

## 마이크로파 유전체의 미세구조와 품질계수의 상관관계에 대한 컴퓨터 시뮬레이션

박재환·박재관  
한국과학기술연구원 재료연구부

### Electromagnetic Simulation of the Quality Factor and Microstructure of Microwave Dielectrics

Jae-Gwan Park and Jae-Hwan Park  
Division of Materials, KIST

(2000년 8월 29일 받음, 2001년 1월 6일 최종수정본 받음)

**초 록** 마이크로파 유전체의 품질계수 측정에 사용되는 cavity resonator 방법에 대하여 실제 측정 결과와 전자기 시뮬레이션에 의한 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 기법을 이용하여 마이크로파 유전체의 산란계수  $S_{12}$ 를 실제로 측정된 값과 시뮬레이션에 의해 구해진 값을 비교하였으며 마이크로파 유전체 내부에 기공이 있는 경우와 유전율이 다른 이차상이 존재할 때 마이크로파 품질계수가 어떻게 변화하는지를 검토하였다. 시뮬레이션을 통하여 기본 공진 모드인  $TE_{01\delta}$  모드를 쉽게 찾을 수 있었으며 기공 및 이차상에 의한 품질계수의 저하를 정성적으로 확인할 수 있었다.

**Abstract** Electromagnetic simulation was compared to the measurement with a network analyzer in the cavity resonator method which has been used for determining microwave quality factor. Scattering matrix  $S_{12}$  obtained from the network analyzer was compared to the  $S_{12}$  obtained from the simulation. The effects of the pore and the secondary phase of the dielectric resonator on the microwave quality factor were studied. From the simulated results, the dominant resonant  $TE_{01\delta}$  mode was determined and the quality factor was observed to decrease with the pore and the secondary phase in the dielectrics.

**Key words** : Microwave ceramics, Electromagnetic simulation, Cavity resonator, Quality factor

## 1. 서 론

최근 멀티미디어 및 이동통신의 급격한 발달에 따라 요구되는 주파수 대역이 마이크로파 대역으로 급속하게 이동되는 경향이 있다. 이러한 마이크로파 통신에서 필터나 듀플렉서와 같은 주요 부품에 마이크로파 유전체가 사용되고 있다. 마이크로파 유전체란 300MHz에서 300GHz 대역에 이르는 주파수 영역에서 사용 가능한 유전체로서 이를 이용하여 온도 특성이 양호하면서도 크기면에서 소형인 공진기나 필터, 안테나 등을 구현할 수 있으므로 마이크로파 유전체에 대한 조성, 공정, 설계와 연관된 연구가 널리 이루어지고 있다.<sup>1~4)</sup>

이러한 마이크로파 유전체는 대부분 oxide 형태의 원료 분말을 혼합하여 고상소결 방법으로 제조되게 되는데 소성한 이후에는 기공과 계면이 존재하는 세라믹스 특유의 미세구조를 갖게 된다. 이러한 미세구조와 마이크로파 특성간에는 밀접한 관련이 있을 것으로 추정되고 있지만 정량적으로 그 관계를 알아내기가 매우 어려운 실정이다. 예컨대, 마이크로파 유전체 세라믹스에 존재하는 기공은 품질계수와 유전율을 감소시킬 것으로 막연하게 추정은 되지만 그 인과관계를 정확히 파악하기는 어렵다. 왜냐하면 기공이 많은 미

세구조를 갖는 소결체의 경우는 미소결 상태에 있는 경우가 많으므로 단일상의 합성이 완전히 이루어지지 않고 여러가지 다양한 조성과 상이 혼재할 가능성이 높으므로 낮게 측정된 유전율과 품질계수가 기공에 의한 것인지 아니면 다른 원인에 의한 것인지 구분하기가 어렵게 된다.

