

동축선 끝단에서의 마이크로파 반사를 이용한 토양 수분 함유량 산출 기술

김태진* · 오이석

(주)제이슨 테크*, 홍익대학교 전자공학과

Retrieval of Soil Moisture Using Microwave Reflection at the End of a Coaxial Probe

Tae-Jin Kim and Yi-Sok Oh

Jason Tech. Co.*, Department of Radio Engineering, Hong-Ik University

Abstract

In this paper, an algorithm for retrieving soil moisture from measurement of microwave reflection at the end of a coaxial cable is presented. Because the wave reflection from the boundary between air and soil layers depends on the dielectric constant of the soil layer, the dielectric constant can be obtained from measured reflection coefficient. At first, an equivalent circuit for the coaxial probe contacted on the soil surface was chosen with two unknown circuit elements. Then, the unknown circuit elements are obtained experimentally by measuring the reflection constants of 20 soil samples, and consequently, an empirical formula for computing the dielectric constant from the reflection coefficient is obtained. The dielectric constant is mainly influenced by the soil moisture, and the soil moisture can be computed from the dielectric constant using an existing empirical formula. HP Network Analyzer 8510C was used to measure the magnitude and the phase of the reflection coefficient at 4.65 GHz, and the measured data set were used to obtain an empirical formula for computing the dielectric constant. The empirical formula obtained in this study was proven by other soil samples.

Keyword : Soil moisture, Microwave reflection, Coaxial probe

요 약

본 논문에서는 동축선 끝단에서의 마이크로파 반사를 측정하여 수분 함유량을 산출하는 알고리즘을 제시한다. 전파 반사는 공기층과 토양층 사이의 유전율 변화에 의해 발생하므로 반사 계수에서 유전율을 얻는 기술을 연구하였다. 우선, 유전체에 접촉한 동축선 끝단의 등가회로를 선정하여 미지의 회로 정수를 설정하였다. 다음에, 수분함유량을 알고 있는 토양을 측정하여 미지 회로 정수를 발견하고 반사 계수와 유전율의 관계식을 실험적으로 찾았다. 토양의 유전율은 주파수, 토양 형태에도 영향을 받지만 주로 수분 함유량에 의해 결정되므로 기존의 실험식을 이용하여 유전율로부터 수분 함유량을 계산할 수 있었다. 본 연구에서는 Network Analyzer를 이용하여 4.65 GHz에서 각종 토양의 반사 계수의 크기와 위상을 측정하기를 반복하여 복소수 형태의 유전율과의 관계식을 산출하였다. 이 실험식은 다른 토양에 이용되어 그 정확도가 검증되었다.

I. 서 론

물은 생태계의 기본 자원이며, 증발, 강우, 침투, 관개 등의 시간과 공간의 순환을 통하여 자연 환경에 필수 불가결한 요소이다. 특히, 토양의 수분 함유량은 농작물, 삼림 등의 성장 정도를 가늠케 해주므로 중요한 정보로 활용될 수 있다. 최근에는 위성 레이다를 이용하여 지표면의 영상 데이터를 얻고, 이 영상 데이터로부터 초목의 특성, 수분 함유량 등의 정보를 얻는 기술이 두드러지게 발전하고 있다. 또한 이러한 정보 추출을 위하여 알고 있는 지표면에서 레이다 산란을 예측하는 모델들도 이론적, 수치해석적, 실험적으로 연구되어지고 있다(Ulaby *et al.*, 1986; Ulaby, 1974; Oh *et al.*, 1992). 정확한 레이다 산란 모델을 개발하기 위해서는 'ground truth' 데이터인 토양 수분 함유량, 표면 거칠기, 또는 지상의 초목 상태 등의 자료를 정확하게 파악하고 있어야 한다.

