

슬랏을 갖는 도파관형 공진기를 이용한 박막 필름의 유전율 측정

Permittivity Measurement of Thin Film Using a Waveguide-type Resonator with a Slot

조 치 현 · 강 진 섭 · 김 정 환

Chihyun Cho · Jin-Seob Kang · Jeng-Hwan Kim

요 약

본 논문에서는 박막 필름의 유전율 측정이 가능한 슬랏을 갖는 도파관형 공진기를 제안하였으며, 시료에 의한 공진 주파수 천이 현상으로부터 유전율을 측정한다. 이를 위하여 공진기 한 쪽에 얇은 슬랏을 두고, 그 위에 부착된 시료에 의해 공진기 내부 전자기장 분포가 섭동되어 공진 주파수 천이 현상이 발생될 수 있도록 하였다. 유전율에 따른 공진 주파수 천이량은 수치 해석을 통하여 계산하였으며, 이를 기반으로 2~3 GHz 대역에서 65 μm 두께의 박막 필름 유전율을 측정하였다. 측정 결과, 유전율은 평균 3.3492 ± 0.0605 (표준오차)를 보였으며, 유전체 공진기나 도파관 프로브 방법과 같은 다른 측정법들과 상호 비교를 통해 제안 방법의 유효성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, a waveguide-type resonator with a slot is proposed to measure permittivity of thin film from resonant frequency shifting by an attached MUT(Material Under Test). The MUT on the slot shifts resonant frequency by perturbation of electromagnetic field. Amount of shifting resonance frequency is dependent on the permittivity of MUT, and that relation is obtained from numerical simulation. The measured relative permittivity of a thin film with thickness of 65 μm is 3.3492 with standard error of ± 0.0605 in the frequency range of 2 GHz to 3 GHz. Also the proposed method is compared with other measuring methods such as dielectric resonator and waveguide probe systems.

Key words : Dielectric Constant, Permittivity, Resonator, Measurement, Thin Film

I. 서 론

최근 Full HDTV나 LTE 휴대단말 등과 같이 고화질/대용량의 데이터 서비스가 점차 증가함에 따라 FFC(Flexible Flat Cable)와 같은 높은 전송률을 갖는 박막형의 데이터 케이블이 요구되고 있다. 고품질의

고속 데이터 전송을 위해서는 기존의 데이터 케이블 설계와 달리 케이블의 RF 특성에 대한 이해가 필수적이며, 이를 위해 FFC 제작에 사용되는 박막형 절연 필름의 유전율과 같은 전기적 특성을 정확하고 간편하게 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

유전율 측정 방법에는 공진기의 전자기장 분포를

「본 연구는 우수제조기술연구센터사업(ATC, 과제번호 10030417)의 위탁과제로 수행되었음.」

한국표준과학연구원 기반기준본부 전자파센터(Center for Electromagnetic Wave, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

· Manuscript received January 3, 2013 ; Revised January 24, 2013 ; Accepted February 5, 2013. (ID No. 20130103-004)

· Corresponding Author : Chihyun Cho (e-mail : chihyun.cho@kriss.re.kr)

시료를 이용해 섭동(perturbation)시켜 유전율을 측정하는 방법과 자유공간 또는 도파관에서 전자파가 시료를 투과/반사하는 양으로부터 유전율을 측정하는 방법 등이 널리 사용되고 있다^[1]. 전자의 방법은 정확한 유전율의 측정이 가능하지만 특정 주파수에서만 측정이 이루어지는 단점이 있으며, 후자의 방법은 비교적 넓은 주파수에서 유전율 측정이 가능하지만, 파장에 비해 시료의 두께가 얇을 경우에는 적용하기 어려운 문제점이 있다. 따라서 비교적 넓은 주파수 영역에서 박막형 시료의 정확한 유전율 측정이 가능하며, 시스템 구축에 소요되는 비용을 줄일 수 있는 새로운 방법이 요구된다. 본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로 우선 단일 주파수에서 간단한 방법으로 비교적 정확한 유전율을 측정할 수 있는 도파관형 공진기 방법을 제안하였다.

