

자기 공진 결합 방식을 이용한 무선 전력 전송기술 구현을 위한 자기 공진기 소형화 설계

조영식¹ · 박지혜² · 남윤서² · 최세영^{2*}

Miniaturization of Inductive Resonator for Implementation of Wireless Power Transfer Technology Using Resonant Inductive Coupling

Young Seek Cho¹ · Ji Hye Park² · Yun Seo Nam² · Seyeong Choi^{2*}

¹Center for Advanced Electric Applications, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

²Department of Information and Communication Engineering, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

요 약

자기 공진 결합 (resonant inductive coupling) 현상을 이용한 무선 전력 전송 기술을 구현하기 위하여 새로운 구조의 자기 공진기를 제시한다. MIT 연구팀이 제안한 헬릭스 (helix) 모양의 자기 공진기의 크기를 줄이고, 공진 주파수 10 MHz를 유지하며, 무선 전력 전송 효율이 크게 열화 되지 않도록 설계한다. 새로운 구조의 자기 공진기는 스파이럴 (spiral) 모양으로써 헬릭스 모양 대비 소형화를 달성하였다. 스파이럴 모양 (1,696 cm³)의 자기 공진기는 헬릭스 모양 (59,376 cm³) 대비 97% 소형화를 이룩하였고, 무선 전력 전송 효율은 기존 기술 (2 m 거리에서 40 % 전송 효율) 대비 9% 이하로 차이를 줄임으로써 무선 전력 전송 기술의 실용화에 기여할 수 있게 되었다.

ABSTRACT

A novel inductive resonator for the implementation of wireless power transfer using resonant inductive coupling is presented. The proposed inductive resonator is much smaller than the helix shape resonator suggested by MIT research team but operates the same resonant frequency with comparable wireless power transfer efficiency. The proposed inductive resonator is a spiral shape (1,696 cm³), which is 97 % smaller than the helix shape (59,376 cm³). The wireless power transfer efficiency is less than 9 % when compared to the helix shape resonator. With the reduce size and comparable efficiency, this novel inductive resonator can be used in practical application of wireless power transfer.

키워드 : 무선 전력 전송, 소형화, 자기 공진 결합, 자기 공진기

Key word : inductive resonator, inductive resonant coupling, miniaturization, wireless power transfer

접수일자 : 2014. 07. 01 심사완료일자 : 2014. 07. 15 게재확정일자 : 2014. 07. 28

* **Corresponding Author** Seyeong Choi(E-mail:sychoi@wku.ac.kr, Tel:+82-63-850-6882)

Department of Information and Communication Engineering, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.8.1798>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

무선 전력 전송(Wireless Power Transfer) 시스템은 전력을 무선 전송에 유리한 마이크로파나 자기 공진의 물리현상을 이용하여 에너지를 전달하는 새로운 개념의 전력 전송 방식으로 전선 없이 전기에너지를 공간을 통해 보낼 수 있는 시스템이다. 무선 전력 전송을 위한 고전적인 정전기 유도 방식은 20 세기 초에 이미 발견되었다. 테슬라는 무선 전력 전송을 시현하기 위하여 “테슬라 코일”을 설계하였다[1].

표 1. 무선 전력 전송 시스템 비교
Table. 1 Comparison of wireless power transfer system

분류	전송거리	특성
원거리 전송	수 km - 수백 km	수 GHz 주파수 고출력 전송
근거리 전송	수 m - 10 m 내외	수십 MHz &- 수백 MHz 저출력 전송
비접촉 전송	수 mm 내외	고효율 전송 자기 결합 방식

표 1에 거리에 따른 무선 전력 전송 시스템을 분류하였다. 원거리 전송을 위하여 지향성을 갖는 고주파 에너지 전송은 주로 공중이나 우주공간에서 무선 전력 전송을 위하여 제안되었다. 지향성을 갖는 고주파 에너지 전송을 위한 한 가지 방식은 고출력 마이크로파 전력 전송이다[2-4].

