

論文2000-37TC-5-3

개방단말 동축선 프로브로 측정된 마른 모래의 복소 유전율 (Complex Permittivity of Dry Sand Measured by an Open-Ended Coaxial Probe)

辛 炫 *, 金世潤 **, 金英植 ***

(Hyun Shin, Se-Yun Kim, and Young-Sik Kim)

요 약

자체 설계 및 제작된 개방단말 동축선 프로브를 이용하여 마른 모래의 복소 유전율을 측정하였다. 프로브의 간단한 교정 방안으로 순수한 물에 대해 측정된 반사계수와 수치계산한 반사계수간의 위상차를 모래에 대해 측정된 반사계수의 위상에 뺐다. 그 다음 마른 모래에 대해 측정된 반사계수를 개선된 가상의 동축선 모델에 대입하여 복소 유전율을 환산하였다. 동일한 마른 모래에 대해 측정된 정확한 측정자료와 비교함으로써 본 측정방법의 정확성을 입증하였다.

Abstract

Complex permittivity of dry sand is measured by using an open-ended coaxial probe, which was self-designed and manufactured. As a simple calibration scheme of the probe, the phase difference between the measured and the calculated reflection coefficients of pure water is subtracted from the phase of the measured reflection coefficient for dry sand. And then the complex permittivity of dry sand is reconstructed by applying its measured reflection coefficient into an improved imaginary transmission-line model. The accuracy of our measurement scheme is verified by showing that its reconstructed complex permittivity approaches the precise value of dry sand.

I. 서 론

GPR(Ground Penetrating Radar)은 지뢰, 파이프, 케 이블, 지하 매질 등과 같은 지표면에 매설된 표적을 찾 기 위한 용도로 1970년대 이후부터 지금까지 많이 사 용되고 있다^[1]. 이러한 GPR 개발 시 가장 중요한 것은 흙이나 모래와 같은 복잡한 매질에 의한 간섭잡음으로

부터 표적에서 산란된 신호를 구분해낼 수 있는 정도 로 주파수 대역이 넓은 송·수신안테나를 설계 및 제 작하는 것이다. 그런데 GPR의 경우에는 전파경로가 지 하이므로 손실(lossy), 비균일(inhomogeneous)등의 특 성을 갖고 있는 흙이나 모래와 같은 매질 내에서의 안 테나 문제를 다루게 된다. 따라서 최적의 GPR 송·수 신 안테나를 설계 및 제작하기 위해서는 넓은 주파수 대역에서 흙과 모래의 매질특성을 아는 것이 필수적이 다. 본 논문에서는, 마른 모래를 기준으로 GPR 안테나 를 설계, 제작하기 위한 사전작업으로 마른 모래의 복 소 유전율을 300 kHz ~ 3 GHz의 주파수 대역에서 측 정하였다.

매질의 복소 상대 유전율을 측정하는 방법은 크게 공동 공진기법이나 전송선로법, 개방단말 동축선 프로 브를 사용한 매질의 복소 유전율 측정법의 세 가지가

* 學生會員, 高麗大學校 電波工學科

(Dept. of Radio Sciences and Eng., Korea Univ.)

** 正會員, 韓國科學技術研究院 映像미디어研究센터
(Imaging Media Research Center, KIST)*** 正會員, 高麗大學校 電氣·電子·電波工學部
(School of Electrical Eng., Korea Univ.)

接受日字:1999年6月10日, 수정완료일:2000年4月10日

있다^[2-4]. 이러한 방법 중에서 공동 공진기법이나 전송선로법은 정확성이 개방단말 동축선 프로브법보다 우수하지만, 측정 매질을 일정 규격에 맞게 가공해야하는 단점이 있다. 본 논문에서 측정대상으로 삼은 마른 모래의 경우는 공동공진기법이나 전송선로법으로 측정하기 위한 형태로 매질을 가공하기가 어렵거나 측정이 불편하므로, 다른 측정방법들에 비해 정확성은 떨어지지만 개방단말 동축선 프로브법을 사용하는 것이 적절하다^[4-6]. 개방단말 동축선 프로브를 사용한 복소 유전율 측정의 정확성이 떨어지는 원인으로 크게 다음과 같은 세 가지를 들 수 있다. 첫째로 프로브의 제작이나 측정 시에 생길 수 있는 오차^[7-9], 둘째로는 프로브의 교정오차^[10], 마지막 세 번째로는 실제 측정하는 구조와 반사계수로부터 복소 유전율을 환산해내는 환산모델에 의한 오차이다^[11]. 따라서 정확한 복소 유전율 측정을 위해서 프로브의 제작 정밀성과 측정 시 프로브와 매질간의 접촉이 양호해야 하고, 프로브의 교정 또한 정확하게 수행되어야 하며, 정확한 환산모델의 사용이 필요하다^[12].

