

구형 유전체 위에 있는 구형 패치의 공진 특성과 방사 특성

Resonance Characteristics and Radiation Characteristics of a Spherical Patch on a Dielectric Sphere

정이루 · 홍익표* · 이명건** · 전흥재*** · 육종관

Yi-Ru Jeong · Ic-Pyo Hong* · Myung-Gun Lee** · Hueng-Jae Chun*** · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 구형 유전체 위에 있는 구형 패치의 전파 특성으로서 공진 특성과 방사 특성을 분석하였다. 공진 주파수와 Q를 계산하여 특정 모드의 공진 특성을 해석하였으며, 원거리에서의 전기장을 계산하여 방사 특성을 해석하였다. 구형 유전체의 해석을 위해 스펙트럴 영역 해석법(spectral domain analysis method)를 적용하였으며, Vector Legendre transform pair와 Galerkin's method를 이용하여 스펙트럴 영역으로 변환한 후 대수식으로 정리하여 효율적인 계산을 할 수 있었으며, 이를 통해 구형 패치의 반지름이나 곡률, 유전체의 특성이 구형 패치의 특성에 미치는 영향을 해석하였다.

Abstract

In this paper, the resonance characteristics and radiation characteristics of a spherical patch on a dielectric sphere are analyzed. Resonance characteristics can be obtained from the resonant frequency and the quality factor. Radiation characteristics can be also analyzed from the E-field in the far region. In order to calculate these parameters, spectral domain analysis method is applied. Algebraic equation can be obtained in spectral domain through Vector Legendre transform pair and Galerkin's method. So, efficient calculation is possible numerically. It is investigated that radius, curvature of a spherical patch, and dielectric constant of a dielectric sphere have an effect on characteristics of a spherical patch.

Key words : Spherical Patch, Spectral Domain Method, Complex Resonance, Radiation

I. 서 론

최근 이동 통신의 급속한 발전에 따라 경량화와 소형화가 가능하여 널리 사용되고 있는 마이크로스트립 패치 안테나에 대한 연구는 대부분 평면 구조의 패치에 대한 연구로 제한되어 있다. 그러나 전자

기기 구조의 소형화, 집적화로 인해 평면형 구조만을 사용하면 공간상의 제약이 따르게 되는 경우가 발생하기 때문에 최근 원통형 또는 구형과 같은 곡면 구조에 대한 안테나의 적용이 요구되고 있다. 예를 들어, 원통형 기지국 안테나, 비행체에 적용되는 안테나 등 많은 경우에 곡면형 구조의 패치를 적용

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electronics & Electricity Engineering, Yonsei University)

*공주대학교 정보통신공학부(Dept. of Information & Electricity Engineering, Kongju National University)

**국방과학연구소(Agency for Defense and Development)

***연세대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received August 22, 2011 ; Revised December 29, 2011 ; Accepted January 13, 2012. (ID No. 20110822-090)

· Corresponding Author : Jong-Gwan Yook (e-mail : jgyook@yonsei.ac.kr)

해야 하는 경우가 발생하게 되고, 곡면형 패치를 적용하기 위해서는 정확한 전파 해석이 필요하다.

곡면형 구조를 해석하기 위해 유한 요소법(Finite Element Method, FEM)이나 유한 차분 시간 영역법(Finite Difference Time Domain method: FDTD)과 같은 3차원 수치 해석 방법을 이용한 연구가 주로 이루어졌다^{[1]~[3]}. 이 방법들은 임의의 구조를 해석할 수 있지만 구조의 크기에 따라 많은 계산 시간이 필요하다는 단점이 있다. 또한, 모드 정합법(mode matching method)을 이용하여 본 논문에서 제안한 구조의 해석이 가능하지만, 해석 구조가 제한적이라는 단점이 있다^[4]. 본 논문에서는 제한적이긴 하지만 비교적 간단하게 곡면 구조를 해석하기 위해 스펙트럴 영역 해석법(Spectral Domain Analysis method: SDA)을 사용하였다. SDA는 적분을 이용하여 표현된 식을 간단한 대수식으로 바꾸어 주어 효율적인 계산을 가능케 한다. 또한, 적절한 기저 함수를 선택하면 각각의 모드에 대한 특성을 알 수 있어 특정 구조에 대하여 직관적으로 전파 특성을 관찰할 수 있다는 장점을 가질 뿐만 아니라 모드 정합법에 비해 더 다양한 구조를 해석할 수 있다. 따라서 평면형 구조의 패치 특성 연구를 위해 많이 쓰여 왔다^[5]. 곡면 구조 안테나의 해석과 관련해서는 원통형 좌표계에서 원통형 구조의 패치를 푸리에 변환을 이용하여 해석하는 연구가 이루어졌으며^{[6],[7]} 또한 구형 좌표계에서는 vector Legendre transform pair를 이용하여 구형 패치를 해석하는 연구가 이루어졌다^{[8],[9]}. 하지만 이러한 연구는 주로 패치 아래에 접지면(ground plane)이 있는 안테나 관점에서 이루어졌다. 그러나 구형 곡면 구조의 경우, 구형 안테나뿐만 아니라 구형 주파수 선택 구조(Frequency Selective Surface: FSS)와 같이 접지면이 없고 유전체만 존재하는 구조도 일반적으로 사용이 되기 때문에, 본 논문에서는 구형 유전체에 구형 패치가 있는 구조에 대한 전파 특성을 해석하였다. 본 논문에서 전개한 전파 특성 해석을 위한 계산 과정은 구형 접지면이 있는 구형 패치 해석을 위해 적용한 SDA 해석 과정^[8]을 참고하였다. 구형 패치의 공진 주파수와 Q(quality factor)를 계산하여 공진 특성을 살펴보고, 원거리에서의 전기장을 계산하여 방사 특성을 해석하였다.

