

## 무선전력전송용 고지향성 Low-Profile 패치 안테나 설계

# High-Directivity Low-Profile Patch Antenna for Wireless Power Transmission

강은정 · 서철현 · 추호성\*

Eunjung Kang · Cheolhun Seo · Hosung Choo\*

### 요약

본 논문에서는 마이크로파 방식의 무선전력전송에 적용하기 위한 고지향성 low-profile 패치 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 패치안테나를 캐비티 모델 이론을 바탕으로 하여 기본모드와 고차모드를 분석하고, 지향성 수식을 이용하여 최대 지향성을 가지는 방사체 크기를 도출하였다. 또한, low-profile 특성을 얻기 위해 최적 유전 상수를 적용하여 제작 비용 및 설계 구조를 단순화한 고지향성 low-profile 패치 안테나를 설계하였다. 제안된 패치 방사체는 한 변의 길이가  $0.63 \lambda_0$ 이고, 기판의 유전율이 5.4일 때, 최대 지향성이 11.4 dBi임을 확인하였다. 측정과 시뮬레이션 전면방향이득은 5.8 GHz에서 각각 8.5 dBi, 10.1 dBi이며, 안테나의 반사계수는 각각  $-12$  dB,  $-12.7$  dB임을 확인하였다.

### Abstract

In this study, we propose a high-directivity low-profile patch antenna for microwave wireless power transmission systems. The proposed antenna is analyzed according to fundamental and higher-order modes based on the cavity theory, and high-directivity characteristics are derived with an optimum patch size using the directivity formula. To achieve low-profile characteristics, a high-directivity patch antenna is designed by applying the optimum permittivity, which can simplify the structure and lower the manufacturing cost. For a side length of  $0.63 \lambda_0$  and substrate permittivity of 5.4, a maximum directivity of 11.4 dBi is observed. The measured and simulated reflection coefficients are  $-12$  dB and  $-12.7$  dB at 5.8 GHz, respectively, and the bore-sight gains are 8.5 dBi and 10.1 dBi at 5.8 GHz, respectively.

Key words: Gain Enhancement, Higher-Order Mode, Wireless Power Transmission

### I. 서론

최근 무선전력전송 기술은 모바일장치, 체내 삽입형 의료기기, 자동차 등 다양한 산업 분야에서 전원을 공급하기 위한 수단으로 사용되고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 무선전력전송 방

식으로는 전송방식에 따라 자기유도, 자기공명, 마이크로파 방식으로 분류할 수 있으며, 그 중 마이크로파 방식은 다른 방식들보다 장거리 전력전송이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 자유공간에서 전송거리가 증가함에 따라 전력 손실이 커지는 단점이 있어 높은 지향성을 가지는 송,

「이 연구는 2015년도 및 2017년도 정부(교육부, 과학기술정보통신부와 이공분야 기초연구사업)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A5A1015596, 2015R1A6A1A03031833).」

송실대학교 정보통신전자공학부(Department of Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

\*홍익대학교 전자전기공학부(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· Manuscript received June 28, 2021 ; Revised July 30, 2021 ; Accepted September 29, 2021. (ID No. 202100628-010S)

· Corresponding Author: Hosung Choo (e-mail: [hschoo@hongik.ac.kr](mailto:hschoo@hongik.ac.kr))

수신 안테나 설계를 필요로 한다. 송, 수신 안테나의 지향성을 높이기 위한 연구로는 패치 안테나에 메타표면 적층<sup>[3]</sup>, 단락핀 삽입<sup>[4]</sup>, 디랙터를 삽입하는 연구<sup>[5]</sup> 등이 있지만, 이러한 방식들은 제작 과정이 복잡하며, 비용이 비싸다는 단점이 있다.

본 논문에서는 마이크로파방식의 무선전력전송에 적용하기 위한 무선전력전송용 고지향성 low-profile 패치 안테나 설계를 제안한다. 제안된 안테나는 고지향성을 도출하기 위하여 고차모드를 사용하였으며, 패치안테나를 캐비티 모델 이론으로 해석하여 기본모드와 고차모드를 분석하고, 지향성 수식을 바탕으로 최대 지향성을 가지는 방사체 크기를 도출하였다. 또한, low-profile 특성을 적용하기 위해 최적 유전율을 도출하고,  $0.63 \lambda_0$ 의 길이를 가진 기존의 기본모드인  $TM_{010}$  모드 패치 안테나보다 전면 방향에서 약 6 dB의 지향성 증가가 있음을 확인하였다.