본 연구에서는 전자기 시뮬레이션 기법을 이용하여 마이크로파 유전체 내부에 기공이 있는 경우와 유전율이 다른 2차상 (secondary phase) 이 존재할 때 마이크로파 품질계수가 어떻게 변화하는지를 검토하고자 한다. 본 연구를 통하여 기공이 많이 존재하는 마이크로파 유전체에서 낮은 품질계수가 측정되었을 때 실질적으로 기공 및 이차상에 의한 기여가 어느 정도인지를 가늠해 볼 수 있는 참고가 될 것으로 기대된다. 전자기 시뮬레이션은 유한요소법에 기초한 상용 소프트웨어 HFSS를 사용하였으며 실험적으로 cavity resonator법으로 측정된 결과와 비교 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 유한요소법 및 HFSS의 개요

FEM (Finite Element Method) 은 구조 해석 등 기계 분야에서 출발된 개념으로서 1968년 이후 전자기 문제의 해결에 처음으로 적용되기 시작하였고 그 이후로 다양한 전자

기 문제들(waveguide, microstrip, dielectric resonator, radiation 등)에 활용되었다. FEM과 유사한 수치적 방법으로서 FDM(Finite Difference Method) 및 MoM(Method of Moment)가 있는데 FEM에 비해 개념적으로 간결하고 알고리즘 작성이 용이한 면이 있지만, FEM 방법은 복잡한 구조물 및 이방성 물질의 해석에서 강력한 힘을 발휘하기 때문에 일반적으로 널리 사용된다. 현재 상용으로 판매되고 있는 소프트웨어의 경우 평면형 안테나만을 다루는 제품의 경우는 MoM을 주로 사용하고 있고 3차원 구조물의 전자기 문제를 다루는 제품의 경우는 모두 FEM을 사용하고 있다.<sup>5,6)</sup>

FEM 방법에 의한 전자기 시뮬레이션은 현재 마이크로파를 연구하는 상당수 연구실에서 각각의 연구목표 및 방법에 의거 알고리즘이 작성되어 연구되고 있으며 FEM의 특성상 알고리즘이 일단 작성되면 3차원적인 구조물의 형상이 바뀌거나 매질의 유전율 등이 조정되어도 쉽게 알고리즘 조정이 가능한 장점이 있다. 현재 널리 사용되고 있는 FEM 기반의 전자기 시뮬레이터로서 HFSS(V7.0, Ansoft Co., USA)를 들 수 있는데 이러한 상용 소프트웨어의 특징은 사용자들이 직접 FEM 알고리즘을 작성할 때 가장 어려운 메쉬(유한 개의 요소)를 나누는 과정이 자동화되어 있어서 편리하다는 점이다. 일단 초기 메쉬가 나뉘어진 이후에 일정 비율로 메쉬의 갯수를 증가(Mesh refinement)시킨 이후 S parameter의 변화율을 검사하여 정해진 수준 이내로 수렴할 때 메쉬의 갯수를 늘리는 과정을 중단하고 결과 값을 확정하게 된다.<sup>7)</sup>

이러한 전자기 시뮬레이터는 필터나 듀플렉서 등 마이크로파 부품의 설계에 널리 사용되고 있다. 마이크로파 유전체의 유전율과 투자율의 복소값을 입력해 주고 부품의 형상에 따른 경계조건을 입력해 주면 관심있는 3차원 공간상에서 전자계 벡터가 확정되며 전자파의 전달특성을 알게 된다.

2-2. Cavity resonator 법

마이크로파 세라믹스의 전기적 특성을 측정하는 방법 가운데 현재 널리 사용되고 있는 것이 open cavity에 의한

방법과 cavity resonator에 의한 방법이다.<sup>3,8)</sup> 이 가운데서 cavity resonator에 의한 방법은 금속 몰드 안에 형성된 실린더 형상의 cavity 안에 실린더 형상의 마이크로파 유전체를 놓아둔 후, SMA 코넥터를 통하여 RF network analyzer에서 RF전력을 주고받으면서 S<sub>12</sub> 값을 측정하는 방법이다. 이 경우에 TE<sub>012</sub> mode를 이용하여 마이크로파 품질계수 및 유전율을 계산하게 되는데 이 공진 peak를 결정하는 것이 실험적으로 쉽지가 않다. 이 방법에서는 주파수의 변화에 따른 S<sub>12</sub> 값의 피크 가운데서 가장 저주파 대역에서 나타나는 것을 TE<sub>012</sub>로 결정하게 된다. 그림 1에는 측정장치의 개략도를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. HFSS 시뮬레이션에 의한 방법과 실험적 방법의 비교

