

## 유역관리를 위한 토양수분 분석(II) - 토양수분 관측 연구동향



김 광 섭 |

경북대학교 토목공학과 교수  
kings@knu.ac.kr

### 1. 서론

지난호에서는 토양수분 관측관련 일반사항과 관련 연구역사 및 최근동향에 대한 전반적인 고찰결과를 기술하였다. 본 호에서는 광역의 토양수분 원격관측 기법과 관측자료로부터 토양수분을 산정하는 과정을 더 자세히 알아보하고자한다. 최근 원격관측기술의 발달은 광역의 전자기파 스펙트럼 정보를 사용한 다양한 기술에 의하여 토양수분이 관측될 수 있음을 보여주었다. 근적외선과 마이크로웨이브 파장대를 이용한 위성관측은 지난 토양수분에 대한 위성관측 가능성을 보여주었다. 선행연구자들에 의해 적외선 파장대의 휘도온도는 증발산률과 높은 상관관계를 가짐을 보였으며(Wetzel and Chang, 1988)뿐만아니라 토양 열전도율과도 높은 상관관계가 있음을 보였다(Carlson 등, 1990). 또한 선행강수지수(Antecedent Precipitation Index), 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index) 등과 같은 보조자료를 이용한 간접적인 토양수분 산정방법에 관한 연구도 진행되고 있다. 그러나 마이크로웨이브를 이용한 토양수분 관측은 다음과 같은 다양한 장점을 가지고 있으므로 가장 유망한 관측기법이 되리라 판단된다. (1) 마이크로웨이브 특성상 대부분의 기상조건에서 관측가능 하다. (2) 식생피복은 반투명 층으로 볼 수 있으므로 이러한 조건하에서의 마이크로웨이브 적용성이 높다. (3) 마이크로웨이브 신호는 목표물의 다양

한 수분상태에 따른 유전율과 높은 상관성을 가진다. (4) 태양광의 영향이 미미하므로 전시간대의 적용이 가능하다. (5) 습도의 변화에 매우 예민하게 반응한다. 이러한 장점들 때문에 가시광선이나 근적외선 관측에 의한 토양수분 관측보다 큰 이점이 있다.

본 강좌에서는 마이크로웨이브를 이용한 토양수분 원격관측의 기초가 되는 토양의 유전율과 토양 특성들의 상관관계를 설명하고 이와 관련한 이론 및 실험식들을 소개하고자한다. 토양수분관측과 관련한 대표적인 passive 기법과 active 기법을 소개하고 특히 Electronically Scanned Thinned Array Radiometer(ESTAR)로부터 관측되는 휘도온도자료를 이용한 토양수분 산정과정과 Synthetic Aperture Radar(SAR)자료와 Integral Equation Model(Fung 등, 1992)를 사용하여 토양수분을 추출하는 과정을 알아보고자 한다. 이를 위하여 주어진 토양 유전율, 표면거칠기, 상관길이에 대한 SAR 기로부터 관측되는 후방산란계수의 변화 상관관계에 대하여 설명하고자 한다.

### 2. 마이크로웨이브 원격관측의 기초

#### 2.1 토양의 유전율과 토양조직의 기능

마이크로웨이브 기술을 이용한 토양수분 측정의 이론적 기반은 건조토양과 물사이의 유전특성의 큰 차이에 있다. 물의 큰 유전상수는 전기쌍극자의 물분자구조에 기인하고 토양에서 함수비의 증가는 토양 유전상수의 명백한 변화를 동반한다. 예를 들어 L밴드(파장 21cm)내에서 유전상수는 약 80인데 반해 마른땅에서의 유전상수는 3-5이다. 토양수분이 증가하면서 유전상수는 20이상 증가할 수 있다. 토양의

