

비가공 물질의 유전 상수 측정 방법

A Dielectric Constant Measurement Method of Unprepared Samples

이원희^{1,a}
(Won-Hui Lee^{1,a})

Abstract

A measurement method of the dielectric constant of materials whose standard sample is not prepared easily is proposed. The unprepared sample of the material is placed in a cavity, and the resonant frequency is measured. A commercial software simulates the same sample and the cavity leading to find the correct dielectric constant. The measured samples include a ceramic, a forced glass, and a powdered enamel. The measured dielectric constant of a ceramic, a forced glass, and a powdered enamel are $11-j0.0033$ ($\epsilon_r=11$, $\tan\delta=0.0003$), $4.15-j0.053$ ($\epsilon_r=4.15$, $\tan\delta=0.0128$), and $3.9-j0.042$ ($\epsilon_r=3.9$, $\tan\delta=0.0108$) respectively.

Key Words : Dielectric constant, Unprepared sample, Resonant frequency, Cavity

1. 서론

최근에 위성통신·방송, 이동통신 및 CATV, 유무선 통신 등에서 쓰이는 주파수 대역이 고주파 영역으로 확대되고 있으며 전자파와 관련한 MIC, MMIC 기술의 발달로 이에 사용되는 전자파 유전체의 개발이 활발해지고 있다. 따라서 고주파 영역에서도 측정 가능한 유전 상수 측정 기술 개발이 요구되고 있다. 또한 상용 3D 시뮬레이터의 발달로 그동안 실험적 측정에만 머물러야 했던 많은 시스템들이 해석적인 방법으로 예측할 수 있는 영역까지 확대되고 있다. 모의실험의 정확도에 가장 중요한 시뮬레이션 영역은 물질의 유전 상수와 같은 물성치를 얼마나 정확히 측정할 수 있느냐 하는 것이다.

유전 상수 측정 기술로는 자유공간법(free space method), 개방 단말 동축 선로 방법(open-ended coaxial line method)[1], 공진기 방법(cavity resonator method)[2], 전송선로법(transmission line method)[3]

등이 있다. 이 중 공진기 방법은 많은 연구들이 진행되어 공동 공진기 내의 정확한 필드 해석에 의한 정확한 유전 상수를 측정하는 기법들이 연구되었다. 그러나 정확한 해석(exact solution)[4]에 의한 측정 기법은 공진기 내부에 삽입하는 유전체의 형상을 정형화된 모양으로 가공해야하는 문제점이 있다. 원통형 공진기 내부에 유전체를 봉이나 디스크 형태로 가공하고, 삽입한 경우에 대해 실험과 계산의 오차가 0.5 % 이하로 정확히 계산될 수 있다[5]. 그러나 유전체의 형상이 가공이 되지 않는 경우에는 정확한 해석에 의해 유전 상수를 측정하는 것은 불가능하다.

마이크로파 시스템의 시뮬레이션을 진행할 경우 물질을 정확히 가공할 수 있는 재료도 있지만, 강화유리, 법랑, 특별한 경우의 세라믹처럼 가공이 불가능한 물질도 존재하므로 이러한 비가공 물질에 대해서도 유전 상수를 측정하는 방법들이 요구되고 있다. 이러한 비가공 물질들은 정형화되지 않은 고체 형태, 또는 분말 형태로 형상화 되어 있다.

본 논문에서는 이러한 측정의 제약 조건을 극복하고자 상용 3D 시뮬레이터인 CST사의 MWS 4.0을 이용하여 실험값과 비교하여 비가공 물질들의 유전 상수를 측정하는 방법을 제안한다. 상용 소프트웨어인 MWS의 구동원리는 FIA(Finite Integration

1. 포항공과대학교 미래정보기술사업단

(경북 포항시 남구 효자동 산 31)

a. Corresponding Author : whlee@postech.ac.kr

접수일자 : 2008. 7. 9

1차 심사 : 2008. 9. 3

심사완료 : 2008. 9. 19

Algorithm)를 채용함으로써 다른 전자기장 수치 해석 방법보다 필드 해석 방식의 효율성 및 정확성이 향상된 것이 특징이다.

