

## 캐비티 재질이 마이크로파 유전체 공진기의 Q값 측정에 미치는 영향

박재환<sup>1</sup> · 박재관<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>충주대학교 전자공학과

<sup>2</sup>한국과학기술연구원 나노포토닉스연구센터

### Effect of Cavity Material on the Q-Factor Measurement of Microwave Dielectric Materials

Jae-Hwan Park<sup>1</sup> and Jae-Gwan Park<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Chungju National University, Chungju 308-702, Korea

<sup>2</sup>Nanophotonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(2011년 9월 5일 접수: 2011년 9월 22일 수정: 2011년 9월 26일 게재확정)

**초 록:** 마이크로파 유전체의 Q 값 측정에 널리 사용되고 있는 유전체 공진기 방법에서 캐비티의 재질변화가 유전체의 Q 값 측정에 미치는 오차요인에 대해 HFSS 시뮬레이션과 실측평가를 병행하여 조사하였다. HFSS의 전자계 벡터 형상으로부터 TE<sub>018</sub> 모드의 공진주파수를 결정하고 S<sub>21</sub> 파라미터의 3dB 대역폭으로부터 Q 값을 계산하였다. 캐비티 금속이 Cu, SUS, Au 등으로 변화할 경우 유전체 공진기의 Q 값 측정에 큰 오차는 발생하지 않았으나, 금속이 산화하여 전도도가 수 천 정도로 떨어질 경우 Q 값이 매우 낮게 측정되는 오차가 발생함을 확인하였다. 이러한 시뮬레이션 결과는 실제로 다양한 재질의 금속 캐비티를 가지고 유전체 공진기의 Q 값을 측정해 본 결과 서로 일치되는 관련성을 나타내었다.

**Abstract:** Effects of cavity material on the Q-factor measurement of microwave dielectric materials were studied by HFSS simulation and the measurements using metal cavity. TE<sub>018</sub> mode resonant frequency was determined from the electric and magnetic field patterns and the loaded Q-factor was calculated from 3dB bandwidth of S<sub>21</sub> spectrum. When the cavity metal materials were Cu, SUS and Au cavity, the level of Q-factor was similar. However, Q-factor was significantly decreased when the cavity metal material was CuO. The Q-factor measurements of dielectric resonator by network analyzer using various metal cavity exhibits consistent behavior.

**Keywords:** microwave dielectrics, cavity, HFSS, resonator, quality factor

### 1. 서 론

마이크로파 (0.3~300 GHz) 회로 및 시스템에서 높은 Q-factor와 소형화된 구조를 갖는 공진기를 구현하기 위해서 마이크로파 유전체가 널리 사용되고 있다.<sup>1-3)</sup> 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. 마이크로파 유전체의 비유전율과 Q 값은 유전체의 거시적 조성 뿐 아니라 미세구조와 미시적 조성변동 등 다양한 인자에 의해 크게 변화되게 된다. 마이크로파 유전체는 대부분 산화물 형태의 원료분말을 혼합하여 고상소결 방법으로 제조되게 되므로 소성한 이후에는 국부적인 조성변동 및 기공, 결함 및 입계 면이 존재하는 세라믹스 특유의 미세구조를 갖게 된

다. 이러한 비균질성은 마이크로파 유전체의 품질계수를 떨어뜨리는 역할을 하게 된다. 예컨대 TiO<sub>2</sub> 유전체의 경우 기공율이 10% 증가할 때마다 마이크로파 품질계수는 대략 절반 정도로 줄어드는 것으로 보고된 바 있다.<sup>4)</sup> 그러므로 특정한 마이크로파 유전체의 비유전율과 Q 값이 알려져 있다 해도, 실제 제작된 공진기의 유전특성은 실측을 통하여 확인하여야 한다.

마이크로파 대역에서 유전재료의 유전특성을 측정하는 방법으로는 평행판 방법(Hakki-Coleman method), 유전체 캐비티 공진법, 공진기 섭동법, Feby-Perot 방법 등 다양한 방법이 있다.<sup>3, 5-6)</sup> 이 중에서 평행판 방법은 마이크로파 유전체의 유전율을 결정하는데 유리한 방법이며, 유전체 캐비티 공진법은 Q 값을 측정하는데 유용한 방법이다. 특히 유전체의 Q 값이 수 만 ~ 수 십만으로 매우 큰 경우에는 유전체 캐비티 공진법은 가장 효과적으로 사용될 수 있다. 유전체 캐비티 공진법은 Fig. 1 (a)에 나타

