

구형태 공진기에서의 평면파 산란 공진모드

Plane Wave Scattering Induced Resonant Modes of Spherical Resonator

유형석*
 (Hyongsuk Yoo)

Abstract - Plane wave scattering from a spherical resonator is calculated by solving the combined field integral equation (CFIE) with Rao-Wilton-Glisson (RWG) basis functions and the moment method. The calculations show that magnetic and electric dipoles are found at resonant modes. These characteristics are confirmed by radiation patterns in the far field region. In addition, an analysis of a magnetodielectric sphere is discussed.

Key Words : Rao-Wilton-Glisson (RWG) basis functions, Moment method, Resonator, Scattering

1. 서론

최근에 다양한 유전율을 가진 공진기가 안테나개발, 고주파회로 등에 이용되어 지고 있다. 안테나의 이득과 고효율, 그리고 제작의 간편하다는 것이 유전체 공진기가 가지는 장점이며, 최근에 metamaterial 특성을 가지는 High dielectric 공진기도 많이 각광을 받고 있다[1]-[3]. 특히 metal성분을 가지는 metamaterial보다 고유전율을 가지는 공진기는 자화성을 고려할 때 그 장점이 뛰어나다[4]. 이러한 유전체 공진기를 해석하기 위해서는 여러 기법들이 이용되어 지고 있으며 본 논문에서는 수치해석기법인 method of moments를 이용하였다[5]. 구형태의 공진기를 평면파(plane wave)를 입사시켜서 combined field 적분식을 Rao-Wilton-Glisson basis 함수를 이용하여 구 내부에 산란되는 형태를 수학적으로 모델링하였다[6,7]. 산란의 특징을 보기 위해서 구 내부의 전장, 자장의 분포를 계산하였으며, 장거리 방사 패턴 또한 계산되었다.

고유전율 구공진기는 첫 번째 모드에서는 자장 쌍극자, 두 번째 모드에는 전장 쌍극자가 나타났으며, 세 번째 모드에서는 아주 강한 전장 자장 쌍극자가 동시에 나타나는 것을 본 논문에서 확인되었다. Magnetodielectric 공진기가 같은 크기에서 연구되었으며 그 특징은 비슷하나 세 번째 모드에서 강한 전장 자장 쌍극자현상은 나타나지 않았다. 본 논문에서는 구형태의 공진기를 평면파 산란기법을 통해 연구되었으며, 특히 세 번째 모드에서 강한 전장 자장 쌍극자 현상은 지금까지 보고되지 않은 새로운 현상이다. 이러한 연구의 내용을 확대시켜서 negative-index material 즉 metamaterial특성연구에 많은 도움이 되리라 생각된다[8,9].

2. 본론

2.1 공진 주파수

구형태 공진기의 공진 주파수를 확인하기 위해서 먼저 구를 내접할 수 있는 정육면체의 공진 주파수를 다음과 같은 식에서 구할 수 있다[10].

$$(f_r)_{mnp}^{TE/TM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2} \quad (1)$$

m, n, p는 모드의 특성을 나타내는 상수이며, W, H, L은 각각 정육면체의 x, y, z축의 길이를 나타낸다. ε과 μ는 유전체내부의 유전율과 투자율이다. 식 (1)을 이용하여 대략적인 구형태의 공진기의 공진주파수를 구한다음 인근 주파수 sweep하여 그 모드의 특징을 수치해석 결과에서 자세하게 나타내었다.

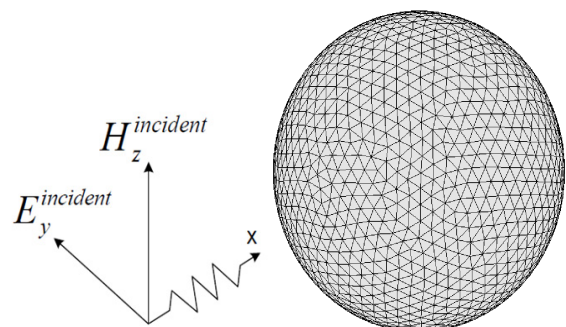


그림 1 공기 중에서 x축 방향으로 평면파가 균질한 유전율을 가진 구로 입사.