2. 유전 상수 측정 방법

2.1 측정 시료

본 논문은 강화 유리나 세라믹처럼 유전체 봉(rod), 펙(puck), 슬랩(slab) 형태로 가공하기 어려운 물질 또는 분말 형태 물질의 유전 상수를 측정하고자 한다. 만약, 강화 유리나 세라믹의 크기가 매우 커서 원통형 공진기에 넣을 수 없다면, 깨뜨려서 원통형 공진기에 삽입하고 3D 시뮬레이터에 의해 깨진 강화 유리나 세라믹을 정확히 모델링하여 유전 상수를 측정한다. 깨진 시료에 대해 정확히 기계적인 측정기에 의해 점으로 형태 측정이 가능하며, 3D 시뮬레이터는 점을 이용하여 3D CAD가 가능하므로 깨진 시료를 정확히 모델링 하는 것은 큰 문제가 되지 않는다. 그림 1에는 강화 유리 재질의 그릇이 있고, 이러한 그릇은 유전 상수를 측정하기 위해 정형화된 모양으로 가공이 불가능하다. 따라서 그릇 자체의 유전 상수를 측정하기 위해서는 본 논문에서 제안하는 것처럼 그릇을 깨뜨려서 시료를 만들고, 원통형 공진기에 삽입하여 유전 상수를 측정한다.

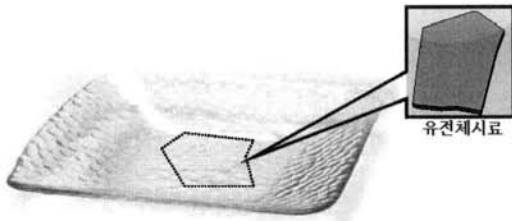


그림 1. 비가공 시료 모양.

Fig. 1. A shape of unprepared sample.

또한, 분말 타입의 유전체의 경우는 원통형 공진기 안에 테플론(teflon)으로 제작된 그릇을 만들어 그 안에 분말 시료를 넣고 유전 상수를 측정한다. 테플론의 경우는 쉽게 가공이 가능하므로, 미리 이론적인 정확한 해에 의해 유전 상수를 정확히 구한 후 시뮬레이션을 하도록 한다. 유전 상수 측정 방법의 기본 개념은 공진주파수 편이량을 이용하는 것이다. 즉, 빈 공진기와 유전체 삽입 공진기의 공진주파수 편차와 S_{21} 손실(loss) 편차를 이

용하여 유전 상수를 측정하는 방법이다. 비가공 물질이 공진기에 삽입된 경우 이론적인 해석이 매우 어려우므로, 3D 시뮬레이션 상에서 구조를 정확히 모델링하여 공진주파수와 손실 편차를 구하고, 실험에 의해 공진주파수와 손실 편차를 측정해서 두 결과를 비교함으로써 유전 상수를 측정한다. 그림 2는 강화 유리나 세라믹을 원통형 공진기에 삽입하여 3D 시뮬레이터로 모델링 한 것이다. 강화 유리와 세라믹의 경우 크기가 매우 커서 원통형 공진기에 삽입하기 어려웠으므로, 깨뜨려서 측정하였다. 깨뜨린 유전체 시료는 기계적 측정기에 의해 정확히 구조를 계산하여 시뮬레이션 모델링에 이용하였다. 그림 3은 분말의 유전 상수를 측정하기 위한 원통형 공진기와 테플론 그릇의 구조를 나타내었다. 테플론의 경우, 그릇으로 만들기 전에 유전체 봉으로 만들어 유전 상수를 정확히 측정 후 3D 시뮬레이터의 데이터로 활용하였다. 측정된 테플론의 복소 유전 상수는 $2.06-j0.0008$ 이다.

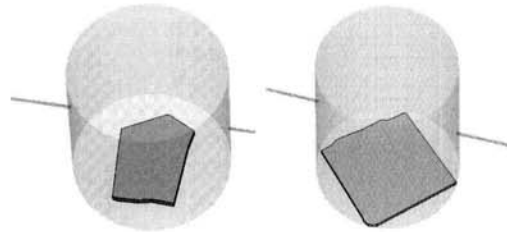


그림 2. 원통형 공진기에 비가공 시료(강화유리, 세라믹)가 삽입된 구조.