## II. 고차모드 패치 안테나 설계 및 분석

그림 1은 캐비티 모델로 해석한 패치 안테나의 기본모드 및 고차모드 개념도를 나타낸다. 그림 1(a)는 기본모드인  $TM_{010}$  동작하는 패치 안테나를 해석하기 위한 캐비티 모델을 나타내며, 그림 1(b)는 고차모드 중  $TM_{030}$ 모드로 동작하는 캐비티 모델을 보여준다. 길이가  $L$ , 너비가

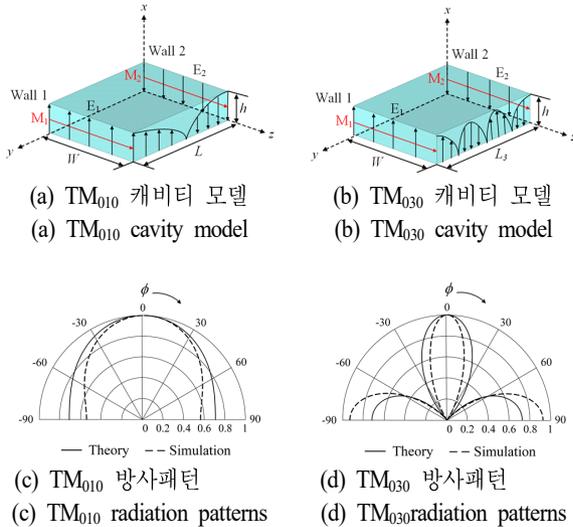


그림 1.  $TM_{010}$ ,  $TM_{030}$  캐비티 모델과 방사패턴  
Fig. 1. Figure of the patch cavity model and radiation patterns.

$W$ , 높이  $h$ 를 가지는 패치 안테나는 위, 아래는 전기 도체벽, 측벽은 자기도체벽으로 이루어진 캐비티 모델로 나타낼 수 있으며, Huygens' principle에 의해 Wall 1과 Wall 2에서는 등가 자기 전류 밀도  $M_s$ 가 형성된다.  $y$ 축 방향의 측벽에서는 등가 자기 전류 밀도는 서로 상쇄되며,  $z$ 축에서 생성된 등가 자기 전류 밀도  $M_s$ 는 거리가  $L_3$ 만큼 떨어져 있다. Homogeneous wave equation을 바탕으로, 맥스웰 방정식을 통해 Magnetic vector potential의 해를 찾고, 캐비티 모델의 맥스웰 방정식과 경계조건을 이용하면 파수  $k$ 의 값을 찾을 수 있다. 여기서,  $A_{mnp}$ 는  $mnp$  모드에서의 vector potential의 크기를 뜻하며,  $L_3$ 는  $L$ 의 3배가 되는 길이를 의미한다. 기본 캐비티 모델 해석을 바탕으로 고차모드 중  $TM_{030}$ 에 대해 각 축 전기장, 자기장을 나타내면 식 (1)과 같다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{aligned} E_x &= -j\omega A_{030} \cos\left(\frac{\pi}{L_3}y\right) \\ H_z &= \frac{\pi}{\mu L} A_{030} \sin\left(\frac{\pi}{L_3}y\right) \\ E_y = E_z = H_x = H_y &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 구한 캐비티 모델을 바탕으로  $TM_{030}$ 모드에 대해  $z$ 와  $y$ 축이 이루는 각을  $\theta$ ,  $x$ 와  $y$ 축이 이루는 각을  $\phi$ 라 할 때,  $E$ -평면( $\theta=90^\circ$ ,  $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ )에 대해 전체 전계강도인  $E'_\phi$ 를  $E$ - ( $\theta=90^\circ$ ,  $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ),  $H$ - ( $\theta=0^\circ$ ,  $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ ) 평면에 대해 나타내면 식 (2), 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 그림 1(c)와 그림 1(d)는  $TM_{010}$ ,  $TM_{030}$  모드에 대해 FEKO EM 시뮬레이션과 식 (2) 및 식 (3)을 바탕으로 이론적으로 계산한 정규화된 방사 패턴을 보여준다. 실선과 점선은 각각 이론과 시뮬레이션 결과이며,  $TM_{030}$  모드의 반전력 빔폭은  $TM_{010}$  기본모드에 비해 좁아진 것을 확인하였다.

