

무선 전력전송을 위한 강제 공진형 소형 공동 안테나

김기채 권익승
 영남대학교 LG정보통신

Characteristics of Forced Resonant Type Small Cavity-Backed Slot Antenna for Electromagnetic Power Transmission

Ki-Chai Kim Ick Seung Kwon

School of Electrical and Electronic Engineering, Yeungnam University

Tel: 053-810-2583 kckim@ynucc.yeungnam.ac.kr

요약 본 논문에서는 전기적으로 소형인 공동의 내부에 급전 및 무급전 포스트를 개구면과 평행으로 배치하고 무급전 포스트에 접속시킨 외부 리액턴스를 이용하여 공동을 강제적으로 공진시킬 수 있으며, 또한 개구면과 대향하고 있는 공동벽을 제거함으로써 안테나의 열 특성이 양호할 뿐만 아니라 안테나의 무게도 줄일 수 있는 소형의 공동 안테나를 제안하고 있다. 본 안테나는 마이크로파 회로부를 공동에 접한 측면부분에 장착시킬 수 있는 구조적 특징을 가지고 있다. 이론해석의 결과, 개구면의 폭이 좁을수록 공동의 깊이를 알게 할 수 있으므로 공동의 체적을 줄일 수 있다는 것을 확인하고 있다.

1. 서론

우주에 거대한 태양전지 발전소를 설치하고 발전된 전력을 지상으로 마이크로파를 사용하여 송전하고 지상에서 그 전력을 이용하는 SPS (Solar Power Satellite) 시스템에 관한 연구가 진행되고 있다[1]. SPS 시스템을 위한 송전 안테나용 소자로서 공동이 부착된 슬롯 안테나가 제안되어 있다[2,3]. 문헌 [2]의 안테나는 제작의 용이성 등을 고려하여 급전 포스트가 개구면과 서로 직각이 되는 구조로 되어 있으며 마이크로파 회로부는 공동의 밑부분에 장착되는 구조이다. 이 안테나는 급전 포스트가 개구면과 서로 직각이 되므로 개구면을 효과적으로 여기시킬 수 없다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 공동의 개구를 효과적으로 여기시키기 위하여 급전 및 무급전 포스트를 개구면과 평행하게 배치하고 무급전 포스트에는 외부 리액턴스를 장하하여 이를 적절히 조정함으로써 공동을 강제적으로 공진시킬 수 있는 소형 공동 안테나를 제

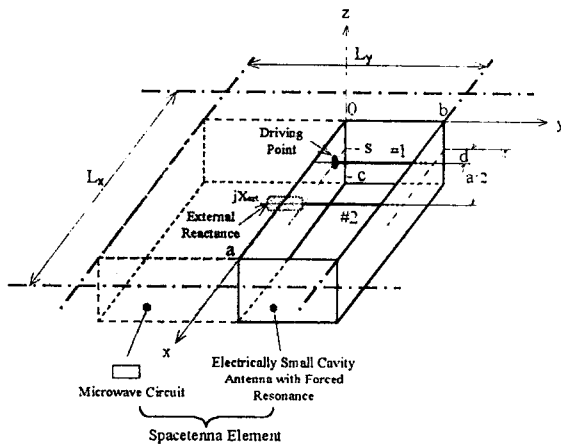


그림 1. 무선 전력전송을 위한 강제 공진형 소형 공동 안테나의 구조와 좌표계

제안하고 안테나의 기본 특성을 검토하였다. 본 안테나는 개구면과 대향하는 공동벽을 제거하여도 안테나의 공진특성에는 영향을 미치지 않는 구조적

특징을 가지므로 안테나의 무게를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 안테나의 열특성도 좋게 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

수치계산 결과, 특성 임피던스가 50 Ω인 급전 선로와 완전정합을 취하기 위해서는 급전 포스트의 위치를 $d = 0.0455\lambda$ 로 선택하여 무급전 포스트에 장하 리액턴스 $X_{in} = 677.4 \Omega$ 를 접속시키면 되고, 개구면과 대항하는 공동벽은 $c = 0.35\lambda$ 정도 이상이면 안테나의 공진 특성에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