토양의 수분 함유량을 측정하는 가장 원시적이고 보편적인 방법은 토양의 일부를 채취하여 oven에 말리고 무게 차이를 비교하는 일명, 'oven-drying' 방법이다(Ulaby *et al.*, 1986). 마이크로파 송수신기를 이용하여 좀더 쉽게 수분 함유량을 측정하는 많은 방법들이 소개되었는데, 이 방법들에서는 토양의 전기적인 특성을 대변하는 유전율을 측정하여 수분 함유량을 산출한다(Hallikainen *et al.*, 1985). 예를 들면, 도파관에 토양을 삽입하여 전파의 전송 특성을 측정하던지(waveguide 기술), 두 개의 안테나 사이의 공간에 토양을 놓고 전파 전송 특성을 측정하는 방법(free-space 기술) 등이다. 그러나 이들 방법은 실험실에서 측정하는 방법들이며, 측정 장비 보정이 쉽지 않다. 현장에서 쉽게 측정할 수 있도록 설계된 것도 있으며 대표적인 것이 동축선 끝단을 이용하여 전파 반사 특성을 이용하여 유전율을 측정하는 것이다(Brunfelt, 1987). 이 방법은 보정이 간단하지만 유전율의 허수 부분에서 큰 오차를 주는 단점이 있다(Jackson, 1990). 또한 최근에는 링 공진기의 공진 특성을 이용하여 수분 함유량을 정확하게 측정하는 기술이 발표되었으나(Sarabandi and Li, 1994) 아직 실용되지는 않고 있다.

본 논문에서는 동축선 끝단을 이용하여 마이크로파 반사를 측정하고 후 유전율을 산출하는 알고리즘을 연구하였으며, Network Analyzer를 이용하고 세밀한 보정과정을 거쳐 정밀한 측정이 가능하도록 하였다. 우선, 동축선 끝단이 토양에 접촉한 상태를 전기회로로 대체하고, 반사계수를 이용하여 회로 정수와 유전율과의 관계를 정립하였다. 이 관계식의 미지 정수를 구하기 위해 이미 수분 함유량을 알고 있는 토양의 많은 샘플들을 이용하여 반복적으로 반사계수를 측정하였다. 이 샘플들의 수분 함유량을 oven-drying 기술로 정확히 측정하고, Hallikainen *et al.*(1985)의 논문에서 주어진 실험식에 의해 유전율을 얻은 후, 가장 적절한 미지 정수를 구하였다. 이 방법은 다른 토양 샘플을 측정 비교하여 그 정확성이 검증되었다.

II. 등가회로 모델링

1. 기본 원리

모든 물질의 수분 함유량은 그 물질의 전기적인 유전율과 매우 밀접한 관련이 있다. 또한 마이크로파의 반사계수는 반사되는 물질의 유전율에 비례한다. 이러한 두 가지의 성질을 접합하여 마이크로파를 토양에 반사시키면 그 반사계수의 변화를 통하여 수분함유량을 산출할 수 있다. 유전율 ϵ 이란 물질의 전기적인 성질을 나타내는 복소수 인자로서 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0(\epsilon_r' - j \epsilon_r'')$ 의 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 ϵ_0 은 공기중에서의 유전율을 나타내며 ϵ_r 은 공기에 대한 상대적인 유전율을 나타내는 것으로서 본 연구에서는 이 상대유전율 ϵ_r 을 기본적인 유전율인자로 취급한다. 또한 유전율과 물질의 굴절률 n 과는 $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 의 관계가 있다.

반사 전압의 입력 전압에 대한 비를 의미하는 반사계수 Γ 를 측정하는데는 open coaxial probe를 사용하였다. 이 probe는 반고체 동축선로(semi-rigid coaxial cable)를 잘라서 단면을 진행 방향과 수직으로 매끈하게 연마한 것이다(Fig. 1 참조). 이것은 시중에서 구하기 쉽고 제작이 간단해서 널리 쓰이는 반사계수 측정법이다.

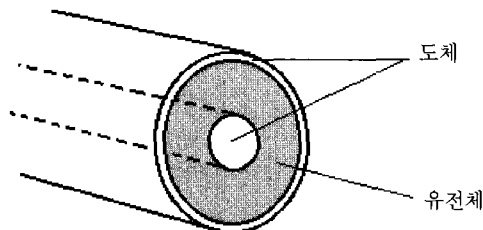


Figure 1. Semi-rigid Coaxial Cable

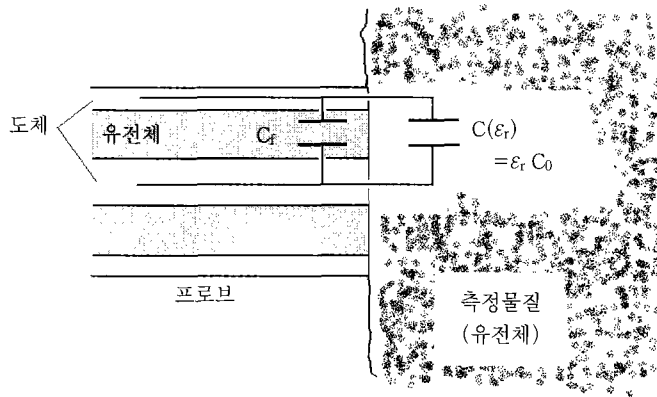


Figure 2. Equivalent circuit of the coaxial probe

반사계수 측정 계기로는 HP사의 8510C 네트워크 분석기를 사용하였다. 이 계기는 마이크로파 대역에서 고주파 회로의 반사계수와 전달계수 등의 여러 가지 특성을 동시에 측정할 수 있다.