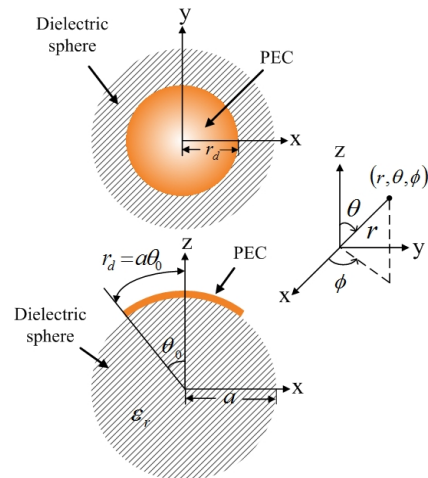


그림 1. 구형 패치의 구조: 윗면과 단면
Fig. 1. Geometry of a spherical patch: Top view & cross sectional view.

II. 구형 패치의 공진 특성^[8]

본 논문에서 해석하기 위한 구형 패치가 구형 유전체 위에 있는 구조는 그림 1과 같다. 구형 패치의 둘레는 $2\pi r_d$ 이고, 완전 도체라고 가정한다. 구형 유전체의 반지름은 a 이고, 유전율(ϵ)과 투자율(μ)은 $\epsilon_r\epsilon_0$, μ_0 이다. 본 논문에서의 계산 과정과 수식에서 급전 구조는 고려하지 않았다.

2-1 Spectral Domain에서 표면 전류와 전기장의 관계

구면 좌표계에서 전위를 TM 모드와 TE 모드로 분리하여 해석할 수 있으므로 유전체 내부와 유전체 외부에서의 각 모드에 대해 전위를 표현할 수 있다.

TM 모드(ϕ_{TM})는 전기적 전위에 해당하고, TE 모드(ϕ_{TE})는 자기적 전위에 해당한다. 그리고 외부의 소스(\bar{J} , \bar{M})가 없을 때, 전위만으로 전기장과 자기장을 계산할 수 있으므로 \bar{J} 와 \bar{M} 가 0인 Helmholtz equation을 만족하도록 ϕ_{TM} 와 ϕ_{TE} 를 표현한다.

구형 유전체 내부($0 < r < a$)에서 TM 모드(ϕ_{TM}^s)와 TE 모드(ϕ_{TE}^s)에서의 전위는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 구형 좌표계에서 원점을 포함하므로 여러 종류의 베셀 함수 중에서 $\hat{J}_n(x)$ 을 적용한다.

$$\phi_{TM}^s = e^{jm\phi} \sum_{n=m}^{\infty} A_n \hat{J}_n(kr) P_n^m(\cos\theta) \quad (1)$$

$$\phi_{TE}^s = e^{jm\phi} \sum_{n=m}^{\infty} B_n \hat{J}_n(kr) P_n^m(\cos\theta). \quad (2)$$

여기에서 k 는 전파 상수를 나타내며, $\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_r\epsilon_0}$ 로 표현된다. 또한, k_0 는 $\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 이다.

구형 유전체 외부($r > a$)에서 TM 모드(ϕ_{TM}^a)와 TE 모드(ϕ_{TE}^a)도 다음과 같이 나타낼 수 있다. 구형 좌표계에서 원점을 포함하지 않으며 외부로 진행되는 전파를 표현해야 하므로 $\hat{H}_n^{(2)}(x)$ 를 적용한다.

$$\phi_{TM}^a = e^{jm\phi} \sum_{n=m}^{\infty} C_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0r) P_n^m(\cos\theta) \quad (3)$$

$$\phi_{TE}^a = e^{jm\phi} \sum_{n=m}^{\infty} D_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0r) P_n^m(\cos\theta). \quad (4)$$

여기에서 $P_n^m(x)$ 는 order가 m 이고, degree가 n 인 associated Legendre function이며, $\hat{J}_n(x)$ 와 $\hat{H}_n^{(2)}(x)$ 는 order가 n 인 Ricatti-Bessel function이다. 그리고 계수 (A_n, B_n, C_n, D_n)는 문제의 경계 조건에 부합하도록 정해진다.

