

마이크로파 유전체의 내부 기공과 마이크로파 품질계수의 상관관계에 대한 컴퓨터 시뮬레이션

Computer Simulation on the Correlations between the Microwave Quality Factor and the Pores inside the Dielectrics

박 재 환
(Jae-Hwan Park)

Abstract

Effects of pores on the microwave properties in microwave dielectric ceramics were studied by a computer simulation. Scattering matrix S_{21} obtained from the network analyzer was compared to the S_{21} obtained from the simulation. From electric field distribution, the dominant resonant TE_{018} mode could be easily determined. The effects of the porosity and pore size inside the dielectrics on the microwave properties were investigated by the HFSS simulation. When the total pore volume remains constantly, the quality factor decreased as the pore size increases. As the total pore volume of the dielectrics increased, quality factor decreased.

Key Words : Porosity, Microwave dielectrics, Simulation, Cavity resonator, Quality factor

1. 서 론

최근 이동 통신과 멀티미디어 통신서비스를 중심으로 하여 마이크로파 대역의 주파수 이용이 급격히 증가되고 있으며, 필터나 듀플렉서와 같은 주요 통신부품에 마이크로파 유전체가 다양한 형태로 활용되고 있다[1,2]. 마이크로파 유전체란 대략 300MHz에서 300GHz 대역에 이르는 주파수 영역에서 사용 가능한 유전체로서 이를 이용하여 온도 특성이 양호하면서도 소형화된 공진기나 필터, 안테나 등을 구현할 수 있으므로 마이크로파 유전체의 조성, 공정, 설계와 연관된 연구가 널리 이루어지고 있다[3-5]. 특히 마이크로파 품질계수가 높은 마이크로파 유전체를 활용하면 저손실의 디바이스를 구현할 수 있으

므로 고품질계수의 유전체 조성 및 관련 공정개발 연구들이 이루어지고 있다.

이러한 마이크로파 유전체는 대부분 산화물 형태의 원료분말을 혼합하여 고상소결 방법으로 제조되게 되므로 소성한 이후에는 기공, 결함 및 입계 면이 존재하는 세라믹스 특유의 미세구조를 갖게 된다. 대개 수 μm 에서 수 십 μm 에 이르는 입자들과 이들이 접촉하는 입계로 구성되어지며, 그 밖에도 여러 가지 형태의 기공 등과 같은 결함들이 존재하게 된다. 일반적으로 산화물 소결체 형태의 마이크로파 유전체에서 마이크로파 품질계수를 영향을 미치는 요인으로는 불순물 또는 첨가제, 산소 공공(vacancy), 기공, 평균 입경 등을 들 수 있다. 이 가운데서 첨가제 등에 의한 결함구조 및 기공의 존재로 인한 품질계수 저하가 가장 큰 것으로 알려져 있다[6]. 그러나 이러한 미세구조와 마이크로파 특성 사이에는 밀접한 관련이 있을 것으로 추정되고 일부 연구보고가 있지만 정량적으로 그 관계를 알아내기가 매우 어려운 실정이다.

한국과학기술연구원 재료공학부
(서울특별시 성북구 하월곡동 39-1,
Fax: 02-958-5509
Corresponding Author : parkjh@kist.re.kr
2002년 8월 8일 접수, 2002년 9월 11일 1차 심사완료,
2003년 1월 20일 최종 심사완료