II. 도파관형 공진기 구조

그림 1은 제안된 도파관형 공진기를 나타내며, a mm× b mm× L mm의 내부 크기를 가진다. 본 논문에서는 WR-284 표준 도파관으로 공진기를 제작하여 2~3 GHz 대역에서 시료의 유전율을 측정할 수 있도록 하였다. 도파관의 한 쪽 종단에는 얇고 작은 슬랏 구조의 개구면(a_s × b_s)이 위치하며, 도파관 단면과 동일 크기의 시료가 슬랏 구조의 개구면에 부착된다. 부착된 시료는 도파관형 공진기 내부의 전자기장 분포를 섭동(perturbation)시켜 공진 주파수가 이동하게 된다. 이때 시료의 유전율과 두께에 따라 공진 주파수의 천이 정도가 다르게 되며, 이를 이용하여 시료의 유전율을 측정할 수 있다. 따라서 기존의 도파관 개구면에 시료를 위치하여 전자파 반사/투과량으로부터 유전율을 측정하는 도파관 프로브 방법보다 정확한 유전율 측정이 가능하다. 통상 공진 주파수의 천이현상은 2단자(2-port) 시스템에서 더욱 명확하게 관찰^[2]되므로 본 연구에서는 2 단자 시스템을 적용하였으며, 단자와 단락면과의 거리(D_1) 및 두 단자 사이의 거리(D_2)를 적절히 조절하면 공진이 발생하는 주파수를 조절할 수 있다. 또한, 각 단자는 길이 L_p 를 갖는 동축형 모노폴 프로브로 구성하였으며, 각 설계 변수들은 표 1에 자세히 정리하였다.

그림 2는 제안된 방법을 이용하여 측정 시료에 의

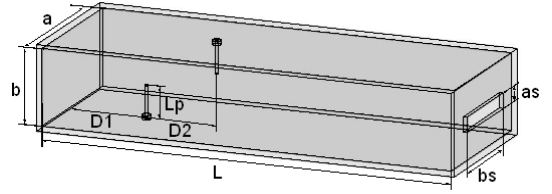


그림 1. 제안된 도파관형 공진기 구조
Fig. 1. Proposed waveguide type resonator.

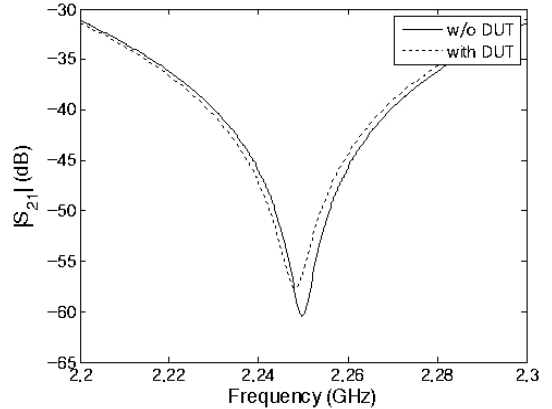


그림 2. 측정 시료($\epsilon_r=2.4$, 두께: 0.75 mm)의 유무에 따른 측정 S_{21}
Fig. 2. Measured S_{21} with and without MUT.

표 1. 도파관형 공진기 설계 파라미터

Table 1. Design parameters of the proposed waveguide type resonator.

a	72.14 mm	a_s	7.15 mm
b	34.04 mm	b_s	43.2 mm
D_1	52.74 mm	L	198 mm
D_2	81 mm	L_p	13.6 mm
동축형 모노폴 프로브 지름			1.5 mm

해 공진 주파수가 천이되는 현상을 측정한 결과이다. 예상대로 시료에 의해 주파수 천이 현상이 명확히 발생하는 것을 알 수 있으며, 이때 공진 주파수의 천이량은 다음과 같이 결정된다^[3].

$$\Delta f = \frac{f_s - f_0}{f_0} = (\epsilon_r - 1)hK(\epsilon_r, h) \quad (1)$$

여기에서 h 는 시료의 두께를 의미하며, f_0 와 f_s 는 각각 시료가 없을 경우와 있을 경우의 공진 주파수를 나타낸다. 공진 주파수의 천이량 Δf 는 시료의 두께

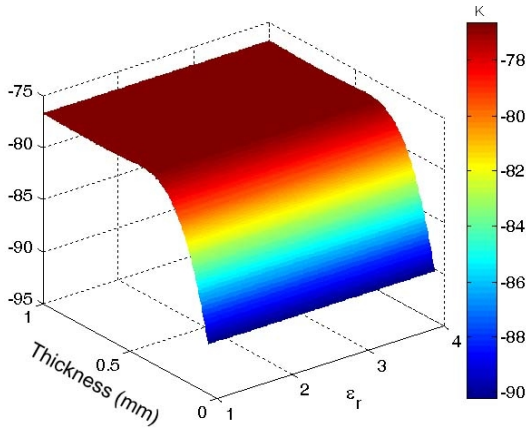


그림 3. 유전율과 두께에 따른 상수 K
Fig. 3. K as a function of relative permittivity and thickness.