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: jgpark@kist.re.kr

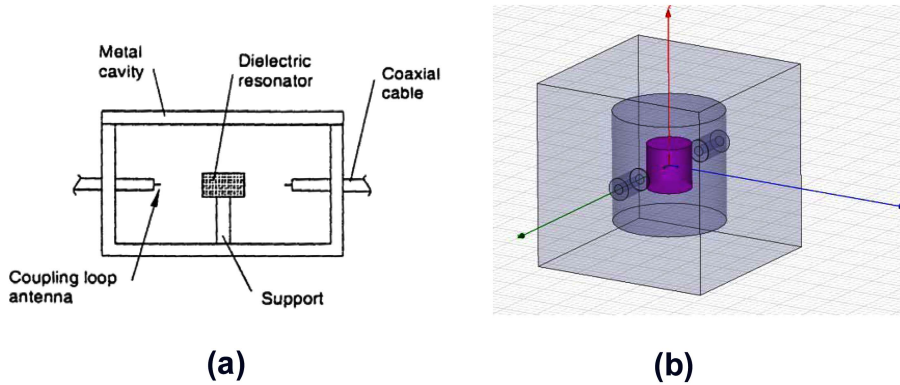


Fig. 1. (a) 유전체 공진기 방법에서 유전체와 금속 캐비티의 형상. (b) HFSS 시뮬레이션에서 생성된 오브젝트 형상.

낸 것처럼 실린더 형상의 금속 캐비티 안에 실린더 형상의 유전체 공진기를 탑재시키고 포트1에서 포트2로 마이크로파 전력을 투과시키면서 TE<sub>016</sub> 모드의 공진주파수를 탐색한 후 공진주파수( $\Delta f_0$ )와 S<sub>21</sub> 파라미터의 3dB 대역폭(f)으로부터 다음과 같이 품질계수를 계산하게 된다.

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f} \text{ (loaded Q)}$$

$$Q_0 = \frac{Q_L}{1 - |S_{21}|} \text{ (unloaded Q)}$$

유전체 캐비티 방법에서 금속 캐비티의 크기와 내부에 탑재하는 유전체의 크기 비는 대략 3~5:1 정도로 하게 되는데 대부분의 전자계 에너지는 유전체 내부에 존재하게 되지만 일부는 유전체와 금속 캐비티 사이 공간에 존재하게 된다. 한편 금속 캐비티의 벽면이 완전한 도체(perfect electric conductor)라고 가정할 경우 금속 내부와 표면에 전계가 존재하지 않지만 캐비티를 구성하는 금속 도체의 전도도가 떨어질 경우 도체 내부에도 전자계 에너지가 분포하게 되는데 이로 인하여 유전체의 Q<sub>L</sub> 측정에 오차를 유발하게 된다. 즉, 네트워크 분석기를 통해 실제로 측정되는 품질계수는 유전체 자체의 품질계수와 함께 금속 캐비티에서 초래되는 손실이 함께 반영되어 실측되게 된다.

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{(dielectric)}} + \frac{1}{Q_{(cavity)}}$$

실제 각 연구실과 생산현장에서 유전체 캐비티 방법으로 유전체의 품질계수를 측정할 때 사용하는 기구물에서 금속 캐비티의 재질은 통상 구리(Cu) 또는 스테인레스 스틸(SUS) 등이 많이 사용되며 간혹 금(Au)을 표면에 코팅한 구리 캐비티를 사용하기도 한다. 본 연구에서는 3D 전자계 시뮬레이션 소프트웨어인 HFSS를 사용하여 유전체 캐비티 방법에서 금속 캐비티의 재질변화가 유전체의 품질계수 측정에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고 실제 다

양한 캐비티 재질에 의해 측정된 실측 데이터와 비교하여 분석하고자 한다. 특히 구리 캐비티를 장시간 사용할 때 발생하는 구리 표면의 산화에 의해 품질계수 측정에 어떠한 오차가 발생하는지를 검토하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 HFSS 시뮬레이션

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.<sup>6-7)</sup> 본 연구에서는 HFSS(V7.0, Ansoft Co., USA)를 사용하였다. Fig. 1 (b)에 나타난 것과 같이 실린더 형상의 캐비티, 캐비티 내부의 유전체, SMA 커넥터 등을 실제 측정 기구물과 동일하게 오브젝트를 형성하고 재질별로 전도도, 유전율, 품질계수 등을 셋업한 후 분석 주파수 범위는 1~20 GHz로 설정하고 시뮬레이션을 진행하였다.