TiO₂ 유전체의 미세구조와 마이크로파 품질계수를 조사한 바에 의하면 소결체의 유전손실은 기공율에 의해 크게 좌우되며, 산소 공공 및 첨가제(dopant) 등의 결함(defect)에 의해서도 크게 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다[6]. 이 보고에서는 TiO₂의 소결온도를 1000~1500°C 사이의 범위에서 제어함으로써 기공율을 2~30%의 범위로 조절하였고 기공율이 10% 증가할 때마다 마이크로파 품질계수는 대략 절반 정도로 줄어드는 것을 관찰한 바 있다. 그러나 이러한 실험적인 방법에서의 문제점은 기공율과 마이크로파 특성 간의 정확한 인과관계를 규명하기가 어렵다는 것이다. 왜냐하면 소결온도를 변화시키면 치밀화가 제어되므로 기공율을 제어할 수 있겠지만 기공율 외에도 많은 것이 동시에 변화하기 때문이다. 기공이 많은 미세구조를 갖는 소결체의 경우는 미소결 상태에 있는 경우가 많으므로 상의 합성이 완전히 이루어지지 않을 수도 있으며 입계의 구조나 관련 defect 들의 특성도 동시에 달라지게 된다. 따라서 낮게 측정된 품질계수가 단순히 높은 기공율에 의한 것인지 아니면 다른 원인이 복합된 것인지 구분하기가 어렵게 된다.

본 연구에서는 전자기 시뮬레이션 기법을 이용하여 마이크로파 유전체 내부에 기공이 존재하는 경우에 기공의 크기 및 전체적인 기공율에 따라 마이크로파 품질계수가 어떻게 변화하는지를 검토하고자 한다. 여러 마이크로파 유전체 시스템에서 기공율이 증가하면서 마이크로파 품질계수가 저하하는 경향을 나타내고 있는데, 본 연구를 통하여 기공율의 증가가 마이크로파 품질계수의 저하에 직접적으로 어떠한 영향을 미치고 있는가를 어느 정도 정량적으로 살펴볼 수 있을 것으로 판단된다. 전자기 시뮬레이션은 유한요소법에 기초한 상용 소프트웨어 HFSS를 사용하였으며 실험적으로 캐비티 공진기(cavity resonator)법으로 측정된 결과와 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 준비

본 연구에서는 마이크로파 유전체로서 널리 사용되어온 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ (MCT) 세라믹스를 시뮬레이션 및 실제 측정용 대상 시편으로 사용하였다[7,8]. 시편제작을 위해 출발원료로 MgO, TiO₂, CaCO₃ (99.9%, High Purity Chem. Co., Japan)를 사용하였다. 조성은 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃로 고정하였으며 일반적인 고상반응법을 이용하여 시편을 준비하였다. 각각

의 원료들은 유효숫자 소수점 4자리까지 정량비로 칭량한 후 탈이온수와 지르코니아 불을 이용하여 24시간 혼합하였으며, 이를 100°C 이상의 온도에서 충분히 건조한 뒤 5°C/min의 승온속도로 1200°C까지 가열한 후 2시간 동안 유지하여 하소하였다. 하소된 분말을 성형한 후 1350°C의 온도에서 2시간 동안 소결하여 시편을 제작하였다.

2.2 캐비티 공진기법에 의한 마이크로파 품질계수 측정

마이크로파 세라믹스의 전기적 특성을 측정하는 방법 가운데 현재 널리 사용되고 있는 것이 평행판 공진기(parallel plate resonator)에 의한 방법과 캐비티 공진기에 의한 방법이다[9,10]. 본 연구에서는 캐비티 공진기 방법을 이용하여 마이크로파 품질계수를 측정하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 지름 25mm 높이 20mm의 실린더 형상의 금속 캐비티 안에 실린더 형상의 마이크로파 유전체를 놓아둔 후, SMA 코넥터를 통하여 RF 네트워크 분석기로부터 RF 전력을 통과시켜서 S₁₂ 값을 측정하였다.

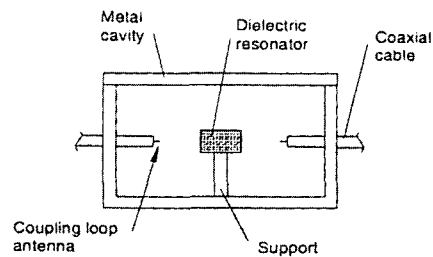


그림 1. RF 네트워크 분석기를 이용한 캐비티 공진기 측정법의 개략도.

