

최적 효율 무선 전력 전송을 위한 Magnetic Beam 형성

정형준* · 최 익**

Magnetic Beamforming for Optimum Efficiency Wireless Power Transfer

Hyung-Jon Jung* · Ick Choy**

요 약

무선 전력 전송은 유선 전력 전송 보다 편리하지만 전송거리가 짧고 효율이 낮다. 또한, 여러 장치를 동시에 충전하기 어렵다. 본 논문에서는 무선 전력 전송의 전송 거리를 증가시키고 효율을 향상시키기 위해 다수의 송신코일을 이용해서 Magnetic Beam을 형성하는 방법을 제안한다. 이를 위해 송신코일 전류와 수신코일 중심에서의 자속밀도 사이의 관계를 모델링하고, 의사역행렬(Pseudoinverse)의 특성을 이용해 최적의 송신코일 전류를 계산한다. 마지막으로 Simulation을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

ABSTRACT

Wireless power transfer is more convenient than wired power transfer, but has a shorter transfer distance and lower efficiency. In addition, it is difficult to charge multiple devices simultaneously. In this paper, we propose a method of magnetic beam forming by using multiple transmitters in order to increase transfer distance and improve efficiency of wireless power transfer. To do this, the relationship between the transmitter coil current and magnetic field at the center of receiver coil is modelled, and calculate the optimal transmitter coil current using the characteristics of the pseudoinverse. Finally, the validity of the proposed method is verified by simulation.

키워드

Wireless Power Transfer , Beam Forming, Pseudoinverse , Optimum Efficiency
무선 전력 전송, 빔 포밍, 의사역 행렬, 최적 효율

1. 서 론

휴대기기 및 친환경 모빌리티가 광범위하게 보급됨에 따라 무선 전력 전송 국제 규격(Qi, A4WP 등)이 제정되었고 효율적인 배터리 충전을 위한 무선 전력

전송 시스템이 개발되고 있다.[1]

현재 상용화 되고 있는 근거리 무선 전력 전송 시스템은 자기 유도 방식[2-3]과 자기 공진 방식[4-6]을 사용한다. 이 중 자기 유도 방식은 구현이 간단하고 근거리 효율이 높지만 거리가 멀어 질수록 효율이 급

* 광운대 로봇학부(wjdgudwhs12@naver.com)

** 교신저자 : 광운대 로봇학부

• 접수 일 : 2019. 12. 10

• 수정완료일 : 2020. 01. 12

• 게재확정일 : 2020. 02. 15

• Received : Dec. 10, 2019, Revised : Jan. 12, 2020, Accepted : Feb. 15, 2020

• Corresponding Author : Ick Choy

School of Robotics, Kwangwoon University,

Email : ickchoy@kw.ac.kr

격히 떨어진다는 단점이 있다. 자기 공진 방식은 자기 유도 방식과 비교해 충전거리가 멀지만 효율이 낮다. 이러한 무선 전력 전송의 문제를 해결하기 위해 통신 분야에서 널리 사용되는 Beam 형성을[7] 적용한 Magnetic Beam 형성 기법이 연구 되고 있다. Magnetic Beam을 이용한 무선 전력 전송의 대표적인 연구는 자기 유도 방식의 MagMIMO[8]와 자기 공진 방식의 MultiSpot[9]이 있다.

본 논문에서는 전류제어방식으로 구동되는 송신코일 배열을 사용한 자기 유도 방식의 Magnetic Beam 형성 기법을 제안한다. 각 송신코일 전류에 의한 수신코일의 쇄교자속 행렬식을 유도하고 의사역행렬을 사용하여 요구되는 수신코일 쇄교자속 형성에 필요한 송신코일 전류를 계산한다. 이때 수신코일의 전류에 의한 영향은 외란으로 간주하고 무시하였다.

II. 최적 효율 송신코일 전류 계산

수신코일에서 발생하는 유기기전력(e_r)의 크기는 Faraday 법칙에 의해 식 (1)과 같다.

$$e_r = N_r \frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (1)$$

여기서

N_r : 수신코일의 턴수

Φ_r : 수신코일 내부 통과자속 [Wb]

λ_r : 수신코일 쇄교자속($N_r\Phi_r$) [Wb]

이다.

수신코일 쇄교자속은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\lambda_r = N_r \int_A (\mathbf{B}_r \cdot \mathbf{n}_r) dA_r \quad (2)$$

여기서

\mathbf{B}_r : 수신코일 내부 자속밀도벡터 [T]

\mathbf{n}_r : 수신코일 내부 면적의 법선단위벡터

A_r : 수신코일 내부 면적 [m²]

이다.