시뮬레이션 과정에서 셋업한 재질특성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 금속재질은 HFSS 라이브러리의 값을 호출하였으며, 유전체의 특성은 실제 제작하여 비교 검토한 유전체의 특성값으로 입력하였다. 한편, 구리 캐비티가 산화될 경우 표면의 조성은 구리 산화물이 되는데 이를 CuO라고 가정하고 전도도를 구리에 비해 1/10,000 이하로 낮아진 1000 Ω·m<sup>-1</sup>로 가정하여 입력해 주었다. SMA 커넥터는 실제와 동일한 형상과 재질을 입력하여 임피던스가 50 Ω으로 매칭되도록 하였다. HFSS 시뮬레이션이 진행된 후 주파수변화에 따른 전계, 자계 벡터의 3차원적 형상과 S<sub>21</sub> 파라미터의 값을 얻었다. 시뮬레이션으로 얻어진 공진주파수와 S<sub>21</sub> 파라미터의 스펙트럼의 3dB 대역폭으로부터 Q 값을 계산하였다.

### 2.2 실측 시편 준비

본 연구에서는 HFSS 시뮬레이션 결과와 비교하기 위

**Table 1.** HFSS 시뮬레이션을 위한 재질 파라미터 설정

오브젝트	설정 재질	전도도 ( $\Omega^{-1}m^{-1}$ )	비유전율	유전손실	비투자율
금속 캐비티	Cu	58,000,000	1.0	-	0.999991
	CuO	1000	1.0	-	0.999991
	Au	41,000,000	1.0	-	0.999991
	SUS	1,100,000	1.0	-	0.999991
DR	K40	-	40.0	0.001	1.0

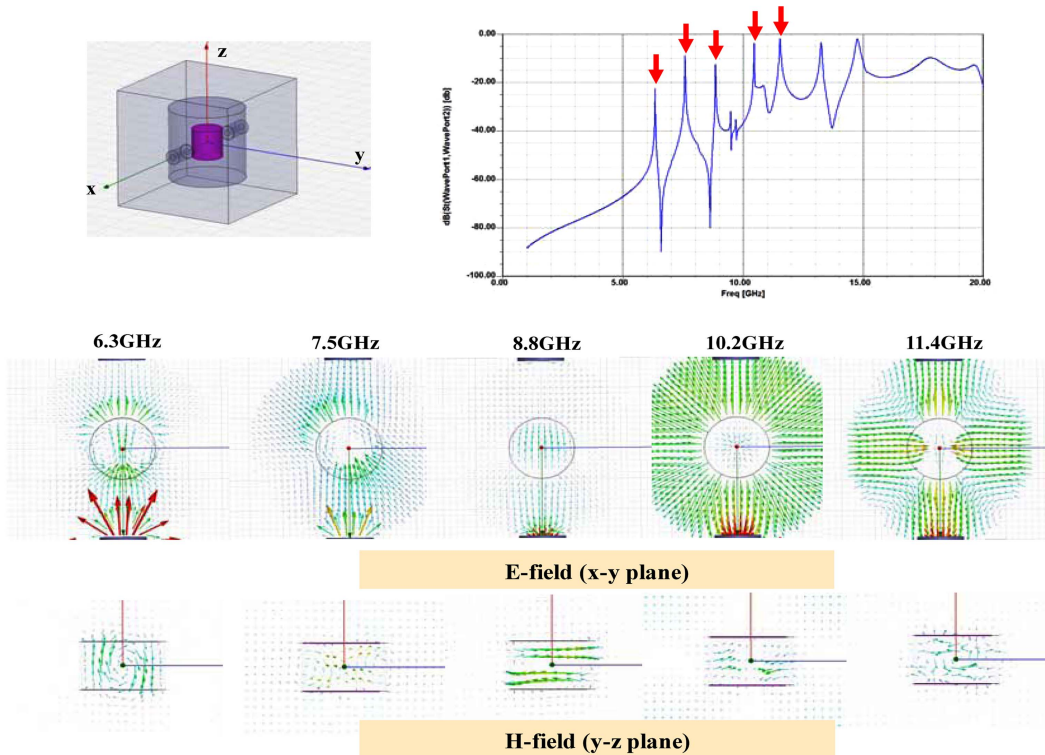
해 실측 시편을 준비하였다. 이를 위해 마이크로파 유전체로서 널리 사용되어온 BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> 유전체(비유전율 38, Qxf= 30,000~40,000)를 고상소결방법에 의해 제작하였다. 유전체의 형상은 실린더 타입이며, 지름 10mm의 몰드를 사용하여 직경/높이비를 1:0.4 정도가 되도록 하였다.