2. 등가회로 모델링

동축선 끝단의 등가회로는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

캐패시터는 도체와 도체 사이에 유전체가 위치하여 전기적인 에너지를 축적하는 소자이다. 이 경우에도 외부도체와 내부 도체 사이에 전파를 전달하는 바깥 유전체가 위치해 있으므로 하나의 캐패시터 C로 모델링할 수 있다. 또한 내부 유전체로 누설되는(fringing) 전파가 있으므로 다른 하나의 캐패시터 C_f로 모델링이 가능하다. 이 경우의 식은 다음과 같다(Athey *et al*, 1982).

$$\Gamma = \Gamma e^{j\phi} = \frac{1 - j\omega Z_0 [C_0 \epsilon_r + C_f]}{1 + j\omega Z_0 [C_0 \epsilon_r + C_f]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서 Z₀는 선로의 특성 임피던스이며 본 연구에서는 50Ω이며, ε_r은 측정물질의 유전율을 말한다. 이 식으로부터 반사계수와 유전율은 서로 일정한 함수관계에 있음을 알 수 있다. 이 식을 바로 역변환하면 다음과 같은 식을 얻을 수가 있다.

$$\epsilon_r = \frac{1 - \Gamma}{j\omega Z_0 C_0 (1 + \Gamma)} - \frac{C_f}{C_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

3. 복소 유전율 변환

실제로 유전율은 복소수의 형태로 구하여진다. 일반적으로 C_f 는 C_0 에 비해 매우 작은 영향을 미친다. 그래서 C_f 를 아예 생략하고 식을 전개해도 결과값의 변화는 크지 않다. 하지만 넓은 유전율 범위에서 반사계수와 유전율과의 관계를 정의하기 위해서는 C_f 가 있어야 한다. 왜냐하면 C_f 는 물리적인 의미보다는 C_0 값을 보정하는 수학적인 미지수로서의 기능이 더 강하기 때문이다. 또한 C_f 를 포함시킴으로써 복소 반사계수와 복소 유전율간의 2 : 2의 수학적인 역변환이 가능해지게 된다.

이러한 복소수의 유전율을 정확히 구하기 위해서는 역변환식을 실수부와 허수부로 나눌 필요가 있으며 수학적으로 다음과 같은 두 개의 식으로 나누어진다(Stuchly, et al., 1982).

$$\epsilon_r' = \frac{2 |\Gamma| \sin(-\phi)}{\omega Z_0 C_0 (1+2 |\Gamma| \cos \phi + |\Gamma|^2)} - \frac{C_f}{C_0} \dots\dots\dots (3a)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{1-|\Gamma|^2}{\omega Z_0 C_0 (1+2 |\Gamma| \cos \phi + |\Gamma|^2)} \dots\dots\dots (3b)$$

이 식을 이용하면 반사계수에서 바로 복소 유전율로 변환이 가능하다. 하지만 이 식 자체로는 2개의 정전용량 C_0 와 C_f 가 아직 미지수로 남아 있다. 이 두 개의 미지수는 유전율을 알고 있는 물질을 여러 개 측정하는 보정과정을 통하여 결정할 수 있다.

III. 반사계수와 유전율 관계 정립

1. 미지수 보정

유전율을 구하기 위한 변환식의 미지수 C_0 와 C_f 를 구하는 식은 그 식을 역변환하여 다음과 같이 만들 수 있다.

$$C_0 = \frac{1-|\Gamma|^2}{\omega Z_0 \epsilon'' (1+2 |\Gamma| \cos \Phi + |\Gamma|^2)} \dots\dots\dots (4a)$$

$$C_f = \frac{-2 |\Gamma| \sin \Phi}{\omega Z_0 (1+2 |\Gamma| \cos \Phi + |\Gamma|^2)} - \epsilon' C_0 \dots\dots\dots (4b)$$