유전상수 계산에 있어 반드시 고려되어야 할 사항은 공기, 토양입자, 수분 등이다. 또한 자료를 타당하게 해석하기 위하여 토양구조에 대한 지식이 필요하다. 유전상수는 체적특성이므로 각 성분에 대한 체적분이 포함된다. 또한 이러한 혼합유전상수에 대한 많은 연구가 수행되었으며 혼합방정식에 대한 다양한 이론이 존재한다. 전형적인 선형가중합수형태가 사용되기도 하고 Fresnel 방정식과 토양구조로부터 유도된 혼합 유전상수의 산정에 기초한 체적토양계산이 이루어진다. 토양에 포함된 수분은 결합수와 자유수로 크게 두가지로 나누어진다. 결합수는 토양입자주변의 초기 몇 분자층에 포함된 물분자를 말한다. 물과 토양입자의 결합은 압력포텐셜로 나타낼 수 있고 습도가 낮은 경우 압력포텐셜은 장력으로 나타나며 토양이 포화되면서 압력포텐셜은 0이 된다. 토양의 수분보유능(field capacity)은 토양에 포함된 물의 표면장력과 중경이 평형을 이룰 때 토양이 보유할 수 있는 물의 양을 이야기하며 그 시점에서의 압력은 약  $-1/3bar$ 이다. 위조점(wilting point)은 식물이 토양으로부터 수분을 흡수하기 힘든 상황에서의 수분수준을 나타내고 위조점은 압력 약  $-15bar$ 에서 관측된다. 위조점과 수분보유능은 수분을 함유할 수 있는 능력을 정량적으로 제시하고 이는 토양구조에 의존한다(Schmugge, 1980). 위조점과 수분보유능에 대한 경험식은 다음과 같다.

$$WP = 0.068 - 0.00064Sand + 0.0048Clay \quad (1)$$

$$FC = 0.30 - 0.0023Sand + 0.005Clay \quad (2)$$

여기서 Sand와 Clay는 부피로 나타낸 각성분의 비율이다.

점토입자(입자 크기  $-0.001mm$ )는 사질토양(입자 크기  $-0.3mm$ )보다 큰 표면적을 가진다. 보다 작은 입자크기는 또한 보다 작은 공극률을 가진다. 점토토양의 높은 모관압력은 사질토양보다 수분을 함유할

능력이 커서 나타난다. 또한 점토토양은 사질토양보다 높은 유전상수를 가진다. 토양에 포함된 점토, 모래, 실트의 비에 따른 토양구조에 의하여 유전상수가 달라진다. 이와 관련한 실험결과는 여러 연구자들에 의하여 이미 발표되었다(Wang and Schmugge, 1980). 또한 Schmugge 등(1974)은 토양수분에 대한 라디오미터 반응의 토양구조 효과를 식생피복이 없는 평평한 땅에 대한 19.35GHz의 공중관측실험을 통하여 처음으로 제시하였다. 후속연구에서 토양수분이 토양의 수분보유능의 비율로 나타낼 수 있음을 보였다(Wang and Schmugge, 1981).

깨끗한 물의 유전상수에 대한 주파수( $f$ ) 상관관계는 다음과 같이 Debye 방정식으로 나타낸다(Ulabay 등, 1984).

$$\epsilon_w = \epsilon_w^\infty + \frac{\epsilon_w^0 - \epsilon_w^\infty}{1 + j2\pi f\tau_w} \quad (3)$$

여기서  $\epsilon_w^0$ 은 깨끗한 물에 대한 무차원 유전상수,  $\epsilon_w^\infty$ 은  $\epsilon_w$ 의 무차원 고주파 한계,  $\tau_w$ 는 깨끗한 물의 감쇄시간을 나타낸다.

$$2\pi\tau_w(T) = 1.1109 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12}T + 6.938 \times 10^{-14}T^2 - 5.096 \times 10^{-16}T^3 \quad (4)$$

여기서 T는 온도 ( $^{\circ}C$ )를 나타낸다.