유전율 90, 유전손실 0.001인 마이크로파 유전체 조성(BaO-PbO-2Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10TiO<sub>2</sub>)에 대하여 실험적인 결과와 상용 소프트웨어인 HFSS 시뮬레이션에 의한 결과를 비교해 보기로 한다. HFSS 시뮬레이션을 위해 먼저 실험적으로 행해지는 cavity resonator 방법 그대로 도면 작성을 및 재질 설정을 해 주었다. 그림 2에 3차원 도면의 개략을 나타내었다. 그림 2(a)는 금속 cavity와 마이크로파 유전체를 모두 나타내었으며 그림 2(c)는 유전체 안에 기공이 설정된 경우의 모습을 나타내었다. 실제의 기공은 수 μm에서 수 십 μm 정도의 크기이겠지만 시뮬레이션의 편의상 기공의 크기(0.5mm)를 크게 하고 갯수(75개)를 제한하여 분석하였기 때문에 실제의 경우와는 다소 다른 조건이다. 기공의 크기를 작게하면서 갯수를 더 늘릴 수는 있지만 분석시간이 기하급수적으로 증가하게 된다. 시뮬레이션에서 설정한 기공의 부피비는 유전체에 대하여 약 2.2% 정도로서 실질적인 경우와 비슷한 수준이다.

Cu 재질의 몰드안에 실린더 형상의 cavity를 설정하였고, 양쪽으로는 SMA connector를 설정하였다. 이 경우 SMA connector의 물리적 크기 및 내부 재질을 실제 그대로 반영하였다. Cavity의 내부에는 실제 측정된 샘플인 유전율 90(Loss=0.001)인 유전체를 설정하였다.

이러한 구조 및 재질에 대하여 주파수를 2~20GHz까지 변화시키면서 전자계 필드의 스칼라 값 및 산란계수 S<sub>12</sub> 값을 살펴보았다. 그림 3은 cavity를 수평 절단한 면에서 관찰한 전계의 스칼라값을 밀도 형태로 나타낸 것이다. RF전력이 출입하는 SMA connector 주변에서 가장 전계의 밀도가 높은 것을 볼 수 있으며 가운데 놓아둔 마이크로파 유전체에도 전계의 강도가 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 유전체의 유전율이 주변의 공기에 비해 월등히 높으므로 전계가 집중되는 것을 보여주는 것이다.

그림 4에는 시뮬레이션으로 구한 S<sub>12</sub> plot과 실험적으로 구한 S<sub>12</sub> plot 값을 비교하여 나타내었다. 실험적으로 구한 결과는 RF network analyzer(8720C, Hewlett Packard)를 사용하여 BPNT 유전체 세라믹스(유전율 90)에 대해 구한 값이다. 두 경우 모두 TE<sub>012</sub> mode는 5GHz 부근

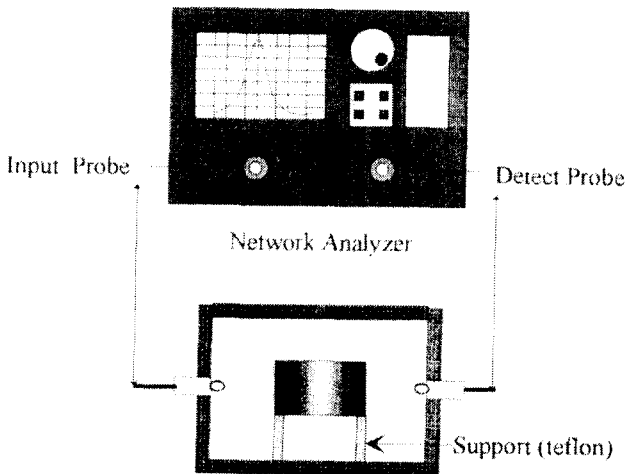


Fig. 1. Schematics of cavity resonator method using RF network analyzer.

