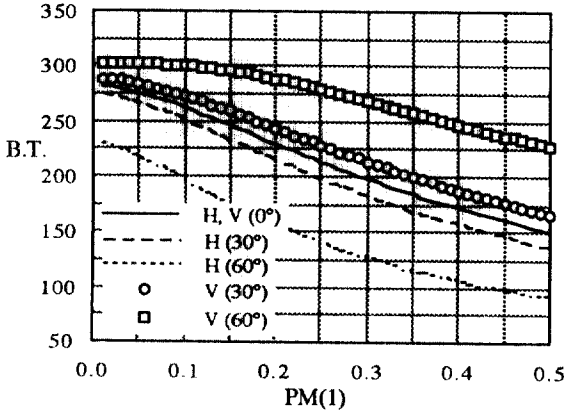


Fig. 4. Calculated vertical and horizontal brightness temperature ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Stokes의 두 인자 즉  $P(\text{강도}) = 1/2(T_v + T_h)$ 와  $Q(\text{편광}) = T_v - T_h$ 을 이용하여 모델의 또다른 예측적인 면을 볼 수가 있는데 특정한 관찰각에 대해 토양 표면층의 함수비의 함수로서 예측된 강도  $P$ 와 편광  $Q$ 가 그림 5a와 5b에 나타나 있다. 그림 5a로부터 관찰각  $0^{\circ}$ 의 강도곡선이  $30^{\circ}$ 의 강도곡선과 거의 같음을 볼 수 있고  $60^{\circ}$ 보다 작은 관찰각에 대해서는 강도가 관찰각에 약한 상관이 있음을 알 수 있다. 편광은 관찰각과 함수비  $PM(1)$  모두 상관이 있고 함수비  $0 \sim 20\%$  사이에서 민감함을 알 수 있다.

표면 조도의 영향을 알아보기 위해서는 표면 높이의 표준편차  $\sigma$ 와 이에 관련된 거칠음 높이  $h$ 를 계산하여야 한다.  $\sigma$ 와  $h$ 를 계산하기 위해 random

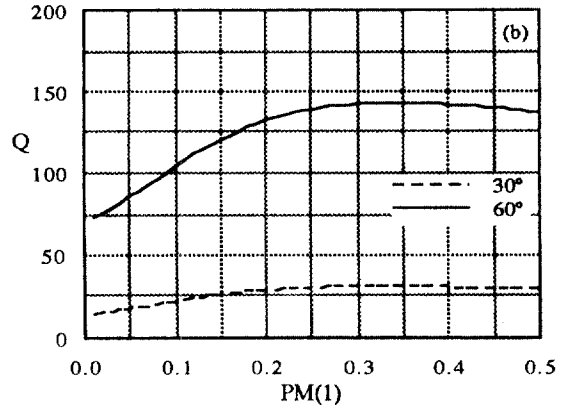
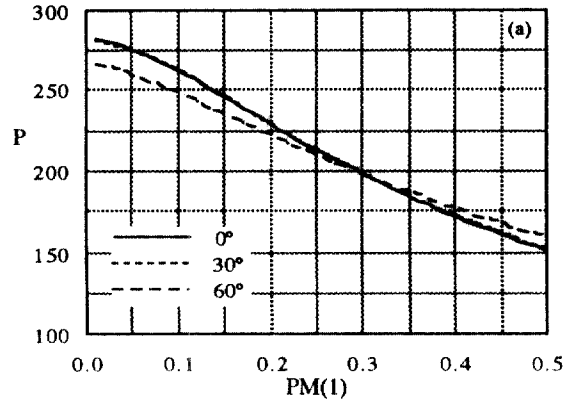


Fig. 5. Predicted Stokes parameters: (a) intensity  $P(^{\circ}\text{K})$  and (b) polarization  $Q(^{\circ}\text{K})$ .

walk를 이용하여 두 개의 가상의 토양 표면 profile 1과 2를 발생시켰고 그림 6에서 거친표면 1의 profile을 볼 수가 있다. 통계학적인 분석에 의해  $\sigma = 0.9$ 를 얻을 수 있었고 식 (3.3)으로부터 구한 조도 높이는 0.2877이다.