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

이 때 유전체의 크기는 지름 12mm, 높이 7mm가 되도록 가공하였으며 테프론 봉을 유전체 아래에 설치함으로써 유전체가 캐비티 한 가운데 위치하도록 하였다. 공진피크 가운데서 기본 공진모드인 TE₀₁₆ 모드를 결정하고, 이 피크의 주파수를 3dB 대역폭으로 나누어 줌으로서 부하 품질계수(Loaded Q : Q_L)를 결정하였다. 부하 품질계수로부터 관련 수식을 사용하면 물질상수인 무부하 품질계수로 환산도 가능하지만 본 연구에서는 품질계수의 변화 경향성을

파악하는 것이 목적이므로 부하 품질계수로 통일하여 모든 결과를 비교하였다.

2.3 유한요소법 및 HFSS의 개요

유한요소법 (Finite Element Method, FEM)은 구조 해석 등 기계 분야에서 출발된 개념으로서 1968년 이후 전자기 문제의 해결에 처음으로 적용되기 시작하였고 그 이후로 다양한 전자기 문제들 (웨이브가이드, 마이크로스트립, 유전체 공진기, 전자파방사 등)에 활용되었다. [11-12] 본 연구에서는 현재 널리 사용되고 있는 FEM 기반의 전자기 시뮬레이터로서 HFSS (V7.0, Ansoft Co., USA)를 사용하였다.

시뮬레이션 결과와 실제 측정결과를 정확하게 비교하기 위해서 그림 1에 나타난 실제 측정 장치의 형상을 HFSS 상에서 3차원적인 오브젝트로서 형성하였다. 또한 HFSS 시뮬레이션을 통해서 기공이 있는 MCT 세라믹스의 품질계수를 결정하기 위해서 이에 대한 3차원 오브젝트 도면 작성 및 재질 설정을 해 주었다. 그림 2에는 HFSS 상에서 유전체 공진기와 그 안에 기공이 3차원 오브젝트로서 작성된 것을 여러 각도에서 나타내었다.

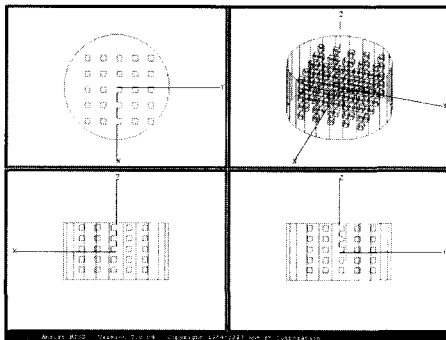


그림 2. 유전체 실린더 및 기공의 3차원 레이아웃.
Fig. 2. 3D schematic layout of the dielectric cylinder and pores.

마이크로파 유전체의 소결 후에 실제 소결체 내에 존재하는 기공은 수 μm 에서 수 십 μm 정도의 크기 이겠지만, 시뮬레이션의 편의상 기공의 크기를 다소 크게 설정하였다. 기공 한 개의 크기는 한 변이 0.5mm인 정육면체 (0.5mm×0.5mm×0.5mm)로서 설정하고 재질은 공기로 설정하였다. 시뮬레이션 과정에

서 기공율이란 유전체 오브젝트의 부피에 대한 정육면체 형상의 기공들의 부피합의 비율을 의미하며 기공의 개수가 125개가 되면 대략 2%의 기공율이 된다.

시뮬레이션 과정에서 MCT 유전체 세라믹스의 재질 설정은 캐비티 공진기 방법에 의해 실제 측정된 결과를 토대로 해 주었다. 유전율이 20이고 10GHz에서의 유전손실값이 대략 0.001 정도로 나타났으므로 이 값을 HFSS 재질 설정에 적용하였다. 재질 설정 이후에 HFSS를 기동하면 자동적으로 메쉬 (유한 개의 요소)를 나누는 과정이 진행된다. HFSS에서의 메쉬 기준은 물질 내에서의 유효파장 (유전율과 해당 주파수를 고려한)과 오브젝트의 꼭지점이 되므로 기공의 크기를 수 μm 정도로 줄인다면 기공의 개수가 수만개가 되고 메쉬가 수 백만개로 늘어나서 분석이 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 어느 정도의 오차를 감수하면서 기공의 크기를 다소 크게 설정하도록 하였다.