$$E'_\phi = -j \frac{k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \sin\theta\right)}{k_0 h} \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{k_0 W} \right\} \quad (2)$$

$$E'_\theta = 0$$

$$E'_\phi = -j \frac{k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \cos\phi\right)}{k_0 h} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_3}{2} \sin\phi\right) \quad (3)$$

캐비티 모델 해석에서  $\Phi$ ,  $\theta$ 에 대해 지향성 수식  $D(\theta, \Phi)$ 을 도출하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 수식을 바탕으로 패치안테나의 지향성 변화를 확인하기 위하여  $W$ 의 값은 고정하고,  $L$ 의 변화에 따른 지향성을 확인하였다.

$$D(\theta, \phi) = \left| \frac{E_{\phi}^t(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right| \frac{4\pi}{P_{rad}} = \left| -j \frac{k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \cos\phi\right)}{\frac{k_0 h}{2} \cos\phi} \right] \right| \left| \frac{4\pi}{\cos\left(\frac{k_0 L}{2} \sin\phi\right)} \right| \frac{4\pi}{P_{rad}} \quad (4)$$

그림 2(a)는  $L$ 을  $0.5 \lambda_0$ 에서  $3 \lambda_0$ 까지 증가시키면서 지향성의 변화를 보여주며,  $L$ 이  $0.63 \lambda_0$ 일 때, 지향성이 11.4 dBi로 최대값을 가지는 것을 보여준다. 또한, 지향성이 최대일 때의  $L$ 값인  $0.63 \lambda_0$ ,  $TM_{010}$ 모드에 해당되는  $0.5 \lambda_0$ ,  $TM_{030}$ 모드에 해당되는  $1.5 \lambda_0$ 에 대해 방사 패턴을 확인하여 그림 2(b)에 나타내었다.  $0.63 \lambda_0$ 에 해당되는 방사 패턴은  $TM_{030}$ 모드의 패턴과 같이 사이드로브를 가지며,  $TM_{030}$ 모드에 비해 반전력범폭이 좁아지면서 전면 방

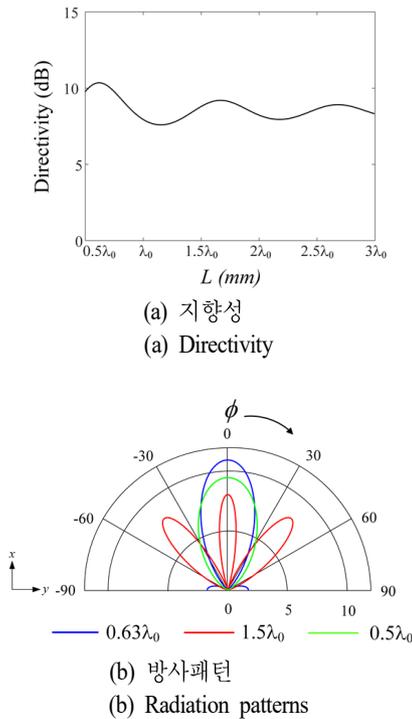


그림 2.  $L$ 에 따른 지향성과 방사패턴  
Fig. 2. Directivity and radiation patterns according to  $L$ .

향으로의 지향성이 증가한 것을 확인하였다.

패치 안테나를 실제로 구현하기 위해서는 공진 주파수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서  $m, n, p$ 는 정수이다.  $TM_{0m0}$ 모드로 패치 안테나가 특정 주파수에서 동작하기 위한  $L_{0m0}$ 에 대해 정리하면 식 (6)과 같다. 식에서  $L$ 은 유전율과 연관이 있음을 알 수 있으며, 역으로  $L$ 이  $0.63 \lambda_0$ 가 되는 유전율  $\epsilon_r$ 값은 5.4임을 도출할 수 있다.

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (5)$$

$$L_{0m0} = \frac{n\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

그림 3은 패치 안테나의  $W$ 와  $L$ 을  $0.63 \lambda_0$ 로 FEKO EM 시뮬레이터를 통해 최적 설계하고, 유전율 변화에 따라 지향성을 추가적으로 확인해본 결과를 보여준다. 유전율 ( $\epsilon_r$ )이 5.4일 때, 지향성이 11.5 dBi로 최대이며, 이론으로 구한 유전율과 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다. 또한, 실제로 구현하기 위해 5.4와 유사한 유전율을 가지는 상용 유전체 기판인 RF-60TC ( $\epsilon_r=6.15, \tan \delta=0.002$ )의 지향성을 확인한 결과, 10.3 dBi임을 확인하였다.