식 (1)~(4)에 제시된 전위를 이용하여 \hat{r} 방향과 수직인 전기장과 자기장($E_\theta, E_\phi, H_\theta, H_\phi$)을 구할 수 있다.

전기장과 자기장은 공간 영역(space domain)에서 표현된 식이므로 이를 스펙트럴 영역(spectral domain)으로 변환해야 한다. 변환을 위해 식 (5), (6)에 제시된 vector Legendre transform pair^[8]를 이용하였다.

$$\bar{\bar{F}}(\theta) = \sum_{n=m}^{\infty} \bar{L}(n, m, \theta) \bar{\bar{F}}(n) \quad (5)$$

$$\bar{\bar{F}}(n) = \frac{\int_0^\pi \bar{L}(n, m, \theta) \bar{\bar{F}}(\theta) \sin\theta d\theta}{S(n, m)}. \quad (6)$$

여기서 $\bar{\bar{F}}$ 와 $\bar{\bar{F}}$ 는 각각 공간 영역과 스펙트럴 영역에서의 값이므로 다음과 같이 행렬식으로 표현하며,

$$\bar{\bar{F}}(\theta) = \begin{bmatrix} F_\theta(\theta) \\ F_\phi(\theta) \end{bmatrix}, \quad \bar{\bar{F}}(n) = \begin{bmatrix} \tilde{F}_U(n) \\ \tilde{F}_L(n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Vector Legendre transform pair의 \bar{L} 와 S 는 다음과 같다.

$$S(n, m) = \frac{2n(n+1)(n+m)!}{(2n+1)(n-m)!} \quad (8)$$

$$\bar{L}(n, m, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_n^m(\cos\theta)}{\partial\theta} & -jmP_n^m(\cos\theta) \\ \frac{jmP_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} & \frac{\partial P_n^m(\cos\theta)}{\partial\theta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Vector Legendre transform pair를 이용하여 스펙트럴 영역으로 변환한 구형 유전체의 내부($\bar{\bar{E}}^s, \bar{\bar{H}}^s$)와 외부($\bar{\bar{E}}^a, \bar{\bar{H}}^a$)에서의 전기장과 자기장은 다음과 같다.

$$\bar{\bar{E}}^s(n) = \begin{bmatrix} \frac{k}{j\omega\mu_0\epsilon r} A_n \hat{J}_n'(kr) \\ \frac{1}{\epsilon r} B_n \hat{J}_n(kr) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\bar{\bar{H}}^s(n) = \begin{bmatrix} \frac{k}{j\omega\mu_0\epsilon r} B_n \hat{J}_n'(kr) \\ \frac{-1}{\mu_0 r} A_n \hat{J}_n(kr) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\bar{\bar{E}}^a(n) = \begin{bmatrix} \frac{k_0}{j\omega\mu_0\epsilon_0 r} C_n \hat{H}_n^{(2)'}(k_0r) \\ \frac{1}{\epsilon_0 r} D_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0r) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\bar{\bar{H}}^a(n) = \begin{bmatrix} \frac{k_0}{j\omega\mu_0\epsilon_0 r} D_n \hat{H}_n^{(2)'}(k_0r) \\ \frac{-1}{\mu_0 r} C_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0r) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

식 (10)~(13)의 미지수인 계수(A_n, B_n, C_n, D_n)를 구하기 위해서 구형 유전체 표면에서 경계 조건을 적용한다. 경계면과 평행인 전기장은 연속이지만 구형 패치 상에 존재하는 표면 전류로 인하여 자기장은 불연속하다. 이러한 경계 조건을 적용하면 완전한 전기장과 자기장을 계산할 수 있고, 경계 조건에 관한 식과 전기장, 자기장에 관한 식을 종합하면 스펙트럴 영역에서 표면 전류와 전기장 사이의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{\bar{J}}_s(n) = \bar{\bar{Y}}(n) \bar{\bar{E}}^s(n) \quad (14)$$

$$\bar{\bar{Y}}(n) = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 \\ 0 & Y_{22} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

식 (15)에 제시된 행렬의 성분은 다음과 같다.

$$Y_{11} = \frac{j\omega\epsilon_0}{k_0} \left(\frac{\widehat{H}_n^{(2)}(k_0 a)}{\widehat{H}_n^{(2)'}(k_0 a)} - \frac{\epsilon_r}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{\widehat{J}_n'(ka)}{\widehat{J}_n(ka)} \right) \quad (16)$$

$$Y_{22} = \frac{k_0}{j\omega\mu_0} \frac{\widehat{H}_n^{(2)'}(k_0 a)}{\widehat{H}_n^{(2)}(k_0 a)} - \frac{k\epsilon_r}{j\omega\mu_0} \frac{\widehat{J}_n'(ka)}{\widehat{J}_n(ka)}. \quad (17)$$