메쉬가 나뉘어지는 과정은 자동화되어 있어서 일단 초기 메쉬가 나뉘어진 이후에 일정 비율로 메쉬의 갯수를 증가 (Mesh refinement)시킨 이후 산란계수 (S parameter)의 변화율을 검사하여 정해진 수준 이내로 수렴할 때 메쉬의 갯수를 늘리는 과정을 중단하고 전자계 결과 값을 확정하고 주파수 변화에 따른 S_{12} 값을 잘못하게 된다. 상세한 과정은 참고문헌에 나타나 있다[12].

3. 결과 및 고찰

그림 3에서는 기공율을 2%로 설정한 경우에 대하여 주파수를 2~15GHz까지 변화시키면서 시뮬레이션으로 구한 S_{12} plot과 실험적으로 구한 S_{12} plot 값을 비교하여 나타내었다. 실험적으로 구한 결과는 RF network analyzer (8720C, Hewlett Packard)를 사용하여 실제 소결된 MCT 유전체 세라믹스를 측정된 값이다. 본 연구에서 측정 시편으로 사용한 MCT 유전체의 기공율을 측정된 결과 2% 정도로 나타났으므로 두 경우 모두 기공율이 근접한 경우로 볼 수 있다. 산란계수의 주파수 스펙트럼에서 보면 두 경우 모두 TE_{016} mode는 5GHz 부근으로 비슷하게 나타났다.

그러나 그림 3의 결과를 보면 실험적 방법과 시뮬레이션 방법에서 공진주파수도 다소 다르게 나타났고, 다른 주파수 대역에서의 S_{12} 의 주파수 특성은 상당히 다르게 나타났다. 이는 실제의 실험적인 조건

에서는 마이크로파 유전체 내부에 존재하는 기공, 금속 cavity 표면에 존재하는 불균질성, 유전체 및 금속 cavity의 가공오차 등에 의해 시뮬레이션과는 다른 조건이 되기 때문으로 판단된다. 그러나 실제로 측정된 경우와 시뮬레이션의 경우에 있어서 TE₀₁₆ 모드에서의 3dB 대역폭을 통해서 Q_L을 계산해 보면 실측치가 1430, 시뮬레이션의 경우가 1210으로서 20% 정도의 오차로 나타났다.

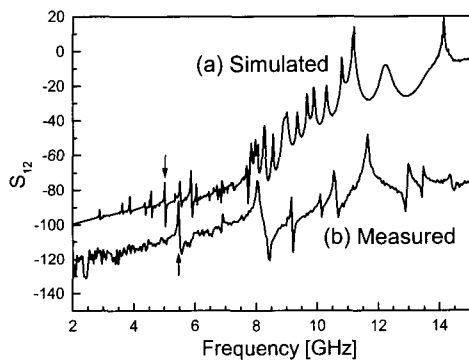


그림 3. 2 ~ 15GHz 대역에서의 산란계수 S₁₂의 주파수 의존성. (a) Ansoft HFSS V7.0를 이용한 시뮬레이션 결과, (b) 네트워크 분석기를 이용한 측정값. TE₀₁₆ 모드는 화살표로 나타냄.

Fig. 3. Frequency dependence of S₁₂ in the range of 2 ~ 15GHz. (a) shows simulated result using Ansoft HFSS V7.0 and (b) shows measured result using network analyzer. TE₀₁₆ modes are indicated as arrows.

실험적인 방법에서 TE₀₁₆를 결정할 때는 주파수의 변화에 따른 S₁₂ 값의 피크 가운데서 가장 저주파 대역에서 나타나는 것을 택하거나 공진기의 내부 용적을 변화시키면서 S₁₂ 값의 피크값이 나타나는 주파수를 관찰함으로써 선택하는 번거로움이 따르게 된다. 그러나 시뮬레이션 방법에서는 각 주파수 별로 전계 패턴을 직접 관찰할 수가 있어서 쉽게 기본 공진 모드를 선별할 수 있게 된다. 그림 4는 cavity 내부에 위치한 유전체를 수평으로 분할하는 평면에서 공진주파수에서의 전계 벡터를 표시한 것이다. 이는 HFSS 상에서 관찰 면을 위와 같이 지정하고 전계벡터를 계산하면 얻어지게 된다. 실린더 모양의 시편의 축방향을 중심으로 하여 동심원을 그리는 형태를 나타내고 있으며 이는 TE₀₁₆ 공진모드를 나타내는 전계분포이다[9]. 시뮬레이션 주파수를 변경하