본 논문에서는 FDTD 수치해석 방법을 이용하여 개방단말 동축선 프로브를 설계한 후 실제로 제작하였고 기준에 나와있는 프로브의 교정방법을 간략화 시킨 개방단말 동축선 프로브의 교정방법을 제안하였다. 또한 복소 유전율 환산의 정확성이 가장 우수한 것으로 알려진 가상의 전송선 모델^[13]을 개선한 모델^[7]을 사용하였다. 본 논문에서는 프로브의 교정을 수행한 후 마른 모래를 프로브에 접촉시키고 측정된 반사계수를 환산모델에 대입하여 복소 상대 유전율을 환산함으로써 마른 모래의 복소 유전율을 측정하였다^[12].

II. 프로브의 설계와 측정매질 크기 결정

개방단말 동축선 프로브는 동축선 단말을 평평하게 절단만 하는 구조와 평평하게 절단한 동축선 단말에 접지판을 부착한 구조의 두 가지로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 외부 전자파의 영향을 줄이고 프로브와 측정매질간의 접촉을 좋게 하기 위하여 접지판이 부착된 구조를 택하였다. 프로브에 부착시키는 접지판의 크기를 무한한 크기로 만들 수 없으므로 접지판의 유한한 크기에 의한 영향이 반사계수 측정결과에 나타나게 된다. 따라서 본 논문에서는 수치계산을 통하여 접지판

의 크기가 측정 반사계수에 영향을 미치지 않는 최소 크기를 결정하였다. 수치계산은 넓은 주파수대역에서의 전자장 수치해석법으로 널리 이용되고 있는 FDTD 방법을 이용하였으며, 프로브에 대한 FDTD 해석 구조는 그림 1과 같다^[7].

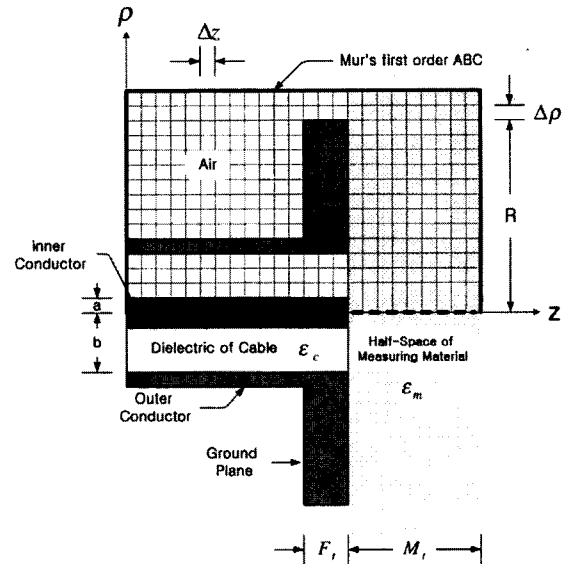


그림 1. 개방단말 동축선 프로브의 FDTD 모델
Fig. 1. FDTD model of an open-ended coaxial probe.

FDTD 수치계산에서 매질의 분산특성도 다룰 수 있도록 매질의 복소 상대 유전율 ϵ_i 를 Cole-Cole 방정식을 이용하여 다음과 같이 정의하였다^[10].

$$\epsilon_i(\omega) = \epsilon_i'(\omega) - j\epsilon_i''(\omega) = \epsilon_{i\infty} + \frac{\epsilon_{i0} - \epsilon_{i\infty}}{1 + j\omega\tau_i} - j\frac{\sigma_{i0}}{\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

여기서 ω 는 각주파수(angular frequency)이고, ϵ_{i0} 는 $\omega \rightarrow 0$ 일 때의 상대 유전율(static relative permittivity), $\epsilon_{i\infty}$ 는 $\omega \rightarrow \infty$ 일 때의 상대 유전율(infinite relative permittivity)이며, σ_{i0} 는 $\omega \rightarrow 0$ 일 때의 도전율(static conductivity), τ_i 는 이완시간(relaxation time)을 나타낸다.