만일 C_0 와 C_f 가 상수라면 이 정전용량을 결정하는데는 이론적으로 두 개의 보정물질만 있으면

가능하다. 그러나 두 개의 정전용량이 유전율 또는 수분함유량에 관하여 상수가 아니라 함수형태를 가지며, 여러 학자들이 연구한 바에 의하면 유전율과 정전용량의 관계는 비선형적인 관계를 가지고 있으며, 대체로 지수함수 패턴을 갖고 있다고 알려져 있다(Gadja and Stuchly, 1983). 이 함수형태는 케이블의 특성에 따라 많은 차이가 있으므로 여러 보정물질을 통하여 정전용량의 수치해석적인 곡선함수화가 필수이다. 이러한 곡선함수화는 측정에 이용할 주파수를 정확히 결정한 후에 해야한다. 주파수 결정은 사용하는 프로브의 특성에 맞게 공기중에서의 반사계수가 정확히 1이 되는 지점을 찾아 결정하는 것이 좋다. 여기서 사용된 프로브는 4.65 Ghz에서 공기중에서의 반사계수가 $1.0 \angle 127.5^\circ$ 이고 내부도체와 외부 도체의 직경은 각각 1.63mm, 6.35mm이다.

이러한 보정을 하기 위해선 유전율이 알려진 여러 물질을 보정물질로 사용해야 한다. 하지만 토양에 해당하는 범위에서 유전율이 잘 알려진 물질을 찾는 것은 쉽지 않다. 그래서 이 연구에서는 토양을 이용한 유전율 샘플을 제작하였다. 유전율과 수분함유량 변환 알고리즘을 적용하여 토양을 가열해가면서 각 단계별로 토양의 무게를 측정해가면서 반사계수를 측정하였다. 토양이 완전히 건조한 이후에 각 단계의 수분함유량을 산출하고 그것을 유전율로 변환시킴으로써 여러 개의 각기 다른 유전율 샘플을 만들어 보정에 사용하였다.

2. 유전율과 수분함유량의 관계

유전율과 수분함유량과의 변환은 Hallikainen *et al*(1985)의 논문에서 발췌한 실험식을 이용하였다. 이 실험식은 방대한 실험 데이터에 기초한 것으로 오랜 기간 동안의 실험을 통하여 입증된 것이다. 기본적인 실험식은 다음과 같다.

$$\epsilon_c = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C)m_v + (c_0 + c_1S + c_3C)m_v^2 \dots\dots\dots (5)$$

여기서 S와 C는 각각 sand와 clay의 조성비를 나타내는 것이다. 위 식의 a, b, c는 방대한 측정 데이터로부터 도출된 상수들이다. 여기서 수분함유량 m_v 는 수분의 부피와 마른 토양의 부피의 비로 정의되어진다. 일반적으로 수분함유량은 가열을 통한 질량의 변화를 측정하여 구하여진 값이므로 각 토양의 건조밀도를 측정하여 곱해주어야 부피에 대한 수분함유량을 얻을 수 있다.

위에서 언급된 토양의 조성비는 입자의 크기에 따라 3가지 형태로 구분하는데 sand(2-0.05mm), silt(0.05-0.002mm), clay(0.002mm이하)의 3가지 크기의 토양의 입자크기의 비율로 정해진다. 위의 3가지 토양은 각각의 입자의 무게가 다르기 때문에 시간에 따라 침전되는 입자가 뚜렷하게 구별됨을 볼 수 있다. 이러한 시간의 변화에 따른 비중의 변화를 이용하여 토양의 조성비를 측정하였다(Fig. 3).