품질계수 측정을 위한 금속캐비티는 Cu 및 SUS 재질의 두 가지를 적용한 기구물을 사용하여 측정하였다. 특히 Cu 캐비티의 경우 10년 넘게 사용한 기구물과 최근 제작한 Cu 캐비티를 동시에 비교하여 측정하였다. 오래된 Cu 캐비티의 경우 표면이 CuO로 산화되었을 것으로 추정되며, 실제 측정에서도 낮은 품질계수를 나타내었다.

주파수별 S<sub>21</sub> 파라미터의 측정은 RF 네트워크 분석기(8720C, Hewlett Packard)를 사용하여 측정하였다. 품질계수의 결정은 실측된 공진주파수와 S<sub>21</sub> 스펙트럼의 3dB 대역폭으로부터 계산하였다.

Fig. 2에는 HFSS에 의해 시뮬레이션된 S<sub>21</sub> 파라미터의 스펙트럼과 각 공진주파수에서의 전자계 벡터의 형상을 나타내었다. 공진피크는 6.3 GHz부터 6~7개의 여러 피크가 나타나고 있는데 이 중에서 TE<sub>018</sub> 모드의 공진주파수를 확인하기 위해 유전체 공진기의 수평면에서의 전계벡터와 수직면에서의 자계벡터를 HFSS 플롯 툴을 사용하여 출력해 보았다. 주파수 7.5 GHz에서 전계벡터는 유전체 공진기의 수평면(x-y plane)에서 단일 동심원을 형성하고 있고, 자계벡터는 유전체 공진기의 수직면(y-z plane)에서 대칭적으로 두 개의 동심원을 형성하는 것을 통해 TE<sub>018</sub> 모드의 공진주파수임을 입증할 수 있다. 한편 6.3 GHz에서의 공진은 TM모드에 의한 공진이며 8.8 GHz 이상의 주파수에서 나타나는 공진모드는 전자계의 형태로부터 다양한 고차모드임을 알 수 있다. Fig. 3에서는 공진주파수가 아닌 경우와 TE<sub>018</sub> 모드의 공진주파수에서의 전계벡터의 크기(mag E) 플롯을 나타내었다. 공진주파수에서는 전자계 에너지가 유전체공진기에 의해 강하게 커

**3. 결과 및 고찰**



**Fig. 2.** HFSS에 의해 시뮬레이션된 S<sub>21</sub> 스펙트럼과 각 공진주파수에서의 전자계 벡터의 형상.

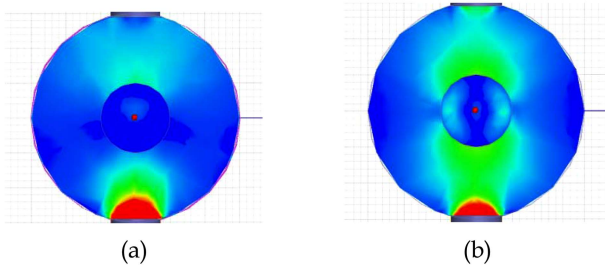


Fig. 3. (a) 7.0 GHz에서 캐비티 내부의 전기벡터의 크기분포. (b) 7.0 GHz (TE<sub>018</sub> 모드 공진주파수)에서 캐비티 내부의 전기벡터의 크기분포.

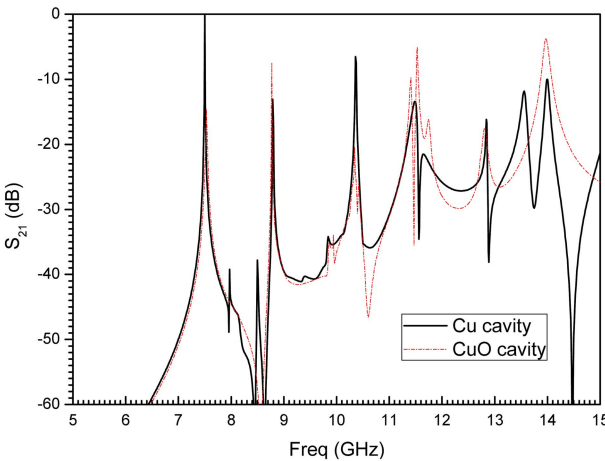


Fig. 4. 캐비티의 재질이 Cu에서 CuO로 변화될 경우 S<sub>21</sub> 스펙트럼의 변화.

