

論文2001-38TC-7-4

개방단말 동축선 프로브를 이용한 다양한 유전체의 복소 유전율 측정

(Measurement of the Complex Permittivities of Various Dielectrics Using an Open-Ended Coaxial Probe)

辛 炫 *, 玄昇燁 **, 金尙昱 ***, 金世潤 ***

(Hyun Shin, Seung-Yeup Hyun, Sang-Wook Kim, and Se-Yun Kim)

요 약

본 논문에서는 자체 설계 및 제작한 개방단말 동축선 프로브를 이용하여 분말(설탕, 밀가루)과 고체(테플론, 아크릴)와 같은 다양한 유전체에 대하여 복소 유전율을 측정하였다. 측정장치로 프로브를 동축선을 통하여 벡터 회로망 분석기(VNA)와 연결하였다. 동축선의 끝단까지는 OSL(개방, 단락, 부하) calibration kit를 이용하여 교정하였다. 동축선 끝단에 프로브를 삽입함으로써 발생하는 위상차이는 증류수에 대하여 수치계산한 반사계수를 이용하여 보정하였다. 측정매질의 표면에 프로브를 접촉시켰을 때 측정된 반사계수를 가상의 원추형 선로 모델에 대입하여 복소 유전율을 환산하였다. 30 MHz부터 3 GHz에 걸친 광대역 주파수 범위에서 여러 가지 분말과 고체에 대하여 본 논문의 방법으로 측정된 복소 유전율을 한국표준과학연구원(KRISS)에서 전송선로법으로 측정된 결과와 비교하였다.

Abstract

In this paper, the complex permittivity of various dielectrics such as powder(sugar and flour) and solid(teflon and acryl) are measured by using an open-ended coaxial-line probe, which is self-designed and manufactured. The probe is connected to a vector network analyzer(VNA) through a coaxial cable. The end of the cable is corrected by using an OSL(open, short, and load) calibration kit. The phase difference, which is produced by inserting the probe at the end of the line, is compensated by using the numerically calculated reflection coefficient of distilled-water. The complex permittivity is reconstructed by inserting the measured reflection coefficient, which is produced at the interface between the probe and measuring material, into an virtual conical-cable conversion model. Over a wide frequency range from 30 MHz to 3 GHz, the measured complex permittivities of various powder and solid using the our method are compared with the results, which are measured by using an transmission-line method of the Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS).

* 學生會員. 三星電氣

(Samsung Electro-Mechanics, Co.)

** 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, Korea Institute of Science and Technology)

接受日字:2000年8月11日, 수정완료일:2001年6月8日

I. 서 론

최근 통신, RF(radio frequency), 초고주파 산업의 급속한 성장과 사용 주파수 대역이 고주파 영역으로 확대됨에 따라 새로운 매질에 대하여 광대역에 걸친 유전특성을 측정하는 방법에 대한 관심이 증가하고 있다.

유전율은 일반적으로 복소수로서 실수부는 매질 내에 저장되는 에너지, 허수부는 손실 특성을 나타낸다. 이 값은 인가 주파수, 온도 등의 변화, 매질의 물리적인 상태(기체, 액체, 고체, 분말 등)에 따라 크게 좌우된다. 측정방법 또한 이러한 상태에 따라 여러 가지 방법이 존재하며, 측정의 적용범위, 정확성, 편의성 등에 따라 서로 다른 장·단점을 지니므로 목적에 가장 적합한 방법의 선택이 매우 중요하다.

대표적인 복소 유전율 측정방법으로 공동공진기법(cavity resonator method)^[1], 전송선로법(transmission-line method)^[2], 동축선 프로브법(coaxial-line probe method)^[3,4]이 있다. 공진기내부에 시편을 삽입하여 측정된 공진 주파수로부터 복소 유전율을 환산하는 공동공진기법은 정확성은 가장 우수하나 광대역 주파수에 대한 측정이 어렵고, 고체형 시편에 한정되어 있으며, 시편을 정확한 크기로 가공해야하는 단점을 지니고 있다. 동축선(coaxial-line)이나 도파관(waveguide)과 같은 선로의 내부에 매질을 삽입하여 반사계수(reflection coefficient) 및 전송계수(transmission coefficient)를 측정하여 복소 유전율을 환산하는 전송선로법은 선로 내부에 삽입하는 매질의 크기가 인가주파수에 대하여 반파장이 되는 경우에는 공진현상이 발생하여 광대역 측정에 제한이 있으나 공동공진기법보다 광대역 측정이 용이하고, 복소 유전율의 환산도 용이하다. 공동공진기법과 전송선로법은 공통적으로 시편을 정확하게 가공해야하므로 실제 운용상 불편하다. 매질의 표면에 동축선 프로브를 접촉하여 측정된 반사계수로부터 복소 유전율을 환산하는 동축선 프로브법은 측정매질을 가공하지 않고서 쉽게 측정할 수 있는 장점을 지니고 있다. 정확성면에서는 공동공진기법이나 전송선로법보다는 떨어지지만 현장에서 운용상의 큰 장점을 지니고 있고, 고체 형태의 매질뿐만 아니라 액체, 분말 등도 측정이 용이하다.

