

Post Resonator 방법에 의한 마이크로파 유전율 측정에서의 오차 분석

조문성¹ · 임동건¹ · 박재환^{1,†} · 박재관²

¹한국교통대학교 전자공학과

²한국과학기술연구원 나노포토닉스연구센터

Error Analysis for Microwave Permittivity Measurement using Post Resonator Method

Mun-Seong Cho¹, Donggun Lim¹, Jae-Hwan Park^{1,†} and Jae-Gwan Park²

¹Department of Electronic Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, 308-702, Korea

²Nanophotonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791, Korea

(2012년 8월 22일 접수: 2012년 9월 17일 수정: 2012년 9월 22일 게재확정)

초 록: 마이크로파 유전체의 비유전율 측정에 널리 사용되고 있는 post resonator 기법에서 시편의 형상과 기구물의 편차 등에 의해서 발생하는 비유전율 계산의 오차요인에 대해 시뮬레이션과 시편 실측을 통해 분석하였다. HFSS 시뮬레이션 결과를 통하여 post resonator 측정 기구물에 놓여진 유전체(유전율 38) 디스크의 S_{21} 파라미터 스펙트럼을 계산하고 TE_{011} 모드 공진주파수로부터 비유전율을 계산하였다. 시편의 형상비(직경D/높이H)가 0.8~1.6 사이로 변화함에 따라 계산되는 비유전율 값의 오차는 약 0.3% 이내로 미미하였다. 시편과 상하부 도체 사이에 1~10% 정도의 공극이 존재할 경우, 비유전율은 1~10% 정도의 높은 수준으로 오차가 발생하였다. 시편이 중심부에서 벗어나서 위치하는 것은 비유전율 측정에서 오차를 유발하지 않았다. 이러한 시뮬레이션 결과는 제작 샘플의 실제 측정을 통해 유사한 경향성을 확인하였다.

Abstract: Errors of relative permittivity calculation caused by the variation of sample aspect ratio (diameter/height) and measuring geometry were analyzed by computer simulation and measurement. Firstly, the S_{21} spectrum of the sample (permittivity 38) was simulated in the post resonator measuring apparatus by HFSS simulation. Then, the relative permittivity was calculated from the TE_{011} mode resonant frequency. The relative permittivity varied by ca. 0.3% with sample aspect ratio variation ($D/H=0.8\sim 1.6$). The relative permittivity varied by ca. 1~10% when the 1~10% of air-gap was introduced in between the dielectric disk and upper conductor. All the simulation results showed consistent tendency with real measurement.

Keywords: post resonator, permittivity, HFSS, microwave dielectrics

1. 서 론

비유전율이 높고 유전손실이 작은 마이크로파 유전체 공진기는 저렴한 제조비용, 높은 Q값, 온도변화에 대한 안정성 등으로 인하여 마이크로파 주파수 대역의 필터나 발진기에 많이 활용되고 있다.¹⁻³⁾ 이러한 마이크로파 유전체는 실린더, 로드, 기관 등의 다양한 형태로 제작되어 안테나 및 필터를 중심으로 하는 공진기 소자를 구성하게 된다. 통상 마이크로파 유전체의 경우 비유전율 3~100 정도이고 unloaded Q 값은 수 백~수 만에 이르는 값을 나타낸다.

초고주파 회로에서 유전체 공진기가 형성하는 공진주파수는 유전체 공진기의 형상과 비유전율에 의해 결정되며, 동작특성은 Q 값과 관련되게 된다. 유전체 공진기는 동일한 조성으로 제작하더라도 제작과정에서 3~5% 정도의 비유전율 편차를 보이게 되며, Q 값 역시 제작과정에

서 재료적 외형적 결함에 의해 10% 내외의 편차를 나타내게 된다. 역으로 비유전율을 모르는 어떤 마이크로파 유전체 조성물의 비유전율을 측정하는 과정에서도 역시 오차가 발생하게 된다. 그러므로 유전체 재료의 비유전율과 Q 값을 정확하게 측정하는 것은 매우 중요하다. 마이크로파 대역에서 유전재료의 유전특성을 측정하는 방법으로는 post resonator 방법(Hakki-Coleman method), 유전체 캐비티 공진법, 공진기 섭동법, Feby-Perot 방법 등 다양한 방법이 있다.^{1, 4-6)} 이 중에서 post resonator 방법은 마이크로파 유전체의 유전율을 결정하는데 유리한 방법이며, 유전체 캐비티 공진법은 Q 값을 측정하는데 유용한 방법이다.