Fig. 1 The homogeneous dielectric sphere is located in free space and externally excited by a plane wave propagating along the x direction with its electric field polarized along the y axis.

* Corresponding Author : Dept. of Biomedical Engineering, School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea
 E-mail : hsyoo@ulsan.ac.kr

Received : July 3, 2013; Accepted : August 13, 2013

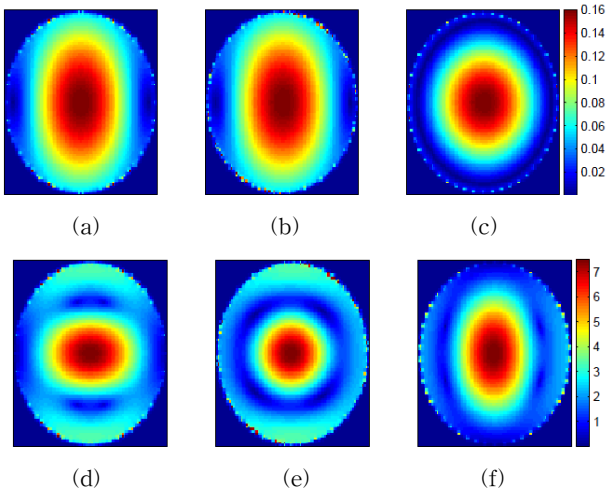


그림 2 6.7 GHz에서의 high dielectric 구 내부의 자장 분포와 9.5 GHz에서의 전장 분포

Fig. 2 Magnetic field distributions of the high dielectric sphere ($\epsilon_r = 30$, $\mu_r = 1$, radius = 4mm) at 6.7 GHz in (a) yz-plane (b) xz-plane (c) xy-plane. Electric field distributions of the high dielectric sphere at 9.5 GHz in (d) yz-plane (e) xz-plane (f) xy-plane.

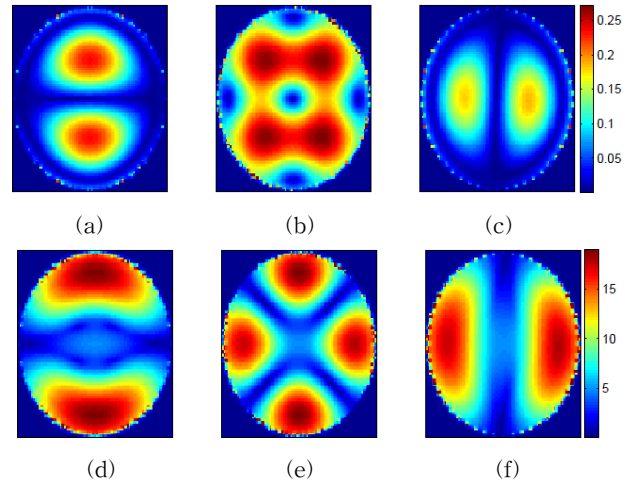


그림 3 9.7 GHz에서의 high dielectric 구 내부의 자장 분포와 전장 분포

Fig. 3 Magnetic ((a)-(c)) and electric ((d)-(f)) field distributions of the high dielectric sphere ($\epsilon_r = 30$, $\mu_r = 1$ radius = 4mm) at 9.7 GHz in (a) and (d) yz-plane, (b) and (e)-xz plane, (c) and (f) xy-plane.

2.2 수치 해석 결과

2.2.1 High dielectric 구 ($\epsilon_r = 30$, $\mu_r = 1$)

High dielectric 구 공진기가 combined field 적분식(CFIE)과 method of moments 방법[6,7]을 이용하여 먼저 연구되었다. 일반적인 CFIE방정식은 다음과 같은 식 (2)로 정의되고, Rao-Wilton-Glisson basis 함수 특성상 표면전류밀도를 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} [Z] & [C] \\ [-C] & [Y] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [J] \\ [M] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [E] \\ [H] \end{bmatrix} \quad (2)$$