그림 1과 같은 해석구조에서 프로브를 접촉한 매질의 복소 상대 유전율과 동축선 단말에 부착된 접지판의 크기를 변화시키면서 반사계수를 수치계산 하였다. 이 때 접지판의 크기가 반사계수에 어느 정도의 영향을 주는지 살펴보기 위하여 측정매질의 두께는 무한한 것으로 가정하였다. FDTD 해석에서 접지판과 측정매

질을 흡수경계조건을 적용하는 지점까지 모델링함으로써 접지판과 측정매질이 무한 길이를 갖는 경우로 다룰 수 있었다. 측정매질의 상대 유전율은 10, 도전율은 0.1 인 경우에 접지판의 크기 변화에 따른 반사계수는 그림 2와 같다. 그림 2로부터 접지판의 반경이 2 cm 이상인 경우 반사계수의 크기와 위상은 무한히 큰 접지판의 결과와 일치하였다. 그러나 접지판의 반경이 1.5 cm로 줄인 경우에는 그림 2(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 반사계수의 크기에서 주파수가 증가할수록 점차 줄어들었다. 비록 접지판의 반경이 1.5 cm로 줄더라도 그림 2(b)와 같이 반사계수의 위상은 여전히 변하지 않음을 보였다. 따라서 그림 2의 결과는 접지판의 반경이 2 cm 이상이면 충분함을 보장하므로, 본 논문에서는 동축선 단말 반경을 2 cm로 설계하였다. 이러한 설계 결과를 이용하여 N-type 커넥터에 반경 2 cm의 접지판이 부착된 프로브를 그림 3과 같이 제작하였다.

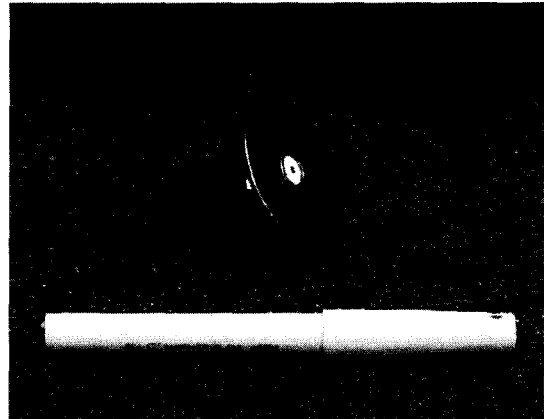


그림 3. 제작된 개방단말 동축선 프로브
Fig. 3. Manufactured open-ended coaxial probe.

접지판의 크기 결정을 위한 FDTD 수치계산에서는 측정매질의 두께가 무한하다고 가정을 하였으나, 실제 측정 매질은 유한하다. 따라서 측정매질의 두께가 프로

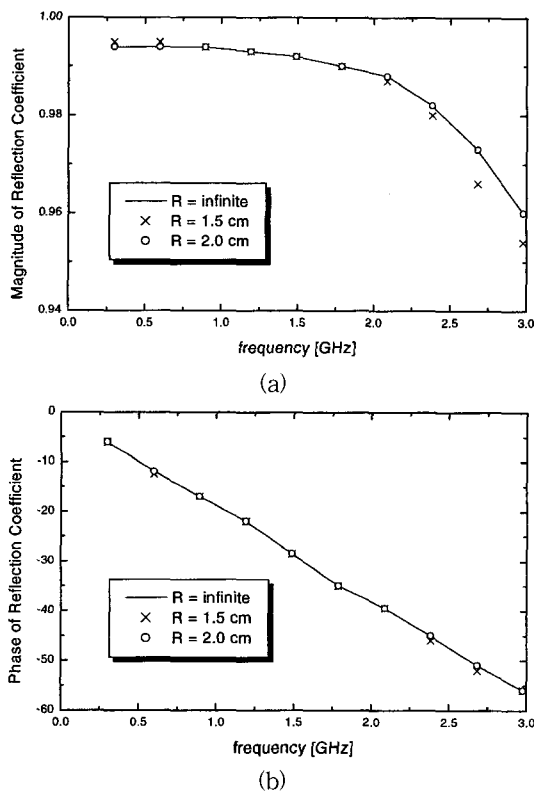


그림 2. 접지판의 크기 영향
(a) 반사계수 크기 (b) 반사계수 위상
Fig. 2. Effect of the ground-plane size.
(a) Magnitude of reflection coefficient. (b) Phase of reflection coefficient.