Hakki-Coleman과 Courtney에 의해 제시된 dielectric post resonator 기법은 비교적 넓은 면적을 갖는 상부 및 하부 평행도체 사이에 유전체 디스크를 삽입하고 투과방식에 의

[†]Corresponding author

E-mail: pjh@ut.ac.kr

해 공진을 유도하여 마이크로파 유전특성을 평가한다.⁵⁾ Post resonator 기법에서 측정 공진모드는 TE_{011} 모드이다. TE_{011} 모드는 다른 모드의 공진피크와는 달리 윗면의 도체를 위, 아래로 움직일 때 공진주파수가 변동하는 폭이 작아서 쉽게 판별할 수 있다. 또한 평행도체의 반경이 유전체의 반경에 비해 3배 이상이 되면, 평행판은 거의 무한도체로 간주할 수 있을 정도로 되므로 측정에 미치는 영향이 작다. 그러므로 시편을 상하부 금속 평판의 중심부에 위치시키지 않아도 측정의 오차가 작다는 장점이 있다. 이러한 이유로 마이크로파 유전체의 비유전을 측정에 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 post resonator 기법은 유전체의 Q값 측정에는 적절치 않은데, 이는 도체표면의 전류분포를 정확히 알아내기 힘들고 유전체의 원주면에서 지름방향으로 형성되는 TEM 모드의 복사를 고려하기 어렵기 때문이다.

현재까지 post resonator 기법에 대한 이론적 근거에 대한 많은 연구들이 이루어져 왔으며, 실제 실험적으로 비유전율을 측정하는 방법으로 적용된 사례들이 보고되어 왔다. 이 방법을 활용한 실제 측정에서 시편의 형상비(직경/높이)나 기구물의 편차 등에 의해서 결정되는 비유전율의 오차가 일부 발생하게 된다. 본 연구에서는 전자계 시뮬레이터를 사용하여 시편의 형상변화, 측정시 기구물의 편차 등이 post resonator 방법을 통한 비유전율 측정에 미치는 오차요인에 대해 살펴보고 실제 유전체로 제작하여 측정한 결과와 비교하여 검토하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 시뮬레이션 및 비유전율 계산

유한요소법(Finite Element Method, FEM)에 의한 전자계 시뮬레이션 방법은 3차원 구조의 물체를 유한한 개수로 분할(meshing)한 후 3차원적으로 존재하는 전하, 전류, 전계, 자계의 분포로부터 유도되는 전자계를 합산하여 분석하게 된다.⁷⁾ 본 연구에서는 FEM을 기반으로 하는 full-wave 3D 소프트웨어인 HFSS (V7.0, Ansoft Co., USA)를 사용하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 post resonator 방법과 동일하게 상하부 도체, 공극 및 유전체, SMA 커넥터 등을 실제 측정 기구물과 동일하게 오브젝트를 형성하고 재질별로 전도도, 유전율, 유전손실계수 등을 셋업한 후 분석주파수 범위는 2~20 GHz로 설정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용한 유전체 오브젝트는 비유전율 38, 유전손실 0.0005로 설정하였는데 이는 실측용 샘플로 제작한 유전체의 유전특성과 일치시키기 위함이다.