2-2 구형 패치의 전류 분포에 대한 기저 함수

구형 패치 상의 표면 전류(\vec{J}_s)는 N 개의 기저 함수(basis function)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\vec{J}_s(n) = \sum_{i=1}^N I_i \vec{J}_{si}(n) \quad (18)$$

기저 함수를 얻기 위해 cavity model theory^[16]를 적용한다. 이 때, 구형 패치의 가장자리 방향과 수직인 표면 전류는 없어야 하므로 가장자리와 평행한 자기장 성분도 0이어야 한다.

$$H_\phi|_{\theta=\theta_0} = 0 \quad (19)$$

식 (19)의 경계 조건을 통해 각각 TM 모드와 TE 모드의 각 m 에 대한 v 를 구할 수 있고, 이를 각각의 기저 함수^[8]에 적용한다.

$$\vec{J}_{si}^{TM_{mv}} = \frac{1}{S(n,m)} P_v^m(\cos\theta_0) \times \left[\begin{array}{c} \sin^2\theta_0 \frac{v(v+1)}{n(n+1)-v(v+1)} P_n^{mv}(\cos\theta_0) \\ jm P_n^m(\cos\theta_0) \end{array} \right] \quad (20)$$

$$\vec{J}_{si}^{TE_{mv}} = \frac{1}{S(n,m)} P_n^m(\cos\theta_0) \times \left[\begin{array}{c} 0 \\ \sin^2\theta_0 \frac{n(n+1)}{n(n+1)-v(v+1)} P_v^{mv}(\cos\theta_0) \end{array} \right] \quad (21)$$

2-3 구형 패치의 공진 주파수와 Q

전류 분포의 기저 함수와 같은 함수를 가중 함수(weighting function)로 이용하는 방법인 Galerkin's method를 식 (14)에 적용하여 N 개의 미지수와 N 개의 식을 갖는 homogeneous equation을 만들어낸다. 스펙트럴 영역에서 표현된 식들 간의 내적을 행해야 하므로 공간 영역이 아닌 스펙트럴 영역에서의 함수 간의 내적^[8]은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\langle A, B \rangle = \sum_{n=m}^{\infty} A^+(n) B(n) S(n,m). \quad (22)$$

여기에서 위 첨자(+)는 complex conjugate transpose를 나타낸다.

표면 전류와 전기장 간의 관계인 식 (14)에 Galerkin's method를 적용하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$0 = \sum_{i=1}^N I_i \left[\sum_{n=m}^{\infty} \vec{J}_{si}^+ S(n,m) \vec{Y}^{-1} \vec{J}_{sj} \right]. \quad (23)$$

여기에서 아래 첨자 i 와 j 는 각각 기저 함수와 가중 함수에 해당하는 index이다.

본 논문에서 살펴 볼 공진 특성은 외부에서 입사되는 전파나 외부에서 인가하는 전원 같은 외부 소스가 없는 경우이기 때문에 Parseval's theorem에 의해 식 (23)의 좌변은 0이 된다^[8]. 최종적으로 식 (23)을 행렬식 형태로 표현할 수 있다.

$$[0] = [Z][I]. \quad (24)$$

여기에서 각 행렬의 성분은 다음과 같다.

$$Z_{ij} = \sum_{n=m}^{\infty} \vec{J}_{si}^+ S(n,m) \vec{Y}^{-1} \vec{J}_{sj}(n) \quad (25)$$

$$[I]^T = [I_1 I_2 I_3 \dots I_N]. \quad (26)$$

Homogeneous equation에서 전류($[I]$)가 0이 아니어야 공진 특성을 살펴볼 수 있으므로 식 (24)가 nontrivial solution을 가져야 한다.

$$Det([Z(f)]) = 0. \quad (27)$$

하나의 특정 모드만 가지는 경우이거나 여러 모드들의 합으로 이루어진 경우에서 식 (27)을 만족하는 값은 복소수($f = f' + i f''$)가 나오게 되어 복소 공진(complex resonance)이라 부를 수 있다. 복소수의 실수 성분(f')은 공진 주파수를 나타내고, 허수 성분(f'')은 방사 손실(radiation loss)을 나타낸다. 따라서 특정 모드의 공진 주파수(f_r)와 Q (quality factor)^[15]를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_r = Re(f) \quad (28)$$

$$Q = \frac{Re(f)}{2 Im(f)} \quad (29)$$

이를 통해 구형 패치의 공진 특성을 살펴볼 수 있다.