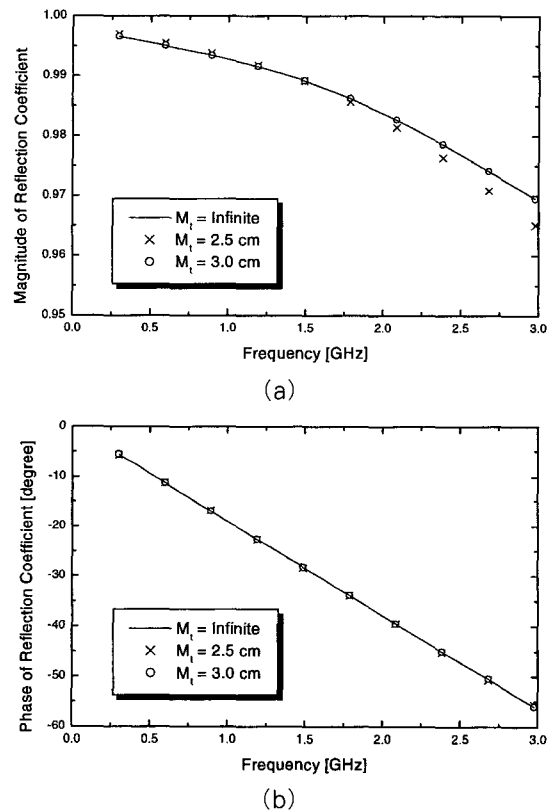


그림 4. 측정매질의 두께 영향
(a) 반사계수 크기 (b) 반사계수 위상
Fig. 4. Effect of the sample thickness.
(a) Magnitude of reflection coefficient. (b) Phase of reflection coefficient.

브를 통해 측정되는 반사계수에 어떤 영향을 주는지 살펴보고, 최소 측정매질의 두께를 결정해야 한다. 측정매질 두께를 결정하기 위한 수치계산도 마찬가지로 FDTD법을 사용하였으며, 측정매질 두께에 의한 영향만을 살펴보기 위하여 접지판의 크기는 무한하다고 가정하였다. 프로브에 접촉된 매질의 복소 상대 유전율과 측정매질의 두께를 변화시키면서 반사계수 수치계산을 수행하였다. 측정매질의 상대 유전율은 10, 도전율은 0.1인 경우에 측정매질의 두께 변화에 따른 반사계수는 그림 4와 같다. 그림 4에서 매질의 두께가 3 cm 이상이면 반사계수의 크기와 위상 모두 일정한 값을 갖지만, 그림 4(a)와 같이 매질의 두께가 2.5 cm로 줄면 반사계수의 크기는 주파수에 따라 약간의 차이를 보인다. 그러나 매질의 두께가 2.5 cm로 줄어도 그림 4(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 반사계수의 위상은 전혀 변화가 없었다. 따라서 측정매질의 두께는 단지 3 cm 이상이면 반사계수에 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

Ⅲ. 개방단말 동축선 프로브의 교정

실험에 마련된 개방단말 프로브를 이용한 복소 상대 유전율 측정시스템은 그림 5와 같다. 그림 5처럼 실험에 이용한 동축선의 양 끝단은 각각 N-type 커넥터가 부착되어 있으며, 두 끝단 중 한쪽은 Network Analyzer에 연결하고 나머지 한 쪽은 실험을 위해 제작한 프로브를 연결하였다. Network Analyzer로 측정매질의 반사계수를 측정하기 전에 동축선과 프로브의 특성, 시스템 오차를 보정하기 위한 교정(calibration)을 수행해야 한다. 그러나 기존의 교정 키트(calibration Kit)로는 프로브 이전의 동축선 끝단까지만 교정이 가능하다. 따라서 프로브의 특성은 교정할 수 없으므로, 측정된 반사계수는 프로브의 첨가에 의한 위상변화나 프로브와 동축선 사이의 불연속 같은 영향들을 포함하게 된다. 개방단말 동축선 프로브를 위한 교정 키트의 제작이 어렵기 때문에 복소 상대 유전율을 알고 있는 매질의 반사계수 측정결과를 기준(reference)으로 프로브를 교정하는 방법을 주로 이용한다^[10]. 기존의 방법은 세 가지의 기준매질이 필요하고 기준매질의 복소 상대 유전율의 불확실성에 의한 영향이 큰 단점이 있다. 본 논문에서 사용하는 환산모델은 두 가지 기준매질을 사용하고 환산과정에 교정기능이 들어 있으므로, 별도의 교정 키트를 제작하지 않고서도 프로브의 영향을 고려

해주는 간략화한 교정방법을 제시하였다^[12].

