

# 무선전력전송용 스위치가 장착된 직교루프 전방향 빔조향 공진기

## Omnidirectionally Beam-Steerable Orthogonal Loop Resonator with Switch for Wireless Power Transfer

최 보 희 · 이 정 해

Bo-Hee Choi · Jeong-Hae Lee

### 요 약

본 논문에서는 무선전력전송용 전 방향 빔 조향 직교 공진기를 제안하였다. 전 방향 빔 조향 직교 공진기는 2개의 루프를 수직으로 교차하여 이들의 연결 관계를 스위치로 제어하는 방식이다. 스위치의 연결 방식에 따라 루프에 흐르는 전류의 방향이 결정되고, 그에 따라 빔 조향 방향이 결정된다. 수직으로 교차한 공진기의 전류와 그에 따라 형성되는 자기장의 벡터 합의 원리를 이용하여 대각선 방향으로의 빔 조향을 실현하였다. 4개의 스위치 mode를 통해서 총 8개 방향으로 빔 조향이 가능하다. 적합한 스위치 mode를 사용하여 전 방향에 대한 전송 효율을 구하면 시뮬레이션과 측정 결과가 각각 56.3~60.0 % (편차 3.7 %), 41.2~48.7 % (편차 7.5 %)으로 비교적 전 방향에 대해 균일한 전송 효율을 얻을 수 있다.

### Abstract

This paper presents an omnidirectionally beam-steerable orthogonal loop resonator for wireless power transfer. The resonator is composed of two orthogonal loops. These connections of two loops and the current direction on the loops are determined by the control of switch. The magnetic field direction is determined by the vector sum of each loop current. The beam is steerable to eight directions by four switch modes. Using the suitable switch mode, the simulation and measurement efficiencies in the whole azimuthal direction are 56.3~60.0 % (deviation 3.7 %) and 41.2~48.7 % (deviation 7.5 %), respectively. The results show a little variation of transmission efficiency in the azimuthal direction.

Key words: Near-Field Steering, Wireless Power Transfer(WPT), Orthogonal Loop Resonator, Magnetic Resonance

### I. 서 론

자기공명방식 무선충전이 스마트폰, 가전제품, 전기차, 의료기기 등 다양한 산업 제품에 적용되기 위해서는 송신기와 수신기 사이의 축 정렬이 고정되지 않고 자유로울 때에도 효율적으로 전력 전송이 이루어져야 할 것이다

[1]-[3]. 송신기와 수신기의 축 정렬이 나란할 때에는 공진기 사이에 강한 커플링이 형성되어 효율적으로 전력이 전송되지만, 축 정렬이 비스듬하게 되면 공진기 사이의 커플링이 감소하게 되고, 전송 효율도 낮아지게 된다[4]. 최악의 경우, 2개의 공진기가 수직으로 배열되어 있을 때에는 공진기 사이의 커플링이 "0"이 되고, 효율 역시 "0"

「이 연구는 2015학년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2013R1A2A2A05005640).」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

· Manuscript received December 29, 2014 ; Revised February 3, 2015 ; Accepted February 17, 2015. (ID No. 20141229-045)

· Corresponding Author: Jeong-Hae Lee (e-mail: jeonglee@hongik.ac.kr)

이 된다. 따라서 축 정렬이 자유로운 전 방향 빔 조향 공진기가 필요함을 알 수 있다.

송신기와 수신기 사이의 축 정렬이 자유로운 전방향 빔조향 공진기에 대한 연구는 이미 몇 차례 보고된 바 있다. 기존 직교한 2개 루프 구조에서의 전방향 빔조향 공진기는 2개의 전원부가 요구되지만<sup>[5]</sup>, 본 논문은 동일 구조에서 1개의 전원부와 스위치 제어를 통해 빔 조향을 도모하여, 시스템 구성을 단순화하였다. 또한, 120°로 배열한 3개 루프에서 커패시턴스를 조정하여 3개 mode를 통한 전방향 빔조향 공진기<sup>[6]</sup>에 비하여 본 논문은 4개 mode를 사용하여 방향에 따른 효율 편차를 최소화하였다.