면 전계벡터의 형상은 크게 어긋나게 된다. 수 십개의 다른 주파수에서 전계를 플롯해 보면 그림 4와 같은 형상의 전계분포는 TE₀₁₆ 공진모드에 해당하는 주파수에서만 유일하게 나타나게 된다. 이와 같은 전계벡터의 양상을 주파수에 따라 관찰함으로써 여러개의 공진 피크 중에서 TE₀₁₆ 공진모드를 쉽게 찾을 수 있다.

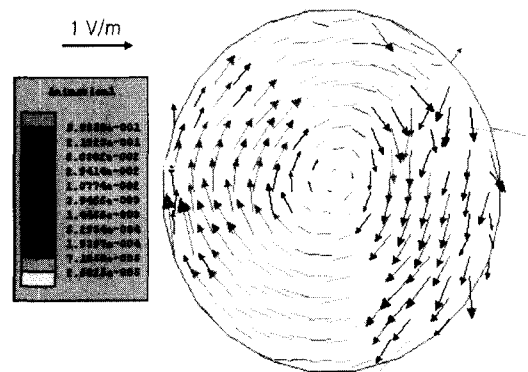


그림 4. 5.0GHz 주파수에서 나타난 유전체의 수평면 상에서의 벡터 전계.

Fig. 4. Vector electric field in the horizontal plane of dielectrics at 5.0GHz.

마이크로파 유전체의 품질계수 및 유전율은 세라믹스의 미세구조 및 조성에 의해 영향을 받게 된다. 특히 세라믹스 내부에 있는 기공은 품질계수를 저하시키는 것으로 예상되어 왔다. 또한 세라믹스에서 나타나는 입계의 경우에도 유전율과 전기전도도가 달라지므로 유전체의 마이크로파 품질계수를 낮출 것으로 예상할 수 있다. 시편의 전체 부피에 대한 모든 기공의 부피함의 비율은 기공율로 표현되는데 이러한 기공율의 증감에 의한 품질계수의 변화동을 살펴보고, 아울러서 기공율이 일정할 때 개별 기공의 크기에 의한 영향을 검토해 보았다. 먼저 그림 5는 기공의 크기가 품질계수에 어떠한 영향을 미치는지 검토한 것이다. 0.5mm×0.5mm×0.5mm의 크기를 갖는 기공이 125개 있는 경우 (기공율 2%)와 기공의 크기를 증가시키고 개수를 8개, 1개로 줄이는 경우를 비교하여 나타내었다. 즉, 기공이 한 개인 경우는 2.5mm×2.5mm×2.5mm의 크기를 갖는 정육면체의 기공 한 개가 설정된 것이다.

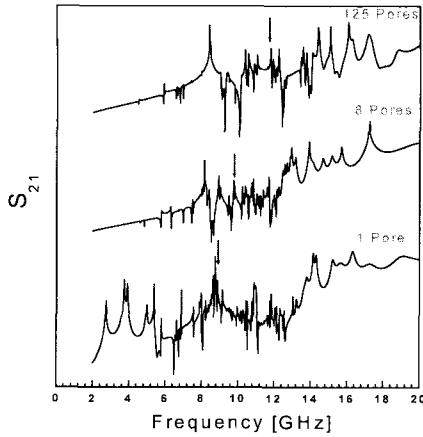


그림 5. 유전체 내부의 기공갯수 변화에 따른 2 ~ 20GHz 대역에서의 산란계수 S_{12} 의 주파수 의존성.