3. 측정 횟수의 결정과정

실제 토양의 반사계수를 측정해보면 같은 토양이라도 측정하는 위치에 따라서 반사계수에 어느

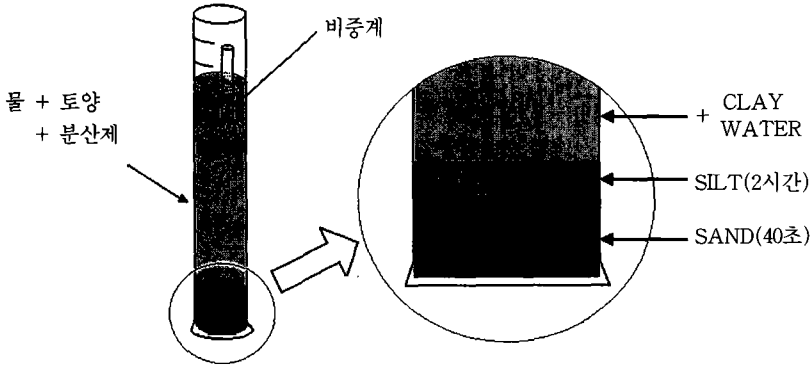


Figure 3. Measurement of soil properties

정도 차이가 생긴다. 왜냐하면 같은 토양이라도 수분이 일정하게 분포되어 있는 것이 아니기 때문이다. 측정 대상으로 하고 있는 토양의 전체적인 수분함유량을 산출하기 위해서는 반복측정을 통한 평균화작업이 필수적이다. 그러기 위해선 신뢰도를 가질 수 있는 측정횟수를 실험적으로 산출해야 한다. 수분함유량에 대한 반사계수 표준편차의 변화를 그래프로 나타내면 Fig. 4(a)와 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 수분함유량이 높을수록 표준편차가 크게 나타나므로 좀더 많은 점을 측정하여 평균해야 된다는 것을 의미한다. 수분함유량이 낮은 토양은 수분 자체가 적어서 수분의 분포에 대한 반사계수의 변화가 적게 된다. 여기서 믿을만한 평균값을 얻기 위해선 몇 번의 측정을 해야 하는지 알아보기 위해서 0.4정도로 수분 함유량이 높은 토양에서 50군데를 랜덤하게 측정하였다.

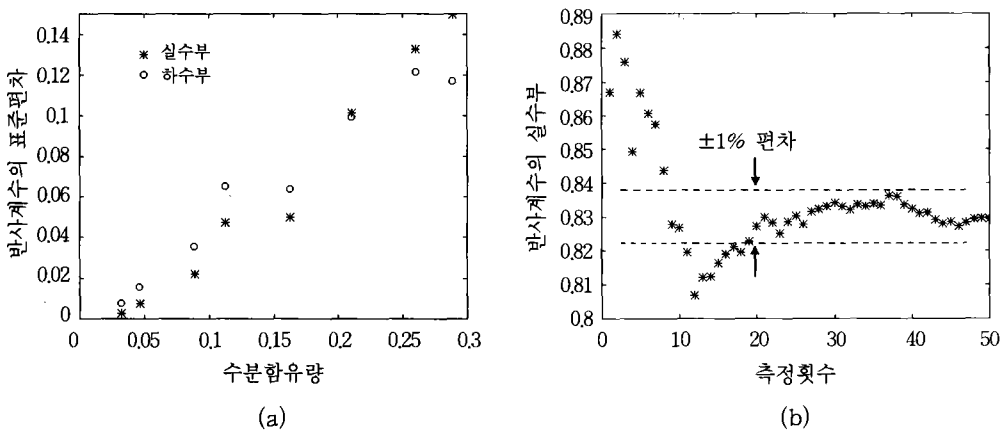


Figure 4. Estimation of number of the measurement : (a) Standard deviation of reflection coefficient distribution and (b) Real part of reflection coefficient

Fig. 4(b)는 측정을 할 때마다 그 측정 횟수까지의 측정치를 평균한 값들이다. 이 그림에서는 약 20번 이상 측정하여 평균한 반사계수는 측정치의 최종 평균에서 $\pm 1\%$ 오차 범위 이내에 있다는 사실을 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 본 연구에서의 모든 토양의 반사계수는 20번씩 반복 측정한 값들을 평균한 것을 사용하였다. 그러므로 이 연구에서 허용하는 토양에 대한 대략적인 측정오차는 $\pm 1\%$ 라고 할 수 있다.

4. 보정 결과

동축선로 끝단의 보정을 위해 soil sample들을 준비하였고 이 sample들의 수분 함유량을 알고 있으므로 유전율도 이미 알고 있다. 이 sample들에서 동축선로 끝단과 vector network analyzer를 이용하여 반사계수의 크기와 위상을 측정하여 식(4)에서 치럼 등가회로의 정전용량들을 구하면 된다.

우선 수분함유량과 실험식을 통해 얻은 유전율과의 관계를 알아보기 위해 본 연구에서 사용된 soil sample들의 경우를 Fig. 5(a)에 보였다. 또한 Fig. 5(b)에는 soil sample들의 수분 함유량에 대응하는 측정된 반사 계수의 크기를 보이고 있다.