식 (2)에서 수신코일 쇄교자속을 계산하기 위해서는 수신코일 내부 모든 지점에서의 자속밀도를 계산해야 한다. 수신코일의 반지름이 송신코일과 수신코일 사이의 거리보다 충분히 작다면 수신코일 내부 각 지점에서의 자속밀도의 차이가 미미하기 때문에 본 논

문에서는 수신코일 쇄교자속을 식 (3)과 같이 근사화하였다.

$$\lambda_r \approx N_r A_r (\mathbf{B}_c \cdot \mathbf{n}_r) \quad (3)$$

여기서 \mathbf{B}_c 는 수신코일 중심의 자속밀도이다.

2.1 수신코일 중심의 자속밀도

그림 1은 x-y 평면에 있는 원형 송신코일과 공간 상에 위치한 수신코일을 나타낸 그림이다. 수신코일의 중심 좌표 P(x, y, z)가 주어지면 Biot-Savart 법칙을 이용하여 송신코일 전류에 의해 수신코일 중심에 발생하는 자속밀도를 계산 할 수 있다. 계산된 자속밀도의 x, y, z 성분은 각각 식 (4), (5), (6)과 같다.

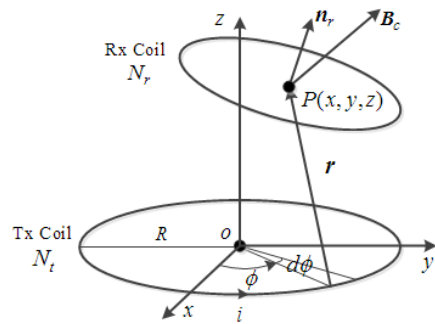


그림 1. 원형 송신코일에 의한 자속밀도

Fig. 1 Flux density by circular Tx. Coil

$$B_{cx} = iN_t \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 \cdot z \cdot R \cdot \cos\phi}{4\pi r^3} d\phi = k_x i \quad (4)$$

$$B_{cy} = iN_t \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 \cdot z \cdot R \cdot \sin\phi}{4\pi r^3} d\phi = k_y i \quad (5)$$

$$B_{cz} = iN_t \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 (R^2 - xR\cos\phi - yR\sin\phi)}{4\pi r^3} d\phi = k_z i \quad (6)$$

여기서

R : 송신코일의 반지름 [m]

i : 송신코일의 전류 [A]

N_t : 송신코일의 턴수

μ_0 : 진공의 투자율 [H/m]

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + R^2 - 2xR\cos\phi - 2yR\sin\phi}$$

k_x, k_y, k_z : 송신코일 전류에 의해 수신코일 중심에 발생하는 자속밀도의 비례상수이다.

2.2 수신코일 내부자속 계산 행렬

x-y 평면에 N 개의 송신코일이 있고 그 위 공간상에 M 개의 수신코일이 있다고 하면 식 (3)~(6)으로부터 n 번째 송신코일에 의한 m 번째 수신코일의 쇄교자속 λ_{mn} 은 식 (7) 과 같다.

$$\lambda_{mn} = N_m A_m [n_{mx} k_{x(m,n)} + n_{my} k_{y(m,n)} + n_{mz} k_{z(m,n)}] i_n = m_{mn} i_n \quad (7)$$

여기서

N_m : m 번째 수신코일의 턴수

A_m : m 번째 수신코일의 내부면적 [m^2]

$\mathbf{n}_m = [n_{mx} \ n_{my} \ n_{mz}]^T$: m 번째 수신코일 면적의 법선단위벡터

m_{mn} : n 번째 송신코일과 m 번째 수신코일 사이의 상호 인덕턴스 [H]

이다.

식 (7)로부터 N 개의 송신코일에 의한 M 개의 수신코일의 쇄교자속 $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_M]^T$ 를 행렬식으로 표현하면 식 (8)과 같이 상호 인덕턴스 행렬 \mathbf{M} 과 송신코일 전류벡터 \mathbf{I} 의 곱으로 표시된다.