그림 4는 제안된 고지향성 low-profile 패치 안테나의 형상을 나타낸다. 한 변의 길이  $g$ 가  $1.26 \lambda_0$ , 두께  $t$ 가 2.55 mm인 RF-60TC ( $\epsilon_r=6.15, \tan \delta=0.002$ ) 기판에 너비  $w$ , 길이  $l$ 인 사각형 모양의 방사체가 인쇄되어져 있다. 패치안테나의 고지향성 특성을 도출하기 위해서  $w, l$ 은  $0.63 \lambda_0$ 의 크기로 설계하였으며, SMA connector에 의해 급전

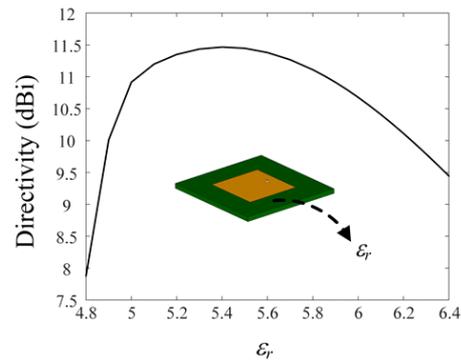


그림 3. 유전율 변화에 따른 지향성  
Fig. 3. Directivity according to  $\epsilon_r$ .

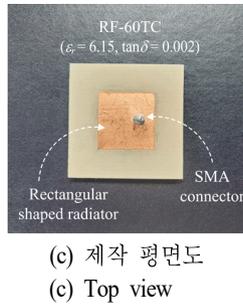
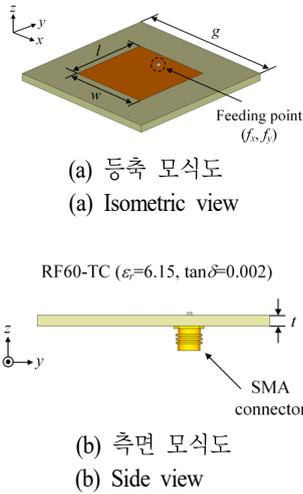


그림 4. 제안된 고지향성 low-profile 패치 안테나 형상  
Fig. 4. Geometry of the low-profile high directivity patch antenna.

된다. 그림 4(c)는 RF-60TC 기판에 사각 모양의 방사체를 인쇄하여 제안된 안테나를 제작한 사진을 보여주며, 방사체의 한 변의 길이는  $0.7\lambda_0$ 로 제작되었다.

그림 5는 제안된 패치안테나의 전면방향 이득과 안테나의 반사계수를 보여준다. 그림 5(a)에서는 제안된 안테나의 시뮬레이션과 측정을 비교한 전면방향이득을 나타내며, 측정과 시뮬레이션 전면 방향이득은 5.8 GHz에서 각각 8.5 dBi, 10.1 dBi임을 확인하였다. 또한, 그림 5(b)에서는 측정과 시뮬레이션 안테나의 반사계수는 5.8 GHz에서 각각  $-12$  dB,  $-12.7$  dB임을 나타내었다.

그림 6은 제안된 안테나의 이득을 확인하기 위하여 2-D 방사 패턴을 시뮬레이션과 측정을 비교한 것을 보여준다.  $zx$ -평면에서 측정과 시뮬레이션 반전력 빔폭은 각각  $50.5^\circ$ ,  $48.8^\circ$ 이며, 동일하게  $zy$ -평면에서의 반전력빔폭

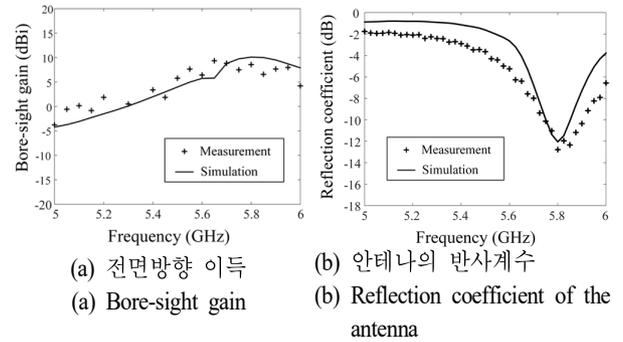


그림 5. 제안된 안테나의 전면방향 이득과 안테나의 반사계수

Fig. 5. Bore-sight gain and reflection coefficient of the proposed antenna.