III. 구형 패치의 방사 특성

2장에서 특정 모드의 공진 주파수와 Q 를 계산하여 공진 특성을 계산하였으며, 특정 모드의 공진 특성뿐만 아니라 방사 특성도 알아볼 수 있다. 특정 모드의 방사 특성을 알아보기 위해서는 전류 분포와 그에 해당하는 주파수를 정해야 한다. 이를 위해 특정 모드의 공진 주파수에서 그 모드에 해당하는 기저 함수와 함께 전류 분포가 형성된다고 생각할 수 있다. 특정 모드에 해당하는 전류 분포의 기저 함수와 식 (14)를 이용하면 식 (12)에서 계수인 C_n, D_n 을 구할 수 있고, 구형 유전체 외부에서의 전기장을 얻을 수 있다.

$$C_n = \frac{j\sqrt{\mu_0\epsilon_0}a}{\widehat{H}_n^{(2)'}(k_0a)} \frac{\widetilde{J}_U(n)}{Y_{11}(n)} \quad (30)$$

$$D_n = \frac{\epsilon_0 a}{\widehat{H}_n^{(2)}(k_0a)} \frac{\widetilde{J}_L(n)}{Y_{22}(n)} \quad (31)$$

여기에서 $\widetilde{J}_U(n), \widetilde{J}_L(n)$ 은 다음과 같이 표면 전류 행렬의 성분이다.

$$\widetilde{J}_s(n) = \begin{bmatrix} \widetilde{J}_U(n) \\ \widetilde{J}_L(n) \end{bmatrix} \quad (32)$$

방사 특성을 살펴보기 위해 원거리(far region)에서의 전기장을 계산해야 하므로 Hankel function의 large-argument asymptotic formula을 이용하여 식을 비교적 간단히 할 수 있다. Large-argument asymptotic formula와 식 (30), (31)을 적용하여 스펙트럴 영역에서 전기장을 구한 후 이를 공간 영역으로 변환한 전기장에 관한 식^[11]은 다음과 같다.

$$E_\theta^a = \frac{e^{-jk_0r}}{r} \cos m\phi \times \sum_{n=m}^{\infty} \left[\frac{-j^{n+1}}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} C_n \frac{\partial P_n^m(\cos\theta)}{\partial\theta} + \frac{j^n}{\epsilon_0} D_n \frac{mP_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} \right] \quad (33)$$

$$E_\phi^a = \frac{e^{-jk_0r}}{r} \sin m\phi \times \sum_{n=m}^{\infty} \left[\frac{j^n}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} C_n \frac{mP_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} + \right]$$

$$\left. \frac{j^{n+1}}{\epsilon_0} D_n \frac{\partial P_n^m(\cos\theta)}{\partial\theta} \right]. \quad (34)$$

식 (27), (28)을 이용하여 특정 모드의 공진 주파수에서 전기장을 계산할 수 있고, 이를 통해 방사 특성을 알 수 있다.

IV. 계산 결과

4-1 자유 공간에서의 구형 패치의 특성

표 1에 접지면이 있는 구조^[8]에서 TM₁₁의 공진 주파수 결과가 제시되어 있다. 접지면 역할을 하는 PEC로 이루어진 구의 반지름(a_p)이 커지면 곡률이 작아지게 되므로 평면형 구조와 가까워진다. 표 1을 보면 substrate의 높이(h)가 일정할 때, a_p 가 커짐에 따라 평면형 구조의 값^[14]과 유사해지는 것을 알 수 있다. 접지면이 있는 구조 해석을 위해 적용한 방법과 접지면이 없는 구조 해석을 위해 적용한 방법이 같으므로 본 논문에서 제시한 해석 방법과 결과가 타당함을 유추할 수 있다.

구형 유전체의 유전 상수(ϵ_r)를 1로 하면, 유전체가 없는 자유 공간에서의 구형 패치의 특성을 알아볼 수 있는데, 그림 2와 그림 3에 구형 패치의 크기가 변화할 때, TM 모드의 공진 주파수와 Q 의 변화를 나타내었다. r_d 가 커질수록 공진 주파수가 작아지는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 평면 구조에서도 확인할 수 있는 경향이다. 자유 공간에서 Q 는 구조가 변화하더라도 거의 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 구형 패치의 위와 아래가 모두 유전율이 같기 때문이다. 또한, 그림 4와 그림

표 1. 접지면이 있을 때, PEC 구의 반지름(a_p) 변화에 따른 TM₁₁의 공진 주파수: $r_d=2.2$ cm, $h=3$ mm

Table 1. Resonant frequency of TM₁₁ with variation of PEC sphere radius(a_p) on a ground sphere: $r_d=2.2$ cm, $h=3$ mm.

a_p [cm]	5	10	20	Planar (∞)
Resonant Freq. [GHz]	2.033	1.924	1.889	1.903

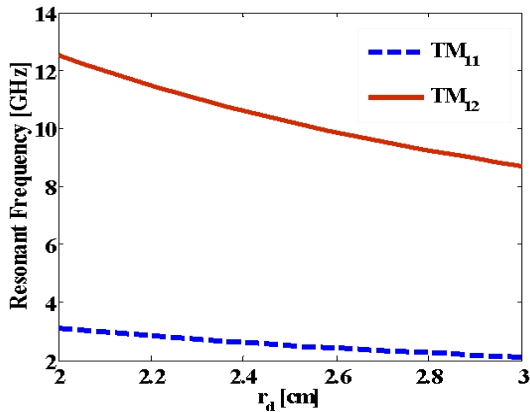


그림 2. 패치의 반지름(r_d) 변화에 따른 공진 주파수: $\epsilon_r = 1$

Fig. 2. Resonant frequency with variation of patch radius(r_d): $\epsilon_r = 1$.