### II. 스위치 Mode와 구동 원리

그림 1은 전방향 빔조향 공진기의 구조 및 스위치 mode에 따른 전류의 흐름과 자기장 분포를 나타낸다. 스위치를 통해 2개의 직교한 루프의 연결 관계를 설정함으로써, 전류의 방향과 그에 따른 자기장 방향이 결정된다. 4가지 스위치 mode마다 양방향으로 자기장이 분포하여 총 8개 방향으로 빔 조향이 가능하다. 스위치 연결 방식에 따른 빔 조향 원리는 다음과 같다. Mode 1과 mode 3은 하나의 루프만 동작하고, 다른 루프는 연결이 끊어져 있으므로, 플레밍의 오른손 법칙에 따라 자기장 방향이 결정되며, 양방향으로 자기장이 분포하게 된다. Mode 2와 mode 4는 루프 2개가 모두 작동하며, 2개 루프의 전류 방향에 따라 벡터합에 의해 대각선 방향으로 자기장이 형성된다. 그림 2는 mode 2에서의 전류의 흐름과 그에 따른 자기장의 벡터 합을 나타낸다. Mode 4일 때에는 스위치 연결 관계에 따라 다른 1개 루프의 전류의 방향이 반대로 되게 되고, 다른 방향의 대각선으로 자기장이 형성하게 된다.

### III. 구조 및 시뮬레이션 결과

그림 3(a)는 시뮬레이션을 하기 위해 모델링한 전 방향 빔 조향 직교 공진기의 구조 및 치수이다. 송신 공진기는 2개의 루프가 수직으로 교차하며, 상단에는 2개 루프의 연결 관계를 결정하는 스위치가 장착되어 있다. 하단에는 6.78 MHz에서 공진을 이루기 위한 커패시터가 직렬로 연

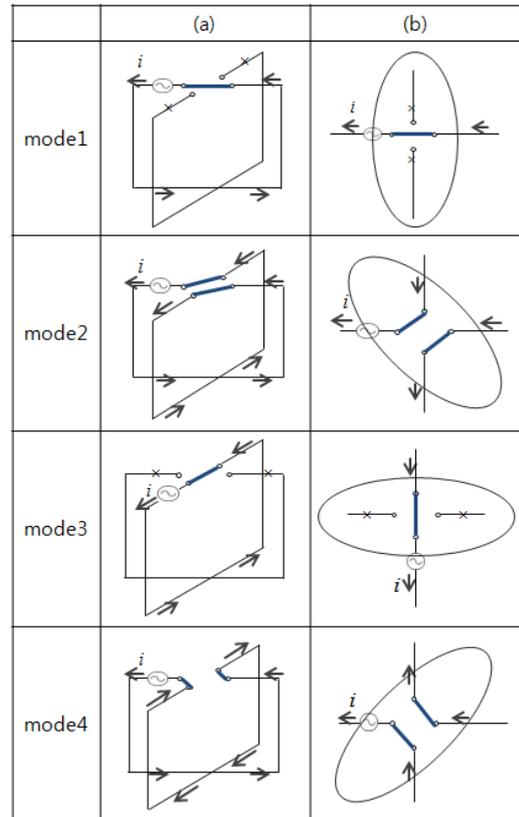


그림 1. 공진기 구조 및 스위치 mode (a) 스위치 mode에 따른 전류의 흐름, (b) 자기장 분포(top-view)

Fig. 1. Structure of resonator and switch mode (a) Current flow according to switch mode, (b) Magnetic field distribution(top-view).

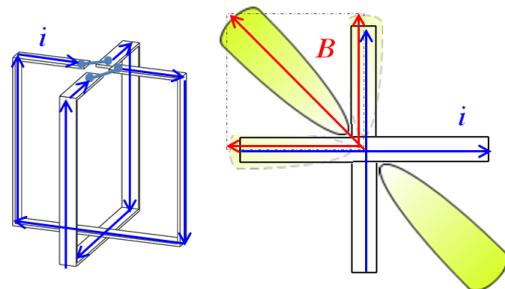


그림 2. 자기장의 벡터합(mode 2)

Fig. 2. Vector sum of magnetic field(mode 2).