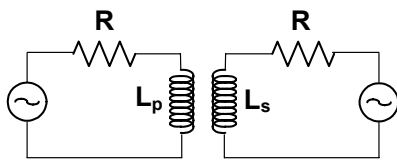


그림 1. 자기 결합 방식을 이용한 무선 전력 전송 개념도
Fig. 1 Schematic of wireless power transfer using inductive coupling

근거리장 (near-field) 또는 비방사 (non-radiative) 전력 전송 방식은 자기 결합 (inductive coupling) 방식과 자기 공진 결합 (resonant inductive coupling) 방식 등 두 가지가 있다. 그림 1에 묘사된 자기 결합 방식은 휴대폰, 태블릿 컴퓨터, 전동 칫솔, 전기 면도기 같은 휴대

용 전자제품을 위한 범용 충전기[5], 집적회로 내부의 전력 공급[6], 의료용 기구의 전력 공급[7] 등에 폭 넓게 사용된다. 이러한 자기결합 충전기와 배터리는 서로 접촉되거나 매우 가깝게 서로 놓아야 한다.

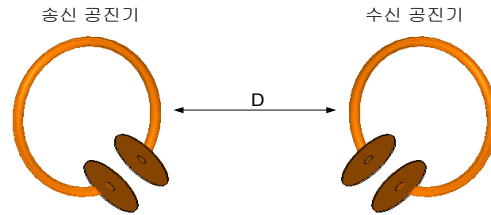


그림 2. 자기 공진 결합 방식을 이용한 무선 전력 전송 개념도
Fig. 2 Schematic of wireless power transfer using resonant inductive coupling

자기 공진 결합 방식은 자기 결합 방식보다 좀 더 효율적인 무선 전력 전송 방식이다. 자기 공진 결합 방식에서는 두 개의 같은 공진 주파수를 갖는 시스템은 결합되기 쉽지만, 공진 주파수가 다른 시스템과는 공진 현상이 일어나지 않는 현상을 이용하는 것이다. 방사 또는 흡수에 의한 손실을 최소화하여 근거리 장을 갖는 전자기적 공진기를 설계함으로써, 적정 수준 효율을 보이는 무선 전력 전송 방식을 구현 할 수 있다. 이와 같은 자기 공진 결합 구조의 개념도를 그림 2에 도시하였다.

MIT 물리학과와 마린 솔라지치(Marin Soljacic) 교수 연구팀은 자기 공진 결합 방식을 채택하여 무선 전력 전송 기술을 시연하였음을 발표하였다[8]. 자기 공진 결합 방식에서 메타물질을 이용한 공진기 개발이 제안되기도 하였다[9].

본 논문에서는 MIT 연구팀이 제안한 자기 공진 결합 방식을 도입하되, 협소한 공간에서 사용이 가능하도록 무선 전력 전송 시스템의 수신부 회로의 소형화 방법을 제시하고, 무선 전력 전송 효율을 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 3차원 초고주파 모델링 소프트웨어 패키지, High Frequency Structure Simulator (HFSS)[10]를 이용한 자기 공진 결합 방식을 이용한 무선 전력 전송 시스템의 모델링 방법론을 소개한다. III장에서는 본 논문에서 제안한 스파이럴 모양의 공진기 설계 방법론을 소개한다. 끝으로 IV장에서는 본 논문의 결론과 향후 추가 연구 분야를 제시한다.

II. 무선 전력 전송 시스템 모델링

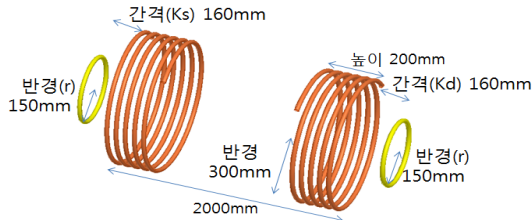


그림 3. MIT 연구팀이 제안한 무선 전력 전송 시스템의 HFSS 모델

Fig. 3 HFSS model of wireless power transfer suggested by MIT research team

HFSS 모델링의 결과를 검증하기 위하여 MIT 연구팀이 제안한 자기 공진 결합 방식을 이용한 무선 전력 전송 시스템을 HFSS를 이용하여 모델링하였다. MIT 연구팀이 제시한 송수신 공진기의 크기와 모양 (반경 300 mm와 높이 200 mm, 그리고 5.25-turn의 helix 모양)을 HFSS를 이용하여 그림 2와 같이 모델링하였다. 전송 효율은 그림 3의 입력 코일과 출력 코일 사이의 산란 파라미터(scattering parameter, S-parameter)를 HFSS를 이용하여 계산한 다음 아래의 식 (1)에 따라 계산된다. 아래 식에서 S_{21} 은 산란 파라미터의 전송 계수를 의미한다.