Fig. 5. Frequency dependence of S_{12} in the range of 2 ~ 20GHz when the number of pores inside dielectrics varies.

표 1. 유전체 내부의 기공갯수 변화에 따른 부하 품질계수.

Table 1. Calculated Q_L when the number of pores inside dielectrics varies.

Number of Pores	Frequency (TE ₀₁₈)	Q_L
1	8.86	1029
8	9.76	1059
125	11.76	1158

기공의 개수가 줄어들면 기공의 크기를 비례적으로 크게 설정하였으므로 모든 경우에서 전체 기공율은 항상 2%로 유지되었다. Q_L 값의 계산은 TE₀₁₈ 공진모드에서 나타나는 공진피크의 중심주파수를 대역폭 (-3dB)으로 나누어준 값으로부터 계산하여 표 1에 나타내었다. 기공의 크기가 커지면서 개수가 줄어드는 경우 품질계수는 10% 정도 다소 감소함을 볼 수 있다. 즉, 시편 내에서 기공율이 일정하다고 가정하면 작은 크기의 기공이 여러개 있는 경우보다 큰 크기의 기공이 적은 개수로 있는 경우가 품질계수가 감소함을 알 수 있다. 즉, 유전체 세라믹스의 미세구조에서 생각해 보면 기공율이 일정하더라도 큰

크기의 기공이 분포하는 것은 품질계수의 저하를 초래할 수 있음을 알 수 있다. 세라믹스의 경우 소결 과정을 마친 이후에 소결체 내에 존재하는 기공은 수 μm 에서 수 십 μm 정도의 크기로서 여러 가지 형태가 있다. 입자 내부에 트랩되어 있는 형태의 소형 기공, 입계면에 존재하는 다소 큰 기공들 및 고상소결에서의 물질이동이 충분히 일어나지 않은 경우에는 입자 수십개에 해당하는 수 백 μm 의 기공이 존재할 수도 있다. 본 시뮬레이션 결과를 통해서 보면 전체 기공율이 일정하더라도 기공의 형태가 큰 것으로 존재하는 경우 품질계수의 저하가 큰 것으로 나타났다.

그림 6의 경우는 기공의 크기를 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 로 고정하고 그 개수를 조절하여 전체 기공율을 증가시켰을 때 산란계수의 주파수 특성을 나타내었다. 즉, 기공율 1%의 경우는 62개, 기공율 2%의 경우는 125개, 기공율 10%의 경우는 625개의 기공을 설정하였다.

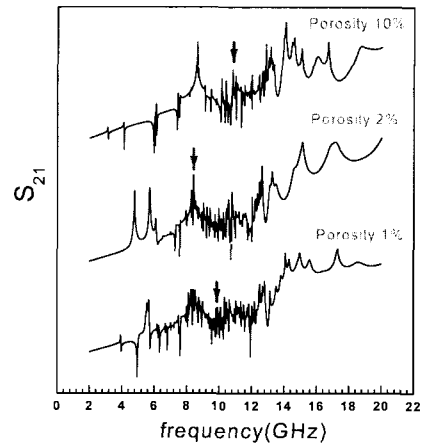


그림 6. 유전체 기공율 변화에 따른 2 ~ 20GHz 대역에서의 산란계수 S_{12} 의 주파수 의존성.

Fig. 6. Frequency dependence of S_{12} in the range of 2 ~ 20GHz when the porosity of the dielectrics varies.

공진피크에서 계산된 Q_L 을 계산하여 표 2에 나타내었다. 공진주파수는 8~11GHz의 범위에서 나타났으며 품질계수는 기공율이 증가하면서 현저하게 감소하는 경향성을 나타내었다. 기공율이 1%에서 10%로 증가하면서 대략 30% 정도 Q 값이 감소한 것으로 나타났다. 그림 5의 결과와 비교해 보면 기공의