Fig. 2. A structure of unprepared samples loaded cylindrical cavity(a forced glass, a ceramic).

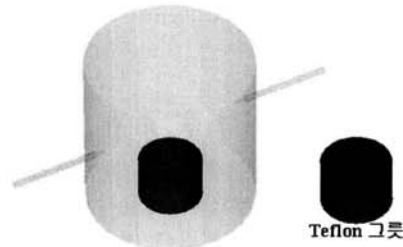


그림 3. 원통형 공진기에 분말 시료가 삽입된 구조(테플론 그릇).

Fig. 3. A structure of powdered sample loaded cylindrical cavity(teflon vessel).

2.2 측정 모드 결정과 주파수 편이법

그림 4는 빈 공진기와 유전체 삽입 공진기의 S_{21} 결과이다. 빈 원통형 공진기의 모드별 공진주파수를 시뮬레이션하고, 유전체 삽입 공진기의 모드별 공진주파수를 시뮬레이션하면 모드별 편차가 발생한다. 각 모드 중 편차가 가장 많이 발생하는 모드를 찾아서 그 모드에서의 공진주파수 편차를 실험값과 비교한다. 시뮬레이션 시 유전체를 삽입하면, 유전체의 유전 상수 정보를 넣어야만 시뮬레이션 결과(output)가 발생한다. 실험의 공진주파수 편차에 맞추도록 시뮬레이션 상의 유전 상수를 변화시킨다. 실험상의 공진주파수 편차가 시뮬레이션의 공진주파수 편차에 일치하면 그 때의 유전 상수 값이 구하고자 하는 유전체의 유전 상수 값이 된다. 본 논문에서는 가장 공진주파수 편차가 많이 발생하는 TM_{111} 모드를 이용하였다. 그림 4에서는 화살표로 표시한 모드가 TM_{111} 모드이다.

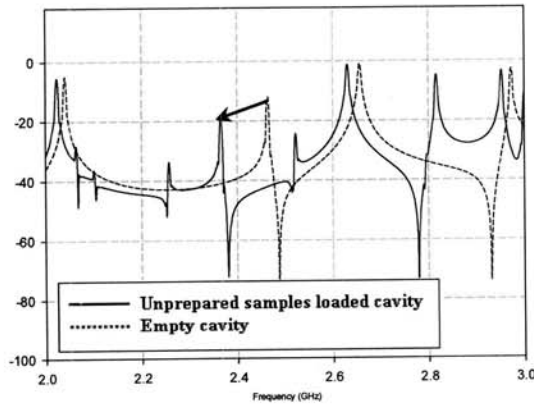


그림 4. 빈 공진기와 유전체 삽입 공진기의 S_{21} 결과.
 Fig. 4. S_{21} results of empty cavity and dielectric loaded cavity.

3. 실험 및 결과

본 논문의 유전 상수 측정은 실험에 의한 공진 주파수와 손실 편차를 측정하고, 시뮬레이션에서 공진기와 유전 물질 모델링을 정확히 한 후에 시뮬레이션 상의 유전체의 유전상수를 변화시키면서 실험의 공진주파수와 손실(loss) 양을 맞추는 과정을 진행한다. 따라서 시뮬레이션에 앞서 실험 과정이 선행되어야 하며, 본 논문의 기술 과정도 시뮬레이션 앞에 실험 및 결과를 삽입하였다. 그림 5는

유전체의 유전 상수를 측정하기 위해 제작한 원통형 공동 공진기의 사진을 나타내었다.



그림 5. 제작된 원통형 공진기.
 Fig. 5. Fabricated cylindrical cavity.

원통형 공진기의 재질은 알루미늄이며 사이즈는 지름 160 mm, 높이 160 mm로 2.45 GHz에서 최저차 모드(dominant mode)가 동작되도록 제작되었다. 그림 6에는 빈 공진기와 세라믹 삽입 공진기의 공진주파수 편차를 측정한 결과이다. 측정에 사용된 측정기는 Advantest사의 R3860A vector network analyzer이다.