습윤토양의 유전특성을 얻기 위해 다음과 같은 혼합방정식이 사용된다.

$$\epsilon = m_t \epsilon_x + (P - m_t) \epsilon_c + (1 - P) \epsilon_r, \quad \text{for } m_v \leq m_t \quad (5)$$

$$\epsilon_x = \epsilon_t + (\epsilon_w - \epsilon_t) \frac{m_v}{m_t} \rho_b \quad (6)$$

$$\epsilon = m_t \epsilon_x + (m_v - m_t) \epsilon_w + (P - m_v) \epsilon_c + (1 - P) \epsilon_r, \quad \text{for } m_v \leq m_t \quad (7)$$

$$\epsilon_x = \epsilon_t + (\epsilon_w - \epsilon_t) \rho_b \quad (8)$$

여기서 P는 건조토양의 공극율이고  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_w$ ,  $\epsilon_r$ 와  $\epsilon_i$ 는 각각 공기, 물, 암석 및 얼음의 유전상수를 나타낸다.  $\epsilon_x$ 는 초기 수분상태의 유전상수이다.  $\rho_b$ 는 토양의 체적밀도이다.  $m_t$ 와  $\rho_b$ 값은 관측자료를 사용하여 18개의 토양형에 대하여 결정되었다(Wang and Schmugge, 1980).

$$m_t = 0.49 WP + 0.16 \quad (9)$$

Dobson 등(1985)은 유전상수  $\epsilon$ 에 대한 두개의 혼합모형을 제시하였다. 첫 번째 접근법은

$$\rho_b = -0.57 WP + 0.48 \quad (10)$$

결합수와 자유수의 비율은 토양구조의 상세한 정보를 이용하여 계산된다. 많은 적용에 있어서 특히 위성자료분석의 경우 이 모델에 필요한 변수들이 충분한 정도를 가지고 결정되지 못한다. 그러므로 Dobson 등(1985)은 유전상수  $\epsilon$ 에 대한 토양구조와 주파수의 의존도를 나타낼 수 있는 간편식을 제시하였다. 이 접근법에서 결합수는 경험적 형태 요소  $\eta$ 에 관계된다. 다른 계수  $\beta$ 는 토양구조를 설명한다. 이 모델은 4-18GHz 주파수 영역에서 일반적으로 사용된다. 복잡한 토양 유전율은 다음과 같다.

$$\epsilon = [1 + \frac{\rho_s}{\rho_r} (\epsilon_r^2 - 1) + m_v^2 \epsilon_{fv}^2 - m_v]^{1/2} \quad (11)$$

$$\epsilon_{fv} = \epsilon_{w\infty} + \frac{\epsilon_{u0} - \epsilon_{w\infty}}{1 + j2\pi f r_w} - j \frac{c_i}{2\pi f \epsilon_0} \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s m_v} \quad (12)$$

여기서  $m_v$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_r$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_{fv}$ 는 각각 토양 체적 수분, 마른 토양과 암석 밀도 및 암석과 자유수의 유전율을 나타낸다. 자유수의 유전상수는 주파수와 온도에 의존하고 Debye 방정식으로 주어진다. 변수  $\beta$ 와  $c_i$ 는 실험실 실험으로부터 모래와 점토비와 관련되어 있다.

$$\beta_e = 1.275 - 0.519 Sand - 0.152 Clay \quad (13)$$

$\epsilon(\epsilon')$ 의 실수부분은

$$\beta_e = 1.338 - 0.603 Sand - 0.166 Clay \quad (14)$$

$\epsilon(\epsilon'')$ 의 허수부분은

$$c_i = -1.645 + 1.939 \rho_s - 2.256 Sand + 1.594 Clay \quad (15)$$

주파수가 증가할 때 토양수분이 증가함에 따라 실수부분은 감소하고 허수부분은 증가한다.

토양수분 원격관측에 있어 지구에 대한 토양구조를 정확히 아는 것은 불가능하다. 더욱이 위성관측을 위한 passive 라디오미터의 공간분해능에서는 관측격자내에서 토양구조가 변하게 된다. 관측격자내에서의 토양구조의 변화와 관련한 토양수분 상관관계에 대한 연구도 많이 수행되고 있다.

토양으로부터 반사되는 마이크로웨이브 방출은 입사복사와 현존하는 토양수분의 함수관계로 나타난다. 원격측정된 토양수분은 특정 깊이에 대한 관측면적의 공간평균을 나타낸다. 토양수분 관측깊이에 대한 양호한 상관관계는 다음과 같이 나타난다.

$$\delta_p = k | \text{Im}(\sqrt{\epsilon}) | \quad (16)$$

여기서  $k=2\pi/\lambda$ 는 자유공간에서의 전파상수이고  $\text{Im}$ 은 허수부분을 나타낸다.