이미 본 연구실에서는 FDTD(finite-difference time-domain)법으로 프로브를 설계한 후 실제로 제작한 바 있다^[5,6]. 본 논문에서는 제작한 개방단말 동축선 프로브를 이용하여 몇 가지 분말과 고체에 대한 측정의 정확성을 조사하였다. 측정장치로 개방단말 동축선 프로브를 동축선을 경유하여 벡터 회로망 분석기(VNA; vector network analyzer)에 연결하여 구성하였다. 동축선 끝단까지는 동축선에 대한 OSL(open, short, and load) calibration kit를 이용하여 교정하였으며, 프로브

를 삽입함으로써 발생하는 위상차는 매질 특성이 잘 알려져 있는 증류수에 대해서 측정된 반사계수와 FDTD 법으로 수치계산한 결과와의 차로 보상하는 방법^[6]을 이용하였다. 측정매질로 분말 형태인 설탕과 밀가루, 고체 형태인 테플론과 아크릴을 프로브에 접촉시키고, 측정된 반사계수를 가상의 원추형 선로 모델(virtually conical cable model)^[7]에 대입하여 복소 유전율을 환산하였다. 동일한 매질을 한국표준과학연구원(KRISS; Korea Research Institute of Standards and Science)에 의뢰하여 전송선로에 채워 넣어 측정된 결과와 비교하였다.

II. 측정장치의 구성 및 복소 유전율 환산 방법

A. 측정장치의 구성 및 교정방법

그림 1(a)와 같이 개방단말 동축선 프로브를 동축선을 통하여 HP 8714C 벡터 회로망 분석기에 연결하여 측정장치를 구성하였다. 벡터 회로망 분석기를 포함한 동축선 끝단까지는 HP 85032 OSL calibration kit을 이용하여 교정할 수 있다. 그러나 동축선 끝에 개방단말 동축선 프로브를 삽입함으로써 인해 발생한 영향은 일반 상용 OSL calibration kit로 교정할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 이미 발표한 바 있는 논문 [6]에서 제시한 바와 같이 프로브의 길이는 비교적 짧은 길이를 가지므로 프로브의 삽입에 의한 감쇠는 거의 무시할 수 있었으며, 단지 위상차 만을 보상하는 간략한 교정방법을 이용하였다. 프로브의 개구면에 매질 특성이 잘 알려져 있는 증류수를 접촉시켰을 때의 측정된 반사계수와 FDTD로 수치계산한 반사계수간의 위상차로 프로브의 삽입에 의한 영향을 보상하였다^[6]. 이와 같은 교정 및 보상 과정을 거친 후 프로브의 개구면에 측정매질을 접촉하여 반사계수를 측정하고, 측정된 반사계수를 다음의 B절에서 제시한 환산모델에 대입하여 복소 유전율을 환산한다.

B. 가상의 원추형 선로 모델을 이용한 복소 유전율의 환산^[7]

그림 1(a)에서 프로브와 접촉매질 부근에 대하여 FDTD 모의계산하면 프로브 끝단에서 전자파가 방사형으로 퍼져나가는 현상을 볼 수 있으므로 그림 1(b)처럼 상대 유전율 ϵ_c 인 실제 동축선(전파상수 $k_0\sqrt{\epsilon_c}$, 특성