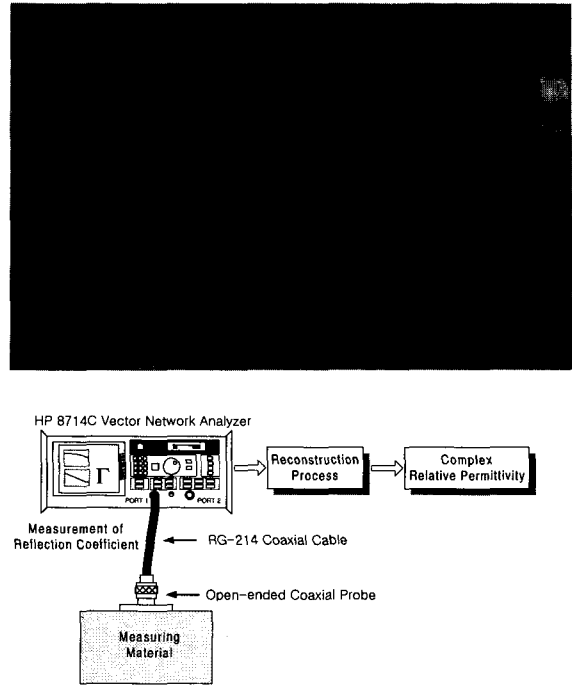


그림 5. 복소 상대 유전율 측정시스템

Fig. 5. Measurement system of complex relative permittivity.

순수한 물에 대해 그림 1의 FDTD 모델로 계산한 반사계수와 그림 3과 같이 제작된 동축선 프로브로 측정된 반사계수를 비교해보면 그림 6(a)에서 볼 수 있는 것처럼 크기 변화는 적으나 위상은 주파수에 비례하여 그 차이가 증가하였다. 본 논문에서 제안하는 프로브 교정은 크게 다음과 같은 두 단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 프로브 이전까지의 Network Analyzer와 동축선을 포함한 끝단에서 일반상용 교정 키트를 이용하여 교정한다. 두 번째로 동축선 끝단에 프로브를 연결한 후 기준매질인 순수한 물을 프로브에 접촉시켰을 때의 반사계수를 측정하고, 측정된 반사계수의 위상 값을 FDTD 방법을 이용해 같은 구조에 대하여 미리 수치계산한 반사계수 위상 값으로 대체한다. 이와같이 프로브의 영향을 고려해준 다음 복소 상대 유전율 환산에 이용한 가상의 전송선 모델에 필요한 나머지 한 가지의 기준매질로 공기를 프로브에 접촉시켰을 때의 반사계수를 측정한다. 마지막으로 측정하고자 하는 매질을 프로브에 접촉시켰을 때의 반사계수를 측정한다.

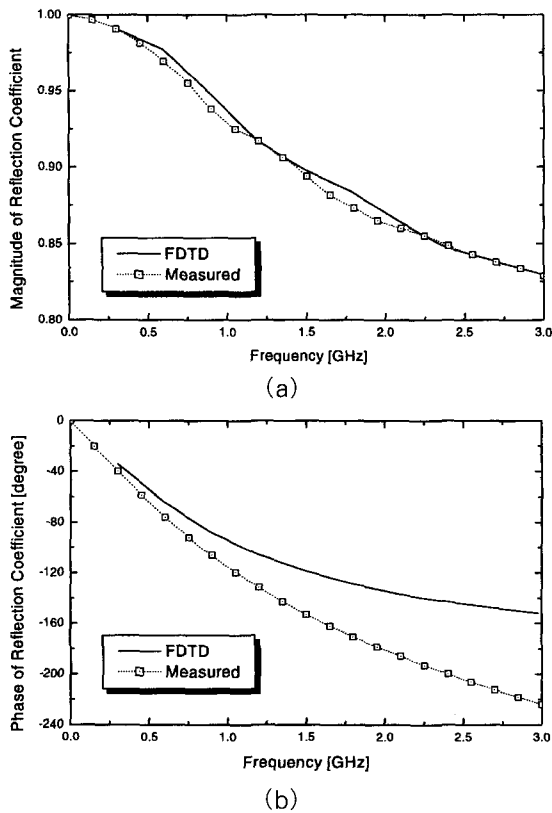


그림 6. 순수한 물에 대해 수치계산한 반사계수와 실제 측정된 반사계수의 비교

(a) 크기 (b) 위상

Fig. 6. Comparison between numerically simulated and actually measured reflection coefficients of pure water.