토양수분 측정을 위한 라디오미터 기기설계를 위한 가장 중요한 요소가 파장의 결정이다. 방출파장이 줄어들 때 토양의 유전상수도 줄어든다. 또한 파장이 줄어들 때 식생피복에 의한 감쇄는 증가한다. 식생피복은 감쇄층으로 작용하는 마치 마스크와 같은 역할을 한다. Jackson과 Schmugge(1991)는 식생 변수 (b)에 대한 파장과 식생 형태의 효과를 조사하여 다음 식을 제시하였다.

$$O_i = b * vwc \quad (17)$$

여기서 vwc(vegetation water content)는 식생 수분량을 나타낸다.

마이크로웨이브 기법을 이용한 토양수분관측은 passive와 active 마이크로웨이브 접근법을 포함하고 각각의 기법 고유의 장점을 가지고 있다. Passive 방법은 지표면에서 발산하는 자연 열 방출의 마이크로웨이브 파장대를 관측한다. Active 방법 또는 레이더 기법은 인공적인 마이크로웨이브 신호를 보내고 받는 기법이다. 수신신호는 후방산란계수를 결정하기 위해서 전송신호와 비교한다. 이러한 결과는 목표물의 특성에 상관된다. Passive와 active 마이크로웨이브 기법은 지표토양수분(0-5cm)관측을 가능하게 높은 고도에서의 관측을 가능하게 하고 이는 광역의 토양수분 관측 가능성을 제시한다. Active 접근법 특히 synthetic aperture radar는 극히 고해상도 위성관측을 가능하게 하며(100m) passive관측기법은 훨씬 저해상도의 관측이 가능하다(10km). 다음절에서 passive기법과 active기법에 대하여 상세히 알아보고자 한다.

## 2.2 Passive 기법

Passive 마이크로웨이브 원격관측은 자연 열 방출에 대한 특별한 파장을 관측할 수 있도록 특정 파장에 대해 매우 예민하도록 설계된 라디오미터를 이용한 원격 관측을 말한다. 이 관측은 지표면과 대기를 통해 관측된 휘도온도를 제공한다. 여기서 대기의 영향은 파장 10cm이상에서 무시할 수 있다. 지표면의 휘도온도는 지표 방사율과 지표의 물리적 온도의 곱과 같다. 만약 물리적 온도가 측정되면 방사율은 결정된다. 마이크로웨이브 방사율은 대부분의 지표면에서 0.6에서 0.95 사이로 나타난다. 이 범위의 파장에서 방사율은 다음과 같다.

$$reflectivity = 1 - emissivity \quad (18)$$

이것은 Fresnel 방정식과 토양수분의 연결고리를

제공한다.

토양수분의 원격관측을 위한 마이크로웨이브 라디오미터의 사용을 위한 지상 및 비행기 탑재 관측에 대한 연구가 이루어져 왔다. 그림 1은 L밴드 주파수에서의 마이크로웨이브 지상관측과 관련한 개요도이다. 단 채널 라디오미터 토양수분 관측에서 사용되는 주파수는 1-30GHz(파장 약 1-30cm)이며 가장 실질적인 주파수는 1-3GHz이다. 더 긴 파장은 더 깊은 관측심과 식생 등에 대한 영향도 작게 받음에도 불구하고 보다 긴 안테나 길이를 요구하므로 기술적인 한계가 있다. 대부분의 연구는 라디오주파의 간섭이 적은 1.4GHz에 집중되었다. 단 채널 관측은 보조 자료들을 이용하여 식생, 표면 거칠기, 온도 및 토양조직 등에 대한 보정이 필요하다. 토양수분이 깊이에 따라 일정하다는 가정 하에서 토양수분변화에 따른 마이크로웨이브 파장대(L-, C- 및 X밴드)의 관입깊이는 달라진다. L밴드 토양수분측정치는 약 7cm에서의 평균토양수분을 나타낼 수 있고 C밴드 토양수분측정치는 약 2cm깊이의 토양수분을 나타낸다. 특히 C밴드 토양수분 측정치가 식생피복의 영향에 얼마나 민감할지를 보여준다. 이러한 관측 마이크로웨이브의 파장대에 따른 측정 깊이의 차이는 토지피복의 분류에 따른 적용에 있어 신중을 기해야 함을 보여준다. 비행기에 탑재한 L밴드 라디오미터의 종류로는 Push Broom Microwave Radiometer(PBMR)기기와 ESTAR기기가 있으며 2차원 토양수분관측에 성공적으로 사용되고 있다. 위성관측을 위한 저주파수(< 3GHz) 라디오미터는 현재까지 단 한차례 운영되었으며(Skylab 1.4 GHz 라디오미터, S-194 mission) 1973년과 1974년에 잠깐 운영되었으며 관측 분해능은 약 115km이다. 또한 그 기기는 토양수분관측을 위해 설계된 기기가 아니었다. 저주파 라디오미터를 이용한 위성관측을 위해서는 관측 분해능 개선을 위한 각종 기술의 발달이 필요한 현실이다.