다. 이 때 전자계 에너지의 대부분은 포트와 유전체 공진기 사이에 존재하며 기타 공간에서는 거의 존재하지 않게 된다.

Fig. 4에는 캐비티의 재질이 Cu 캐비티에서 CuO로 변화될 경우 S<sub>21</sub> 스펙트럼의 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 본 연구실에서는 Cu 캐비티를 이용하여 마이크로파 유전체의 특성측정을 하는 과정에서 캐비티가 최초 제작된 이후 시간이 경과할수록 측정되는 Q 값이 저하되는 경향성을 발견하였으며, Cu 캐비티를 신규 제작할 경우 측정되는 Q 값이 다시 크게 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 세월이 지남에 따라 캐비티를 구성하는 Cu 금속 표면이 산화하는 것에 기인한 것으로 추정된다. Cu는 상온에서도 서서히 산화되어 CuO 또

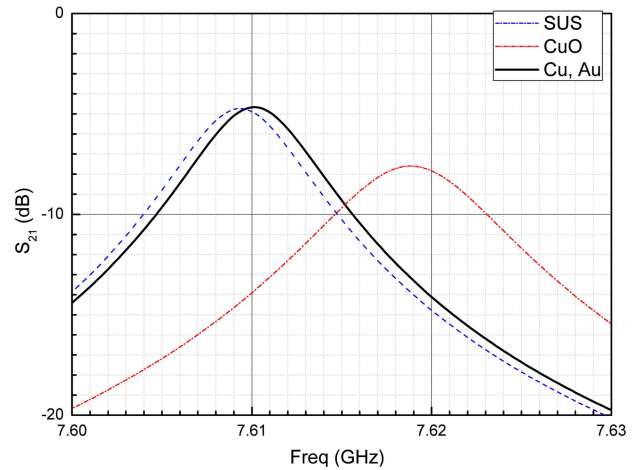


Fig. 5. 캐비티의 재질에 따른 공진점 부근에서의 S<sub>21</sub> 스펙트럼 변화.

는 Cu<sub>2</sub>O로 변화되며 이러한 Cu 산화물의 전도도는 Cu에 비해 크게 떨어진다고 보고되고 있다.<sup>8-9)</sup> 5~10 GHz 영역에서의 표피두께(skin depth)는 1 μm 이하이므로 Cu 캐비티 표면의 산화는 금속 공진기의 Q 값을 결정적으로 떨어뜨리게 될 것이다. 다만 Cu 캐비티 표면에 형성된 산화물 층의 두께 및 전도도는 물리화학적, 전기적 방법으로 확인할 수 없어 직접적으로 규명하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Cu 캐비티가 산화하여 CuO 재질로 변화되었다고 가정하고 그 전도도는 도체 중에서 낮은 수준인 1000 Ω<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4에 나타내었듯이 캐비티의 재질이 Cu에서 CuO로 변화되어도 전체적인 S<sub>21</sub> 스펙트럼의 변화는 크지 않으며 7.5 GHz에서 나타나는 TE<sub>018</sub> 모드의 공진주파수도 거의 동일하게 나타나고 있다. 이러한 현상은 금속캐비티 안에서 대부분의 전자계 에너지가 유전체 안에 집중되어 금속 캐비티의 재질 특성이 변화하더라도 유전체의 공진에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다.

Fig. 5에서는 TE<sub>018</sub> 모드 공진주파수인 7.6 GHz 부근에서의 S<sub>21</sub> 스펙트럼의 변화를 상세하게 나타낸 것이다. CuO 재질의 캐비티의 경우 Cu 재질의 캐비티에 비해 삽입손실(insertion loss)가 2~3 dB 정도 더 증가하고 3 dB 감쇄 대역폭 역시 크게 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 시뮬레이션으로 얻어진 공진주파수와 S<sub>21</sub> 파라미터의 스펙트럼의 3 dB 대역폭으로부터 Q 값을 계산한 결과 Cu 재질의 캐비티에서 Q (loaded) 값은 950 정도로 나타났고,

Table 2. 캐비티 재질변화에 따라 HFSS 시뮬레이션으로 계산된 Q 값과 실측을 통해 확인 유전체의 Q 값 비교.