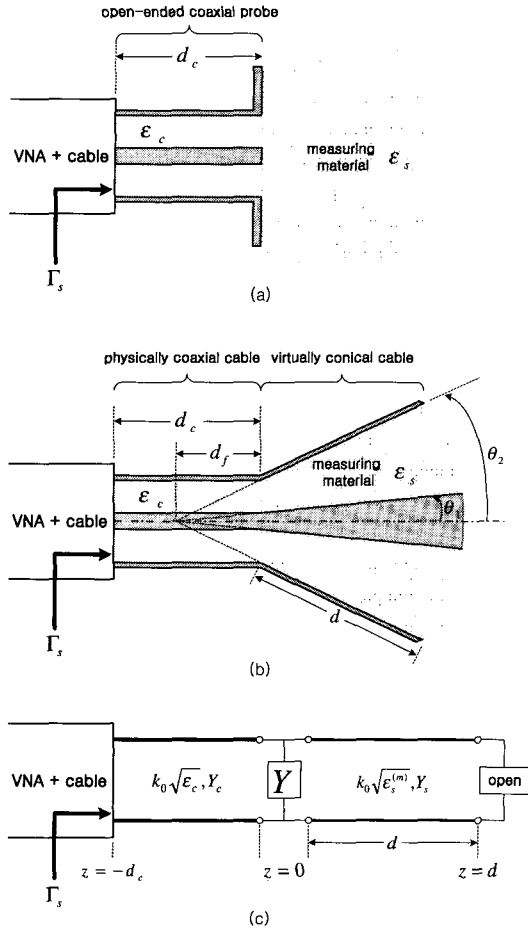


그림 1. 개방단말 프로브를 이용한 복소 유전율 측정 모델

- (a) 측정 시스템의 단면도
 (b) 가상의 원추형 선로 모델
 (c) (b)에 대한 등가회로 모델

Fig. 1. Measurement model of the complex permittivity using an open-ended coaxial probe.

- (a) Cross-section view of measurement system.
 (b) Virtual conical-cable model.
 (c) Equivalent circuit model of (b).

어드미턴스 Y_c , 길이 d_c)과 복소 상대 유전율 ϵ_s 인 측정매질이 채워진 가상의 원추형 선로(전파상수 $k_s = k_0\sqrt{\epsilon_s}$, 특성 어드미턴스 Y_s , 길이 d)가 직렬로 연결된 것으로 간주할 수 있다. 여기서 k_0 와 c_0 는 각각 자유공간에서의 전파상수와 전파속도를 나타낸다.

내심의 반경이 a , 외심의 반경이 b 인 물리적인 실제 동축선과 가상의 원추형 선로에 대한 특성임피던스

는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$Y_c = \frac{\sqrt{\epsilon_c}}{60 \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (1)$$

$$Y_s = \frac{\sqrt{\epsilon_s}}{60 \ln\left[\frac{\cot(\theta_1/2)}{\cot(\theta_2/2)}\right]} \quad (2)$$

여기서 θ_1 과 θ_2 는 원추형 선로의 특성 어드미턴스를 결정하는 구조변수의 각도로서 프로브의 개구면으로부터 초점까지의 거리 d_f 와는 각각 다음과 같은 관계를 만족해야한다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}(a/d_f) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}(b/d_f) \quad (4)$$

측정매질과 프로브의 접촉에 의한 불연속 특성을 고려하기 위하여 등가 어드미턴스 Y 를 도입하였다.

그림 1(b)에 위의 사항을 고려하여 평행도선으로 구성된 등가회로로 나타내면 그림 1(c)와 같다. 그림 1(c)의 모델에서 두 가지 미지수 Y 와 d 는 복소 상대 유전율을 정확히 알고 있는 두 매질(ϵ_1 , ϵ_2)에 대한 반사계수(Γ_1 , Γ_2)와의 관계를 이용하여 다음과 같이 연속적인 2개의 식으로부터 구할 수 있다.

$$Y^{(n)} = Y_c \frac{1 - \Gamma_1 e^{j2k_0\sqrt{\epsilon_c}d_c}}{1 + \Gamma_1 e^{j2k_0\sqrt{\epsilon_c}d_c}} - jY_1 \tan[k_1 d^{(n-1)}] \quad (5)$$

$$d^{(n)} = \frac{1}{k_2} \tan^{-1} \left[\frac{Y_c \frac{1 - \Gamma_1 e^{j2k_0\sqrt{\epsilon_c}d_c}}{1 + \Gamma_1 e^{j2k_0\sqrt{\epsilon_c}d_c}} - Y^{(n)}}{jY_2} \right] \quad (6)$$

여기서 $Y^{(n)}$ 과 $d^{(n)}$ 은 n 번째 iteration에서의 Y 와 d 를 나타내며, 본 논문에서는 $d^{(0)} = 0$ 으로 초기치를 취하였다. 식(5)와 식(6)이 N 번째 iteration 후에 수렴할 경우에 $Y = Y^{(N)}$, $d = d^{(N)}$ 으로 취하였다.