2. 이론 해석

그림 1은 전기적 소형 공동이 부착된 강제 공진형 공동 안테나의 구조와 좌표계를 나타낸다. $z=0$ 면에 놓여진 무한히 넓은 도체판 위에 개구면 ($a \times b$)이 있고, 개구면의 뒷면에는 단면 $a \times b$, 깊이 c 인 공동이 부착되어 있다. 부착된 공동의 단면의 크기는 전기적으로 소형인 치수이다. 이러한 공동의 내부에는 반경이 r 인 급전용의 포스트가 $z=-s$, $x=d$ 의 위치에 배치되어 있으며, 공동 단면의 중앙 $x=a/2$ 에 위치한 무급전 포스트의 끝단에는 공동을 강제적으로 공진시키기 위한 외부 리액턴스 소자 jX_{in} 가 접속되어 있다. 그림 1에서 $L \times L$ 의 크기는 본 안테나 소자를 이용하여 배열 안테나로 하였을 경우 빔 스캐닝시에 최대 부엽이 발생하지 않는 소자간격이며 $L \leq 0.78\lambda$, $L \leq 0.67\lambda$ 으로 선택한다. 그림 1에서 보는 것처럼 공동의 측면에 접속되어 있는 박스형 부분은 스페이스테나의 마이크로파 회로를 구성하는 부분이다. 본 안테나는 강제 공진형의 전기적 소형 공동을 사용하고 있으므로 공동의 체적을 줄일 수 있기 때문에 마이크로파 회로부분은 공동의 측면에 장착시킬 수 있다. 따라서 공동의 밑부분에 접속하는 일반적인 구조와는 다르다는 것이 본 스페이스테나의 구조적 특징이다.

그림 1에서 전자계를 공동영역 I ($z < 0$) 및 반무한공간 영역 II ($z > 0$)으로 분할하고, 급전 포스트

의 $y=0$ 인 위치에서 전압 V 인 델타함수적 전원으로 급전한다고 가정하면, 급전 및 무급전 포스트에 흐르는 전류분포 J 및 J' 와 개구면 전개분포 E_z 에 관한 연립 적분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_S \bar{K}'_{zn} \cdot J_n dS'_n + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{S'} \bar{K}'_{zn} \cdot J'_n dS'_n + \iint_{S'} \bar{K}'_{zn} \cdot [\hat{z} \times E_n] dS'_n = -V \hat{y} \delta(y) \quad (1)$$

$$\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_S \bar{K}'_{zn} \cdot J_n dS'_n + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{S'} \bar{K}'_{zn} \cdot J'_n dS'_n + \iint_{S'} \bar{K}'_{zn} \cdot [\hat{z} \times E_n] dS'_n = jX_{in} \hat{y} I_z(0) \delta(y) \quad (2)$$

$$\hat{z} \times \left\{ \iint_S \bar{K}'_{zn} \cdot J_n dS'_n + \iint_{S'} \bar{K}'_{zn} \cdot J'_n dS'_n + \frac{1}{j\omega\mu_0} \iint_{S'} \bar{K}'_{zn} \cdot [\hat{z} \times E_n] dS'_n \right\} = (-\hat{z}) \times \frac{1}{j\omega\mu_0} \iint_{S'} \bar{K}'_{zn} \cdot [-\hat{z} \times E_n] dS'_n \quad (3)$$

여기서, \hat{z} 는 z 방향의 단위벡터이며, \bar{K}'_{zn} , \bar{K}'_{zn} 등의 적분핵은 전류원 및 자유원이 전계와 자계를 생성시키는 다이애틱 그린함수이다. 또한, 시간 의존성은 $\exp(j\omega t)$ 이며, $k_n = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 2\pi/\lambda$ 이다. r 및 r' 은 관측점 및 파원점의 위치벡터이며, S , S' 및 S'' 는 각각 급전 포스트의 표면, 무급전 포스트의 표면 및 $z=0$ 의 개구면을 나타낸다. 또한 급전 포스트의 반경이 사용과장에 비해 충분히 작다고 생각하여 전류는 포스트의 중심축에 집중하여 흐른다고 가정하고 있다.

개구면 전개분포와 포스트에 흐르는 전류분포를 구하기 위해 연립적분방정식 (1)-(3)을 모멘트법[3]으로 해석한다. 모멘트법으로 해석하기 위해 급전 및 무급전 포스트에 흐르는 전류분포 J , J' 와 슬롯의 개구면 전개분포 E_z 를 다음과 같은 기지의 함수로 전개한다.

$$J_x(y) = \hat{y} \sum_{n=0}^{\infty} I_n \cos \frac{u_n y}{b} \quad (4)$$

$$J'_x(y) = \hat{y} \sum_{n=0}^{\infty} I'_n \cos \frac{v_n y}{b} \quad (5)$$

$$E_z(x, y) = \hat{x} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} E_{mn} \cos \frac{p_m x}{a} \sin \frac{q_n y}{b}$$

$$+ j \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{mn} \sin \frac{p\pi x}{a} \cos \frac{q\pi y}{b} \quad (6)$$

여기서, \hat{x} , \hat{y} 는 각각 x, y 방향의 단위벡터이며, I_x, I_y, E_{mn}, E_{pn} 는 구해야 할 전개계수이다. 식 (4) - (6)을 연립적분방정식 (1) - (3)에 대입하고 Galerkin 법을 적용하면 연립적분방정식은 연립일차 방정식으로 귀착되며 전개계수들을 구하면 스페이스태나의 제반특성을 구할 수 있다.