$[Z]$, $[Y]$, $[C]$ 는 impedance, admittance, off-diagonal

matrix를 각각 의미한다. 미지수 표면 전류상수인 $[J]$, $[M]$ 를 구한 후에는 원하는 전장 자장의 분포를 얻을 수 있다. $[E]$, $[H]$ 는 각각 전장, 자장의 excitation 값이다. 수치 해석 결과는 여러 주파수를 sweep하여서 그 특징이 두드러진 자장 및 전장의 분포를 본 논문에서는 표현하였다. 구의 반지름은 4 mm이며, $\epsilon_r = 30$, $\mu_r = 1$ 이 사용되었다. 식 (1)을 이용한 공진 주파수는 대략 5.98, 8.43, 9.79 GHz이며 첫 번째 모드의 정확한 공진특성을 알아보기 위해서 5-7 GHz 대역의 주파수를 sweep하였다. 그림 2(a)-(c)처럼 6.7 GHz에서 강한 자 장의 분포가 확인되었으며, 0.16 A/m의 peak값을 가졌다. 두 번째 공진모드는 식 (2)에서 나온 공진 주파수와 다른 주파수에서 발견되었는데 8.5 GHz에서 그림 2(d)-(f)의 형태의 전장 분포가 나타나기 시작하였으나 최고값이 1.4 V/m에 불과하였다. 주파수 sweep을 더 한 결과 9.5 GHz에서 최고값인 7 V/m가 확인되었다. 결국 그림 2에서

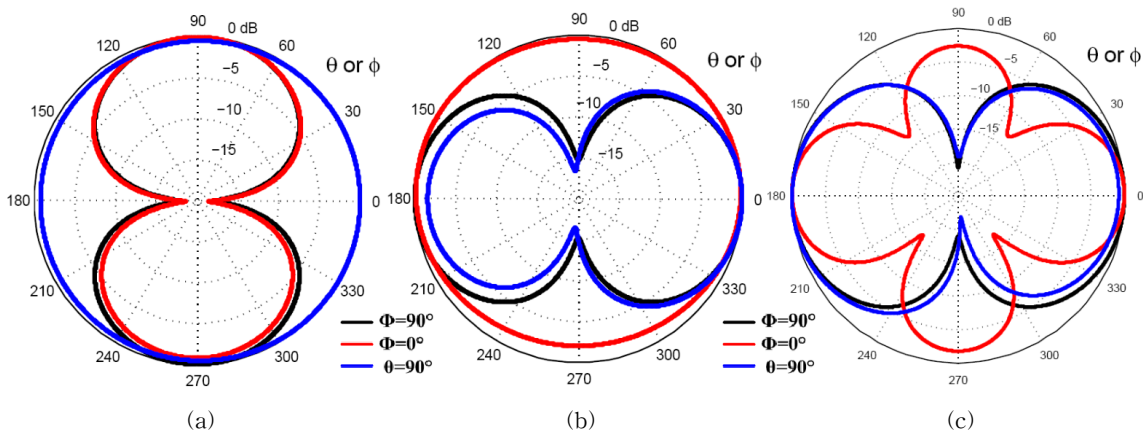


그림 4 High dielectric 구의 2차원 far field 방사패턴

Fig. 4 2D far-field radiation patterns of the high dielectric sphere ($\epsilon_r = 30$, $\mu_r = 1$, radius = 4mm) in the yz- ($\phi = 90^\circ$), xz- ($\phi = 0^\circ$), and xy-planes ($\theta = 90^\circ$), (a) 6.7 GHz, (b) 9.5 GHz, and (c) 9.7 GHz.

보는 것처럼 첫 번째 모드 공진 주파수인 6.7 GHz에서 강한 자장 쌍극자가 발견 되었으며 두 번째는 모드 공진 주파수 9.5 GHz에서 강한 전장 쌍극자가 나타났다. 이러한 전장 자장 쌍극자현상은 강한 변위 전류에 의한 현상이며, 안테나 해석기법인 far field 방사패턴에 의해서는 확인이 가능하다.