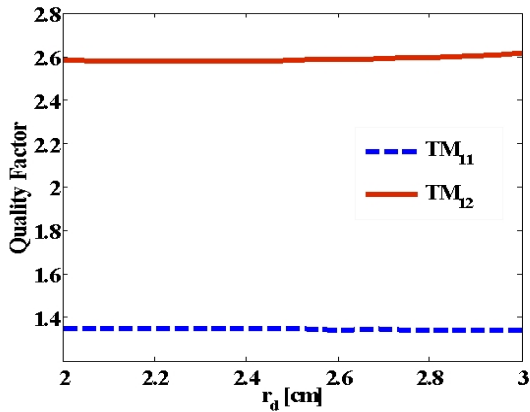


그림 3. 패치의 반지름(r_d) 변화에 따른 Q: $\epsilon_r = 1$

Fig. 3. Q with variation of patch radius(r_d): $\epsilon_r = 1$.

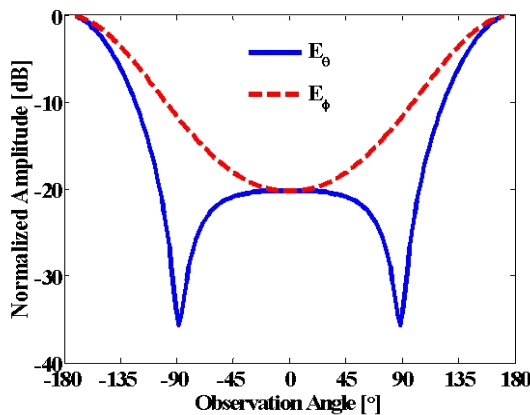


그림 4. TM_{11} 의 전기장: $r_d = 2.2$, $\epsilon_r = 1$

Fig. 4. Electric field of TM_{11} : $r_d = 2.2$, $\epsilon_r = 1$.

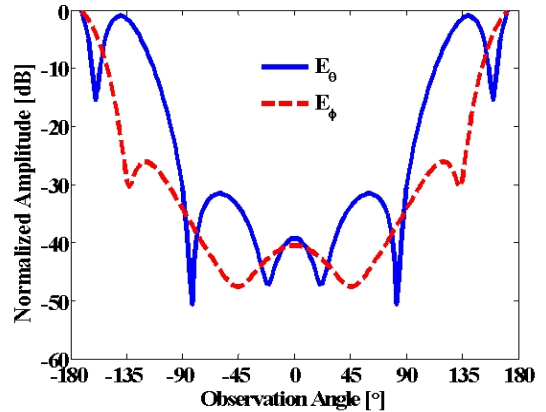


그림 5. TM_{12} 의 전기장: $r_d = 2.2$, $\epsilon_r = 1$

Fig. 5. Electric field of TM_{12} : $r_d = 2.2$, $\epsilon_r = 1$.

5에 동일 해석 구조에 대해 TM_{11} 과 TM_{12} 의 방사 특성을 나타내었다. 모두 180°에서 최댓값을 가지는 것을 알 수 있으며, 각 모드의 특성을 확인할 수 있다.

4-2 구형 유전체 위에 있는 구형 패치의 특성

본 논문에서는 또한 구형 유전체의 유전 상수(ϵ_r)를 3과 6으로 하여 구형 유전체가 있을 때, 구형 패치의 특성에 대해 알아보았다. 그림 6과 그림 7에 구형 패치의 반지름(r_d)은 2 cm로 하고, 구형 유전체의 반지름(a)을 변화시킬 때의 공진 주파수와 Q의 변화가 제시되어 있다. 우선 유전 상수(ϵ_r)가 다르게 되면 공진 특성이 변화가 된다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 구형 패치의 반지름이 고정되어 있을 때, 구형 유전체의 반지름이 커지면 구형 패치의 폭률이 작아지는 것으로 생각할 수 있으므로 유전체의 특성뿐만 아니라 패치의 폭률도 중요한 요소임을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9에 제시된 TM_{11} 의 원거리장을 통해 방사 특성을 알 수 있다. 자유 공간에서와 마찬가지로 180°에서 최댓값을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 유전 상수가 변화면서 전체적인 패턴과 0°에서의 값이 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 제시한 공진 특성과 방사 패턴은 급전 구조를 고려하지 않은 결과들로 구형 패치에 급전을 하기 위해서는 탐침(probe)을 이용한 구조가 대표적이며, 탐침은 선 전류원(line current source)으로 근사하여 구형 패치의 표면 전류뿐만 아니라 탐침의

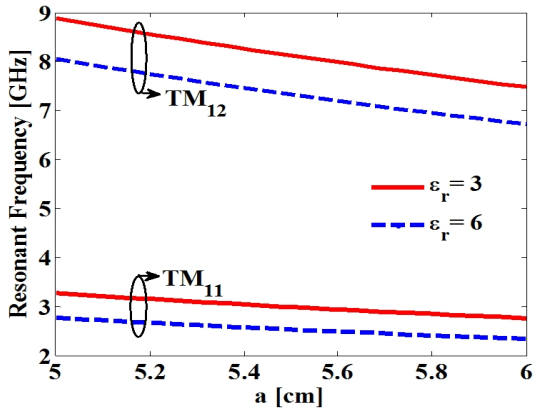


그림 6. 유전체 반지름(a) 변화에 따른 공진 주파수: $r_d = 2$ cm

Fig. 6. Resonant frequency with variation of dielectric sphere radius(a): $r_d = 2$ cm.