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1N} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{M1} & m_{M2} & \dots & m_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \end{bmatrix} = \mathbf{M}\mathbf{I} \quad (8)$$

2.3 의사역행렬을 이용한 송신 전류 계산

식 (1)로부터 요구되는 전압을 유기할 수 있는 수신코일 쇄교자속 $\boldsymbol{\lambda}^*$ 가 주어지면 송신코일 전류벡터 \mathbf{I} 는 식(9)와 같이 \mathbf{M} 행렬의 의사역행렬인 \mathbf{M}^+ 와 $\boldsymbol{\lambda}^*$ 의 곱으로 계산 할 수 있다.

$$\mathbf{I} = \mathbf{M}^+ \boldsymbol{\lambda}^* = \mathbf{M}^T (\mathbf{M}\mathbf{M}^T)^{-1} \boldsymbol{\lambda}^* \quad (9)$$

식(9)로 계산된 전류벡터 \mathbf{I} 는 의사역행렬의 특성으로 2-norm의 크기가 최소인 해가 된다.[10]

2.4 송신코일의 전력 손실

송신코일은 저항성분(R_t)을 포함하고 있으므로 전력 손실이 발생한다. 송신코일 전체의 전력 손실 $P_{t(loss)}$ 는 식 (10)과 같으며, 식(9)로 계산된 전류벡터 \mathbf{I} 가 최소 2-norm 해이므로 송신코일의 전력손실이 최소가 됨을 확인할 수 있다.

$$P_{t(loss)} = R_t (i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_N^2) \quad (10)$$

2.5 송신코일 입력 전류 제한이 있는 경우

송신코일의 전류 크기가 제한되어 있는 경우 \mathbf{M} 행렬과 전류벡터 \mathbf{I} 의 차원을 축소시켜 계산할 수 있다. 송신코일 전류의 최대값을 i_{max} 라 할 때 송신코일 전류 계산 순서는 다음과 같다.

1. 식 (9)에 의해 전류벡터 \mathbf{I} 계산
2. 1번에서 계산된 송신코일 전류 중 i_{max} 보다 큰 값은 i_{max} , $-i_{max}$ 보다 작은 값은 $-i_{max}$ 로 제한
3. 2번에서 크기가 제한된 송신코일 전류에 의한 수신코일 쇄교자속(λ_{mn})을 요구 쇄교자속 $\boldsymbol{\lambda}^*$ 측으로 이항해 차감하고 해당되는 \mathbf{M} 열과 전류벡터 \mathbf{I} 행을 축소
4. 차원이 축소된 식 (9)로부터 전류벡터 \mathbf{I} 계산
5. 새롭게 계산된 전류벡터 \mathbf{I} 의 요소 중 전류 제한을 벗어나는 값이 있다면 순서 2~4 반복

III. Simulation

표 1은 Simulation을 위한 무선 전력 전송 시스템의 구성을 보인 것이다.

표 1. 송신/수신코일의 제한
Table 1. Parameters of Tx/Rx Coil

	Tx	Rx
The Number of Coil	21	1
Radius of Coil [m]	0.033	0.05
The Number of Turns	20	20

그림 2는 x-y 평면상 송신 코일의 배치를, 그림 3은 수신코일이 하나인 경우 수신코일의 배치를 보인 것이다. 수신코일의 중심 좌표는 (0 0 0.2) [m] 이다.

3.1 Magnetic Beam 형성 Simulation

송신코일 전류의 동작주파수를 1 [MHz], 수신코일 유기전력의 크기를 10 [V]인 정현파로 설정하였다.