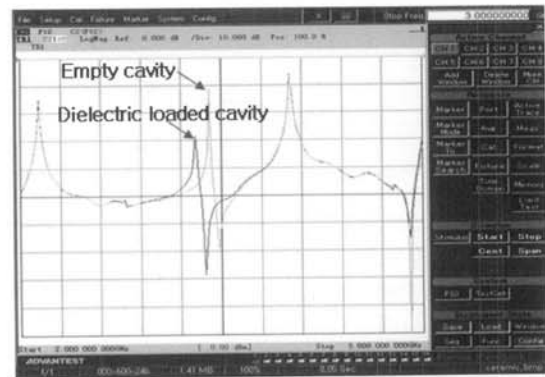


그림 6. 빈 공진기와 세라믹 삽입 공진기의 S_{21} 측정 결과.
 Fig. 6. S_{21} measurement results of empty cavity and ceramic loaded cavity.

그림 6의 측정 결과에서 2~3 GHz에서 총 4개의 모드가 동작한다. 그 중 공진주파수가 가장 많

이 변화하는 모드는 TM_{111} 모드며, TM_{111} 모드를 이용하여 유전 상수 측정을 실시하였다. 강화 유리와 세라믹 그리고, 분말 타입의 범랑을 공진기에 넣어 측정된 결과와 빈 공진기의 공진주파수 측정 결과를 이용하여 손실 편차와 공진주파수 편차를 계산하였다. 그 결과를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 강화 유리와 세라믹, 범랑의 S_{21} 편차 측정 결과.

Table 1. S_{21} deviation measurement results of a ceramic, a forced glass, and a powdered enamel.

	강화 유리	세라믹	범랑
공진주파수 편차 (GHz)	0.0399	0.0350	0.0402
손실 편차 (dB)	-4.666	-4.242	-4.733

4. 3D 시뮬레이션과 유전 상수 측정 결과

시뮬레이션은 상용 3D 시뮬레이터인 CST사의 MWS 4.0을 이용하였다. 원통형 공진기에 깨진 강화 유리와 세라믹을 삽입한 것을 정확히 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 범랑의 경우는 테플론 그릇의 유전 상수를 정확한 계산 해에 의해 측정된 후 그릇 안에 분말의 범랑을 넣은 형태로 시뮬레이션 상에 적용하였다. 시뮬레이션 시 실험에서의 공진 주파수와 손실 편차를 맞추기 위해 유전체의 유전 상수를 변화시키면서 최적화(optimization)하는 과정을 진행한다. 표 2에는 대표적으로 강화 유리의 비유전율과 손실을 시뮬레이션 상에서 최적화한 결과를 나타내었다.

표 2와 같은 방법으로 계산한 강화 유리의 복소 유전 상수는 $4.15-j0.053(\epsilon_r=4.15, \tan\delta=0.0128)$ 이고, 같은 방법으로 세라믹의 유전 상수를 측정해보면 $11-j0.0033(\epsilon_r=11, \tan\delta=0.0003)$ 이 측정되었다. 또한 분말로 측정된 범랑의 유전 상수는 $3.9-j0.042(\epsilon_r=3.9, \tan\delta=0.0108)$ 로 측정되었다. 이렇게 측정된 유전 상수 값들은 참고 문헌[6-8]을 찾아보면 강화 유리의 경우 $4.82-j0.026(\epsilon_r=4.82, \tan\delta=0.0054)$, 세라믹 계열의 경우는 $(9.5\sim 10)-j0.0033(\epsilon_r=9.5\sim 10, \tan\delta=0.0003)$ 으로 본 논문으로 측정된 값과 비슷한 결과 값을 갖는다. 물질의

유전 상수는 물질의 구성에 따라 조금씩 다른 특성을 보인다. 참고 문헌의 측정 시료와 본 논문의 측정 시료는 정확히 같은 것이 아니기 때문에 이러한 작은 오차는 발생할 수 있는 것이라 생각된다.

표 2. 강화 유리의 비유전율과 손실의 최적화. Table 2. Relative permittivity and loss-tangent optimization of a forced glass.