(a) Magnitude. (b) Phase.

IV. 수치계산 및 실험 결과

본 논문에서 그림 1과 같은 구조로 수치계산과 실험에 사용한 동축선은 RG-214로서 내심반경 $a = 1.1305$ mm, 외심반경 $b = 3.7085$ mm, 동축선 내부의 상대 유전율 $\epsilon_c = 2.03$ 이다. FDTD 계산에서 공간간격은 $\Delta\rho = \Delta z = 0.37683$ mm, 시간간격은 Courant의 안정 조건을 만족하는 $\Delta t = 0.82$ ps 로 선정하였으며, 전체 FDTD 계산영역은 100×300 셀로 구성하였다. 전원은 3 GHz 까지의 주파수 성분이 존재하는 Gaussian pulse를 TEM 모우드로 동축선 내부에 선전압으로 인가하였다. 식 (1)과 같은 Cole-Cole 방정식으로 기준매질로 사용한 순수한 물은 $\epsilon_{is} = 78.197$, $\epsilon_{i\infty} = 5.188$, $\sigma_{i0} = 0.0$ S/m, $\tau_i = 8.192$ ps로 모델링하였다^[10].

반사계수 측정을 위해 실험에서 사용한 계측기는 300 kHz ~ 3 GHz 까지의 주파수에서 반사계수 측정이 가능한 HP-8714C Network Analyzer를 이용하였다. HP-85032E Calibration Kit로 Network analyzer와 동축선에 대한 교정을 수행하였으며, 프로브의 교정에는 순수한 물이라고 볼 수 있는 증류수를 사용하였다.

계측기의 측정가능 주파수 대역인 300 kHz ~ 3 GHz까지의 주파수 대역에서 마른 모래에 대하여 복소 상대 유전율 측정 실험을 수행하였다. 이때 매질을 프로브에 접촉하고 반사계수를 측정하는 과정에서 발생하는 오차가 매질의 복소 상대 유전율 환산결과에 큰 영향을 끼치기 때문에, 반사계수 측정 오차를 줄이기 위해서 300 kHz ~ 3 GHz까지의 주파수대역에서 201 개의 주파수에서 측정된 두 번의 반사계수 측정결과를 평균하고, 평균한 반사계수를 주변 주파수에서의 반사계수 값들을 이용하여 smoothing을 수행한 후 뽑아낸 30 개의 주파수에 대해서만 반사계수를 환산식에 대입하였다^[7,8]. 이러한 별도의 복소 상대 유전율 환산과정을 두 번 반복하여 측정 복소 상대 유전율을 평균함으로써 오차를 줄였다^[12].

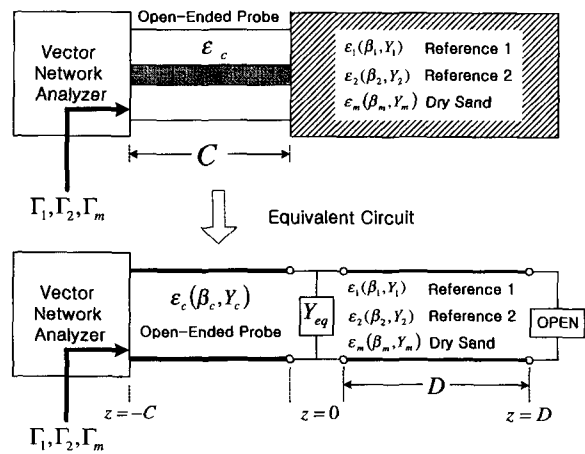


그림 7. 측정구조와 환산모델

Fig. 7. Geometry for measurement and reconstruction model.

본 논문에서 사용하는 환산 모델은 개선된 가상의 전송선 모델로서 그림 7과 같이 측정매질이 프로브에 접촉되어 있는 구조를 실제 동축선에 가상의 전송선이 연결되어 있는 것으로 간주하고, 두 전송선의 불연속을 가상의 어드미턴스로 등가화한 구조이다. 이러한 모델

를 이용하여 측정된 반사계수로부터 복소 상대 유전율을 환산할 수 있다^[7,8].