따라서 그림 1(c)에 임의의 측정매질에 대해 측정된 반사계수 Γ_s 를 대입하면 다음과 같이 m 번째 iteration에서 복소 상대 유전율을 구할 수 있다.

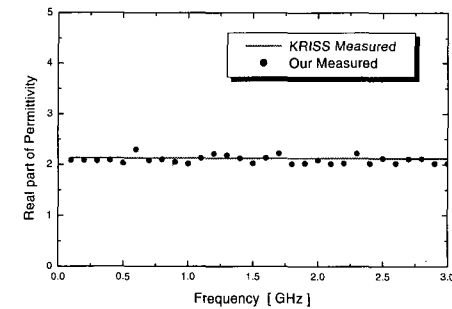
$$\epsilon_s^{(m)} = 60 \ln \left[\frac{\cot(\theta_1/2)}{\cot(\theta_2/2)} \right] \frac{Y_c \frac{1 - \Gamma_1 e^{j2k_0\sqrt{\epsilon_c}d_c}}{1 + \Gamma_1 e^{j2k_0\sqrt{\epsilon_c}d_c}} - Y}{jk_0 d} X^{(m-1)} \quad (7)$$

$$X^{(m)} = k_0 d \sqrt{\epsilon_s^{(m)}} \cot[k_0 d \sqrt{\epsilon_s^{(m)}}] \quad (8)$$

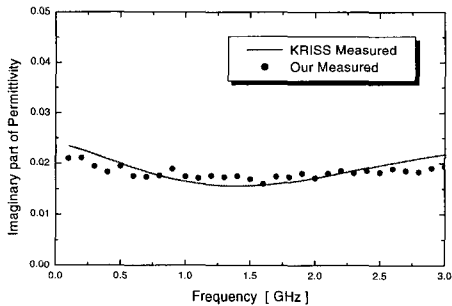
편의상 $X^{(1)} = 1$ 로 취하고, 식(7)과 식(8)을 이용하여 $\epsilon_s^{(m)}$ 이 M 번째 iteration 후 충분히 수렴할 경우에 $\epsilon_s = \epsilon_s^{(m)}$ 로 최종 결과를 출력한다.

III. 다양한 매질에 대한 측정결과

앞의 II절에서 다룬 측정방법과 환산 모델을 이용하여 분말 형태의 매질로 설탕과 밀가루, 고체 형태의 대표적인 유전체로 테플론과 아크릴에 대한 복소 유전율



(a)



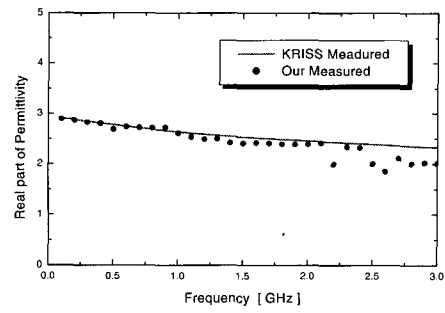
(b)

그림 2. 설탕에 대한 복소 상대 유전율 측정결과 (a) 실수부 (b) 허수부

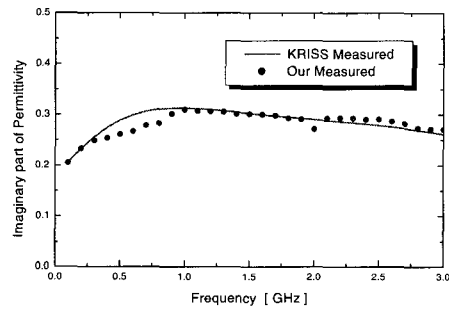
Fig. 2. Measurement results of complex relative permittivity for sugar.

(a) Real part. (b) Imaginary part.

을 측정하였다. 측정에 사용한 동축선과 프로브의 규격은 [6]에서 사용한 것과 동일하다. 환산 모델에서 원추형 선로의 벌어진 각을 결정하는 초점거리는 편의상 $d_f = 1$ mm로 취하였다. 측정결과를 나타낸 모든 그림에서 “KRISS Measured”는 한국표준과학연구원서 전송선로법으로 측정한 것이며, “Our Measured”는 동일한 매질에 대하여 본 논문에서 개방단말 동축선 프로브법으로 측정한 결과를 나타낸다.