상하부 도체는 Cu로 설정하였고, SMA 커넥터는 실제 기구물과 동일한 형상과 재질을 입력하여 임피던스가 50Ω 로 매칭되도록 하였다. HFSS 시뮬레이션이 진행된 후 주파수변화에 따른 전계, 자계 벡터의 3차원적 형상과 S_{21} 파라미터의 값을 얻었다. 시뮬레이션으로 얻어

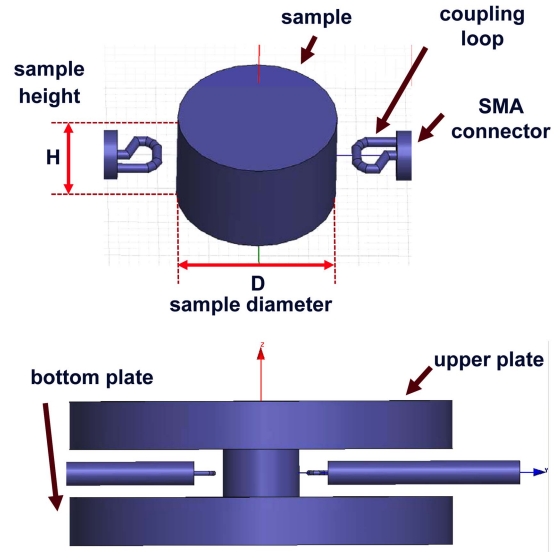


Fig. 1. HFSS 시뮬레이션을 위하여 설정한 유전체 디스크 및 post resonator 기구물 형상.

진 공진주파수와 S_{21} 파라미터의 스펙트럼에서 얻어지는 여러 개의 공진피크 중에서 TE_{011} 모드의 판별은 유전체의 반경방향의 수평면의 전계벡터의 형상으로부터 정확하게 판별할 수 있다.

유전체 디스크의 형상(직경 D, 높이 H)과 TE_{011} 모드 공진주파수가 시뮬레이션 또는 측정되면 Courtney가 제안한 계산과정에 의해 비유전율을 결정할 수 있다.⁸⁾ 먼저 TE_{011} 모드 공진에 대한 특성방정식을 설정하고, 0차 및 1차 Bessel 함수의 해를 구하여 특성방정식을 연립하게 비유전율을 계산할 수 있다. 이 과정은 이미 개발되어 있는 계산 유틸리티를 활용하여 진행하였다.⁹⁾

2.2. 유전체 시편의 실측

본 연구에서는 HFSS 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 실측 시편을 준비하였다. 이를 위해 중유전율 마이크로파 유전체인 MgO-CaO-TiO₂계 조성을 사용하여 고상소결방법에 의해 시편을 제작하였다. 소결 후 시편의 직경은 8 mm, 높이는 3~7 mm가 되게 여러 가지 형상의 샘플을 제작하였다. 주파수 변화에 따른 S_{21} 파라미터의 측정은 post resonator 측정기구물과 RF 네트워크 분석기(8510A, Hewlett Packard)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. HFSS 시뮬레이션

Fig. 2 (a)에는 K=38 (Loss=0.0005) 특성을 갖는 디스크에 대하여 HFSS에 의해 시뮬레이션된 S_{21} 파라미터 스펙트럼을 나타내었다. 여러 개의 공진피크가 나타나게 되는데, 실험적으로는 기구물 상부 도체를 들어올리면서 공진피크의 이동거동을 살펴서 TE_{011} 모드 공진주파수를 찾

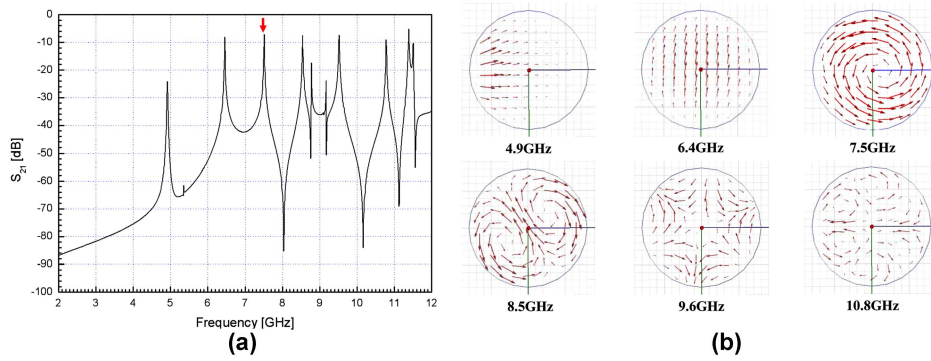


Fig. 2. (a) HFSS에 의한 유전체 디스크 ($D = 8 \text{ mm}$, $H = 5 \text{ mm}$, 비유전율 = 38, 유전손실 = 0.0005)의 S_{21} 스펙트럼 시뮬레이션 결과. (b) 각 공진 모드에서 형성되는 유전체 디스크 내부의 전기벡터 형상.