측정된 반사 계수의 크기와 위상과 주파수 및 유전율을 식(4)에 대입하여 미지수 C_0, C_f 를 얻고, 이 값들은 수분 함유량 (또는 반사계수 값) 등의 함수이다. 본 연구에서는 여러 실험을 거쳐 정확하면서도 단순한 보정을 위해 측정된 반사계수의 크기의 함수로 미지수 C_0, C_f 를 구하였다. Figure 6는 반사 계수 크기에 따른 등가 회로의 정전용량 (미지수) C_0, C_f 의 변화를 점으로 그렸으며, 이 데이터에 최적으로 fitting된 함수형태의 정전용량 방정식을 다음과 같이 구하였다.

$$C_0 = 0.01 \exp (|\Gamma| + 0.485)^3 - 0.052 \dots\dots\dots (6a)$$

$$C_f = -0.01 \exp (|\Gamma| + 2.1)^{1.5} + 0.49 \dots\dots\dots (6b)$$

이 함수를 반사계수-유전율 변환식 (3)에 포함시켜 변수 C_0, C_f 의 값 역시 $|\Gamma|$ 만으로 결정이 가능하게 함으로써 식 (3)의 미지수 C_0, C_f 가 제거되었다. 위의 두 미지수를 $|\Gamma|$ 대신 Φ 를 이용한 수치해석을 적용할 수도 있으나, 일반적으로 프로브를 이용한 측정에서 위상보다 절대값의 오차가 더 적기 때문에 $|\Gamma|$ 를 기준으로 정하였다.

위의 동축선로 끝단의 보정 기술을 이용하여 반사계수로부터 유전율을 측정할 수 있었다. 이 유전율로 수분함유량을 계산할 수 있으며 토양을 oven에 말리는 방법으로 직접 측정한 수분함유량과 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 실제로 직접 측정한 수분 함유량 값과 동축선로 끝단에서의 마이크로파 반사를 측정하여 계산한 수분함유량값과의 비교를 통하여 보정과정의 정확도를 검증할 수 있었다. Fig. 7을 통하여 보정 함수를 이용한 보정과정은 수학적인 오차가 1% 수준으로 아주 잘 맞고 있음을 알 수 있다. 즉, 이 기술을 이용하면 일일이 토양 샘플을 취득하여 말리는 장시간의 과정이 필요 없고, 현장에서 마이크로파 반사만 측정하면 즉시 수분함유량을 계산할 수 있다.

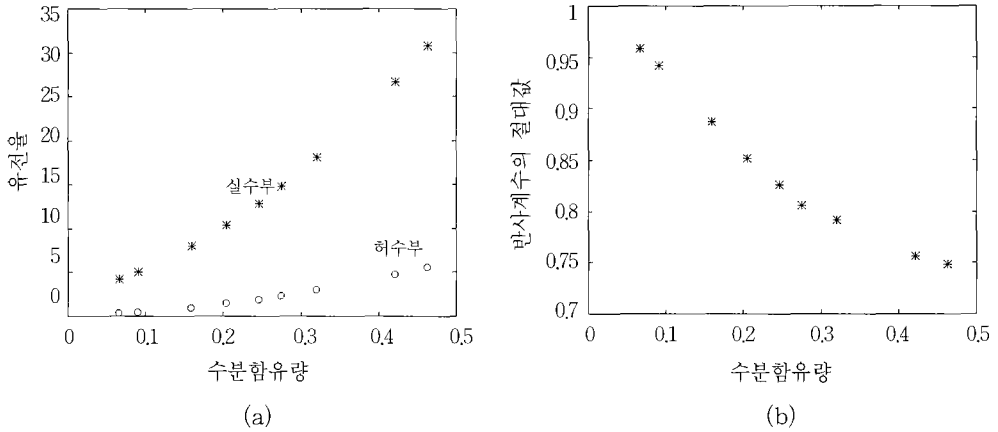


Figure 5. Relationships of variables: (a) m_v and ϵ_r , (b) m_v and $|\Gamma|$.

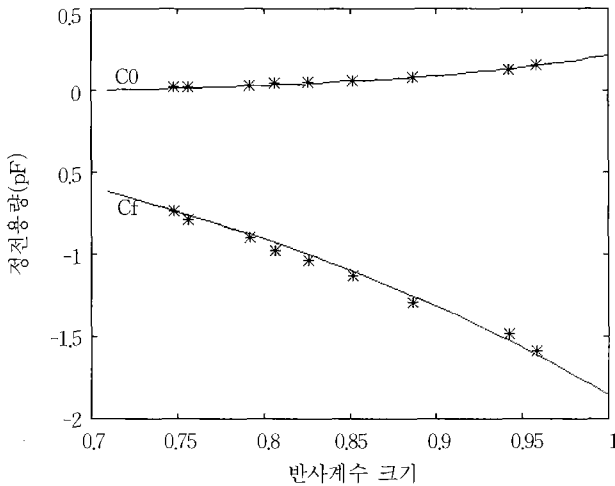


Figure 6. The Values of C_0 and C_f as function of the reflection coefficient

IV. 측정결과

미지수에 대한 보정을 마침으로써 반사계수 측정으로 부터 수분함유량을 계산할 수가 있게 되었다. 이 기술의 적용성과 정확성을 다시 검토할 겸, 논과 밭과 화단에서 각기 다른 토양을 채취하