크기에 의해서도 품질계수에 영향이 미치지만 절대적인 기공율이 증가하면 마이크로파 품질계수는 급격히 감소함을 볼 수 있다. TiO₂ 유전체에서 기공율과 마이크로파 품질계수의 상관관계를 조사한 바에 의하면 기공율이 10% 증가할 때마다 마이크로파 품질계수는 대략 절반 정도만 줄어드는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과보다는 더 급격한 감소를 나타낸 것이다[6]. 그러나 이러한 연구에서는 기공율을 제어하기 위해 TiO₂ 유전체의 소성온도를 제어하는 방법을 사용하였으므로, 낮게 측정된 품질계수가 단순히 높은 기공에 의한 것인지 아니면 다른 원인이 복합된 것인지 구분하기가 어렵게 된다. 본 연구의 결과를 전제로 한다면 선행 연구 결과에서 기공율 증가에 따른 급격한 품질계수의 감소는 기공 뿐 아니라 다른 요인들이 함께 작용한 것으로 판단된다.

표 2. 유전체 내부의 기공률 변화에 따른 부하 품질계수.

Table 2. Calculated Q_L when the porosity of the dielectrics varies.

Porosity [%]	Frequency (TE ₀₁₈)	Q _L
1%	9.81	1275
2%	8.25	1073
10%	10.82	1006

4. 결론

본 연구에서 이러한 시뮬레이션 결과를 통해 마이크로파 유전체 내부에 기공이 존재할 때 품질계수가 저하됨을 확인할 수 있었다. 기공율이 증가할수록 품질계수는 급격히 감소하며, 동일한 기공율일 경우에는 기공의 크기가 클수록 품질계수가 저하됨을 알 수 있었으며 이를 어느 정도 정량적인 수준으로 확인할 수 있었다. 본 연구에서의 시뮬레이션 기법을 이용한다면 마이크로파 유전체에서 실제 측정된 품질계수와 기공율로부터 기공이 마이크로파 품질계수의 저하에 미친 영향을 어느 정도 정량적으로 확인할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 실제로 세라믹스의 미세구조는 기공 및 이차상이 본 연구에서 설정한 크기에 비해 매우 미세하게 또한 균일하게 분포하는 구조이므로 본 시뮬레이션에서 설정한 조건과는 차이점이 있는데 이 점은 향후 연구를 통해 보

완하여야 할 점이다.

참고 문헌

- [1] R. D. Richtmyer, "Dielectric resonators", J. Appl. Phys., Vol. 10, No. 1, p. 391, 1939.
- [2] K. Wakino, "High frequency dielectric and thier applications", Proc. of Sixth IEEE Int. Symp. on Applications of Ferroelectrics, p. 97, 1986.
- [3] 이지형, 방재철, "ZnTiO₃ 계 마이크로파용 유전체 세라믹스의 저온소결에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 1호, p. 30, 2002.
- [4] 김동영, 이상석, 한진우, 전동석, "Li 을 첨가한 MgTiO₃-CaTiO₃ 계 세라믹 유전체의 마이크로파 유전특성", 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 190, 2001.
- [5] 박창엽, 강종윤, 최지원, 윤석진, 김현재, "초전도 자성체 / 유한요소법에 의한 1.9 GHz 대 유전체 일체형 필터의 설계", 전기전자재료학회논문지, 12권, 10호, p. 983, 1999.
- [6] 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., Vol. 83, No. 1, p. 95, 2000.
- [7] E. Nagata, J. Tanaka, M. Tsutumi, and E. Bannai, "Distribution of calcium ion in the crystal of MgTiO₃-CaTiO₃ system," Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol. 56, p. 3173, 1983.
- [8] H. Jantunen, R. Rautioaho, A. Uusimaki, and S. Leppavuori, "Compositions of MgTiO₃-CaTiO₃ ceramic with two borosilicate glasses for LTCC technology," J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 20, p. 2331, 2000.
- [9] D. Kajfez and P. Guillon, "Dielectric Resonators", Artech House, Inc., 1986.
- [10] B. W. Hakki and P. D. Coleman, "A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Trans., MTT-8, p. 402, 1960.
- [11] Matthew N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press, 1992.
- [12] HFSS VCapacities in the Milimeter Range", IRE. 6.0 user's manual, Ansoft, 1999.