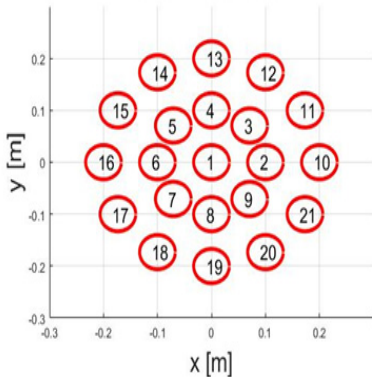


그림 2. 송신코일 배치
Fig. 2 Arrangement of Tx Coils

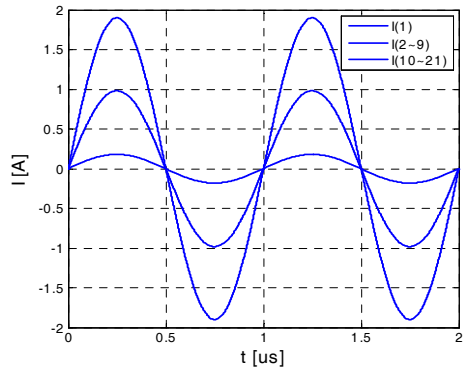


그림 4. 송신코일 전류
Fig 4 Tx Current

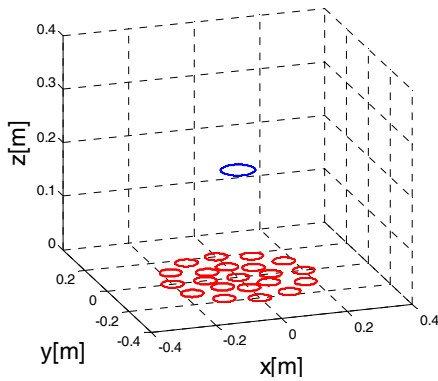


그림 3. 수신코일 배치
Fig. 3 Arrangement of Rx Coil

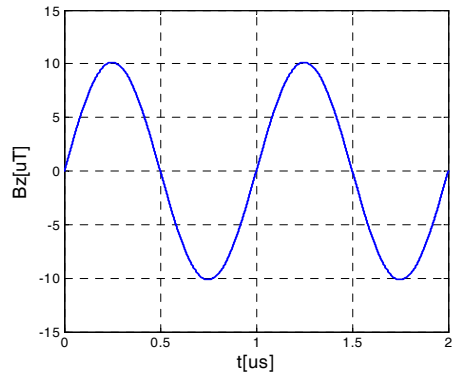


그림 5. 수신코일 중심에서의 자기장
Fig 5 Magnetic Field at the center of Rx Coil

식 (1) 및 표 1로부터 요구되는 정현파 수신코일 쇄교자속의 크기는 $\lambda^* = 1.592$ [uWb], 수신코일 내부 통과 자속의 크기 $\phi^* = 0.07958$ [uWb] 이 되며, 수신코일이 송신코일과 평행한 상태로 놓여 있어 수신코일의 법선단위벡터 $\mathbf{n} = [0 \ 0 \ 1]^T$ 이므로 요구되는 z 성분 자속 밀도의 크기 $B_z^* = 10.13$ [uT]가 된다.

그림 4는 식 (9)에 의해 계산된 각 송신코일의 전류벡터 \mathbf{I} 를 보인 것이며 그림 5는 수신코일 중심에 생성된 자속밀도의 z축 성분 B_z 를 나타낸 그래프이다. 그림 6은 그림 4와 같은 전류를 송신코일에 인가했을 때 수신코일 주변($z = 0.2$ m) 자속밀도 B_z 의 크기를 나타낸 그림으로 수신코일 주변에 요구되는 Magnetic Beam이 형성된 것을 확인 할 수 있다.

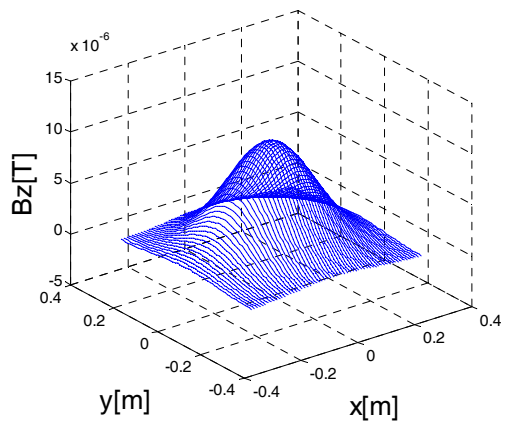


그림 6. 수신코일 주변 자속밀도
Fig. 6 Magnetic Field Around Rx Coil

3.2 송신 전류에 제한이 있는 경우

2.5절에 소개한 방법을 이용해 송신코일 전류의 제한이 있는 경우 전류를 계산할 수 있다. 표 2는 그림 6과 같은 Magnetic Beam을 형성할 때 전류제한에 따른 전류벡터 I 의 2-norm 과 수신코일 중심에 생성된 자속밀도의 z축 성분 B_z 를 비교한 표이다.

표 2. 전류 제한 시 송신코일 전류
Table 2. Tx. coil Current with current Limit

Current Limit [A]	2-norm of I [A]	B_z [uT]
No Limit	3.42	10.13
1.5	3.46	10.13
1.0	4.35	10.13

송신코일 전류 제한 값이 감소함에 따라 전류벡터 I 의 2-norm은 증가하나 수신코일 중심 자속밀도의 Z축 성분은 동일함을 확인할 수 있다.

3.3 다중 수신 시뮬레이션

수신코일이 여러 개인 경우를 검증하기 위해 그림 7과 같이 2개의 수신코일을 송신코일과 평행하게 배열 하였다. 2 개의 수신코일 중심좌표는 각각 (0.2, 0, 0.2)[m], (-0.2, 0, 0.2)[m] 이다.

