

장거리 무선전력용 Air-gap 타입 패치 안테나 어레이 설계 연구

김의연¹, 심원보¹, 임상민², 서강문², 이은수¹

한양대학교 ERICA 전자공학부¹, 삼성전자 영상디스플레이사업부²

RF Patch Antenna Arrays and Feeding Lines for Long-distance Wireless Power Transfer

Uiyeon Kim¹, Wonbo Sim¹, Sangmin Lim², Kangmoon Seo², and Eunsoo Lee¹

Hanyang University ERICA, Electrical Engineering¹, Samsung Electronics Visual Display Business²

ABSTRACT

본 논문에서는 수 미터급 장거리 환경하에 소형 전자기기를 무선 충전하기 위한 5.8GHz급 안테나 설계 방법론을 제안하였다. 수미터 거리에서도 1W급 전력을 전송하기 위한 5.8GHz 마이크로스트립 패치 안테나 어레이에 Air-gap(공극) 삽입을 통해 유전손실 최소화하였고, 유효 유전율 변화에 따른 최적 안테나 크기 및 간격 등을 도출하였다. 제안하는 설계 방법론을 통해 원하는 전기적 조건을 만족할 수 있는 안테나 어레이를 설계할 수 있으며, 안테나 어레이의 방사효율과 실현이득 극대화, 대역폭을 향상시킬 수 있음을 HFSS 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

수미터 급 장거리에서도 소형 전자기기를 자유로이 충전할 수 있는 요구가 증가하고 있으며, 현재 상용화된 대부분의 무선 전력시스템은 모두 수mm~수십cm 수준의 전력전송만이 가능하다. 예컨대, 모바일의 Qi 규격에 기반한 10~30mm급 접촉식 무선충전, EV의 SAE J2954 규격에 기반한 20cm급 무선충전 모두 근거리 자기장 유도방식을 사용한다 [1]. 자기유도 방식 중 수미터급 장거리 무선전력이 가능한 다이폴 방식을 사용할 수 있으나, 이는 코어 사이즈가 너무 크고 무거워지며, 효율이 낮고 전방사 EMF로 인해 인체 유해 및 주변 전자기기 오동작 등의 단점으로 인해 상용화에 제한적이다 [2]. 무선전력전송 거리를 수미터로 늘릴 수 있는 대표적인 방법은 Radio-Frequency (RF) 안테나 어레이를 적용할 수 있다. 비록 RF Amp의 저효율의 단점이 있을 수 있으나 작은 사이즈로 제작이 가능하고 임의의 수신 위치에 따른 빔포밍(Beam-Forming)이 가능하므로 현재까지 장거리 무선전력 솔루션으로는 가장 현실적인 대안이라 볼 수 있다.

본 논문에서는 원하는 무선전력 목표치를 달성할 수 있는 안테나 어레이 설계 방법론을 제안하였다. 특히 기존 FR4 기판 위에 패치안테나 적용시 발생하는 유전손실을 개선하기 위해, 마이크로스트립 패치 안테나와 FR4 기판 사이에 공극을 삽입함으로써 방사효율 (RadiationEfficiency, RE) 및 실현이득(RealizedGain, RG)을 극대화하였다. 제안하는 방법론을 통해 3m의 장거리에서도 1W급 전력전송이 가능한 안테나 어레이를 설계할 수 있으며, 이를 HFSS시뮬레이션을 통해 안테나 기본 성능을 검증하였다.

2. 제안하는 안테나 어레이 설계 방법론

설계자가 목표로 하는 무선전력시스템이 표 1과 같이 주어진 경우, 5.8GHz에 최적화된 안테나 어레이를 도출해야 한다. 표 1에서 전송전력 $P_s = 50W$ 는 RF Amp의 성능에 의해 좌우되며, 전송거리 $d_a = 3m$ 에서 전송전력 $P_L = 1.0W$ 를 전송하기 위해서는 단일 안테나 사이즈를 아래와 같은 식을 통해 도출할 수 있다 [3].

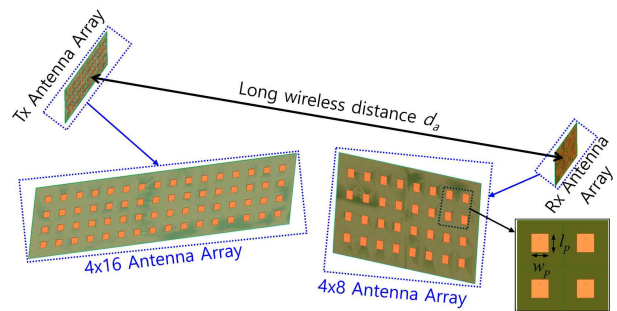


그림 1. 제안하는 안테나 어레이를 활용한 장거리 무선전력 구조도

Table 1 Target for the Proposed RF WPT

주파수 f_s	전송거리 d_a	입력전력 P_L	전송전력 P_s
5.8 GHz	3 m	1.0 W	50.0W

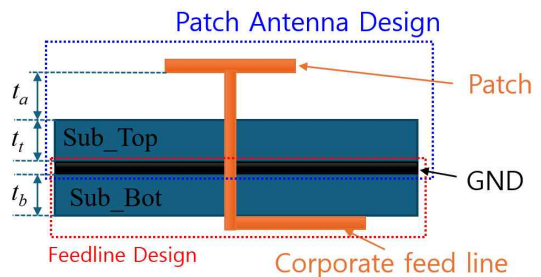


그림 2. 제안하는 공극이 삽입된 단일 안테나 단면도

$$l_p = \frac{c}{2f_s \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta l_p, \quad w_p = \frac{c}{2f_s} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1a)$$