$$\eta = |S_{21}|^2 \times 100 \quad (1)$$

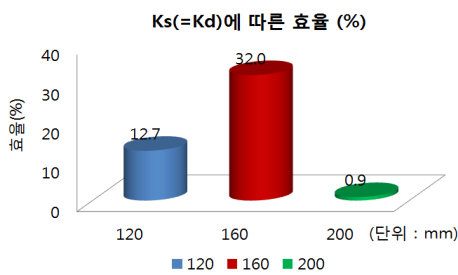


그림 4. 코일과 공진기 간격에 따른 전송 효율 비교

Fig. 4 Comparison of transmission efficiency with respect to the space between coil and resonator

그림 4는 입력 코일과 송신 공진기 사이의 간격(K_s)과 출력 코일과 수신 공진기 사이의 간격(K_d)을 120 mm에서부터 200 mm까지 40 mm씩 증가시켜 실험한

결과를 보여준다. 여기에서 입력 코일과 출력 코일의 반경은 200 mm로 동일하고, 송수신 공진기의 반경은 300mm로 동일한 조건에서 실험하였다. 이 실험에서 $K_s = K_d$ 이며 입출력 코일과 송수신 공진기 사이 간격을 변경하여 실험하였다. 120 mm에서는 12.7 %의 효율을 얻을 수 있었고, 200 mm에서는 0.9%의 효율이 나타났다. 코일과 공진기의 이격 거리를 조절하여 시뮬레이션 한 결과, 160 mm일 때 32 %로 효율이 가장 높다.

그림 5는 K_s 가 160 mm일 때의 산란 파라미터 결과 값을 보여준다. 그림에서 보여진 바와 같이 10.5 MHz 일 때 32 %의 효율을 얻은 결과를 확인할 수 있다.

전송 효율 향상을 위하여 입출력 코일의 반경(r)의 변화에 따른 효율을 분석하였다. 앞선 실험 결과에서 가장 효율이 좋았던 K_s 와 K_d 의 거리는 160 mm로 고정하고 코일의 반지름을 변경하여 실험하였다. 송수신 공진기의 반경이 300 mm이기 때문에 코일의 반지름을 250 mm부터 시작하였고 14.9 %의 효율을 얻었다. 220 mm 일 때는 20.3%의 효율을 얻었고, 반지름이 줄어들수록 효율이 향상됨을 파악하고 반지름을 줄이면서 시뮬레이션을 반복하였다.

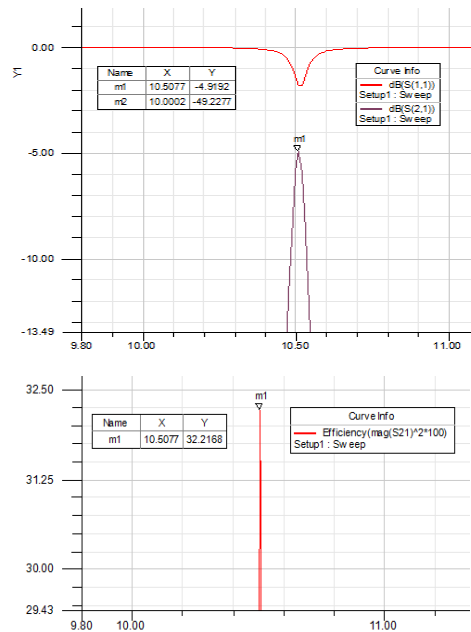


그림 5. $K_s=160$ mm 일 때 S-parameter와 전송 효율

Fig. 5 S-parameter and transmission efficiency at $K_s=160$ mm

코일의 반경이 150 mm일 때 MIT에서 발표한 논문과 같은 2 m 떨어진 곳에서의 40 % 효율을 얻었다. 실험 결과는 그림 6와 그림 7에서 확인할 수 있다.