### 2.2.1 휘도온도모델

식생이 없는 평평한 땅에서의 passive 마이크로웨

이브 원격관측에서 라디오메터는 지표면으로부터 방사각도를 관측한다. 이 방사는 표면온도와 표면방사율의 곱으로 나타나는 휘도온도로 나타낼 수 있으며 다음식과 같다.

$$T_B = t(H)[rT_{sky} + (1-r)T_{soil}] + T_{atm} \quad (19)$$

여기서  $t(H)$ 는 토양으로부터 H만큼 떨어진 라디오메터에 대한 대기 투과율을 나타낸다.  $r$ 은 평평한 지표면의 반사율을 나타내고  $T_{soil}$ ,  $T_{atm}$ ,  $T_{sky}$ 는 각각 토양, 대기온도와 하늘밝기를 나타낸다. 전형적인 마이크로웨이브 장파장 관측에서 토양 휘도온도에 비하여  $T_{atm}$ ,  $T_{sky}$ 의 비율이 작으므로 휘도온도를 다음과 같이 간단히 제시할 수 있다.

$$T_B = (1-r)T_{soil} = eT_{soil} \quad (20)$$

여기서  $e$ 는 방사율로서  $e=(1-r)$ 이며 지표면 거칠기와 토양의 유전상수와 관련된다. 일반적인 토양수분의 범위에서 방사율은 0.95에서 0.6의 범위를 가진다. 또한 반사 계수  $R$ 은 다음과 같이 나타낸다.

$$R = \frac{\cos\theta - \zeta}{\cos\theta + \zeta} \quad (21)$$

$$\zeta = \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta} \quad (22)$$

여기서  $\theta$ 는 입사각을 나타낸다.

관측자료를 이용한 토양수분산정을 위해서는 그림 2에서 제시한 바와 같이 휘도온도에 대한 보정이 필요하다. 지면 특성에 대한 정보를 사용하기 위하여 식생상태, 지표면 형태 등의 자료가 필요하다. 이러한 정보를 사용하여 보정된 휘도온도를 이용하여 지표 방사율을 산정할 수 있다. 이러한 계산과정 중에 지표온도에 대한 정보가 필요하다. 또한 식생 수분량 자료를 이용하여 식생상태 보정이 이루어진다. 토양거칠기는 토지사용 특성에 기초하여 산정된다. 마지막 과정으로 Fresnel 방정식과 유전-토양수분 모델 상관관계를 이용한 토양수분 산정과 토양구조에 대한 보정이 이루어진다.