$$\therefore \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12t_t}{w_p}\right)^{-1/2}, \quad \Delta l_p = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.300)(w_p/t_t + 0.264)}{(\epsilon_{eff} + 0.258)(w_p/t_t + 0.800)} \quad (1b)$$

위 식 (1)에서 c 는 빛의 속도, ϵ_r 은 기판 유전율, ϵ_{eff} 는 안테나 유효 유전율, t_t 는 기판 두께이다. Δl_p 는 경계길이 증가분으로서 안테나의 전자기파가 기판과 공기사이의 경계에서 더 확장되는 효과가 있으므로, 패치의 실제 물리적 길이보다 전기적으로 유효한 길이가 더 길어지는 현상이다. 본 논문에서는 그림 2와 같이 공극이 삽입된 형태이므로 $\epsilon_r < \epsilon_{eff}$ 이며, 해당 유효 유전율을 만족하는 점은 비선형의 특성을 가지므로 수식적으로 정확한 도출이 어렵다. 그러므로, 본 논문에서는 HFSS 시뮬레이션을 통해 매칭되는 안테나 길이 l_p 를 도출하였다고 가정하였다. 위 (1)을 통해 5.8GHz에서 구동하는 단일 안테나 사이즈는 $l_p = 18mm$, $w_p = 19mm$ 로 계산될 수 있다.

표 1과 같이 전기적 목표가 주어진 경우, 아래 Friis 공식을 통해 송수신 안테나의 게인을 도출할 수 있다 [4].

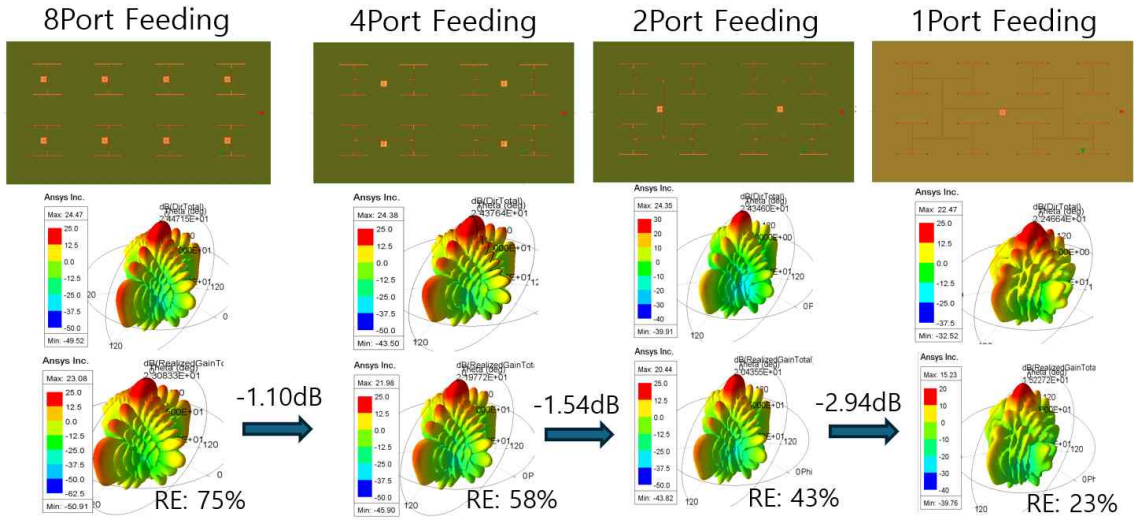


그림 4. 안테나 피딩라인 포트개수별 시뮬레이션 결과

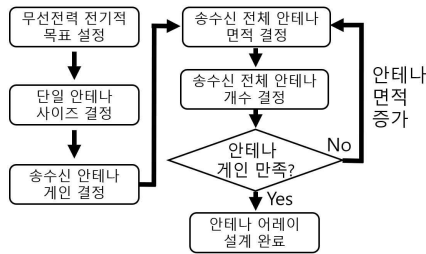


그림 3. 제안하는 안테나 어레이를 활용한 장거리 무선전력 구조도

Table 2 Simulation Results of the Proposed 3m 1W RF WPT

Classification	8 Ports	4 Ports	2 Ports	1 Ports
Directivity [dB]	24.47	24.38	24.35	24.47
RealizedGain [dB]	23.08	21.93	20.44	17.48
Rad. Effi. [%]	75.0	57.7	43.6	23.19