와 유전율에 비례하여 증가하며, K 는 공진기의 구조와 형태에 의해 결정되는 상수 값이며, 시료의 두께와 유전율에 의존적인 함수이다.

제안된 구조를 해석적으로 계산하기에는 많은 어려움이 존재하여 수치 해석을 통하여 K 값을 평가하였다. 시료의 유전율과 두께를 변수로 공진 주파수 천이량을 계산하고, 이로부터 식 (1)을 이용하여 K 값을 산출하였으며, 수치 해석의 유효성 검증은 공진기 자체의 S_{21} 측정값과 비교를 통해 수행하였다. 그림 3은 수치 해석을 이용하여 평가된 제안된 공진기 구조의 K 값을 나타낸다. 수치 해석에는 MoM 기반의 FEKO 상용 시뮬레이션 툴^[4]을 이용하였으며, 가로와 세로축은 각각 유전율과 시료의 두께를 나타낸다. 본 논문에서는 FFC 제작에 사용되는 박막형 절연 필름의 유전율을 측정하기 위해 상대유전율은 1~4, 두께는 50 μm ~1 mm까지 수치 해석을 수행하였다. 전술한 범위에서 살펴보면, 유전율에 따른 K 값은 변화가 발생하지 않는다. 하지만 시료 두께에 따른 K 값은 시료 두께에 따라 선형적으로 증가하다가 일정 두께 이상이 되면 더 이상 증가하지 않는다. 이는 제안된 구조의 공진기에서는 슬롯에 근접한 시료만이 공진기 내부 전자계 분포에 영향을 미치기 때문이다.

III. 측정 결과

앞 절에서 수치 해석으로 계산된 K 값을 바탕으로

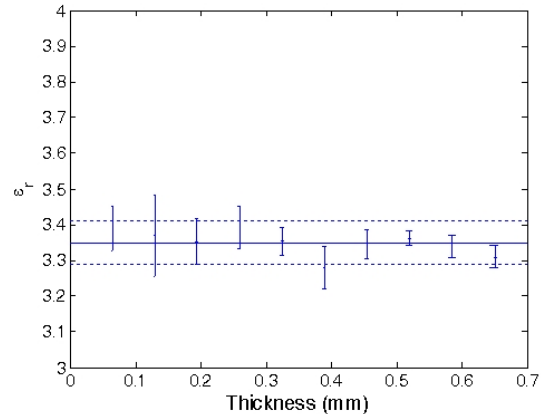


그림 4. 박막 필름의 2.25 GHz 상대유전율 측정 결과
Fig. 4. Measured relative permittivity of thin film on 2.25 GHz.

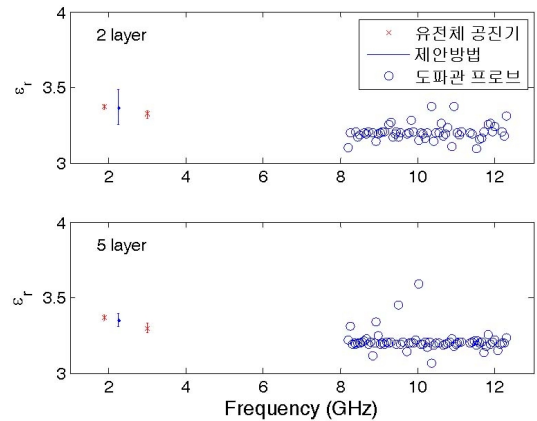


그림 5. 다른 측정법과의 상호 비교 결과
Fig. 5. Comparison results with other measurement methods.

식 (1)을 이용하여 FFC에 사용되는 박막 필름의 유전율을 측정하였다. 측정에 사용된 시료는 65 μm 의 매우 얇은 두께(2.5 GHz 신호 파장의 약 1/1850, K : -88.83)를 가지는 유전체 sheet로 실제 FFC 케이블 제조에 사용되는 박막 필름이다. 유전율의 두께에 따른 측정 방법의 신뢰성을 검증하기 위해 시료를 1장부터 10장까지 적층하여 유전율을 측정하였으며, 또한 측정 반복도를 평가하기 위해 각각 4회씩 유전율 측정을 수행하였다.