(a)



(b)

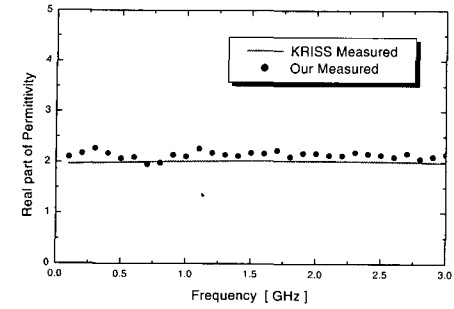
그림 3. 밀가루에 대한 복소 상대 유전율 측정결과 (a) 실수부 (b) 허수부

Fig. 3. Measurement results of complex relative permittivity for flour.

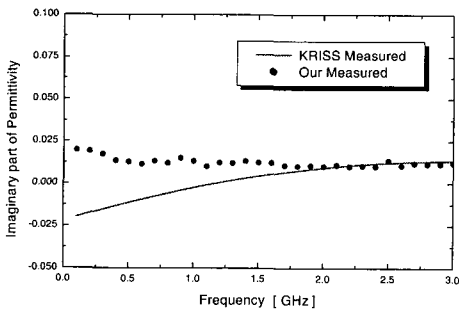
(a) Real part. (b) Imaginary part.

그림 2는 설탕에 대한 측정결과로서 본 논문의 방법이 전송선로법과 전체적으로 10% 이내의 오차를 보였다. 밀가루를 측정한 결과인 그림 3을 살펴보면 복소 유전율의 실수부와 허수부 모두 오차 5%내의 정확성을 보였다. 그러나 주파수에 따라 오차가 심한 경우가 생겼고, 주파수에 따른 변화를 정확하게 살필 수 있을 정도로 민감하지는 못했다. 이는 설탕이나 밀가루 분말에서 입자 사이의 공극에 존재하는 공기에 의한 영향일 것으로 추정된다. 또한 동일 종류의 매질이더라도 온도와 수분 함유량에 따라 복소 유전율이 크게 달라지므로, 전송선로법과 개방단말 동축선 프로브법으로 각각 측정할 때 실험환경의 차이에 의한 오차도 무시할 수 없을 것이다.

이번에는 분말 형태의 매질 이외에 고체 형태인 유전체의 복소 유전율 측정에 개방단말 동축선 프로브를



(a)



(b)

그림 4. 테플론에 대한 복소 상대 유전율 측정결과
(a) 실수부 (b) 허수부

Fig. 4. Measurement results of complex relative permittivity for teflon.

(a) Real part. (b) Imaginary part.

이용한 측정의 정확성을 조사하기 위하여 테플론과 아크릴에 대하여 KRISS의 측정결과와 비교하였다. 측정에 사용할 두 가지 유전체는 지름 4 cm, 두께는 3 cm 인 원통형을 준비하였다. 먼저 테플론의 복소유전율을 측정하고 그 결과 그림 4와 같은 결과를 보였다. 그림 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 복소 유전율의 실수부는 평균적으로 약 10%의 오차가 발생한 반면에 허수부는 그림 4(b)와 같이 전송선로법으로 측정된 기준결과가 DC~1.5 GHz의 주파수 대역에서 음의 값을 갖는 비물리적인 결과를 보여 정확한 비교는 어렵지만 1.5 GHz 이후의 결과는 거의 근접한 것으로 보아 측정된 허수부가 상당히 정확할 것으로 보인다.

아크릴에 대한 측정된 결과는 그림 5와 같으며 실수부는 평균적으로 약 25%, 허수부는 10% 정도의 오차를 보였다. 분말 형태의 매질과는 달리 고체 형태의 유

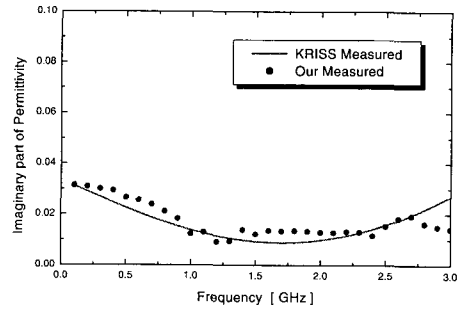
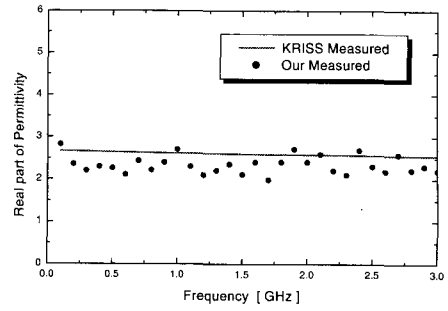


그림 5. 아크릴에 대한 복소 상대 유전율 측정결과
(a) 실수부 (b) 허수부

Fig. 5. Measurement results of complex relative permittivity for acrylic.

