

중/장거리 방사 무선전력전송의 이론적 한계 효율 도출

김준홍^{*}, 남상욱
 서울대학교 전기정보공학부
 뉴미디어통신공동연구소
 jhkim@ael.snu.ac.kr, snam@snu.ac.kr

I. 서론

최근 무선전력전송 기술을 다양한 어플리케이션에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 상용화된 대부분의 무선전력전송 제품은 근거리장을 이용한 패드 형태로 개발되고 있다. 그러나 근거리장을 이용한 무선전력전송 기술은 동작 거리와 수신기의 크기를 줄이는데 한계가 있다. 이에 동작 거리를 확보하여 모바일에 공간자유도를 부여할 수 있고, 수신기도 소형화 할 수 있는 방사형 무선전력전송이 차세대 기술로 주목받고 있다.

방사형 무선전력전송은 일반적으로 효율이 매우 낮은 것으로 알려져 있다. Friis 방정식에 따르면, 송수신기의 거리를 가깝게 배치하여 무선전력전송 효율을 개선할 수 있다. 그러나 송수신기의 거리가 특정 영역 이하로 가까워지면 원거리장 가정이 성립되지 않아, Friis 방정식을 사용할 수 없고, 따라서 무선전력전송 효율을 파악함에 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 기존의 방식으로 파악할 수 없었던 중거리에서의 무선전력전송 효율을 이론적으로 도출하였으며, 시뮬레이션 결과를 이용해 이론을 검증하였다.

II. 본론

본 논문에서는 자유공간에서의, 무선전력전송 한계 효율을 분석하였다. 무선전력전송 시나리오는 그림. 1과 같이 설정하였다. 수신기(mb)가 공간 내부에 존재하고, 임의의 표면에서 송신 전류 분포(bs)가 흐른다고 가정하였다. 본 연구에서는 evanescent 필드보다 radiating field가 더 우세한 영역을 다루고 있으

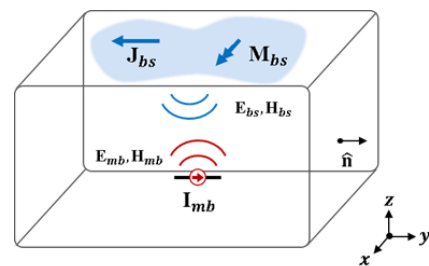


그림.1. 방사형 무선전력전송 시나리오

며 ($kr > 1$), 방사하는 필드의 영향만을 고려하였다. 간단한 이론 분석을 위해, 손실이 없는 상황을 가정하였다. 연구의 목표는 효율을 최대화 하는 것이며, 효율은 식(1)과 같이 송신 전류분포에서 방사한 파워와 모바일에서 수신한 파워로 정의하였다.

$$PTE = \frac{P_{rec,mb}}{P_{in,bs}} \quad (1)$$

식(1)의 분자와 분모를 전자기학 관점에서 표현할 수 있다. 먼저, 수신 안테나 로드단에 걸리는 전압(open circuit voltage)을 reaction 개념을 이용하여 식(2)와 같이 수신 파워를 표현할 수 있다.

$$V_{oc} = - \frac{1}{I_{mb}} \int (\mathbf{E}_{mb} \cdot \mathbf{J}_{bs} - \mathbf{H}_{mb} \cdot \mathbf{M}_{bs}) dS \quad (2)$$

송신부(base)에서 인가해준 파워는 식(3)과 같이 폐곡면을 뚫고 나가는 방사 파워로 계산할 수 있다. 이때, reciprocity를 이용하여 mobile에서 파일럿 신호를 보내는 상황을 가정하며, 임의의 상수 a 를 이용하면 모바일의 필드로 송신파워를 표현할 수 있다.

$$P_{in,bs} = \int \frac{a}{2} (\mathbf{E}_{mb} \times \mathbf{H}_{mb}^* + \mathbf{E}_{mb}^* \times \mathbf{H}_{mb}) \cdot \hat{\mathbf{n}} dS. \quad (3)$$