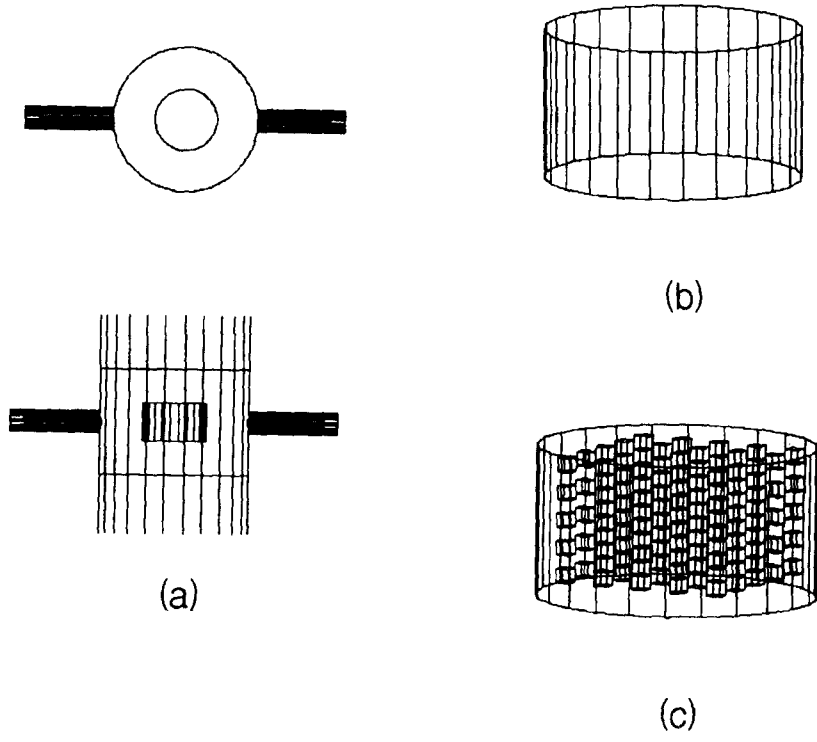


Fig. 2. 3D schematic layout of the metal cavity and dielectric cylinder. (a) Cavity and dielectrics, (b) dielectrics with no pore, (c) dielectrics with pore.

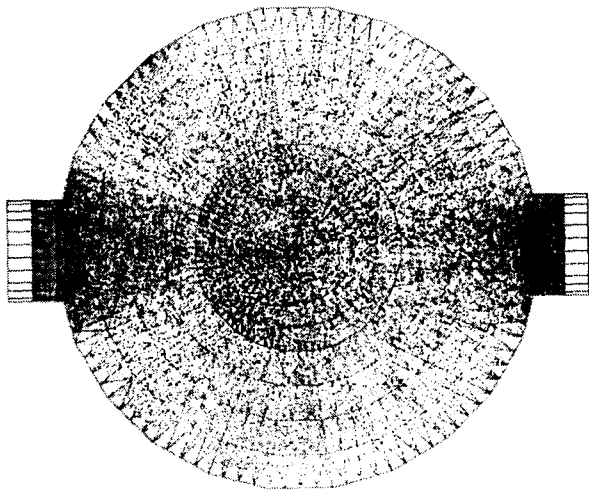


Fig. 3. Contour map of the scalar electric field in the cavity. Higher field density near the dielectrics shown.

으로 비슷하게 나타났다. 그러나 다른 주파수 대역에서의 결과는 다소 다르게 나타났는데 이는 실제의 실험적인 조건에서는 마이크로파 유전체 내부에 존재하는 기공, 금속 cavity 표면에 존재하는 불균질성, 유전체 및 금속 cavity의 가공오차 등에 의해 시뮬레이션과는 다른 조건이 되기 때문이다. 실험적인 방법에서  $TE_{012}$ 를 결정할 때는 주파수의 변화에 따른  $S_{12}$  값의 피크 가운데서 가장 저주파 대역에서 나타나는 것을 택하거나 공진기의 내부 용적을 변화시키면서  $S_{12}$  값의 피크값이 나타나는 주파수를 관찰함으로써 선택하는 번거로움이 따르게 된다. 그러나 시뮬레이션 방법