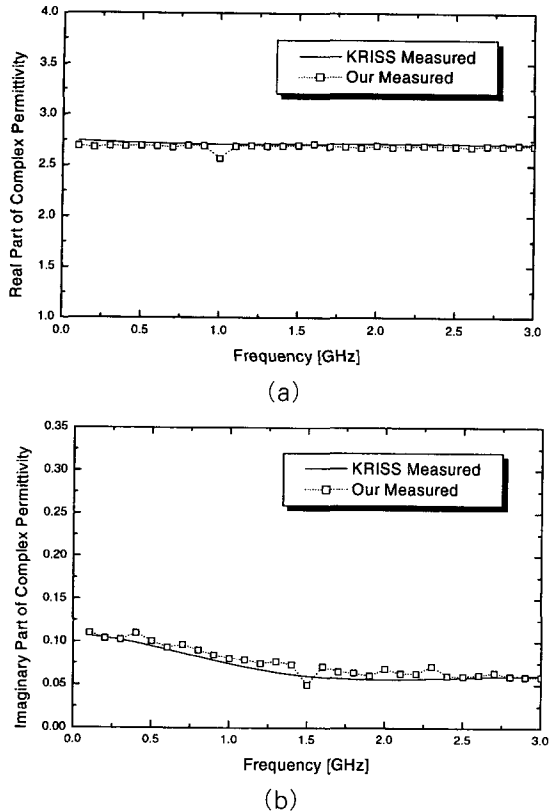


그림 8. 마른 모래의 복소 상대 유전율 측정결과 (a) 실수부 (b) 허수부

Fig. 8. Complex relative permittivity of dry sand. (a) Real part. (b) Imaginary part.

마른 모래에 대한 복소 상대 유전율 측정결과는 그림 8과 같다. 측정결과의 정확성을 검증하기 위하여, 측정 정확성이 높다고 알려진 전송선로법으로 마른 모래의 복소 상대 유전율을 미리 측정한 결과와 본 논문에서 제작한 개방단말 동축선 프로브로 측정된 결과를 비교하였다. 그림 8에서 “KRISS Measured”로 표시한 결과는 한국표준과학연구원(KRISS)에서 전송선로법으로 동일한 마른 모래에 대해 복소 상대 유전율을 측정한 것이며, “Our Measured”는 본 논문의 방법인 개방단말 동축선 프로브법으로 측정된 결과이다.

그림 8을 살펴보면 전송선로법으로 측정한 복소 상대 유전율과 본 논문에서 제작한 개방단말 동축선 프로브로 측정된 결과가 전체 주파수 대역에서는 거의 유사함을 볼 수 있다. 그러나 일부 주파수에 대해서 오

차가 발생하였다. 특히 복소 상대 유전율의 실수부의 경우 주파수 1 GHz 근처에서 오차가 커지고, 허수부의 경우는 주파수 1.5 GHz 와 주파수 2.3 GHz 근처에서 오차가 커지는 현상을 볼 수가 있다. 이것은 환산모델에 필요한 두 가지 기준매질과 측정매질인 마른 모래의 반사계수 측정 과정에서 발생한 측정오차에 의한 것이라고 생각된다. 세 가지 매질에 대해 반사계수를 측정하는 과정에서 동축선과 프로브가 완전히 동일한 상태로 유지하지 못하여 발생한 오차와 한 매질에 대해 반사계수를 측정하는 과정에서도 각각의 주파수마다 반사계수를 측정에서 측정상태의 미세한 변화가 있기 때문이다. 또한 본 논문에서는 프로브 교정에 순수한 물에 대한 FDTD 결과를 이용하여 프로브에 의한 위상차만을 보상하므로 측정상황과 FDTD 모델간에 모델링 오차도 한가지 원인이라 여겨진다. 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 복소 상대 유전율의 실수부보다 허수부의 측정결과가 전송선로법과 비교해볼 때 오차가 크게 발생하였다. 이는 프로브와 매질의 접촉할 때 발생한 반사계수의 오차가 가상의 동축선 등가모델을 통해 복소 상대 유전율로 환산되는 과정에서 허수부에 더 민감한 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.