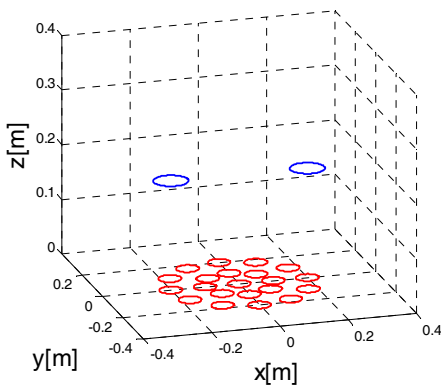


그림 7. 2개의 수신코일
Fig. 7 Two Rx Coils

그림 8은 한 개의 수신코일이 있을 때와 동일하게 2개의 수신코일 중심 자속밀도의 z축 성분 크기를 각

각 10.13[uT]로 설정할 때 수신코일 주변의 자속밀도 분포를 보인 것이다.

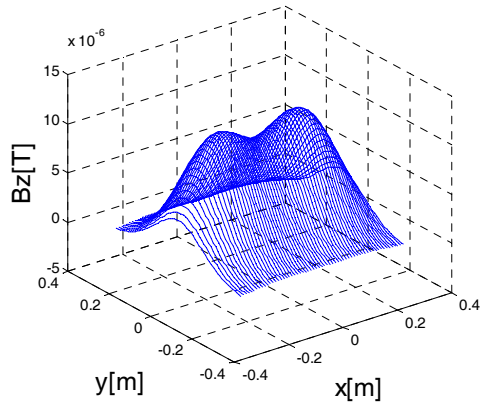


그림 8. 2개의 수신코일 주변 자속밀도
Fig. 8 Magnetic Field Around Two Rx Coils

IV. 결 론

본 논문에서는 전류제어방식으로 구동되는 송신코일 배열을 사용하여 최적 효율 무선 전력 전송을 위한 Magnetic Beam을 형성하는 기법을 제안하였다.

송신코일 전류와 수신코일 내부 자속의 관계식을 구하고 의사역행렬의 특성을 이용해 Magnetic Beam을 형성하는 송신전류를 계산하였고 Simulation을 통해 유용함을 확인하였다.

수신코일의 자세와 중심의 좌표로부터 계산한 상호 인덕턴스 행렬은 실용적인 면에서 실험에 의해 결정할 수 있어야 한다. N개의 송신코일에 대하여 각 송신코일 하나에만 전류를 흘린 상태에서 수신코일에 유기된 전압을 수신코일이 내장된 기기로부터 통신을 통해 획득함으로써 실험적으로 상호 인덕턴스 행렬을 구할 수 있다.

본 논문에서는 수신코일에 전력을 전송 할 때 수신코일 전류의 영향은 고려하지 않았다. 향후 이에 대한 영향을 보완한다면 본 논문에서 제안한 방식이 최적 효율의 무선 전력 전송 시스템 개발에 기여할거라 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

[1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications", *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, 2016, pp. 1413-1452.

[2] J. Murakami, F. Sato, T. Watanabe, H. Matsuki, S. Kikuchi, K. Harakawa, and T. Satoh, "Consideration on cordless power station - contactless power transmission system," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 32, no. 5, Sept. 1996, pp. 5037-5039.

[3] C. Kim, D. Seo, J. You, J. Park, and B. H. Cho, "Design of a contactless battery charger for cellular phone," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 6, Dec. 2001, pp. 1238-1247.

[4] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, July 2007, pp. 83-86.

[5] S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, Sept. 2014, pp. 4500-4511.

[6] C. M. Youn, "Study on the Design of High Efficient Class-E Power Amplifier and Resonant Coils for High Efficient Wireless Power Transfer System," *J. of the KIECS*, vol. 11, no. 10, Oct. 2016, pp. 935-940.

[7] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: a versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP Mag.*, vol. 5, no. 2, Apr. 1988, pp. 1-24.

[8] J. Jadidian and D. Katabi, "Magnetic MIMO: How to charge your phone in your pocket," *Proc. of ACM MobiCom*, proceeding 이라 vol., no. 없습니다. 2014, pp. 495-506.

[9] L. Shi, Z. Kabelac, D. Katabi, and D. Perreault, "Wireless Power Hotspot that Charges All of Your Devices," *Proc. of ACM MobiCom*, proceeding 이라 vol., no. 없습니다. 2015, pp. 2-13.

[10] D. Luenberger, *Optimization by Vector Space Methods*. New York: John Wiley & Sons, 1997.

저자 소개

정형준(Hyung-Jon Jung)



2017년 광운대학교 로봇학부 졸업 (공학사)
2019년 광운대학교 대학원 로봇학부 졸업(공학석사)

※ 관심분야 : 전력전자, 무선충전, 제어

최 익(Ick Choy)



1979년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1981년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
1982년 ~ 2003년 한국과학기술연구원 책임연구원
2003년 ~ 현재 광운대학교 로봇학부 교수
※ 관심분야 : 서보제어, 전력전자, 전동기제어