게 된다. 그러나 시뮬레이션에서는 유전체의 반지름방향의 수평면에 형성된 전기벡터의 형상을 파악하여 바로 TE_{011} 모드 공진주파수를 찾을 수 있다. 그림에서 관찰된 공진피크 중에서 좌측으로부터 6개의 공진모드에 해당하는 전기벡터의 형상을 Fig. 2(b)에 정리하여 나타내었다. 전기벡터의 형상으로부터 7.5GHz의 공진주파수가 TE_{011} 모드임을 바로 확인할 수 있다. 이 주파수를 Courtney의 계산식에 대입하여 계산하면 비유전율은 38.1로 계산되는데 이는 시뮬레이션에 셋업된 38.0의 비유전율에 비해 0.2% 이내의 오차수준으로 비교적 정확한 상호일치를 나타내고 있다.

샘플의 형상 변화에 따른 비유전율 측정오차에 대해 살펴보기 위하여, HFSS 시뮬레이션 오브젝트의 형상(D/H)을 변화시키면서(직경 $D = 8 \text{ mm}$ 및 높이 $H = 3, 5, 7, 9 \text{ mm}$) S_{21} 파라미터 스펙트럼의 변화를 구하였다. Fig. 3에 시편이 높이 변화에 따른 스펙트럼변화를 나타내었다. 화살표로 표시한 주파수가 각 형상별 TE_{011} 모드 공진주파수에 해당한다. 수 많은 공진주파수 중에서 TE_{011} 모드를 판별하기 위해서는 각각의 공진주파수에서 유전체의 반지름방향으로 형성된 전기벡터의 형상을 플랫폼하여 확인하는 과

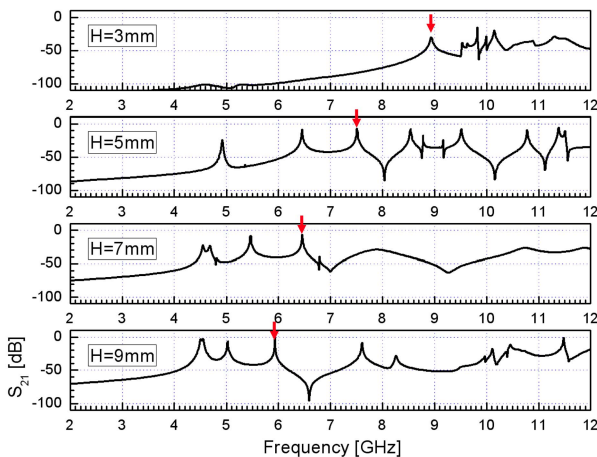


Fig. 3. 유전체(비유전율=38, 유전손실=0.0005) 디스크의 형상변화($D = 8 \text{ mm}$, $H = 3, 5, 7, 9 \text{ mm}$)에 따른 S_{21} 스펙트럼 변화.

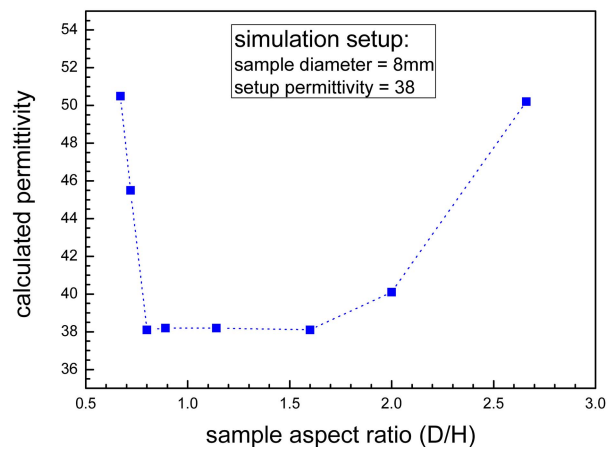


Fig. 4. 유전체 디스크의 형상비 (D/H)가 변화할 때 시뮬레이션을 통해 계산된 비유전율 값의 변화.