V. 결 론

본 논문에서는 매질의 가공하지 않고서도 간편하게 복소 유전율 측정을 할 수 있는 개방단말 동축선 프로브법을 이용하여 300 kHz ~ 3 GHz의 주파수 대역에서 마른 모래의 복소 상대 유전율을 측정하였다. 측정된 복소 상대 유전율의 실수부는 3 GHz까지 약 2.7로서 거의 일정했으나, 허수부는 300 kHz에서 약 0.12에서 3 GHz에서는 약 0.7로 주파수가 증가함에 따라 감소하는 특성을 보였다. 특히 본 논문에서는 FDTD법을 이용한 수치계산으로 프로브의 설계 및 제작하고, 편리한 프로브의 교정방법을 제시하였으며, 측정된 반사계수로부터 복소 상대 유전율을 환산하는 모델의 개선을 통해 복소 상대 유전율 측정의 전 과정을 수행하였는데 의의가 있다. 또한 다른 방법에 의한 측정결과와의 비교를 통해서 인체나 액체 등의 매질에 대해서 주로 사용되었던 개방단말 동축선 프로브를 마른 모래와 같은 분말 형태 매질의 경우에도 유용하게 쓸 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 프로브의 교정방법은 간편할 뿐만 아니라 한가지의 기준매질로 교정이 가능한 장점을 지니고 있다. 그러나 프로브의 첨가에 의한 반사계수 위상 변화는 고려할 수 있는 대신 반사계수의 크기 변화는 고려해주지 못하는 단점을 지니고 있으므로 향후 좀 더 개선된 교정법의 확립이 필요하다. 또한 반사계수 측정 오차를 줄임으로써 복소 상대 유전율 환산의 정확성을 높이는 방법을 강구해야 하며, 매질의 또 다른 중요한 특성인 복소 투자율도 개방단말 동축선 프로브법으로 측정할 수 있도록 확장할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. J. Daniels, *Subsurface-Penetrating Radar*, IEE : London, UK, 1996.
- [2] H. E. Bussey, "Measurement of RF properties of materials-A survey," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 6, pp. 1046-1053, June 1967.
- [3] M. A. Stuchly and S. S. Stuchly, "Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies-A review," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-29, no. 3, pp. 176-183, Sept. 1980.
- [4] E. Tanabe and W. T. Joines, "A nondestructive method for measuring the complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies using an open transmission line resonator," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-25, no. 3, pp. 222-226, Sept. 1976.
- [5] E. C. Burdette, F. L. Cain, and J. Seals, "In vivo probe measurement technique for determining dielectric properties at VHF through microwave frequencies," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-28, no. 4, pp. 414-427, Apr. 1980.
- [6] J. R. Mosig, J. E. Besson, M. Gex-Fabry and F. E. Gardiol, "Reflection of an open-ended coaxial line and application to nondestructive measurement of materials," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-30, no. 1, pp. 46-51, Mar. 1981.
- [7] 신현, 김상욱, 김세윤, "FDTD법을 이용한 유전율 측정용 개방단말 프로브의 에러 해석," 1998년도 추계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, vol. 21, no. 2, pp. 285-288, Sep. 1998
- [8] 신현, 현승엽, 김상욱, 김세윤, "복소유전율 측정용 개방단말 동축선 프로브 제작오차의 영향에 관한 FDTD 모의계산," 대한전자공학회 논문지, 제 36권, D편, 제 8호, 19-26 쪽, 1999년 8월
- [9] S. Bringham, M. F. Iskander, and M. J. White, "Thin-sample measurement and error analysis of high-temperature coaxial dielectric probes," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-45, no. 12, pp. 2073-2083, Dec. 1997.
- [10] A. Nyshadham, C. L. Sibbald, and S. S. Stuchly, "Permittivity measurements using open-ended sensors and reference liquid calibration-An uncertainty analysis," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-40, no. 2, pp. 305-314, Feb. 1992.
- [11] D. Bérubé, F. M. Ghannouchi and P. Savard, "A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurements of lossy dielectric/biological materials at microwave frequencies," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-44, no. 10, pp. 1928-1934, Oct. 1996.
- [12] 김세윤, 전자파 IMAGING용 새로운 역산란 기법의 개발, 과학기술부 과제, KIST 연구 보고서, UCN1743-6304-4, 1998년 11월
- [13] F. M. Ghannouchi and R. G. Bosisio, "Measurement of microwave permittivity using a six port reflectometer with an open-ended coaxial line," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 38, no. 2, pp. 505-508, Apr. 1989.

저 자 소 개

辛 炫(正會員) 第 36卷 D編 第 8號 參照
현재 삼성전기 연구원

金 英 植(正會員) 第 36卷 D編 第 7號 參照
현재 고려대학교 전기·전자·전파공
학부 부교수

金 世 潤(正會員) 第 32卷 A編 第 6號 參照
현재 과학기술연구원 영상미디어연구
센터 책임연구원