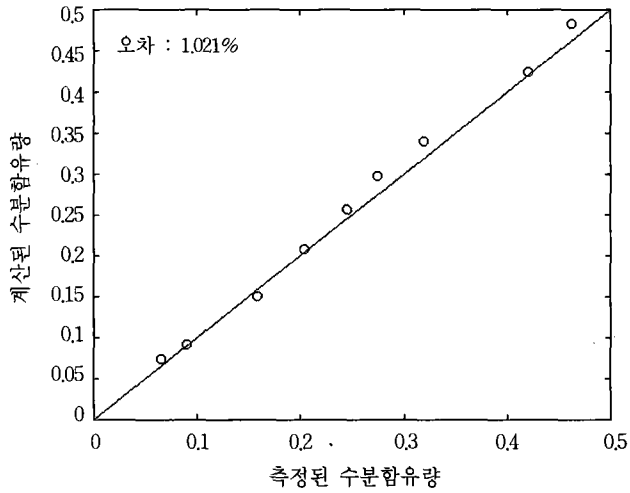
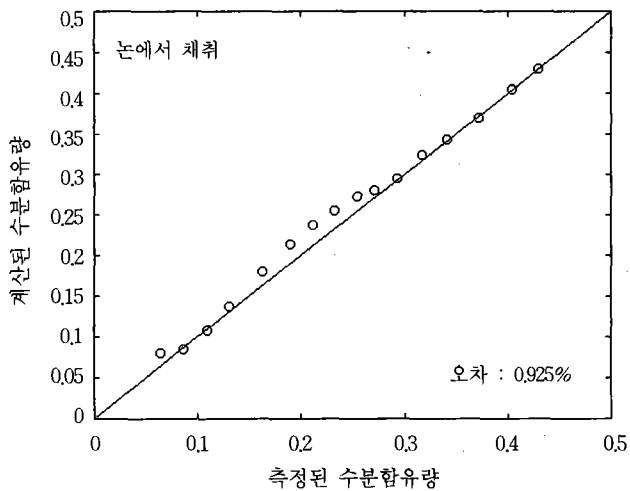


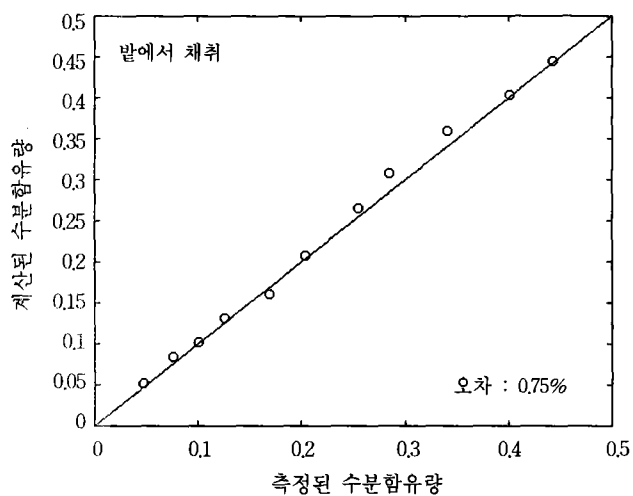
Figure 7. Verification of calibration results

여 수분 함유량을 측정하였다. 이 토양들을 점차 건조시켜 가면서 반사계수를 측정하여 계산한 수분함유량과 실제로 건조시켜 측정한 수분함유량과의 비교를 Fig. 8(a), (b), (c)에 각각 보였다. 각 토양의 조성비는 괄호 안에 sand : silt : clay 의 순서로 표시하였다.