정이 필요하다. 이러한 확인과정을 통하여 샘플의 높이가 3, 5, 7, 9 mm로 변화함에 따라 TE_{011} 모드 공진주파수는 8.9, 7.5, 6.5, 5.9 GHz로 하향 이동함을 확인할 수 있었다. S_{21} 파라미터 스펙트럼에서 얻어진 TE_{011} 모드 공진주파수와 유전체 디스크의 형상을 기초로 하여 Courtney가 제안한 계산과정에 의해 계산된 비유전율은 Fig. 4에 정리하여 나타내었다. 형상비 (D/H)가 0.8~1.6 사이일 때 시뮬레이션 과정을 통해 계산된 비유전율 값은 시뮬레이션 셋업에서 정해진 값과 거의 일치하는 경향성을 나타내는데, 대략적으로 0.5% 이내의 오차를 나타낸다. 그러나 시편의 형상비가 0.7 이하로 떨어지거나, 2.5 이상으로 증가하게 되면 비유전율 계산 값은 증가하는 경향성을 나타내어 최대 30% 정도의 오차를 나타내게 된다. 이를 통해 post resonator 측정방법에서 시편의 형상비(D/H)는 1.0~2.0 사이에서 설정되는 것이 적합하다고 판단된다.

Post resonator 측정 기구물을 이용하여 유전체 디스크의 비유전율을 측정할 때, 상부도체 및 하부도체는 유전체 디스크의 윗면과 아랫면에 밀착시키게 된다. 그러나 실제 측정에서는 상하부 도체 및 제작 샘플의 가공 불균일과 조작자의 실수 등으로 인해 도체와 유전체가 완전

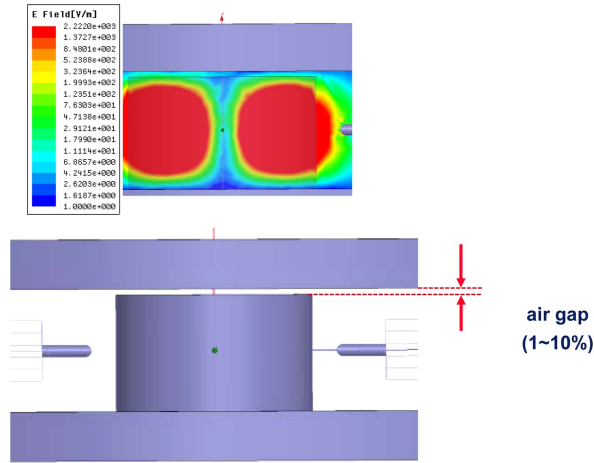


Fig. 5. 유전체 디스크와 상부 도체 사이에 형성된 공극의 형상 및 공극에 형성되는 전계벡터의 크기.

히 밀착되지 못하고 약간의 이격이 발생할 수 있다. 이러한 공극으로 인한 비유전율 오차에 대해 HFSS 시뮬레이션을 통해 확인해 보았다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 유전체 디스크와 상부 도체 사이에 공극을 유전체 디스크의 높이의 1~10%로 설정하여 전자계의 변화 및 공진주파수 변화를 살펴보았다. 이 때, 공극 및 유전체 측면의 공간은 모두 air 재질로 설정하였다. Fig. 5의 전계벡터의 크기표시에 나타났듯이 상부의 공극으로 인하여 전자계 에너지가 유전체 상부에 약간 더 집중되며, 상부의 공극으로 흩어져 나감을 확인할 수 있다. 이러한 오차요인은 S_{21} 파라미터 스펙트럼의 변화 및 비유전율 계산의 오차로 연결된다. Fig. 6에는 유전체 디스크와 상부전극 사이의 공극형성에 따라 시뮬레이션에 의해 계산된 비유전율 값의 변화를 정리하여 나타내었다. 공극이 존재하지 않는 이상적인 경우에는 설정된 비유전율 (38.0)과 계산된 비유전율 값이 거의 일치하게 된다. 그러나 공극이