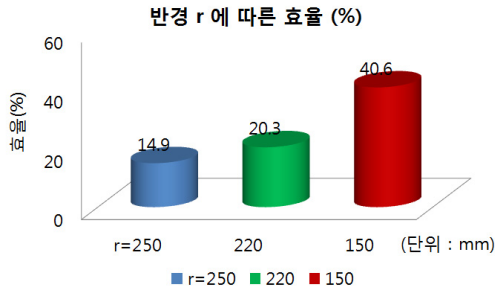


그림 6. 코일의 반경에 따른 전송 효율 비교
Fig. 6 Comparison of transmission efficiency with respect to the radius of the coil

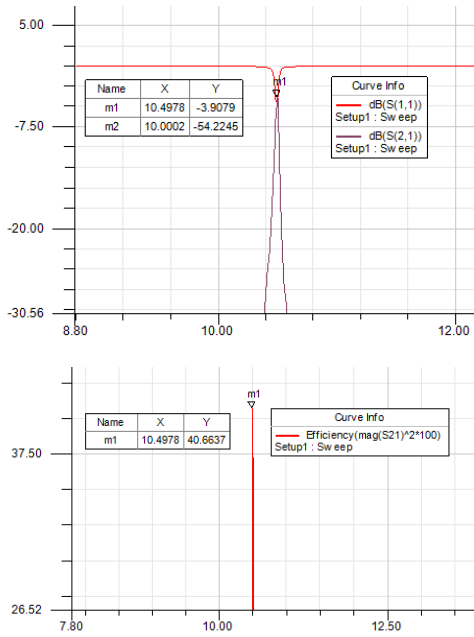


그림 7. 코일의 반경이 160 mm일 때의 S-parameter와 전송 효율
Fig. 7 S-parameter and transmission efficiency at r = 160 mm

그림 8은 효율 40.6%일 때의 자장 (magnetic field: H-field) 분포를 보여준다.

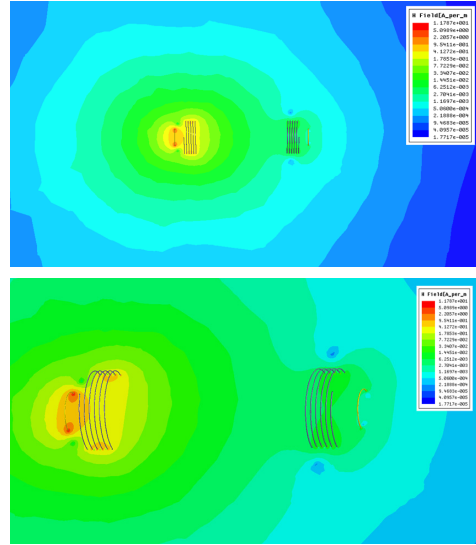


그림 8. 헬릭스 모양의 공진기로 구성된 무선 전력 전송 시스템의 자장(magnetic field) 분포
Fig. 8 Magnetic field distribution in wireless power transfer using helix shape resonators

III. 수신부 공진기의 소형화 설계

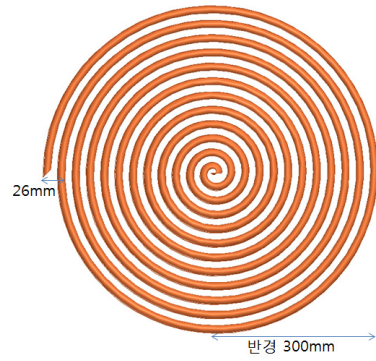


그림 9. 스파이럴 모양의 공진기 모양과 크기
Fig. 9 Shape and dimension of a spiral shape resonator

MIT 연구팀의 연구 결과를 HFSS 시뮬레이션을 통하여 확인하였지만 송수신 resonator의 반경과 높이가 각각 300 mm, 210 mm로 부피가 큰 단점이 있다. 특히 수신부 공진기는 제한된 공간에서 사용해야 할 경우를 대비하여 소형화가 필수적 과제이다. 본 연구에서는 MIT 연구팀이 제안한 헬릭스 모양의 공진기를 스파이

럴 모양의 공진기로 변경하여 소형화를 달성하였다.