결되어 있는데, 그 값은 각각 mode 1과 3에서는 1,237 pF, mode 2와 4에서는 623 pF이다. 수신 공진기는 단일 루프 구조이며, 마찬가지로 공진을 이루기 위한 커패시터가 직

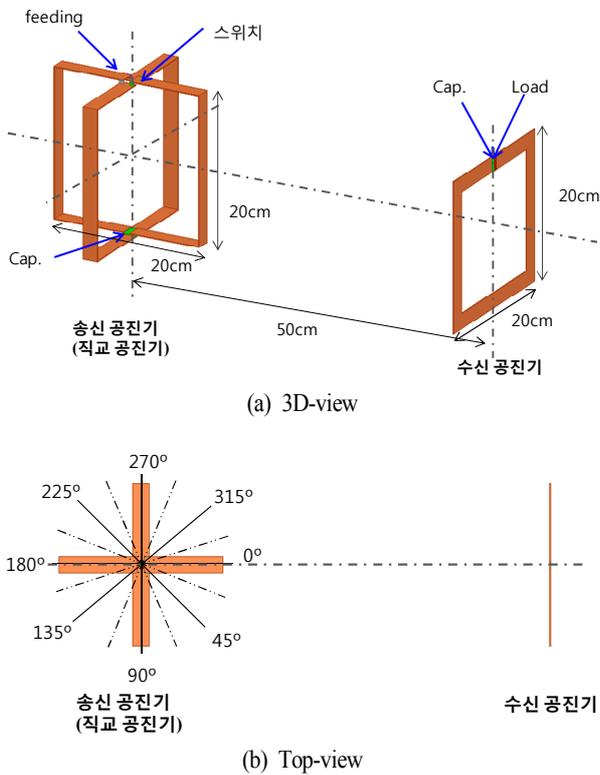


그림 3. 전방향 빔 조향 직교 공진기의 구조 및 치수  
Fig. 3. Structure and dimension of orthogonal resonator.

렬로 연결되어 있고, 그 값은 1,447 pF이다. 직교 공진기의 중심으로부터 수신 공진기까지의 거리는 50 cm이다. 그림 3(b)는 위에서 바라본 공진기의 모습인데, 직교 공진기에 표기된 좌표와 같이 22.5° 간격으로 직교 공진기를 회전하면서 수신 공진기에서의 효율을 측정하였다.

그림 4는 mode에 따른 자계 분포와 효율이다. Mode 1과 3에서는 루프 하나만 동작하기 때문에 동작하는 루프 방향으로 자계가 분포하며, mode 2와 4는 루프 2개가 모두 작동하기 때문에 전류 및 자기장의 벡터합에 의해 대각선 방향으로 자계가 분포하게 된다. Mode 1과 3, mode 2과 4의 배치에서 효율 차이는 2.4 %로 근소하다. 따라서 4개의 mode에서 최대 효율이 나타나므로 총 8개 방향으로 조향이 가능하다. 그림 3(b) 좌표계와 같이 직교 공진기를 22.5°씩 회전시키면서 송신 공진기에서 효율을 산출하였는데, 최대 효율을 위한 적합한 mode를 사용하였을 때 시뮬레이션 효율은 평면상 전 방향에 대하여 56.3~

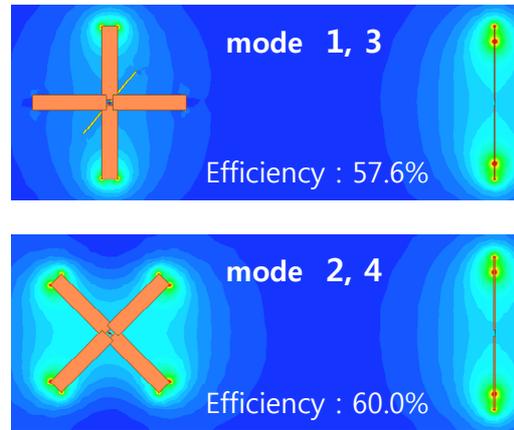


그림 4. Mode에 따른 자계 분포 및 효율  
Fig. 4. Magnetic field and efficiency according to mode.

60.0 %로 산출되었으며, 효율 편차는 3.7 %로 비교적 균일한 효율 분포를 보이는 것을 알 수 있었다.

참고문헌 [5]의 빔 조향 공진기는 수직교차한 2개 루프의 위상차를 0° 또는 180°로 하여 대각선 양 방향으로 빔 조향하는 공진기이다. 본 논문의 빔 조향 직교 공진기와 동일한 치수로 모델링하여 시뮬레이션 결과, 자계 분포와 효율이 동일하게 나타났다. 따라서 참고문헌 [5]의 빔 조향 공진기와 본 논문의 공진기는 효율 및 기능은 동일하나, 구현 방식에 있어서 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 참고문헌 [5]의 빔 조향 공진기는 2개의 루프에 위상차 조정이 가능한 각각의 전원부가 필요하다. 하지만 본 논문의 공진기는 1개의 전원부와 스위치를 통해 빔 조향이 구현된다. 전원부의 개수가 2개에서 1개로 줄어들었기 때문에, 임피던스 정합 및 위상차 조정 등의 시스템 구현을 좀 더 단순하고 수월하게 할 수 있는 장점이 있다.