식(2)와 (3)을 이용하여 효율을 표현한 후, 약간의 변형을 거쳐 Cauchy-Schwartz 부등식을 적용할 수 있다. 최적화를 거치면 식(4)와 같이 최적 전류분포를 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{opt} &= -a \frac{1}{Z_0} (\hat{r} \cdot \hat{n}) \mathbf{E}_{mb}^* \\ \mathbf{M}_{opt} &= a Z_0 (\hat{r} \cdot \hat{n}) \mathbf{H}_{mb}^* \end{aligned} \quad (4)$$

식(8)을 통해, 1) 모바일에서 방사한 파일릿 필드를 뒤집고 2) 송신부 표면에 프로젝션한 (tangential) 성분이 최적 송신 전류분포라는 물리적인 의미를 파악할 수 있다. 결과적으로, 위의 수식을 이용해 중거리 무선전력전송을 위한 최적 송신 전류분포가 phase conjugation과 매우 유사함을 알 수 있다. (4)에서 도출한 최적해를 실제 세미나실에 적용한 결과는 아래의 그림. 2와 같다. 그림.2의 결과를 통해, 수신기와 가까이 있는 영역에서 전류 분포가 강한 것을 알 수 있다. (4)에서 도출한 최적 전류분포를 식(1)에 다시 대입하면 사용하는 송신 면적에 따라 얻을 수 있는 최대 전류분포를 파악할 수 있다. 그림.3에는 모바일 안테나의 종류 (다이폴, 패치, 혼 안테나)와 송신 면적에 따른 최대 무선전력전송 효율을 표현하였다.

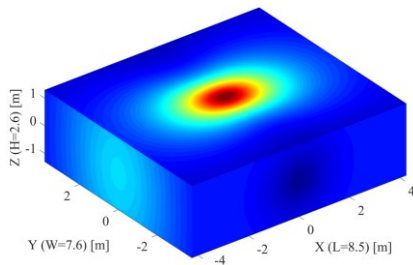


그림.2. 세미나실 표면의 최적 송신 전류분포

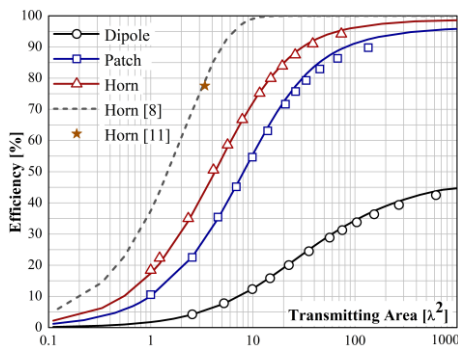


그림.3. 송신 면적과 수신안테나의 종류 따른 최대 한계 효율 그래프

III. 결론

본 연구에서는 전자기학 및 최적화 이론을 이용하여 최적 송신 전류분포를 파악하고 최대 한계 효율을 파악할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 방식을 활용하면, 기존의 Friis 방정식으로 파악할 수 없는 영역에서의 한계 효율을 도출할 수 있다. 도출된 결과에 따르면, 세미나실 천장에 약 1.5m²의 송신기를 설치하고, 방 중앙에 수신용 패치 안테나를 이용하면 2.4 GHz에서도 약 67%의 효율을 확보할 수 있음이 이론적으로 확인하였다. 따라서 본 연구를 이용하면 중거리 방사형 무선전력전송의 거리 및 면적에 따른 한계 효율을 도출할 수 있으며, 최적 송신 전류분포를 파악할 수 있다. 본 연구 결과를 활용하면, 방사형 무선전력전송의 효율을 계산할 수 있기 때문에, 링크 버젯을 계산하는 등, 시스템 설계의 가이드 라인으로 활용될 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 국방생체모방 자율로봇 특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다 (UD190018ID).

Reference

[1] J. -H. Kim, Y. Lim and S. Nam, "Efficiency bound of radiative wireless power transmission using practical antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 8, pp. 5750-5755, Aug. 2019.