그림 9는 본 연구에서 개발한 스파이럴 모양의 공진기의 3차원 모델이다. 본 연구에서는 헬릭스 모양의 공진기를 송신부 공진기를 그대로 사용하기로 하였다. 헬릭스 모양의 공진기의 공진 주파수가 10.6 MHz이므로 수신부 공진기로 쓰일 스파이럴 모양의 공진기의 공진 주파수도 10.6 MHz로 일치시켜야한다. 공진주파수 10.6 MHz인 동작하는 공진기를 얻기 위하여 반경은 헬릭스 모양의 공진기와 동일한 300 mm로 고정하고, pitch와 turn 수를 변경하여 pitch와 turn 수를 최적화 하였다. pitch가 20 mm이고, turn 수가 11.5 일 때 가장 근접한 주파수가 얻어짐을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 그림 10은 pitch와 turns의 변화에 따른 주파수 변화를 나타내었다. 그림 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 헬릭스 모양의 공진기와 공진주파수가 동일함을 알 수 있다.

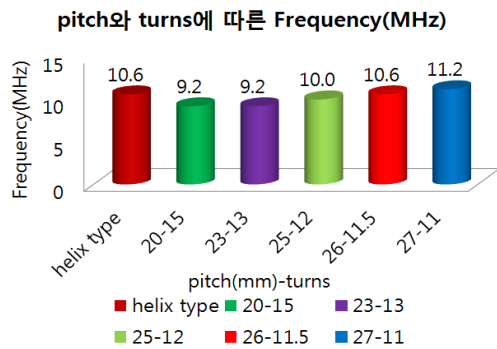


그림 10. 스파이럴 모양의 공진기의 pitch와 turn 수에 따른 공진 주파수
 Fig. 10 Resonant frequency of the spiral shape resonator with respect to pitch and number of turns

앞서 얻어진 최적화 된 입력 코일과 출력 코일의 반경(r)은 150 mm로 선택하고, 입력 코일과 송신부 공진기(헬릭스 모양의 공진기) 사이의 간격(K_s)과 출력 코일과 수신부 공진기(스파이럴 모양의 공진기) 사이의 간격(K_d)을 80 mm부터 200 mm까지 동일하게 변경하여 효율을 분석하였다. 그 결과는 아래 그림 11과 같다.

하지만 송신부와 수신부 공진기의 모양이 다르기 때문에 K_s 와 K_d 를 동일하게 설정하면 효율이 떨어지는 결과가 그림 11처럼 도출되었다.

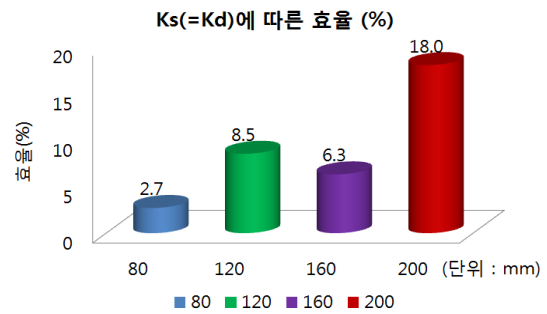


그림 11. 스파이럴 모양의 공진기를 수신부 공진기로 사용할 때 코일과 공진기 사이의 거리에 따른 전송 효율 비교

Fig. 11 Comparison of transmission efficiency of wireless power transfer system using the spiral shape resonator as the receiver

따라서 그림 12에 보인 바와 같이 K_s (입력 코일과 헬릭스 모양의 공진기 사이의 거리)는 160 mm로 고정하고, K_d (출력 코일과 스파이럴 모양의 공진기 사이의 거리) 값을 변경하여 효율을 분석하였다.

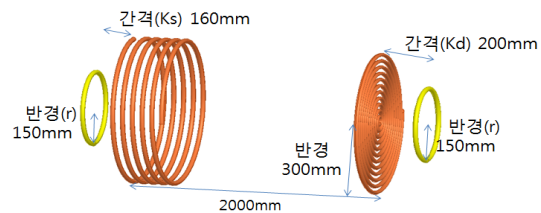


그림 12. 스파이럴 모양의 공진기를 수신부 공진기로 사용한 무선 전력 전송 시스템의 HFSS 모델
 Fig. 12 HFSS model of wireless power transfer system using the spiral shape resonator as a receiver