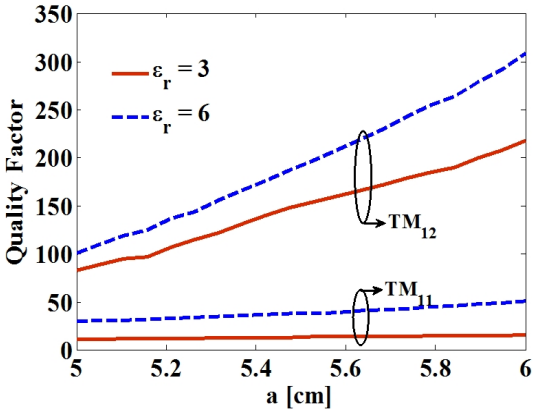


그림 7. 유전체 반지름(a) 변화에 따른 Q: $r_d = 2$ cm

Fig. 7. Q with variation of dielectric sphere radius(a): $r_d = 2$ cm.

전류까지 모두 고려하면 급전 구조가 있을 때의 특성도 살펴볼 수 있을 것이다. 곡면에서도 평면의 경우와 비슷하게 TM_{11} 의 특성이 탐침의 위치와 전류 크기에 따라 공진 주파수와 Q, 방사 특성이 변할 것으로 예상된다. 본 논문에서의 구조는 일반적인 접지면이 없기 때문에, 동축 케이블로 급전할 경우에는 동축 케이블 안의 접지면만 고려하여 임피던스를 계산하여야 할 것이다. 유전체의 두께가 작거나 구형 패치가 많이 휘어진 구조일 경우, 또한 접지면이 없을 경우일수록 공진 주파수에서 임피던스의 실수 성분이 커져서 복사가 잘 될 것으로 예상된다.

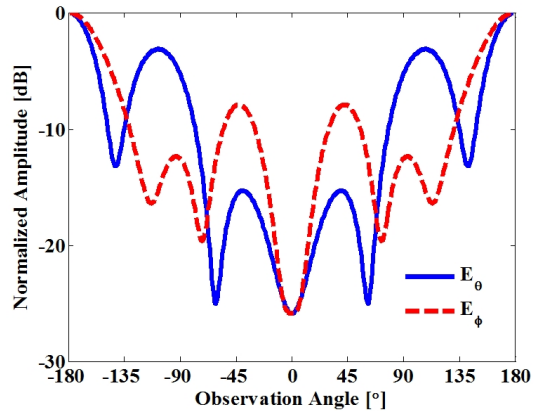


그림 8. TM_{11} 의 원거리장: $a = 5$ cm, $r_d = 2$ cm, $\epsilon_r = 3$

Fig. 8. Far field of TM_{11} : $a = 5$ cm, $r_d = 2$ cm, $\epsilon_r = 3$.

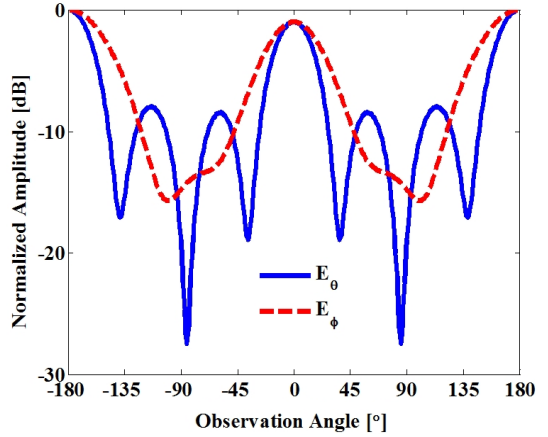


그림 9. TM_{11} 의 원거리장: $a = 5$ cm, $r_d = 2$ cm, $\epsilon_r = 6$

Fig. 9. Far field of TM_{11} : $a = 5$ cm, $r_d = 2$ cm, $\epsilon_r = 6$.