L band 주파수에서 거친 토양 평면 1에 대한 관찰각  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ 에 따른 수직 및 수평 편광된 광명 온도가 함수비의 함수로서 그림 7에 나타나 있는데 표면 조도의 영향이 광명 온도의 증가를 가져왔고 광명 온도와 함수비 사이의 감소경사가 매끈한 표면에 비해 감소함을 알 수 있다. 그림 8a는 거친 표면 1에 대하여 각 관찰각에 따른 함수비의 함수로서의 강도를 보여주고 있으며 매끈한 표면에 비해 거친 표면 1에서 강도  $P$ 가 관찰각과 더 상관 있음을 알 수가 있다. 또한 그림 8b로부터 편광  $Q$ 가 매끈한 표면에 비해 작은 값을 가지고 있음을 알

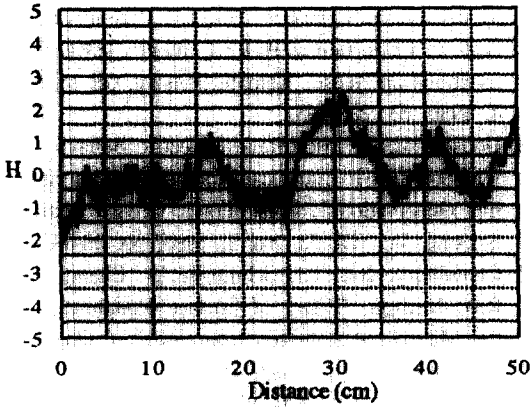


Fig. 6. Generated rough surface height (cm) ( $\sigma=0.9$ ,  $h=0.2877$ ).

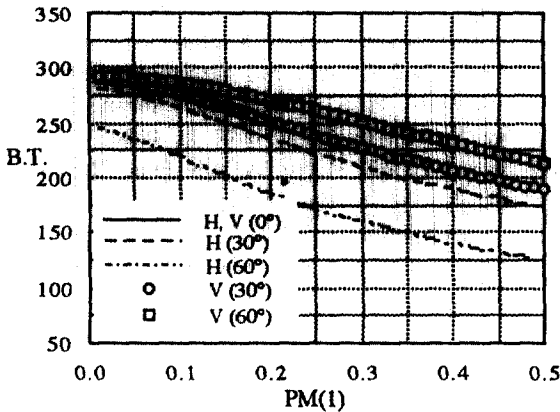


Fig. 7. Calculated vertical and horizontal brightness temperature ( $^{\circ}\text{K}$ ).

수 있는데 그 이유는 거친 표면 1에서 수평으로 편광된 광명 온도는 증가하고 수직으로 편광된 광명 온도는 감소하기 때문이다.

또다른 거친 표면 2에 대해 알아보기 위해 거친 표면 1의 토양 표면 높이를 두배하여 새로운 가상의 표면을 발생 하였고 표준편차  $\sigma=1.8$ 과 조도 높이  $h=1.1508$ 을 구하였다. 조도 높이  $h$ 가 큰 경우에 수직으로 편광된 광명 온도에 비해 수평으로 편광된 광명 온도가 더 증가하였다. 따라서 매끈한 표면이나 거친 표면 1의 경우보다 편광  $Q$ 가 작게 나왔으며 강도  $P$ 가 관찰각에 민감함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