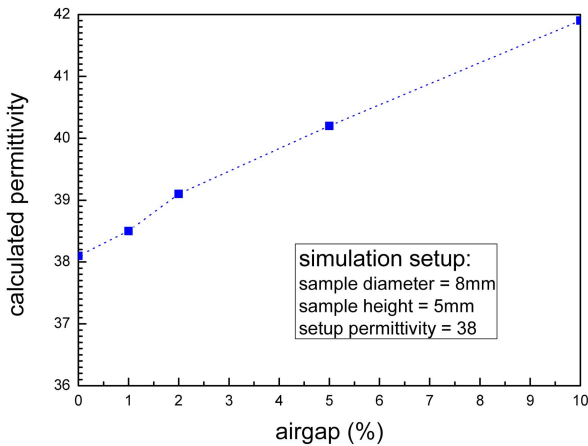


Fig. 6. 유전체 디스크와 상부전극 사이의 공극형성 정도에 따른 시뮬레이션에 의해 계산된 비유전율 값의 변화.

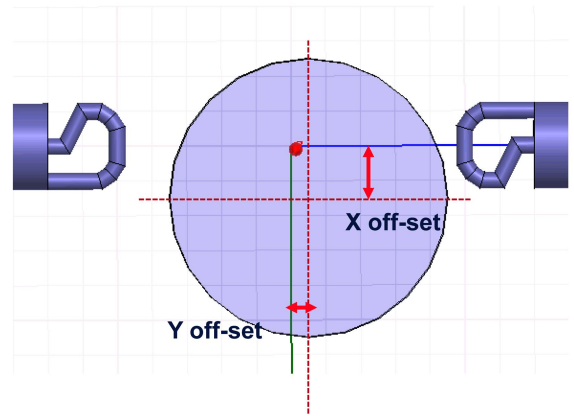


Fig. 7. Post resonator 측정 기구물 내에서 유전체 디스크의 위치 오프셋 정의.

1~10% 정도의 수준으로 증가하게 되면 계산되는 비유전율 역시 최대 10% 정도까지 증가하는 경향성을 나타내고 있다. 이를 통해 post resonator 측정기법을 통하여 유전체 디스크의 비유전율을 결정할 때 상하부 도체와 유전체 디스크의 밀착이 좋을 때는 측정되는 비유전율 값의 오차가 거의 없다고 볼 수 있으며, 상하부 도체와 유전체 디스크의 밀착이 좋지 않거나 치수정밀도가 떨어져서 도체 또는 유전체 디스크의 휨이 있을 경우 측정되는 비유전율은 실제 값에 비해 과대평가될 수 있음을 알 수 있다.

한편, post resonator 측정 기구물을 사용한 실제 측정에서는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 샘플이 중심에 위치하지 않고 벗어나는 경우가 종종 발생하게 된다. 이처럼 샘플의 위치 오프셋이 발생할 경우 HFSS 시뮬레이션에 의해 계산되는 비유전율 값의 변화추이를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 측정 기구물에서 샘플이 X방향, Y방향으로 이동되더라도 S_{21} 스펙트럼 및 이로부터 계산되는 비유전율 값의 변화는 전혀 관찰되지 않았다. 샘플이 중심부에서 벗어날 경우 기하적 비대칭성으로 인한 스푸어리스 피크가 나타나지만, TE_{011} 모드의 공진주파수는 완벽하게 일치하는 것으로 나타났다. 본 시뮬레이션에서는 상하부 도체의 반경은 유전체 디스크의 반경에 비해 5배 크게 설정하였는데, 이러한 조건에서 전자계 에너지의 대부분은 유전체 디스크 안에 집중되게 되며 상하부 평행 도체는 무한면적의 도체로 근사될 수 있다. 그러므로 실제 시뮬레이션 결과를 통해 계산된 비유전율 역시 유전체 디스