2.25 GHz에서 측정한 결과는 그림 4에 에러 바(error bar)로 나타내었으며, 에러 바는 각각의 4회 측정에 대한 표준오차를 의미한다. 실선과 점선은 각각 총 40회 측정 결과의 평균값과 표준오차를 나타

내며, 측정된 유전율 값은 3.3492 ± 0.0605 (표준오차)를 나타낸다. 각각의 두께에 따른 유전율 측정 에러 바가 총 측정 결과의 표준오차 안에 대부분 분포하여 비교적 높은 측정 신뢰도 및 반복도를 보여준다. 측정 시료의 두께가 두꺼워질수록 각 측정값의 표준오차가 감소하는 경향이 관찰되었으며, 이는 시료가 적층됨에 따라 측정 오차를 발생시키는 시료와 공진기 사이의 비접촉면이 점차 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

다음으로 다른 측정 방법들과 비교를 통하여 제안 방법의 유효성을 검증하였다. 비교 측정 방법으로는 유전체 공진기를 이용한 상용 유전율 측정 시스템과 도파관 프로브 방법을 적용하였다. 우선 상용 유전체 공진기의 경우 QWED 사의 1.9 GHz 및 3 GHz용 측정시스템을 이용하였으며, 유전체 공진기에 삽입된 시료에 의한 공진 주파수 천이 현상으로부터 유전율을 측정하는 방법이다^[5]. 도파관 프로브 방법은 시료를 도파관 중단과 완전 도체판 사이에 위치시켜 반사량의 진폭과 위상의 변화로부터 유전율을 측정하였으며^[6], 시료와 완전 도체판의 유한한 크기로 인하여 발생하는 반사량에 의한 측정 오차를 제거하기 위해 벡터 회로망 분석기의 time gating 기법을 적용하였다. 이 측정 방법은 완전 도체판의 제작 상 크기 제약으로 인하여 X 대역(8.2~12.4 GHz)에서 수행하였다. 각각의 측정 결과는 그림 5에 나타내었으며, 유전체 공진 기법은 'x' 표시의 에러 바, 도파관 방법은 'o', 제안 방법은 실선 에러 바로 나타내었다.

그림 5의 상단은 박막 필름을 2장 적층한 결과를, 하단은 5장 적층한 결과를 나타낸다. 앞의 결과와 마찬가지로 모든 측정 방법들이 박막 필름의 적층수가 많을수록 측정 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 각각의 방법을 통해 측정된 시료의 상대 유전율이 주파수가 높아짐에 따라 점차 자연지수적으로 약간씩 감소하는 경향을 보여준다. 제안된 방법은 유전체 공진기 방법과 비교시 1.9 GHz와 3 GHz에서 측정된 결과의 사이값을 보여주고 있으며, 이를 통하여 제안 방법의 유효성을 확인할 수 있다. 향후 제안된 방법을 바탕으로 복소 유전율 측정법을 확립하고, 넓은 대역에서 유전율을 획득할 수 있도록

측정 시스템을 개선할 예정이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 간단한 측정 시스템을 통하여 파장에 비해 수천분의 일의 얇은 두께를 갖는 박막 필름의 유전율을 측정할 수 있는 도파관형 공진기 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 이용하여 $65 \mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 매우 얇은 유전체 sheet의 유전율을 측정하였다. 측정 결과, 비교적 낮은 반복 오차를 가지며, 다른 측정법들과도 유사한 측정 결과를 보여준다. 따라서 향후 다양한 분야에서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

FEKO 시뮬레이터 평가판을 제공해 주신 모아소프트에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. J. Collier, A. D. Skinner, *Microwave Measurements*, The Institution of Engineering and Technology, pp. 430-448, 2007.
- [2] R. Inoue, K. Miwa, H. Kitano, A. Maeda, Y. Odate, and E. Tanabe, "Highly accurate and real-time determination of resonant characteristics: Complex linear regression of the transmission coefficient", *IE-EE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, pp. 2163-2168, Sep. 2004.
- [3] J. Krupka, A. P. Gregory, O. C. Rochard, R. N. Clarke, B. Riddle and J. Baker-Jarvis, "Uncertainty of complex permittivity measurements by split-post dielectric resonator technique", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 21, pp. 2673-2676, 2001.
- [4] FEKO ver. 6.2, EMSS Inc.
- [5] Split post dielectric resonators, QWED company.
- [6] 김정환, 강진섭, 남민희, 이재현, 장다원, "도파관 프로브를 사용한 유전체 sheet의 유전율 측정", 한국전자과학회 종합학술발표회논문집, 21(1), p. 107, 2011년.