공동의 외부에 접속된 리액턴스를 적절하게 조절하면 공동 안테나의 입력 임피던스를 제어할 수 있으며 전기적으로 소형인 공동안테나를 강제적으로 공진시킬 수 있다. 급전점에서 공진을 얻기 위한 공진조건은 다음식으로 주어진다.

$$\text{Im}\{Z_{in}(y, jX_{in})\} = 0 \quad (7)$$

여기서, Z_{in} 은 안테나의 입력 임피던스이며 Im 은 허수부를 나타낸다. 입력 임피던스는 급전점 (포트 1) 및 장하점 (포트 2)에 착목한 4 단자 회로망의 어드미턴스 파라미터 $y_{ij}(i, j=1, 2)$ 를 사용하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{y_{22} + (1/jX_{in})}{y_{11}[y_{22} + (1/jX_{in})] - y_{12}^2} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)의 공진조건식에 대입하여 안테나가 강제적으로 공진하도록 하는 리액턴스의 결정방정식을 유도하면 다음식과 같다.

$$X_{in} = \frac{2y_{12}'}{(-E \pm D)} \quad (9a)$$

$$kt = \tan^{-1} \left(\frac{2y_{12}'}{Z_{in}(-E \pm D)} \right) \quad (9b)$$

여기서, $D = \sqrt{E^2 - 4y_{12}'G}$, $E = (y_{11}')^2 - 2y_{12}'y_{22}' - (y_{22}')^2$, $G = y_{11}'(y_{22}')^2 + y_{12}'(y_{22}')^2 - 2y_{12}'y_{22}'$, $y_{12}' - y_{22}'(y_{11}')^2$ 이다. 여기서 y_{12}' 와 y_{22}' 는 각각 y_{ij} 의 실수부와 허수부를 나타낸다. 식 (9b)는 리액턴스를 특성 임피던스가 Z_{in} 인 끝단 단락인 전송선로로 구성하면 $jX_{in} = jZ_{in} \tan(kt)$ 로 나타낼 수 있으므로, 이를 식 (9a)에 대입하여 kt 에 대해 정리한 것이다. 또한 식 (9)에서 분모의 복호는 +인 경우는 직렬공

진에 해당하고 -부호인 경우는 병렬공진에 해당한다.

식 (9)로부터 구한 리액턴스를 장하하면 입력 임피던스의 허수부분만 0이 되어 공진하게 되는데 완전정합을 얻기 위해서는 급전 포스트의 위치를 조절하여 입력 임피던스의 실수부분을 정합시킨다.

3. 수치계산 결과

그림 2는 급전 포스트의 위치를 변화시켰을 때, 공진조건식 (7)을 만족하는 외부 장하 리액턴스의 값을 개구면의 폭을 파라미터로 하여 식 (9)로부터 계산한 것이다. 이 장하 리액턴스의 값을 부급전 포스트의 외부에 장하시키면 안테나는 강제적으로 공진하게 되는데, 그림 2에는 공진할 때의 입력 저항도 함께 나타내었다. 예로서 $b=0.2\lambda$ 인 경우 급전 포스트의 위치를 $d=0.0455\lambda$ 로 선택하고 부급전 포스트에 $X_{in}=677.4\Omega$ 를 장하하면 직렬공진이 일어나며 이 때의 입력저항은 급전선로의 특성 임피던스 50Ω 과 같아지며 완전정합이 얻어진다는 것을 알 수 있다. 또한 개구면의 폭이 작으면 입력 저항도 작아진다는 것을 확인할 수 있다. 병렬공진인 경우는 안테나의 입력 저항이 아주 크게 되므로 본 논문에서는 직렬 공진인 경우만 논의하고 있다.