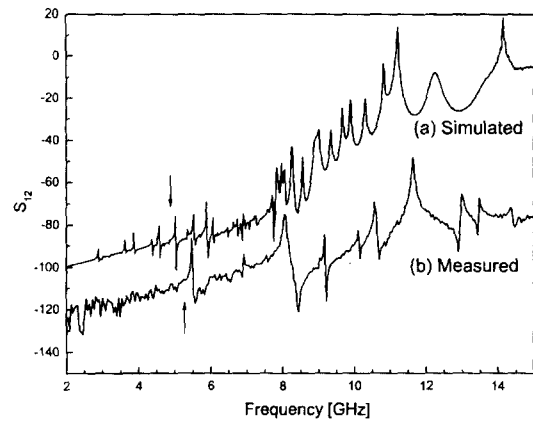


Fig. 4. Frequency dependence of  $S_{12}$  in the range of 2~15GHz. (a) shows simulated result using Ansoft HFSS V7.0 and (b) shows measured result using network analyzer.  $TE_{012}$  modes are indicated as arrows.

에서는 각 주파수 별로 전계 패턴을 직접 관찰할 수가 있어서 쉽게 기본 공진 모드를 선별할 수 있게 된다. 그림 5에서는 몇몇 주파수에서의 전계패턴을 살펴본 것이다.  $TE_{012}$  mode가 5.0GHz에서 나타나는 것을 분명하게 알 수 있다.

3-2. 마이크로파 유전체 내부의 기공에 의한 영향

마이크로파 유전체 세라믹스는 주로 산화물 원료를 이용하여 소결과정을 통해 제조된다. 따라서, 그 내부에 기공 및 입계가 존재하게 되는데 이러한 것들이 정량적으로 마이크로파 유전체의 품질계수에 어떠한 영향을 미치는지를 시뮬레이션을 통해 검토하고자 한다. 마이크로파 유전체의 품질

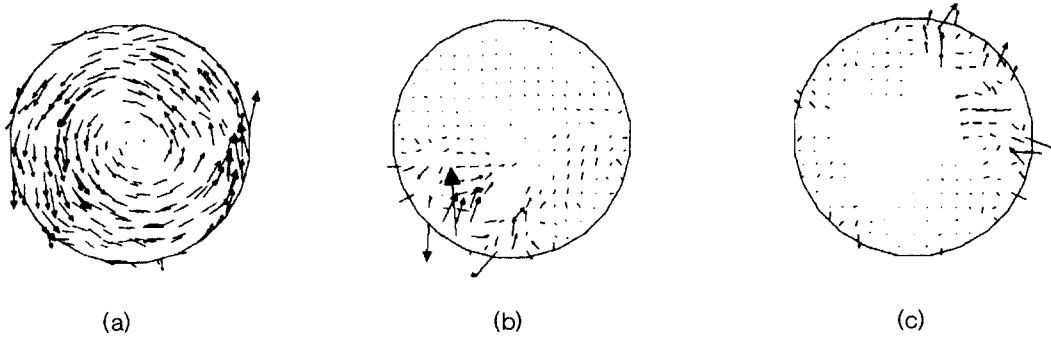


Fig. 5. Vector electric field in the horizontal plane of dielectrics. (a) 5.0GHz, (b) 5.5GHz, (c) 5.9GHz. TE<sub>01s</sub> mode appears at 5.0GHz.

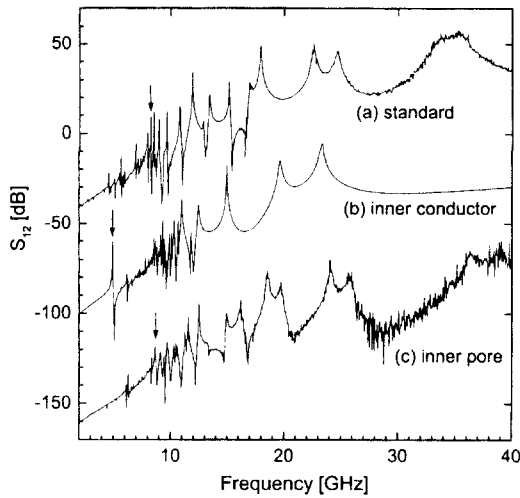


Fig. 6. Frequency dependence of S<sub>12</sub> in the range of 2~40GHz. (a) dielectrics with internal conductive phase, (b) no inclusions in the dielectrics, and (c) dielectrics with internal pore.