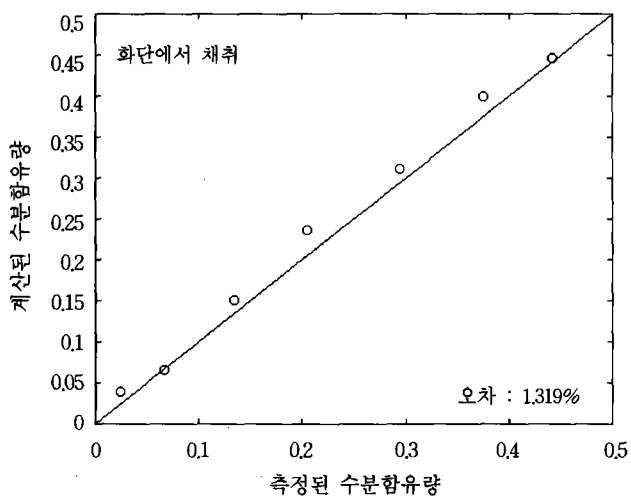
위의 그림들에서 알 수 있듯이 토양의 종류에 따른 정확도 차이는 거의 없으며 모두 1% 내외의 작은 오차를 갖고 잘 일치함을 알 수 있다. 다만 보정에 사용된 토양과 조성비 차이가 많이 나



(a) Sample 1 (sand : silt : clay = 21.8 : 68.6 : 9.6)



(b) Sample 2 (29.2 : 70.5 : 0.3)



(c) Sample 3 (91.8 : 7.3 : 0.9)

Figure 8. Comparison of measured and calculated soil moisture contents

는 토양의 경우에는 결과값들이 수직으로 약간 이동한 듯한 형상을 보인다. 이것은 토양의 조성비와 비중을 구하는 과정에서의 오차가 직접적으로 작용한 결과로 여겨진다.

V. 결 론

본 연구에서는 가열을 통한 수분함유량의 측정이 아닌 마이크로파 반사를 이용한 토양의 수분함유량 산출법을 제시하였다. 여러가지 토양을 이용한 유전율 샘플을 이용함으로써 넓은 범위의 유전율에서 보정하는 기술을 연구하였고 토양의 밀도와 조성비까지 감안하여 보다 정밀한 보정과 측정을 수행할 수 있었다. 이 연구 논문의 핵심은 이러한 유전율 측정장치의 정확한 보정과정에 있으며 이것이 토양의 수분함유량 측정에 응용됨을 보였다.

이러한 동축 프로브를 이용하면 토양의 수분함유량 산출 뿐만 아니라 바닷물의 염분측정이나 나무의 수분량 측정 등 여러 원격탐사 분야에 응용할 수 있다. 이외에도 모든 물체의 전기적 성질을 대변하는 유전율 측정은 많은 분야에 응용이 가능할 것이므로 앞으로도 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 핵심전문 연구비(971-0918-112-2)지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Athey, T.W., M.A. Stuchly and S.S. Stuchly, 1982: "Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part I", *IEEE Trans, Microwave Theory Techniques*, MTT-30(1), pp 82-86.
- Brunfelt, D.R., 1987: "Theory and Design of a field-portable dielectric measurement system", *Proc. IGARSS' 87 Symp.* pp. 559-563, Ann Arbor, USA.
- Gadja, G.B. and S.S. Stuchly, 1983: "Numerical analysis of open-ended coaxial lines", *IEEE Trans, Microwave Theory and Techniques*, MTT-31(5), pp.380-384.
- Hallikainen, M.T., F.T. Ulaby, M.C. Dobson, M.A. El-Rayes and L.Wu, 1985: "Microwave dielectric behavior of wet soil - Part I: Empirical models and Experimental observation", *IEEE Trans, Geoscience Remote Sensing*, GE-23, pp 25-34.
- Jackson, T.J., 1990: "Laboratory evaluation of a field-portable dielectric/ soil-moisture probe", *IEEE Trans, Geoscience Remote Sensing*, 28(2), pp 241-245.
- Oh, Y., K. Sarabandi, and F.T. Ulaby, 1992: "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surface", *IEEE Trans, Geoscience Remote Sensing*, 30(2), pp.370-382.

- Sarabandi, K. and E.S. Li, 1994: "Characterization of soil moisture using a microstrip reactor", *Proc. IGARSS'94 Symp. III*, pp.1445-1447, Pasadena, CA, USA.
- Stuchly, M.A., T.W. Athey and G.M. Saramas, 1982: "Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part II", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, MTT-30(1), pp.87-92.
- Ulaby, F.T., 1974: "Radar Measurement of soil moisture content", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, AP-22(2), pp.257-265.
- Ulaby, F.T., R.K. Moore and A.K. Fung, 1986: *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, vol. III, Artech House, Inc., Norwood, MA, USA.