Table 1. 유전체 디스크의 위치 오프셋에 따른 비유전율 시뮬레이션 값의 변화.

position offset (mm)		permittivity	
X	Y	simulation setup	calculated
0	0	38	38.1
1	0	38	38.1
1	0.5	38	38.1
2	0.5	38	38.1

Table 2. 유전체 (MgO-CaO-TiO₂계) 디스크의 형상, 공진주파수 및 비유전율.

sample #	sample shape			f ₀ (GHz)	permittivity		
	diameter(mm)	height(mm)	D/H				
low D/H	1-1	8.25	5.39	1.53	7.1568	37.658	average 37.804
	1-2	8.26	5.47	1.51	7.0743	37.950	
	2-1	8.26	4.51	1.83	7.8250	37.855	
mid D/H	2-2	8.26	4.52	1.82	7.7944	38.061	average 37.959
	2-3	8.25	4.54	1.81	7.7899	37.961	
	3-1	8.25	3.52	2.34	9.0408	39.130	
high D/H	3-2	8.26	3.51	2.35	9.0693	40.296	average 40.440
	3-3	8.26	3.52	2.34	9.0648	41.895	

크의 위치 오프셋에 무관하게 완벽하게 동일한 값이 얻어짐을 확인하였다. 이를 통해 post resonator 측정기법을 통하여 유전체 디스크의 비유전율을 결정할 때 유전체 디스크의 위치가 중심부에서 벗어나는 것은 오차유발 요인이 아님을 확인할 수 있다.

3.2. 샘플 실측결과와의 비교

본 연구에서는 HFSS 시뮬레이션 결과와 실제 결과를 비교 검토하기 위하여 실측 시편을 준비하였다. 비유전율이 38 전후로 예측되는 고주파회로용 공진기로 사용하기에 적합한 MgO-CaO-TiO₂계 마이크로파 유전체 조성으로 시편을 제작하였다. 직경 10 mm 몰드를 이용하여 디스크 형태로 성형 및 소결하였으며 소결 후 시편의 높이가 3~6 mm 사이가 되도록 다양한 형상비로 시편을 준비하였다. 준비된 샘플은 post resonator 측정 기구물에 넣어 공진주파수를 측정하였으며, 비유전율의 계산은 시뮬레이션에서와 동일하게 Courtney의 계산방법에 의하였다. 샘플실측과 시뮬레이션은 공진주파수를 구하는 방법이 다를 뿐, 비유전율의 계산은 동일한 방법으로 진행하였다.

Table 2에 형상비의 변화 (D/H = 1.5, 1.8, 2.3)에 따라 각각 2~3개씩 준비한 샘플들의 외형치수, 공진주파수, 측정된 비유전율 결과를 정리하여 나타내었다. 앞서 Fig. 4에서 제시하였듯이 유전체 디스크의 직경이 8 mm로 고정되고 높이가 4~6 mm로 변화할 때, 비유전율의 변화는 37~38 사이에서 그다지 변동폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 유전체 디스크의 형상비 (D/H)가 2.0을 넘어서면 측정되는 비유전율 값이 40 전후가 되어, 5% 정도 증가하는 경향성을 나타낸다. 이는 Fig. 4에서 시뮬레이션으로 예측된 것과 유사한 경향성이다.

샘플의 실측에서 상부전극을 유전체 높이의 10% 정도가 되도록 손으로 들어 올렸을 때 네트워 분석기에 의해 측정된 비유전율 값은 약 5~10% 정도 증가하는 경향성을 나타내었으며 이는 Fig. 6에서 나타내었던 시뮬레이션 결과와 유사한 경향성이다. 한편 샘플을 위치시킬 때 중심으로 부터 X, Y방향으로 0.5~2 mm 정도의 오프셋을 갖도록 위치시켰을 경우 네트워 분석기에 의해 측정되는 공

진주파수의 변화는 전혀 나타나지 않았다. 이는 Table 1의 시뮬레이션 결과와 일치하는 경향성이다.