### 2.3 Active 기법

Active 마이크로웨이브 센서는 스캐트로메터로 불리는 방출과 수신되는 힘을 관측하는 기기이다. 관측 기기는 후방산란계수를 제공하고 이 값의 변화는 표면 반사율 및 토양수분과 높은 상관관계를 가진다. 지표면의 지형특성이나 식생피복의 영향을 고려할 수

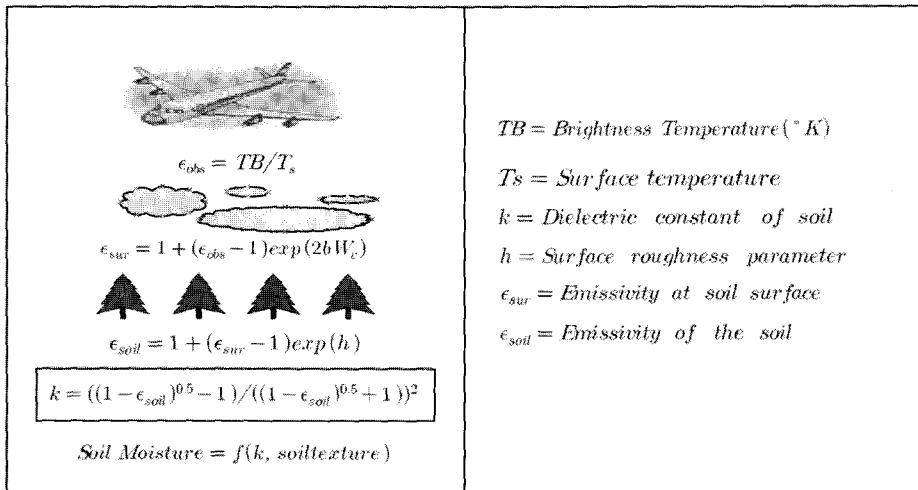


그림 1. Schematic diagram of a passive microwave emission model from land surface (Jackson, 1993)

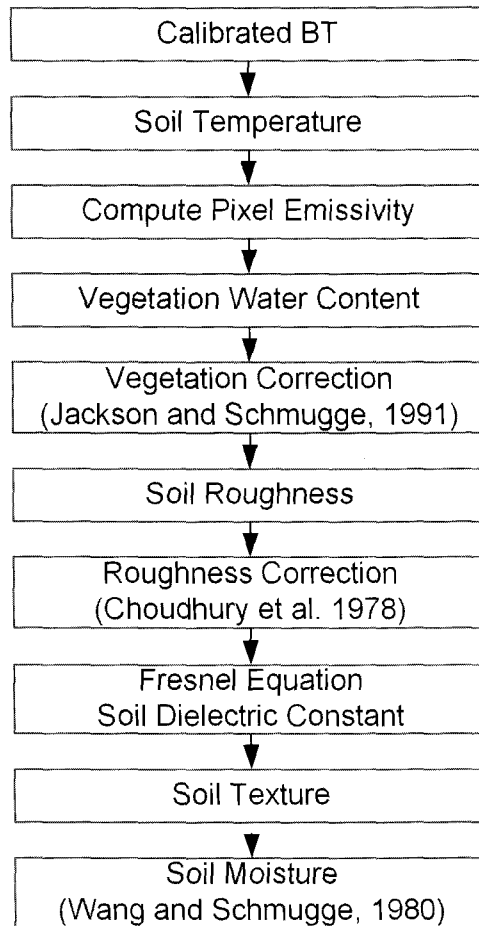


그림 2. Stepwise flow diagram of soil moisture estimation algorithm using passive microwave observation. (Bindlish, 2000)

있는 간단한 모델을 제시하는 것은 매우 어려운 일이다. Dobson 등(1992)은 ERS-1자료(Michigan, USA)를 이용하여 처음으로 초지에 대한 지상보정을 포함한 분석결과를 제시하였다. 그러나 많은 연구자들은 복잡한 레이더 모의 모델에 대한 적용성에 대하여 비판하였다. 또한 Sabburg(1994)는 ERS-1자료를 이용하여 Australia의 농경지에 대한 적용성을 분석하였다. 그의 분석결과는 지표에서 5cm까지의 토양수분에 대하여 10% 범위내의 토양수분 관측이 가능함을 보였다. 최근 사용되는 active 관측기기로는 SAR 장비가 있으며 큰 안테나 장비 없이도 관측 목적에 따른 분해능 조절이 용이하다는 장점이 있다.