캐비티 재질	Q <sub>L</sub> (HFSS 시뮬레이션)	Q <sub>L</sub> (실측샘플 1)	Q <sub>L</sub> (실측샘플 2)	Q <sub>L</sub> (실측샘플 3)
Cu	950	2100	2400	2700
CuO	200	500	690	940
Au	950	-	-	-
SUS	930	390	500	510

CuO 재질의 캐비티에서  $Q_L$  값은 200 정도로 나타났다. 한편 캐비티 재질을 Au로 설정한 경우는 Cu로 설정한 것과 완전히 일치하는 스펙트럼이 얻어졌으며, 캐비티 재질을 SUS로 설정한 경우는 Cu로 설정한 경우와 비교하여 공진주파수는 약간의 편차를 나타내었으나 공진 피크 자체는 거의 동일한 형태가 얻어졌다. HFSS 시뮬레이션 셋업에서 유전체 공진기의 유전손실 값은 Table 1에 나타내었듯이 0.001로 셋업하였으므로 Cu 캐비티에서 확인된  $Q_L=950$ 은 이에 부합하는 결과이다. 그러나 CuO 재질의 캐비티에서  $Q_L=200$ 은 크게 낮게 평가된 값이다. 이러한 결과는 비록 유전체 공진기의 Q 값이 높다 하더라도, 금속 캐비티 표면의 산화 등으로 인해 재질의 변화가 생길 경우 큰 오차를 나타낼 수 있음을 시사하는 결과이다.

한편 금속 캐비티의 재질이 SUS 또는 Au로 변화될 경우 Q 값의 변화에 대해서 Table 2에 정리하여 나타내었다. 유전체 공진기 방법에 의해 Q 값을 측정할 때 Cu 캐비티를 주로 사용하지만 SUS 재질 또는 Au가 표면에 코팅된 Cu 캐비티를 사용하는 경우도 있다. 먼저 HFSS 시뮬레이션에 의해 유전손실을 0.001로 셋업하고 분석한 결과 Cu, Au, SUS 재질 모두 930~950 정도의 Q 값을 나타내었다. 이는 세 가지 재질 모두 전도도가  $10^6$  이상으로서 매우 높기 때문에 금속 캐비티에 의한 손실이 거의 발생하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Q 값이 매우 높은 유전체를 측정할 경우 Cu, Au, SUS 등의 재질 변화에 따라 Q 값 측정에 오차를 유발할 가능성이 커지게 될 것이다.

한편 본 연구실에서 보유하고 있는 SUS 재질의 캐비티를 가지고 유전체 공진기의 Q 값을 측정할 결과 산화된 Cu 캐비티와 마찬가지로 낮은 Q 값을 나타내었다. 이는 SUS 재질의 표면에 어떤 형태이든 전도도가 낮은 표면층이 형성되어 있음을 시사하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

마이크로파 유전체의 Q 값 측정에 널리 사용되고 있는 유전체 공진기 방법에서 캐비티의 재질변화가 유전체의 Q 값 측정에 미치는 오차요인에 대해 살펴 보았다. 캐비티 금속의 전도도가  $10^6 \Omega^{-1}m^{-1}$  이상인 Cu, SUS, Au 등 어

떤 금속도 유전체 공진기의 Q 값 측정에 큰 영향은 미치지 않는 것으로 계산되었다. 그러나 금속 캐비티의 표면이 산화되는 등 화학적변화로 인해 전도도가 수 천 ~ 수만 정도로 떨어질 경우 유전체 공진기의 실제 Q 값에 비해 훨씬 낮은 값이 얻어질 가능성이 확인되었다. 이러한 시뮬레이션 결과는 실제로 다양한 재질의 금속 캐비티를 가지고 유전체 공진기의 Q 값을 측정해 본 결과 서로 일치되는 관련성을 나타내었다. 본 연구를 통해 제작한지 오래된 Cu 캐비티 기구물을 가지고 유전체 공진기의 Q 값을 측정할 경우 큰 오차가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

#### 참고 문헌

1. 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).
2. J. H. Park and J. G. Park, "Low-temperature Sintering and Microwave Properties in  $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})Nd_2Ti_5O_{14}$  Ceramics", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 8(2), 9 (2001).
3. D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, Inc. (1986).
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. V. P. Zhune and B. V. Kurchatov, "The Electrical Conductivity of Copper Oxide", *Physik. Z. Sowjetunion*, 2, 354 (1932).
9. A.A. Ogwu, T.H. Darma and E. Bouquerel, "Electrical resistivity of copper oxide thin films prepared by reactive magnetron sputtering", *J. of Achievements in Meterials and Manufacturing*, 24, 172 (2007).