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r c^2}{(4\pi d_a f_s)^2} \quad (2)$$

위 (2) 수식에서 G_t 는 송신안테나 게인, G_r 는 수신안테나 게인이다. P_r 은 안테나 수신전력으로서, $P_L = \eta_r P_r$ 과 같은 관계식을 가지며 η_r 은 정류기 효율로 일반적으로 40 ~ 60% 수준이다. 또한 P_t 는 안테나 송신전력으로서, $P_t = \eta_s P_s$ 과 같은 관계식을 가지며 η_s 은 송신 효율로서 송신안테나 반사계수 S_{11} 이 -10dB 이하인 경우 $P_t \approx P_s$ 라 볼 수 있다. 위 (2) 식을 통해 테이블 1에 목표한 무선전력시스템 조건을 대입할 경우 $G_t G_r > 44\text{dB}$ 가 됨을 도출할 수 있으며, 송신 사이즈가 수신사이즈 대비 약 2배 크다고 가정할 경우 $G_t = 24\text{dB}$, $G_r = 20\text{dB}$ 로 선정할 수 있다.

5.8GHz 구동 단일 안테나 사이즈가 결정되고, 송신 안테나 게인 $G_t > 24\text{dB}$ 로 설계하기 위해서는 안테나 어레이에 적용되는 안테나 개수를 선정해야 한다. 송수신 전체 안테나 면적을 각각 A_t , A_r 이라 할 경우 아래 Goubau 공식에 의해 A_t , A_r 을 계산할 수 있다.

$$\frac{P_r}{P_t} = 1 - e^{-\tau^2} \quad \therefore \tau = \frac{f_s}{cd_a} \sqrt{A_t A_r} \quad (3)$$

수식 (3)에 의해 A_t 와 A_r 계산 결과, $A_t > 0.053\text{m}^2$, $A_r > 0.021\text{m}^2$ 으로 도출이 가능하며, 만일 전체 안테나 면적을 정사각형이라 가정할 경우 송수신 안테나 전체 한변의 길이는 각각 23.1cm, 14.6cm으로 계산될 수 있다. 만일 단일 안테나간 간격이 안테나 길

이와 유사하다고 가정할 경우 송수신 안테나 개수는 각각 $N_t > 36EA$, $N_r > 16EA$ 로 계산될 수 있다. 하지만, 안테나 어레이를 구동하는 Feeding Line 손실과 임피던스 매칭 환경을 고려하여 설계 마진을 적용할 경우, 본 논문에서는 $N_t = 64EA$, $N_r = 32EA$ 로 결정할 수 있으며 이는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서 제안한 안테나 어레이 설계 프로세스를 그림 3에 요약하였다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 1에 제시된 3m 1W급 안테나 어레이의 실현계인은 앞서 도출된 $G_t > 24\text{dB}$, $G_r > 20\text{dB}$ 를 만족하도록 설계되어야 한다. 각 안테나에 전력을 인가하기 위한 피딩라인 형상은 그림4에 나타내었고, 피딩포트 개수별로 피딩라인의 Insertion Loss가 다르며, 이를 HFSS 시뮬레이션으로 그 성능을 검증하였다. 시뮬레이션 결과, 4x8 안테나 어레이에서 8 Ports를 적용할 경우 실현계인은 약 23dB로서 제안하는 설계방법론을 통해 도출된 $N_t = 64EA$ 를 적용할 경우 실현이득은 26dB가 되므로 제안하는 목표치를 만족하는 것을 알 수 있다. 피딩라인의 포트개수 1개인 경우 피딩라인의 Insertion loss증가에 따른 방사효율 RE가 급격히 낮아지므로 필요에 따라 적절한 피딩포트 개수를 선정해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 장거리 무선전력용 안테나 어레이를 설계하기 위한 최적 설계 방법론을 제안하였다. 제안하는 방법을 통해 전기적 목표치가 주어진 경우 요구되는 안테나 어레이 개수와 총 면적 도출이 가능함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Eun S. Lee, et al., "Triangular DQ Tx Coils of Wireless EV Chargers for Large Lateral Tolerances," *IEEE Trans. Veh. Techn.*, vol. 72, no. 11, pp. 14179 - 14188, Nov. 2023.
- [2] Bo H. Choi et al., "Dipole-Coil-Based Wide-Range Inductive Power Transfer Systems for Wireless Sensors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 5, pp. 3158-3167, May 2016.
- [3] Long Xiao et al., "A Non-diffraction Microstrip Antenna Array for Wireless Power Transfer Applications," *IEEE ISAPE*, Dec. 2021, pp 1-4.
- [4] 안창영, 유홍균, "다중 안테나를 사용하는 무선전력전송 시스템의 설계와 특성 평가," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 54, no. 4, pp. 644-651, Apr. 2020.