일반적으로 자연적인 표면에서의 마이크로웨이브 후방산란은 다음과 같은 세 가지 요소에 영향을 받는다. 1) 토양표면의 거칠기, 2) 토양수분, 3) 지표면의 식생상태. 아래 식은 active 관측에서의 산란구성을 나타낸다.

$$\sigma^0 = T^2 \sigma_s^0 + \sigma_{dv}^0 + \sigma_{int}^0 \quad (23)$$

여기서  $\sigma_s^0$ 는 식생이 없는 평평한 땅에서의 후방산란,  $T^2$ 는 식생층의 이 방향 감쇄,  $\sigma_{int}^0$ 는 식생층의 직접 후방산란, 및는 지표면과 식생 요소를 포함한 다중 산란을 나타낸다. active 기법에 의해서 관측된 산란

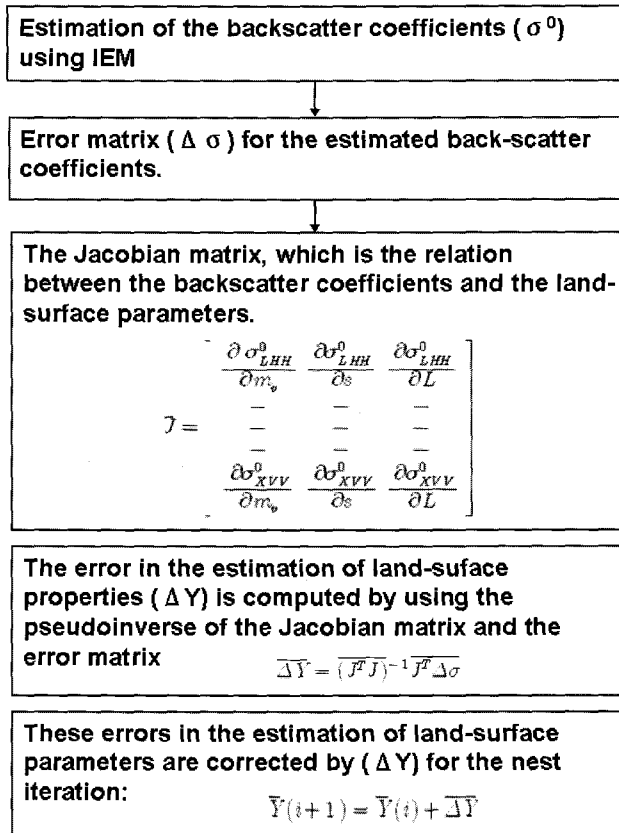


그림 3. Stepwise soil moisture estimation algorithm using multi-frequency & polarization active icrowave observations (Bindlish, 2000)

값을 이용한 토양수분 산정 방법은 회귀식, 인공신경망기법 등 다양한 기법을 이용하고 있으며 식생이 덮인 지표면에서의 토양수분 역전 알고리즘은 개발단계에 있으며, 그림 3은 Bindlish(2000)에 의해서 제시된 식생이 없는 평평한 땅에서의 토양수분 역전 알고리즘의 개요를 나타낸다. 이것은 다중 주파수 및 다중 편광 레이더 자료와 IEM을 사용한 토양수분 산정 과정으로 보다 자세한 내용은 다음절에서 소개하고자 한다.

### 2.3.1 산란모델

평평한 식생이 없는 토양에 대하여 후방산란 관측치와 토양수분을 상관지으려는 시도에서 최소한 유전상수와 지표높이 표준편차(surface height standard deviation: RMS)값을 필요로 한다. 이것은 정

확한 지표높이 표준편차 값이 정확한 토양수분 산정에 필수적이라는 것이다. Active 마이크로웨이브 원격관측은 관측기기의 장점으로 높은 공간분해능을 가지므로 지형정보를 보다 정확하게 고려할 수 있다. 주어진 센서의 자원과 특성 즉 파장, 관측각, 편광 방향 등에 따라 다른 정보를 획득할 수 있다. 이러한 다중 관측 체계로부터 유전상수와 RMS를 얻을 수 있으며 평평한 비 식생 지표면에 대한 active 마이크로웨이브 접근법에 대한 레이더 산란값  $\sigma_s$ 는 다음과 같은 함수관계를 가진다.

$$\sigma_s = f(m_s, s, L) \tag{24}$$

여기서  $s$ 는 표면거칠기를 나타내고  $L$ 은 상관거리를 나타낸다.  $s$ 와  $L$ 이 파장과 편광 및 입사각에 따라

변화하지만 각각의 값을 독립적으로 계산하는 이론적 모형으로부터 만족할 만한 결과를 얻기는 힘들다.