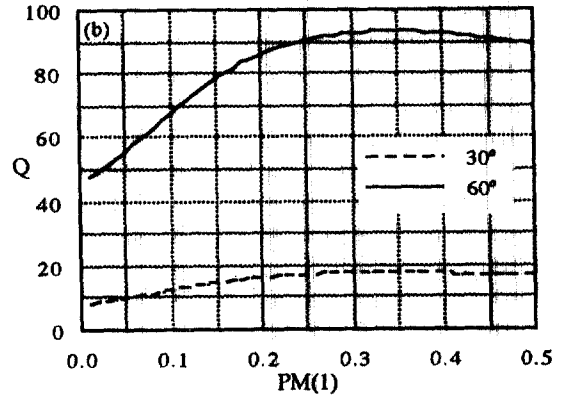
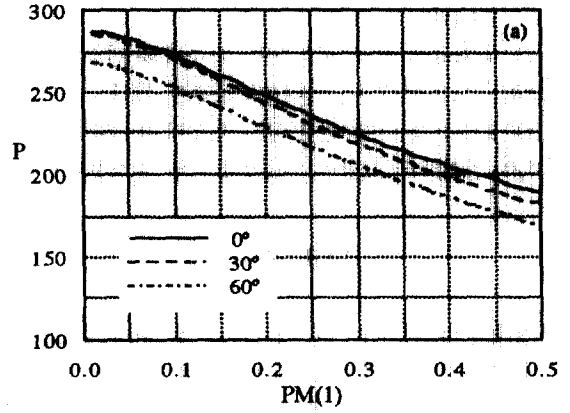


Fig. 8. Predicted Stokes parameters: (a) intensity  $P$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) and (b) polarization  $Q$  ( $^{\circ}\text{K}$ ).

본 연구에서는 원격 측정법의 초단파 방법을 기본으로 한 기존의 방사선 전달식을 사용하여 매끈한 표면과 가상의 거친 표면에 대한 토양 함수비의 산정에 대해서 고찰하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 방법은 실제의 지역에 대하여 측정된 광명온도와 함수비 사이의 관계를 작성한 후 radiometer로 광명온도를 측정하게 되면 넓은 지역이나 접근하기 어려운 지역에 대한 함수비의 산정에 도움을 줄 것이다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 수직으로 편광된 광명온도는 수평하게 편광된 광명온도보다 크게 나타나며 광명온도는 함수비가 증가할 때 감소한다.

(2) 매끈한 표면에 비해 거친표면에서의 광명온도는 증가하며 광명온도와 함수비 사이의 감소 경

사는 감소한다.

(3) Stokes의 인자 강도 P는 함수비에 민감하며 표면이 거칠어질수록 관찰각과 상관성이 있다.

(4) Stokes의 인자 편광 Q는 함수비 0~20% 사이에서 민감하며 표면이 거칠어질수록 감소한다.

### 참고문헌

1. Njoku, E.G., P.E. and O'Neill, "Multifrequency Microwave Radiometer Measurements of Soil Moisture", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. GE-20, No. 4, pp. 468-475, 1982.
2. Schmugge, T.J., P. Gloerson, T. Wilheit, and F. Geiger, "Remote Sensing of Soil Moisture with Microwave Radiometers", *J. Geophys. Res.*, 79, 1974, pp. 317-323.
3. Burke, W.J., T.J. Schmugge, and J.F. Paris, "Comparison of 2.8 and 21-cm Microwave Radiometer Observations over Soils with Emission Model Calculations", *J. Geophys. Res.*, 84, 1979, pp. 287-294.
4. Elachi, C., "Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing", John Wiley and Sons, New York, 1987, pp. 413.
5. Wang, J.R. and T.J. Schmugge, "An Empirical

Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content", *IEEE Transactions on Geosci. Remote Sensing*, GE-18, No. 4, 1980, pp. 288-295.

6. Dobson, M.C., "Microwave dielectric Behavior of Wet Soil-Part I: Empirical Models and Experimental Observations", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. GE-23, No. 1, 1985, pp. 25-33.
7. Choudhury, B.J., T.J. Schmugge, A. Chang, and R.W. Newton, "Effect of Surface Roughness on the Microwave Emission from Soils", *J. Geophys. Res.*, 84, 1979, pp. 5699-5706.
8. Wang, J.R., and B.J. Choudhury, "Remote Sensing of Soil Moisture Content Over Bare Field at 1.4 GHz Frequency", *J. Geophys. Res.*, 86, 1981, pp. 5277-5282.
9. Wang, J.R., P.E. O'Neill, T.J. Jackson, and E.T. Engman, "Multifrequency Measurements of the Effect of Soil Moisture, Soil Texture and Surface Roughness", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. GE-21, No. 1, 1983, pp. 44-50.
10. Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung, "Microwave Remote Sensing: Active and Passive Vol. II", Addison-Wesley, 1982.

(接受: 1994. 1. 27)