참고문헌 [6]의 빔 조향 공진기는 3개의 루프를 120°로 배열한 구조에서 공진기와 공진기 사이의 커플링이 존재하기 때문에, 공진기의 커패시턴스 조절을 통해 공진기의 유도 전류를 조절하여 빔 조향을 실현하였다. 참고문헌 [6]의 공진기는 3개의 mode를 지원하나, 본 논문에서는 4개의 mode를 지원하기 때문에 효율 편차를 개선할 수 있었다. 시뮬레이션과 측정 효율을 비교해 보면, 참고문헌 [6]의 시뮬레이션과 측정 효율이 각각 70.5~81.5%(편차 11.1 %), 59.0~71.3%(편차 12.3 %)에 비해 본 논문의 시

표 1. 전방향 공진기 특성 비교표

Table 1. Comparison of the omnidirectional resonators.

	공진주파수	구현 방식	효율 편차
참고문헌 [5]	-	2개의 소스	-
참고문헌 [6]	13.56 MHz	-	70.5~81.5 % (편차: 12.3 %)
본 논문	6.78 MHz	1개의 소스 + 스위치	56.3~60.0 % (편차: 3.7 %)

물레이션과 측정 효율은 각각 56.3~60.0%(편차: 3.7%), 41.2~48.7%(편차: 7.5%)으로 효율 편차가 향상되었다. 참고문헌 [6]의 빔 조향 공진기와 본 논문의 공진기는 구조와 치수, 동작주파수가 모두 다르기 때문에 효율 비교가 어려워 효율편차만 비교해 보았다.

표 1은 본 직교 공진기와 참고문헌 [5] 및 [6] 공진기의 특성 비교표이다.

#### IV. 제작 및 측정

그림 5는 제작한 공진기와 실험 모습이다. 그림 3과 동일한 치수 및 구조로 제작되었다. 급전 및 부하는 피딩 루프를 통해 구현하였다. 송신 공진기의 피딩 루프는 직교 루프의 안쪽에 배치하였으며, 피딩 루프의 회전과 루프 사이즈 조절이 가능하여 스위치 mode에 따라 공진기와의 커플링 조절이 가능하도록 제작되었다. 직교 공진기의

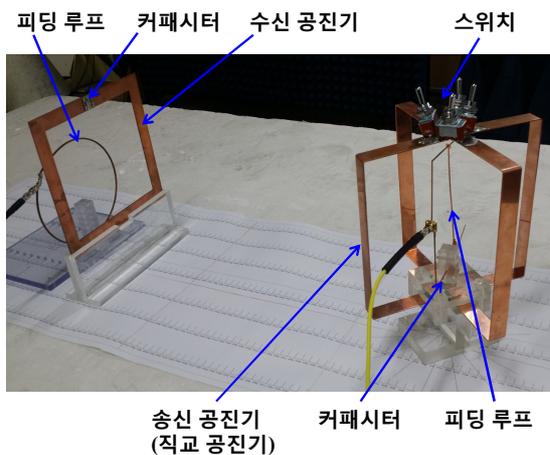


그림 5. 제작한 공진기  
Fig. 5. Fabricated resonators.

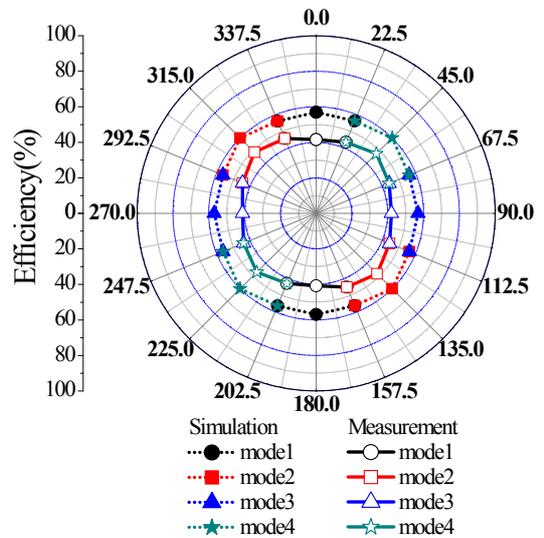


그림 6. 전송 효율  
Fig. 6. Power transfer efficiency.