V. 결 론

본 논문에서는 구형 유전체의 해석을 위해 스펙트럴 영역 해석법(Spectral Domain Analysis method)를 적용하고 vector Legendre transform pair와 Galerkin's method를 이용하여 공간 영역에서의 전기장과 자기장을 스펙트럴 영역으로 변환한 후 대수식으로 정리하여 효율적으로 전파 특성을 계산할 수 있었으며, 이를 통해 구형 패치의 반지름이나 곡률, 유전체의 특성이 구형 패치의 특성에 미치는 영향을 해석하였다. 구형 유전체 위에 놓인 구형 패치의 공진

주파수, Q , 원거리에서의 전기장을 계산하였고, 이를 토대로 전파 특성으로서 공진 특성과 방사 특성을 해석하였다. 또한, 자유 공간일 경우와 구형 유전체가 있는 경우의 구형 패치에 대한 전파 특성 차이를 계산하였으며, 구형 패치의 곡률과 유전체의 유전상수가 전파 특성을 변화시키는 것을 알 수 있었다. 향후 여러 개의 패치가 존재하는 경우 발생하는 결합 효과 및 방사 특성 해석에 관련한 연구가 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

- [1] T. Kashiva, T. Onishi, and I. Fukai, "Analysis of microstrip antennas on a curved surface using the conformal grids FD-TD method", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 42, pp. 423-427, 1994.
- [2] Hyun Kim, Il-Suek Koh, and Jong-Gwan Yook, "Enhanced total-field/scattered-field technique for isotropic-dispersion FDTD scheme", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 10, pp. 3407-3411, Oct. 2010.
- [3] T. Ozdemir, J. L. Volakis, "Triangular prisms for edge-based vector finite element analysis of conformal antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 45, pp. 788-797, 1997.
- [4] S. S. Vinogradov, P. D. Smith, and E. D. Vinogradova, *Canonical Problems in Scattering and Potential Theory*, Champan & Hall/CRC, 2002.
- [5] T. H. Wang, T. Itoh, and H. Ling, "Spectral domain analysis of a coupled slot antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 11, pp. 1620-1624, Nov. 1988.
- [6] S. M. Ali, T. M. Habashy, J. F. Kiang, and J. A. Kong, "Resonance in cylindrical-rectangular and wraparound microstrip structures", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 79, no. 11, pp. 1773-1783, Nov. 1991.
- [7] T. M. Habashy, S. M. Ali, and J. A. Kong, "Input impedance and radiation pattern of cylindrical rectangular and wraparound microstrip antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 38, no. 5, pp. 722-731, May 1990.
- [8] W. Y. Tam, K. M. Luk, "Resonance in spherical circular microstrip structures", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 39, no. 4, pp. 700-704, Apr. 1991.
- [9] T. J. Chang, H. T. Chen, "Full wave analysis of scattering form a spherical-circular microstrip antenna", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 49-52, Sep. 1995.
- [10] 우종명, "완전도체구의 산란 특성", 한국전자과학회논문지, 9(3), pp. 225-230, 1998년 6월.
- [11] Kin-Lu Wong, *Design of Nonplanar Microstrip Antennas and Transmission Lines*, John Wiley & Sons, 1999.
- [12] Shanjie Zhang, Jian-Ming Jin, *Computation of Special Functions*, John Wiley & Sons, 1996.
- [13] Jian-Ming Jin, *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*, John Wiley & Sons, 2010.
- [14] L. C. Shen, S. A. Long, M. R. Allarding, and M. D. Walton, "Resonant frequency of a circular disc, printed-circuit antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 25, no. 4, pp. 595-596, Jul. 1977.
- [15] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, New York: Mcgraw-Hill, 1966.
- [16] Y. T. Lo, D. Solomon, and W. F. Richards, "Theory and experiment on microstrip antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-27, pp. 137-145, 1979.

정 이 루



2010년 2월: 연세대학교 전기전자 공학과 (공학사)
2010년 3월~현재: 연세대학교 전기 전자공학과 통합과정
[주 관심분야] 전자기 수치해석, FSS

전 흥 재



1986년: 연세대학교 기계공학과 (공학사)
1988년: 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
1990년~1994년: Northwestern University 기계공학과 (공학박사)
1994년~1997년: Northwestern University 기계공학과 (Post Doc.)
1997년~현재: 연세대학교 기계공학과 교수
[주 관심분야] Radome 설계, FSS 구조 해석

홍 익 표



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원
2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting Scholar
2003년 3월~현재: 공주대학교 정보통신공학부 부교수
[주 관심분야] 전자기 수치해석, 스펙트럼 관리, 이동 통신

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 12월: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
1997년~1998년: University of Michigan, Post-Doctorial Research Fellow
1998년~1999년: Qualcomm Inc. Senior Engineer
1999년~2000년: 광주과학기술원 정보통신공학과 조교수
2000년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 조/부/교수
[주 관심분야] 마이크로파 시스템 해석 및 설계, Computational Electromagnetics, RF MEMS, Bio-radar and Sensors, EMI/EMC, 안테나 시스템

이 명 건



1990년 2월: 인하대학교 항공공학과 (공학사)
1992년 2월: 인하대학교 항공공학과 (공학석사)
1993년 3월~현재: 국방과학연구소 연구원
[주 관심분야] Stealth, Radome, Composite Structure 등