그림 13은 K_s 를 160 mm로 고정하고 K_d 만 변경하여 실험한 결과를 보여준다. K_d 값이 200 mm일 때 가장 효율이 좋은 것을 알 수 있다. 스파이럴 모양의 공진기를 수신부 공진기로 사용하였을 때 31.4%의 효율을 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

헬릭스 모양의 공진기를 수신부 공진기로 사용하였을 때보다 약 9% 정도의 효율 저하가 발생하였다. 원인은 스파이럴 모양의 공진기의 Q-factor 값이 헬릭스 모양의 공진기보다 작기 때문이다. 공진기의 부피를 대폭 줄였지만 효율이 저하되기 때문에 무선 전력 전송 시스템의 적용 분야에 따라 부피와 효율 사이의 설계 trade-off가 필요함을 알 수 있다.

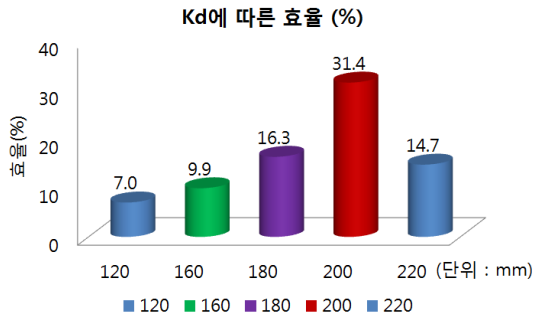


그림 13. 스파이럴 모양의 공진기와 출력 코일의 거리에 따른 전송 효율 비교
 Fig. 13 Comparison of transmission efficiency with respect to the distance between spiral shape resonator and output coil

그림 14는 스파이럴 모양의 공진기를 수신부 공진기로 사용하였을 때 얻어진 효율 31.4% 일 때의 산란 파라미터 결과 값을 보여준다.

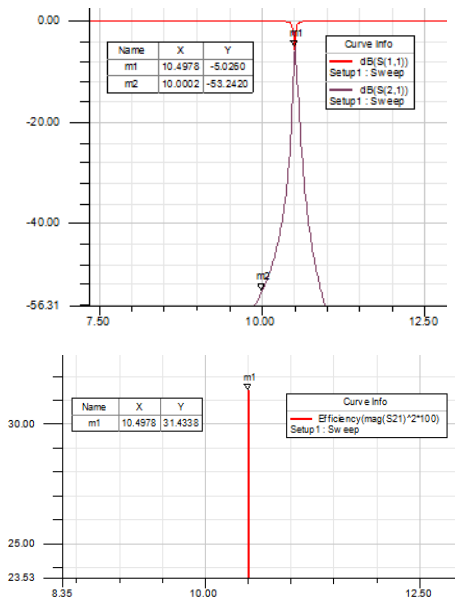


그림 14. 스파이럴 모양의 공진기를 수신부 공진기로 사용했을 때의 S-parameter와 효율
 Fig. 14 S-parameter and transmission efficiency when using the spiral shpae resonator as the receiver

그림 15는 효율 31.4%일 때의 자장 (magnetic field: H-field) 분포를 보여준다.

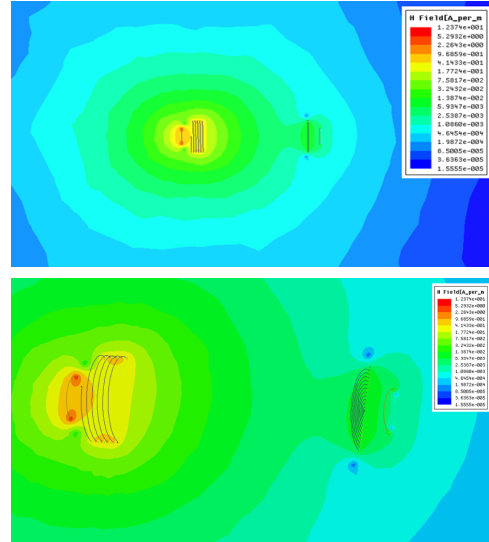


그림 15. 헬릭스 모양의 공진기(송신부)와 스파이럴 모양의 공진기(수신부)로 구성된 무선 전력 전송 시스템의 자장(magnetic field) 분포
 Fig. 15 Magnetic field distribution in wireless power transfer using helix shape resonator for transmitter and spiral shape resonator for receiver