(a) 비유전율 최적화 과정

비유전율	공진주파수 편차 (GHz)
4.00	0.0381
4.10	0.0391
4.15	0.0399
4.20	0.0401
4.50	0.0411
5.00	0.0441
5.17	0.0451
6.00	0.0461

(b) 손실(loss-tangent) 최적화 과정

손실	손실 편차 (dB)
0.0090	-2.69
0.0050	-2.73
0.0100	-2.80
0.0128	-4.66
0.0200	-5.55
0.0500	-9.52

5. 결론

본 논문은 비가공 물질의 복소 유전 상수를 측정하는 방법에 대해 연구하였다. 본 논문의 방법은 정확도 측면에서 많이 검증된 상용 3D 시뮬레이터에 의한 측정 방법이다. 시뮬레이션 자체의 미세한 오차가 존재하지만, 실험적으로 그 오차를 보정하였다. 기존 유전 상수 측정 방법처럼 정형화된 가공에 의해 시료를 제작하지 않아도 되기 때문에 시료를 가공하기 위한 시간적, 경제적인 손실을 줄일 수 있으며 가공 오차 또한 생기지 않는다. 또한, 강화 유리나 세라믹처럼 가공하기 어려운 재료와 분말 물질의 측정도 가능하다는 장점이 있다. 시뮬레이션의 유전 상수 최적화는 실험에 근거를 두기 때문에 실제적인 유전 상수 값과 매우 근접한 값이라 생각된다. 유전 상수 값은 유전체를 구성하고 있는 물질의 구성에 따라 달라지므로, 측정된 값들의 정확도를 직접 증명할 수는 없으나, 같

은 재질 유전체의 문헌 값과 근사한 측정값을 가지므로, 정확한 측정을 하였다고 판단된다. 측정된 강화 유리, 세라믹, 법랑의 복소 유전 상수는 각각 $4.15-j0.053(\epsilon_r=4.15, \tan\delta=0.0128)$, $11-j0.0033(\epsilon_r=11, \tan\delta=0.0003)$, $3.9-j0.042(\epsilon_r=3.9, \tan\delta=0.0108)$ 로 측정되었다.

본 논문에서의 유전 상수 측정 방법은 기존 유전 상수 측정 방법에 비해 매우 간단하며, 어떠한 형태의 유전체도 측정이 가능하다는 장점이 있다. 현재 마이크로파 응용 분야는 3D 시뮬레이터의 발전에 힘입어 크게 발전하고 있다. 그러나 시뮬레이션 시 꼭 필요한 유전 상수의 정보를 정확히 측정하기는 매우 어렵다. 본 논문에서의 측정법을 이용한다면 여러 가지 재질의 유전체의 유전 상수를 측정할 수 있고, 시뮬레이션 할 때의 정확도 향상에 많은 도움이 될 것이다.

참고 문헌

- [1] D. Xu, L. Li, and Z. Jang, "Measurement of the dielectric properties of biological substances using an improved open-ended coaxial line resonator method", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique*, Vol. MTT-35, No. 12, p. 1424, 1987.
- [2] P. Guillon and Y. Garault, "Accurate resonant frequencies of dielectric resonators", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-25, No. 11, p. 916, 1977.
- [3] J. Baker-Jarvis, "Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements", *NIST Technical Note*, p. 1341, 1990.
- [4] 이원희, 김태신, 강민우, 구경완, 허정, "유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기에서의 공진 모드 구분에 관한 연구", *전기전자재료학회 논문지*, 15권, 1호, p. 37, 2002.
- [5] Y. Kobayashi and M. Katoh, "Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by the dielectric rod resonator method", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique*, Vol. MTT-33, No. 7, p. 586, 1985.
- [6] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", Addison Wesley, 1990.
- [7] A. Atanaskovic, V. Tasic, and S. Ivkovic, "Automatization of the Complex Dielectric Constant Measurement", *TELSIKS 2001*, p. 691, 2001.
- [8] R. F. Harrington, "Time-Harmonic Electromagnetic Fields", *The IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory*, p. 452, 2001.