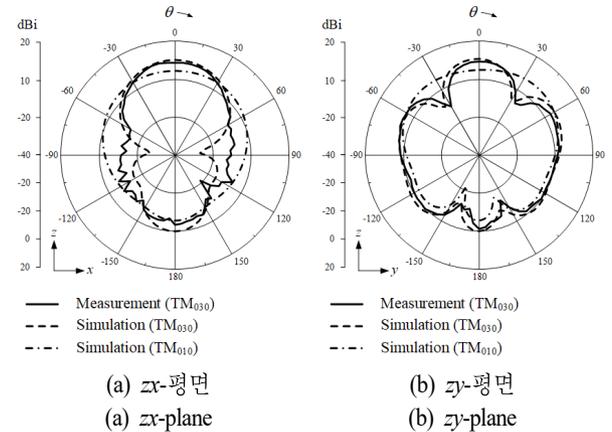


그림 6. 제안된 안테나의 시뮬레이션과 측정 2-D 방사 패턴 비교

Fig. 6. 2-D radiation patterns of the proposed antenna.

은 각각  $31.8^\circ$ ,  $34.5^\circ$ 이며,  $TM_{010}$ 의  $zy$ -평면에서 반전력빔폭은  $122^\circ$ 임을 나타낸다. 제안된 안테나는  $TM_{010}$  모드보다 전면방향으로 6 dB의 이득이 향상됨을 확인하였다.

### III. 결 론

본 논문에서는 마이크로파 방식의 무선전력전송에 적용하기 위한 고지향성 low-profile 패치 안테나 설계를 제안하였다. 제안된 안테나는 패치안테나를 캐비티 모델 이론을 바탕으로 기본모드와 고차모드를 분석하고, 지향성 수식을 이용하여 최대 지향성을 가지는 방사체 사이즈를

도출하였다. 또한, low-profile 특성을 적용하기 위해 최적 유전 상수를 적용하여 제작 비용 및 설계 구조를 단순화한 고지향성 low-profile 패치 안테나를 설계하였다. 제안된 패치 방사체는 한 변의 길이가  $0.63 \lambda_0$ 이고, 기판의 유전율이 5.4일 때, 최대 지향성이 11.4 dBi임을 확인하였다. 제안된 안테나를 제작하여 측정과 시뮬레이션을 비교한 결과, 전면 방향이득은 5.8 GHz에서 각각 8.5 dBi, 10.1 dBi이며, 안테나의 반사계수는 각각  $-12$  dB,  $-12.7$  dB임을 확인하였다.

### References

- [1] G. Kim, B. Lee, "Design of wireless power and information transfer systems considering figure of merit for information," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 4, pp. 241-247, Oct. 2020.
- [2] J. Hur, H. Choo, "Design of a small array antenna with an extended cavity structure for wireless power transmission," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 1, pp. 9-15, Jan. 2020.
- [3] H. Zhou, Z. Pei, S. Qu, S. Zhang, J. Wang, and Z. Duan, et al., "A novel high-directivity microstrip patch antenna based on zero-index metamaterial," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 538-541, Mar. 2009.
- [4] Z. Xiao, L. Zhu, "Gain-enhanced patch antennas with loading of shorting pins," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 64, no. 8, p. 3310, May. 2016.
- [5] B. Yildirim, B. A. Cetiner, "Enhanced gain patch antenna with a rectangular loop shaped parasitic radiator," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 229-232, Apr. 2008.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2015.

강 은 정 [홍익대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0265-1144>



2016년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)

2016년 7월~2017년 10월: 한국전자기술연구원 위촉연구원

2017년 11월~2018년 6월: (주)파워리퍼블릭 연구원

2020년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과

(공학석사)

2020년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 무선전력전송, 배열안테나, UWB, Antenna Propagation

서 철 현 [승실대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6765-8734>



1983년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 3월: 서울대학교 전자공학 (공학석사)

1993년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)

1993년~1995년: MIT 연구원

1993년~1997년: 승실대학교 정보통신학과 조교수

1999년 8월~2001년 1월: MIT 방문교수

1997년~2004년: 승실대학교 정보통신전자공학부 부교수

2005년~현재: 승실대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] 무선전력전송, 레이다, 이동 및 위성통신 RF 시스템, Metamaterial, 전력증폭기 및 VCO, Nonfosternetwork

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)

2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)

2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)

2003년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나