상단에는 스위치가 장착되었는데, 이웃하는 공진기 사이마다 스위치를 연결하여 총 4개의 스위치가 사용되었다. 사용된 스위치는 정격전압 AC 125 V/DC 30 V의 ON/OFF 토글 스위치로 접촉저항이 최대 10 mΩ이다. Mode 1과 3에서는 이웃한 스위치 2개를 ON하고, mode 2와 4에서는 대각선의 스위치 2개를 ON하였다. 스위치 작동은 수동으로 조작한 후 효율을 측정하였다.

그림 6은 실험을 통해 측정된 효율을 시뮬레이션 효율과 중첩하여 도시한 것이다. 시뮬레이션 효율은 56.3~60.0%(편차 : 3.7%)에 비해 측정 효율은 41.2~48.7%(편차 7.5%)으로 측정되었다. 측정 효율이 시뮬레이션 효율에 비해 저하된 원인은 시뮬레이션에서는 고려되지 않았던 직교 공진기에 장착된 스위치에 의한 손실, 공진기에 직렬 연결된 커패시터의 손실 등에 의한 요인으로 분석된다. 특히, 직교 공진기의 Q 값이 mode 1과 3에서는 402, mode 2와 4에서는 492로 시뮬레이션 Q 값 각각 874, 878에 비해 크게 저하되었다. 수신 공진기의 Q 값이 시뮬레이션 811 값에서 측정 값 636으로 저하된 것을 고려하였을 때, 직교 공진기에서 스위치에 대한 손실이 크게 작용한 것을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션에서는 mode 1과 3에 비해 mode 2와 4는 R과 L이 각각 2배씩 증가하여 Q값을 일정하게 유지하였지만, 측정 시 mode 1과 3, mode 2

와 4 모두 스위치가 2개씩 사용되어 상대적으로 mode 1 과 3에서 손실이 더욱 발생하여 효율이 저하됨을 알 수 있다. 따라서 본 전 방향 빔 조향 직교 공진기에서는 스위치의 접촉 저항 및 연결 방식이 수신 효율에 크게 영향을 끼치는 중요한 요인임을 알 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 스위치를 장착한 직교 루프 전 방향 빔 조향 공진기를 제안하였으며, 공진기의 ON/OFF와 직교 루프의 전류 및 자기장의 벡터합을 이용하여 4개의 스위치 mode를 지원함으로써 평면상에서 8개 방향으로의 빔 조향을 실현하였다. 전 방향에 대한 시뮬레이션 및 측정 효율은 각각 56.3~60.0%(편차: 3.7%), 41.2~48.7%(편차: 7.5%)으로 비교적 균일하게 전 방향에 대해 전력을 전송할 수 있다.

### References

[1] W. Xin, G. Yan, and W. Wang, "Study of a wireless power transmission system for and active capsule endoscope", *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, vol. 6, pp. 113-122, 2010.

[2] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Lee, G. Jung, S. -J. Jeon, and D. -H. Cho, "Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1179-1192, Mar. 2014.

[3] J. Jadidian, D. Katabi, "Magnetic MIMO: How to charge your phone in your pocket", *The 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 495-506, Sep. 2014.

[4] M. Pinuela, C. Yates, S. Lucyszyn, "Maximizing DC-to-load efficiency for inductive power transfer", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 2437-2447, May 2013.

[5] 전자부품연구원, "무선 전력 전송을 위한 자기 에너지 빔포밍 방법 및 장치", 대한민국, 등록번호 1013-415100000(2013. 12. 09).

[6] B. -C. Park, J. -H. Kim, "Mode reconfigurable resonators insensitive to alignment for magnetic resonance wireless power transmission", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp. 59-61, Jan. 2014.

### 최 보 희



2009년 8월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2015년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)  
 2015년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 무선전력전송(Wireless Power Transfer), Metamaterial Antenna

### 이 정 해



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
 1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)  
 1993년 3월~1996년 2월: General Atomics 교환연구원  
 1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor  
 1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수  
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나, Metamaterial RF 소자, 무선전력전송