High dielectric 구 공진기의 두 번째 모드 주파수 (9.5 GHz)보다 인접한 9.7 GHz에서 세 번째 공진이 그림 3에서 처럼 발견되었으며, 강한 자장 전장 쌍극자현상을 동시에 가진다. 그리고 그 peak값은 첫 번째 두 번째 공진모드보다 훨씬 더 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 특성을 더 정확하게 확인하기 위하여 2차원 far field 방사패턴을 그림 4에 plot하였으며, 방사패턴이 쌍극자성질과 정확히 일치함을 알 수 있다. 특히 그림 4(c)에서 보는 것처럼 강한 전장과 자장을 동시에 가지는 두 개의 쌍극자현상(quadruple)이 방사패턴을 통해 나타난다.

2.2.2. Magnetodielectric 구 ($\epsilon_r = 16, \mu_r = 10$)

위에서 연구된 high dielectric 구 공진기와 동일한 크기의 Magnetodielectric 구 공진기($\epsilon_r = 16, \mu_r = 10$) 또한 본 논문에서 다루었다. 식 (1)을 이용한 첫 번째부터 세 번째 공진 주파수는 대략 2.59, 3.65, 4.24 GHz이다. 2.5 GHz에서부터 그림 5(a)-(c)와 같이 강한 자장의 분포가 나타났으며 그 형태는 3.9 GHz까지 계속 되었다. 3.875 GHz에서 가장 강한 자장의 크기인 0.22 A/m의 peak값을 가졌다. 전장의 분포는 그림 5(d)-(f)처럼 나타났으며, 4 GHz에서부터 최고값 83 V/m을 보였으며 그 분포형태는 5 GHz까지 지속되었으며 전장의 값은 선형적으로 점차 감소하였다. 하지만 high dielectric 구 공진기와는 달리 세 번째 공진주파수에서는 강한 자장과 전장을 동시에 가지는 형태를 찾을 수 없었다.

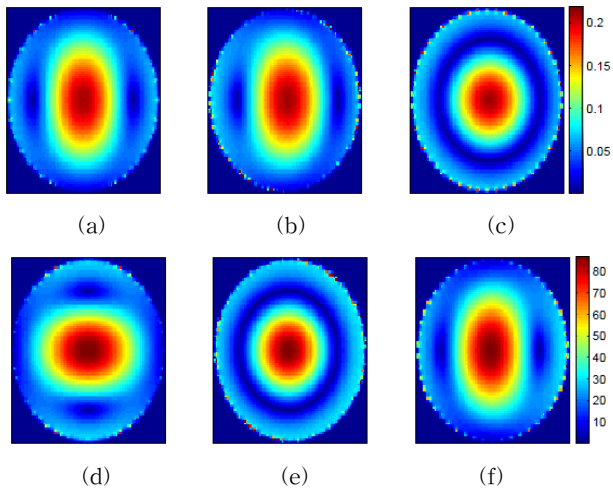


그림 5 3.875 GHz에서의 magnetodielectric 구 내부의 자장 분포와 4 GHz에서의 전장 분포

Fig. 5 Magnetic field distributions of the magnetodielectric sphere ($\epsilon_r = 16, \mu_r = 10, radius = 4mm$) at 3.875 GHz in (a) yz-plane (b) xz-plane (c) xy-plane. Electric field distributions of the magnetodielectric sphere at 4 GHz in (d) yz-plane (e) xz-plane (f) xy-plane.

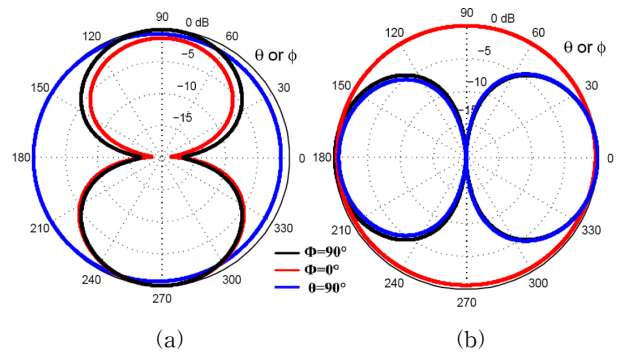


그림 6 Magnetodielectric 구의 2차원 far field 방사패턴

Fig. 6 2D far-field radiation patterns of the magnetodielectric sphere ($\epsilon_r = 16, \mu_r = 10, radius = 4mm$) in the yz- ($\phi = 90^\circ$), xz- ($\phi = 0^\circ$), and xy-planes ($\Theta = 90^\circ$), (a) 3.875 GHz, (b) 4 GHz.