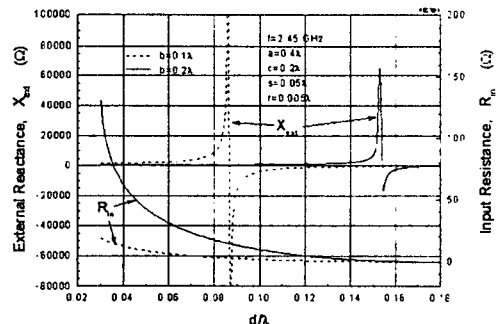


그림 2. 급전 포스트의 위치에 대한 공진을 일으키게 하는 외부 리액턴스 및 공진시의 입력 저항

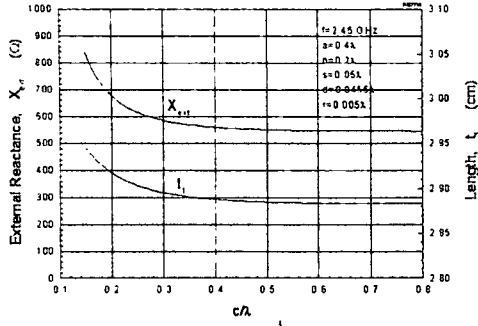


그림 3. 공동의 깊이에 대한 공진을 일으키게 하는 리액턴스 및 리액턴스의 길이

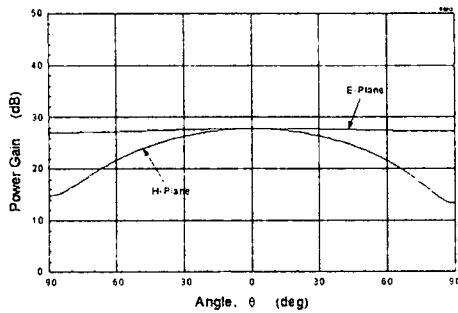


그림 4. 전력 이득의 계산치

그림 3은 강제적으로 직렬공진을 일으키게 하는 장하 리액턴스의 값과 리액턴스의 길이를 공동의 깊이에 대하여 계산한 것이다. 그림 3으로부터 알 수 있는 것처럼 공동의 깊이가 $c \approx 0.35\lambda$ 이상이 되면 개구면과 대향하는 공동벽이 없는 경우와 동등하다. 즉 공동벽을 제거하면 공동의 열 특성을 양호하게 할 수 있으며 공동의 무게를 줄일 수 있다.

본 논문에서 제안하고 있는 구조는 급전 포스트가 개구면과 평행이므로 개구를 효과적으로 여진시킬 수 있을 뿐만 아니라, 개구면과 대향하는 공동벽을 제거할 수 있으므로 열 특성을 개선할 수 있고 마이크로파 회로부분을 공동의 측벽에 장착시킬 수 있는 특징이 있다. 문헌[2]에서 제안하고 있는 무선 전력전송용 공동 안테나는 포스트가 개구

면과 직각이므로 개구를 효과적으로 여진 시키기가 어려우며 마이크로파 회로부분을 공동의 밑면에 장착시키고 있다.

그림 4는 완전정합이 취해진 경우의 전력이득을 나타내고 있다. 그림 4로부터 알 수 있는 것처럼 주지향성의 방향은 천정 방향이며 이 때의 전력이득은 27.9 dB이다.

4. 결론

무선 전력전송용 스페이스테나의 개발을 목적으로 열 특성이 양호한 전기적 소형 공동 안테나를 제안하였다. 본 안테나는 공동의 내부에 급전 및 무급전 포스트를 배치하고 무급전 포스트에 접속한 리액턴스의 값을 적절히 조절하면 안테나가 강제적으로 공진되는 특징을 가지고 있다. 본 스페이스테나는 개구면과 대향하는 공동벽을 제거할 수 있으므로 안테나의 무게를 줄일 수 있으며 열 특성도 개선시킬 수 있다. 또한 본 안테나는 개구를 효율적으로 여진시킬 수 있는 구조일 뿐만 아니라 마이크로파 회로부분을 공동의 측면부분에 장착할 수 있는 특징이 있으므로 스페이스테나 또는 렉테나 소자로서 유용하게 이용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] P.E. Glaser, F.P. Davidson, and K.I. Csizs. ed., Solar Power Satellite - The Emerging Energy Option, Ellis Horwood, New York, 1993.
- [2] T. Hikage, N. Ohno, M. Omiya, and K. Itoh, "Proposal of cavity-backed slot antennas for the microwave energy transmission," IEICE Trans., vol.J81-B-II, no.3, pp.218-225, March 1998.
- [3] I. S. Kwon and K. C. Kim, "Forced Resonant Type Small Cavity-Backed Slot Antennas for Electromagnetic Power Transmission", Proceedings of ISAP 2000, pp.717-720, Fukuoka, Aug. 2000.