IV. 결 론

본 논문에서는 MIT 연구팀이 제안한 자기 공진 결합 방식을 이용한 무선 전력 전송 시스템의 수신부 공진기 소형화 설계 방안을 제시하였다. 3차원 초고주파 모델링 소프트웨어 패키지 (ANSYS 사의 HFSS)를 이용하여 시뮬레이션 한 결과 기존 기술 대비 97 % 소형화를 이룩하였고, 31.4%의 무선 전력 전송 효율을 얻을 수 있었다. 9 % 저하된 전송 효율은 향후 계속 연구가 필요하다. 또한 HFSS 시뮬레이션을 통하여 얻어진 무선 전력 전송 시스템의 효율에 관한 실제 측정 결과도 향후 추진해야 할 과제이다.

REFERENCES

[1] N. Tesla, *Apparatus for transmitting electrical engergy*, US patent number 1,119,732, Patent and Trademark Office, Washington D.C., 1914.
 [2] W. C. Brown and E. E. Eves, "Beamed microwave power

- transmission and its application to space,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, vol. 40, no. 6, June 1992.
- [3] J. O. McSpadden and J. C. Mankins, “Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology,” *IEEE Microwave Magazine*, pp. 46-57, Dec. 2002.
- [4] V. Jamnejad and A. Silva, “Microwave power beaming strategies for fractionated spacecraft systems,” in *Proceeding of 2008 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-14, March 2008.
- [5] B. Choi, J. Nho, H. Cha, T. Ahn, and S. Choi, “Design and Implementation of Low-Profile Contactless Battery Charger Using Planar Printed Circuit Board Windings as Energy Transfer Device,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 140-147, Feb. 2004.
- [6] R. Matias, B. Cunha, and R. Martins, “Modeling inductive coupling for wireless power transfer to integrated circuits,” in *Proceeding of 2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT)*, pp. 198-201, May 2011.
- [7] T. Sun, X. Xie, G. Li, Y. Gu, Y. Deng, and Z. Wang, “A two-hop wireless power transfer system with an efficiency-enhanced power receiver for motion-free capsule endoscopy inspection,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 11, pp. 3247-3254, Nov. 2012.
- [8] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joanopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, “Wireless power transfer via strongly magnetic resonances,” *Science*, vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [9] B. Wang, W. Yezazunis, and K. H. Teo, “Wireless power transfer: metamaterials and array of coupled resonators,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1359-1368, June 2012.
- [10] High Frequency Structure Simulator (HFSS), Version 15.0, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA.



조영식(Young Seek Cho)

1998년 ~ 2004년: SK 텔레텍 (SK 텔레콤 자회사, 현 (주) 팬택) 선임연구원
2010년: Ph. D. in electrical engineering, University of Minnesota, Twin Cities, USA
2011년: Post Doctoral Associate, Purdue University, USA
2012년 ~ 현재: 원광대학교 공과대학 연구교수
※ 관심분야 : 초고주파 회로 설계, 3차원 패키징, 무선 전력 전송, 무선 센서 네트워크



박지혜(Ji Hye Park)

2010년 ~ 현재: 원광대학교 공과대학 정보통신공학과 학부과정
※ 관심분야 : HFSS 설계 및 실험, 무선 전력 전송, 무선 센서 네트워크



남윤서(Yun Seo Nam)

2011년 ~ 현재: 원광대학교 공과대학 정보통신공학과 학부과정
※ 관심분야 : HFSS 설계 및 실험, 무선 전력 전송, 무선 센서 네트워크



최세영(Seyeong Choi)

1998년 ~ 2000년: LG 텔레콤, 주임연구원
2007년: Ph. D. in electrical engineering, Texas A&M University, TX, USA
2007년 ~ 2008년: Post Doctoral Research Associate / Research Consultant, TAMUQ, Doha, Qatar
2008년 ~ 2010년: LG전자, 책임연구원
2010년 ~ 현재: 원광대학교 공과대학 정보통신공학과 조교수
※ 관심분야 : 무선 센서 네트워크, 무선이동통신, 페이딩채널, 다이버시티 기법, 시스템 성능분석