(a) Real part. (b) Imaginary part.

전체를 개방단말 프로브로 측정할 경우에는 매질과 프로브 사이의 접촉 정도에 따라 공기 층에 의한 영향이 좌우되므로, 테플론과 아크릴 모두 분말 형태보다 측정 오차가 큰 것으로 생각된다. 특히 아크릴의 경우 테플론보다 측정결과에 오차가 큰 이유는 표면이 테플론보다 거친 상태였기 때문에 공극에 의한 영향에 의해 발생한 오차일 것이다. 따라서 고체 형태인 유전체의 복소 유전율을 개방단말 프로브로 측정하기 위해서는 매질 표면을 평평하게 가공하는 것이 매우 중요하다.

IV. 결론

본 논문에서는 개방단말 동축선 프로브를 이용하여 몇 가지 분말과 고체에 대한 복소 유전율 측정의 정확성을 조사하였다. 측정장치로 개방단말 동축선 프로브를 동축선을 경유하여 벡터회로망 분석기에 연결하여

구성하였다. 동축선 끝단까지는 동축선에 대한 OSL calibration kit를 이용하여 교정하였으며, 프로브를 삽입함으로써 발생하는 위상차는 매질 특성이 잘 알려져 있는 증류수에 대해서 측정한 반사계수와 FDTD 법으로 수치계산한 결과와의 차로 보상하였다. 분말 형태인 설탕과 밀가루, 고체 형태인 테플론과 아크릴을 각각 프로브에 접촉시키고, 측정한 반사계수를 가상의 원추형 선로 모델에 대입하여 복소 유전율을 환산하였다. 동일한 매질을 한국표준과학연구원에 의뢰하여 전송선로에 채워 넣어 측정한 결과와 비교함으로써 측정의 정확성을 조사한 결과 분말형은 10% 이내, 고체형은 25% 이내의 오차 범위를 보였다. 이와 같이 측정의 정확성은 전송선로법보다는 약간 떨어지지만, 측정매질을 정확한 규격 가공하지 않아도 되므로 현장에서 용이한 측정이 가능함을 알 수 있었다.

본 논문에서 다룬 개방단말 동축선 프로브를 이용한 매질 측정방법에서 프로브를 교정하는 간략한 방법과 새로운 환산식은 여러 가지 매질의 복소 유전율을 간편하고 비교적 우수한 정확성으로 측정할 수 있으므로, 향후 이러한 방법의 적용범위, 효율성과 정확성에 대한 좀더 심층적인 연구를 수행한다면 초고주파 부품의 개발이나 안테나 및 지하탐사 레이더 (GPR; ground-penetrating radar) 시스템 개발 등의 다양한 용도로 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] H. E. Bussey, "Measurement of RF properties of materials a survey," Proc. IEEE, vol. 55, no. 6, pp. 1046-1053, Jun. 1967.

[2] A. M. Nicolson and G. F. Loss, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-19, no. 11, pp. 377-382, Nov. 1970.

[3] 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, Sep. 1976.

[4] 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.

[5] 신현, 현승엽, 김상욱, 김세운, "복소유전율 측정용 개방단말 동축선 프로브 제작오차의 영향에 관한 FDTD 모의계산," 대한전자공학회 논문지, 제 36 권, D편, 제 8호, 19-26쪽, 1999

[6] 신현, 김세운, 김영식, "개방단말 동축선 프로브로 측정된 마른 모래의 복소 유전율," 대한전자공학회 논문지, 제 37권, TC편, 제 5호, 17-24쪽, 2000

[7] 신현, 현승엽, 김상욱, 김세운, "복소유전율 측정용 개방단말 동축선 프로브의 새로운 등가모델," 1999년도 추계마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 제 22권, 제 2호, 143-146쪽, 1999년 9월

저 자 소 개

辛 炫(學生會員) 第 36卷 D編 第 8號 參照
현재 삼성전기 종합연구소 연구원

金 尙 昱(正會員) 第 32卷 A編 第 8號 參照
현재 과학기술원연구원 영상미디어연구센터 연구원

玄 昇 燁(學生會員) 第 36卷 D編 第 3號 參照
현재 고려대학교 대학원 전파공학과 박사과정 재학 중

金 世 潤(正會員) 第 32卷 A編 第 6號 參照
현재 과학기술원연구원 영상미디어연구센터 책임연구원