그림 6은 magnetodielectric 구 공진기의 2차원 방사패턴을 나타낸 것이며 high dielectric 공진기처럼 방사패턴이 쌍극자성질과 정확히 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과는 높은 ϵ_r 과 μ_r 을 가지는 구 공진기는 자장과 전장의 쌍극자현상이 비교적 가까운 주파수에서 일어난 것을 보여준다[8].

3. 결 론

본 논문에서는 구 공진기의 평면파 산란을 method of moments와 Rao-Wilton-Glisson basis 함수를 이용하여 해석하였다. 산란된 구 내부의 강한 자장과 전장은 high-dielectric 구 공진기에서 각각 첫 번째 두 번째 공진 주파수에서 나타났으며, 방사패턴이 전장쌍극자와 자장쌍극자의 성질을 증명하였다. 또한 세 번째 공진 주파수에서는 매우 강한 전장과 자장쌍극자현상이 동시에 나타났으며 이는 지금까지 볼 수 없었던 새로운 quadruple (두개의 쌍극자) 현상이다. 또한 magnetodielectric 구 공진기도 본 논문에서 다루어 졌으며 첫 번째 두 번째 공진주파수에서는 high dielectric 구 공진기와 유사한 성질이 나타났으나, 세 번째 공진주파수에서는 강한 전장 자장 쌍극자현상이 나타나지 않았다. 이러한 연구결과는 현재 많이 연구되어 지고 있는 metamaterial의 특성을 dielectric 구 공진기를 이용하여 구현이 가능함을 나타내며 안테나 성능개선 등에 많이 이용되리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년 정부재원(미래창조과학부 신진연구사업비, NRF-2011-0014776)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구하였음.

References

[1] A. Okayaya and L. F. Barash, "The dielectric microwave resonator," Proc. IRE, vol. 50, pp. 2081 -

2092, Oct. 1962.

- [2] D. Kajfez and P. Guillon, Dielectric resonators. SciTech Publishing, 1998.
- [3] A. A. Kishk, H. A. Auda, and B. C. Ahn, "Radiation characteristics of cylindrical dielectric resonator antennas with new applications," IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 31, no. 1, pp. 7 - 16, Feb. 1989.
- [4] J. Kim, H. Yoo and A. Gopinath, "Simulations and experiments on higher resonant modes of cubic high dielectric resonator metamaterial," Electron. Lett., 2010, 46, (24), pp. 1590 - 1591
- [5] R. F. Harrington, Field computation by moment methods. IEEE Press, 1993.
- [6] K. Umashankar, A. Taflove, and S. M. Rao, "Electromagnetic scattering by arbitrary shaped three-dimensional homogeneous lossy dielectric objects," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 6, pp. 758 - 766, June 1986.
- [7] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 30, no. 3, pp. 409 - 418, May 1982.
- [8] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. Baker-Jarvis, and P. Kabos, "A double negative (DNG) composite medium composed of magnetodielectric spherical particles embedded in a matrix," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 10, pp. 2596 - 2603, October 2003.
- [9] J. Kim and A. Gopinath, "Simulation of a metamaterial containing cubic high dielectric resonators," Physical Review B, vol. 76, no. 11, p. id. 15126, September 2007.
- [10] C. A. Balanis, Advanced engineering electromagnetics. Wiley, 1989.

저 자 소 개



유형석

2003년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사), 2006년 University of Minnesota 전기공학과 (공학석사), 2009년 University of Minnesota 전기공학과 (공학박사), 2009년~2010년 Center for Magnetic Resonance Research (CMRR), University of Minnesota, Post-Doctor 연구원, 2010년~2011년 Cardiac Rhythm Disease Management, Medtronic, USA, MRI 연구원, 2011년~현재 울산대학교 전기공학부 조교수