질계수 및 유전율은 세라믹스의 미세구조 및 조성에 의해 영향을 받게 된다. 예컨대 세라믹스 내부에 있는 기공은 유전율과 품질계수를 저하시킬 것으로 예상할 수 있다. 또한 세라믹스에서 나타나는 입계의 경우에도 품질계수를 낮출 것으로 예상할 수 있다.

그림 6은 이러한 영향을 검토한 것으로서 마이크로파 유전체 내부에 기공이 있는 경우, 전도체 금속이 있는 경우, 아무 것도 없는 경우에 대해 S<sub>12</sub> plot을 나타낸 것이다. 그림 2에서 나타낸 바와 같이 유전체 내부에 기공을 설정한 경우와 전도성 금속으로 설정한 경우에 대하여 시뮬레이션 결과는 상당히 달라짐을 볼 수 있다. 이 그래프에서 나타난 TE<sub>01s</sub> mode 피크를 이용하여 계산된 unloaded Q 값에 대해서 표 1에 나타내었다. Q 값의 계산은 공진피크의 중심 주파수를 대역폭(-3dB)으로 나누어준 값으로부터 계산되었다. 세 경우 모두 기본적으로 유전체 재질 설정은 유전율 90, 손실 0.001로 동일하게 설정하였다. 그러나 TE<sub>01s</sub> mode 피크의 위치가 달라져 있으며 특히 내부에 전도체가 삽입된 경우는 크게 벗어남을 볼 수 있다. 품질계수의 경우 내부에 기공으로 설정된 경우나 전도체로 설정된 경우 모두 크게 낮아져 있음을 알 수 있다. 이는 유전체 내에 기공이

Table 1. Calculated unloaded Q when (a) no inclusions in the dielectrics, (b) conductor present in the dielectrics, and (c) pore present in the dielectrics.

Case	TE <sub>01s</sub> Frequency	Unloaded Q
(a)	8.3	845
(b)	4.9	352
(c)	8.7	407

나 전도체가 있을 때 전자파가 계면에서 산란하거나 간섭을 일으켜서 공진주파수의 변동과 피크 대역폭의 확대가 일어나는 것에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통해 마이크로파 유전체 내부에 기공이나 전도성 입계 등이 존재할 때 품질계수가 현저하게 저하됨을 알 수 있다. 이를 통해서 마이크로파 유전체에서 기공이 존재할 때 미소 결 및 미합성으로 인해 품질계수가 감소하지만 3차원적으로 존재하는 기공 그 자체에 의해서도 품질계수가 저하되는 것을 정성적으로 확인할 수 있었다. 실제로 세라믹스의 미세구조는 기공 및 이차상이 매우 미세하게 또한 균일하게 분포하는 구조이므로 본 시뮬레이션의 조건과는 차이점이 있는데 이는 추후 계속되는 연구를 통하여 보완되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

마이크로파 유전체의 설계 및 해석에 있어서 실험을 통한 방법은 시간과 비용이 많이 드는 반면 수치해석적인 방법은 어떤 형상이라도 전자기 특성을 예측할 수 있고 시간과 비용을 단축할 수 있어서 현재와 같이 고도의 제품 성능이 요청되면서도 개발 주기가 짧아야 하는 환경에서는 매우 효과적인 방법이라 볼 수 있다.

본 연구에서는 전자기 시뮬레이션 기법을 이용하여 마이크로파 유전체 내부에 기공이 있는 경우와 유전율이 다른 이차상이 존재할 때 마이크로파 품질계수가 어떻게 변화하는지를 검토하였다. 마이크로파 유전체의 산란계수 S<sub>12</sub>를 실제로 측정된 값과 시뮬레이션에 의해 구해진 값을 비교하였다. 시뮬레이션을 통하여 기본 공진 모드인 TE<sub>01s</sub> 모드를 쉽게 찾을 수 있었으며 기공 및 이차상에 의한 품질계수의

저하를 정성적으로 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. R.D. Richtmyer, J. Appl. Phys., **10(1)**, 391 (1939).
2. K. Wakino, Proc. of Sixth IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectrics, **97** (1986).
3. D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, Inc., (1986).
4. D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, (1990).
5. Matthew N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press, (1992).
6. R.F. Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, (1961).
7. Ansoft HFSS user's manual, 1999.
8. B.W. Hakki and P.D. Coleman, IRE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. **MTT-8**, 401 (1960).