Table 2에 나타난 것처럼 샘플의 형상비 (D/H)가 1.5, 1.8, 2.3인 경우에 대하여 각각 2~3개의 샘플을 동시에 제작하여 비유전율을 측정된 결과 1% 내외의 오차를 나타내고 있다. 이는 제작된 샘플 자체의 비유전율 편차일 수도 있고, 측정과정에서의 오차일 수도 있다. 동일한 시편을 반복 측정하여도 비유전율은 1% 전후의 오차를 나타낸다. 이러한 오차의 원인은 샘플 자체의 비유전율 값의 변동일 수도 있고, 측정시 기구물 정렬 오차일 수도 있다고 판단된다. 예컨대 Fig. 6 결과에 나타내었듯이 유전체 디스크와 도체 사이에 1% 정도의 공극이 존재하여도 평가되는 비유전율의 차이는 약 1% 정도에 달할 수 있다.

4. 결 론

마이크로파 유전체의 비유전율 측정에 널리 사용되고 있는 post resonator 기법에서 시편의 형상과 기구물의 편차 등에 의해서 발생하는 비유전율 계산의 오차요인에 대해 시뮬레이션과 시편 실측을 통해 분석하였다. 3차원 전자계 시뮬레이션 툴인 HFSS를 사용하여 post resonator 방법과 동일하게 상하부 도체, 공극 및 유전체, SMA 커넥터 등을 실제 측정 기구물과 동일하게 오브젝트를 형성하고 재질별로 전도도, 유전율, 품질계수 등을 셋업한 후 시뮬레이션을 진행하였다. 먼저 시뮬레이션된 S₂₁ 파라미터 스펙트럼을 구하였고 유전체의 반지름방향의 수평면에 형성된 전계벡터의 형상을 파악하여 TE₀₁₁ 모드 공진주파수를 결정하였다.

시편의 형상비 (D/H)가 0.8~1.6 사이로 변화할 경우 계산되는 비유전율 값은 약 0.3% 정도의 오차를 나타내지만 시편의 형상비가 더 크게 변화할 경우 비유전율 오차는 크게 증가하게 된다. 또한 시편과 상하부 도체 사이에 1~10% 정도의 공극이 존재할 경우, 비유전율은 1~10% 정도 높게 평가되는 오차가 나타났다. 시편이 중심부에서 벗어나서 위치하는 것은 비유전율 측정에 오차를 유발하지 않았다. 전체적으로 시편의 형상 및 위치는 비유

전율 측정에서 큰 오차요인이 아니며, 시편과 상하부 도체와의 밀착 및 평탄도는 비유전율 측정에 큰 오차요인으로 작용함을 알 수 있었다. 이러한 시뮬레이션 결과는 제작 샘플의 실제 측정을 통해 동일한 경향성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내 학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고 문헌

1. D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, Inc. (1986).
2. J. R. Yoon, S. W Lee and H. Y. Lee, "The Microwave Dielectric Properties of MgTiO-CaTiO Ceramics Dielectrics and Fabrication of GPS Antenna", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 10(1), 51 (2003).
3. J. H. Park and J. G. Park, "Low-temperature Sintering and Microwave Properties in $(\text{Ba}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{Nd}_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$ Ceramics", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 8(2), 9 (2001).
4. A. Templeton, X. Wang, S. J. Penn, S. J. Webb, L. F. Cohen and N. M. Alford, "Microwave Dielectric Loss of Titanium Oxide", *J. Am. Ceram. Soc.*, 83, 95 (2000).
5. B. W. Hakki and P. D. Coleman, "A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in the Milimeter Range", *IRE Trans.*, MTT-8, 402 (1960).
6. Matthew N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press (1992).
7. HFSS V. 6.0 user's manual, Ansoft (1999).
8. W. E. Courtney, *IEEE Trans. Microwave Theor. Tech.* 18, 476 (1970).
9. <http://coen.boisestate.edu/rickubic/software>.