복잡한 산란 알고리즘을 가지는 IEM에 기초한 다중 채널(L밴드와 C밴드) 및 다중 편광(H와 V) 정보를 이용할 수 있는 보다 간단화된 모델은 전절에서 소개하였다. 식생의 존재는 이러한 문제를 보다 복잡하게 하며 식생의 정도에 따른 적용가능성에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있다(Karam 등, 1992, Ulaby 등., 1984). 다중 편광자료는 IEM의 가장 중요한 변수인 지표의 거칠기에 대한 보다 정확한 정보를 양산을 가능하게 하였다. 산란계수에 대한 식생피복의 영향과 표면 거칠기 정보의 개선에 대한 보다 정밀한 분석은 다음기회에 언급하고자 한다.

다음호에서는 passive와 active 원격관측 및 지상 관측으로부터 획득된 토양수분자료의 시공간 변화특성을 살펴보기로 하겠다.

## 참고문헌

- Bindlish, R. and Barros, A.P., (2000) "Multi-frequency soil moisture inversion from SAR measurements using IEM." *Remote Sensing of Environment*, vol. 71(1), pp. 67-88.
- Carlson, T., Perry, E. and Schmugge, T., (1990) "Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields." *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 52.
- Dobson, M.C., Pierce, L., Sarabandi, K., Ulaby, F.T. and Sharik, T., (1992) "Preliminary Analysis of ERS-1 SAR for Forest Ecosystem Studies" *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sensing*, vol. 30, 203-211.
- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T. and El-Rayes, M.A., (1985) "Microwave dielectric behavior of wet soil, II, Dielectric mixing models." *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, pp. 35-46.
- Fung, A.K., Li, S., Chen, K.S., (1992) "Backscattering from a randomly rough dielectric surface." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 30, pp. 356-369.
- Jackson, T.J. and Schmugge, T.J., (1991) "Vegetation effects on the microwave emission of soils." *Remote Sensing of the Environment*, vol. 36, pp. 203-212.
- Jackson, T.J., (1993) "Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing." *Hydrological Processes*, vol. 7, pp. 139-152.
- Karam, M.A., Fung, A.K., Lang, R.H. and Chauhan, N.S., (1992) "A Microwave Scattering Model for Layered Vegetation", *IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing*, vol. 30, 767-784.
- Sabburg, J.M., (1992) "Evaluation of an Australian ERS-1 SAR scene pertaining to soil moisture measurement" *Proc. of the Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1424-1426.
- Schmugge T., P. Gloersen, T.T. Wilheit, and F. Geiger, (1974) "Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers." *J. Geophysical Research*, vol. 79(2), pp. 317-323.
- Schmugge, T.J., (1980) "Effect of texture on microwave emission from soils". *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, vol. 18, pp. 353-361.
- Ulaby, F.T., Allen, C.T., Eger III, G. and Kanemasu, E., (1984) "Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index." *Remote Sensing of Environment*, vol. 14, pp. 113-133.



Wang, J.R. and Schmugge, T.J., (1980) "An empirical model for complex dielectric permittivity of soils as a function of water content." *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, vol. 18, pp. 288-295.

Wang, J.R. and Chouhury, B.J., (1981) "Remote sensing of soil moisture content over bare

field at 1.4 GHz frequency." *J. Geophysical Research*, vol. 86, pp. 5277-5282.

Wetzel P.J. and Chang, J.T., (1988) "Evapotranspiration from nonuniform surfaces: A first approach for short-term numerical weather prediction." *Monthly Weather Review*, vol. 116, pp. 600-621. 🌐