

Feasible approach of contactless power transfer technology combined with HTS coils based on electromagnetic resonance coupling

Yoon Do Chung^{*a}, Seong Woo Yim^b, and Si Dole Hwang^b

^a Suwon Science College, Gyeonggi-do, Korea

^b Korea Electric Power Corporation Research Institute, Daejeon, Korea

(Received 29 January 2013; revised 19 March 2013; accepted 20 March 2013)

Abstract

The contactless power transfer (CPT) systems have been recently gaining popularity widely since it is an available option to realize the power delivery and storage with connector-free devices across a large air gap. Especially, the CPT with electromagnetic resonance coupling method is possible to exchange energy within 2 m efficiently. However, the power transfer efficiency of CPT in commercialized products has been limited because the impedance matching of coupled coils is sensitive. As a reasonable approach, we combined the CPT system with HTS wire technology and called as, superconducting contactless power transfer (SUCPT) system. Since the superconducting coils have an enough current density, the superconducting antenna and receiver coils at CPT system have a merit to deliver and receive a mass amount of electric energy. In this paper, we present the feasibility of the SUCPT system and examine the transmission properties of SUCPT phenomenon between room temperature and very low temperature at 77 K as long as the receiver is within 1.0 m distance.

Keywords: high temperature superconducting resonance coupling, superconducting contactless power transfer

1. 서 론

최근 전원 선을 사용하지 않고 자유공간을 매질로 하여 전력을 전송하는 무선전력전송(Contactless Power Transfer: CPT) 기술 (그림 1)에 대한 관심이 높아지고 있다[1-2]. 특히, 휴대용기기 및 가전용 전자 제품이 다양해짐에 따라 모바일 기능을 확대시켜 더욱 편리하게 사용할 수 있을 뿐 아니라 대용량의 전력을 사용할 경우 더욱 안전하게 사용할 수 있다는 장점 때문에 소규모 전자기기 시스템뿐 아니라 대전력으로 전력을 공급하는 전력기기 시스템에 대한 적용연구가 날로 증가하고 있다[3].

무선전력전송 시스템은 사용주파수에 따라 원거리, 근거리, 단거리 무선전력전송으로 구분된다[1,4]. 단거리 유도결합방식은 수백 KHz 미만의 주파수를 사용하기 때문에 전송거리가 짧은 단점이 있으나 송수신 2개 코일 구조로 간단하면서 수 KW의 전력 전송이 가능하다. 근거리 공진결합방식은 전송 전력도 전송거리에 따라 수백 W까지 가능하며 멀티 수신이 가능한 장점이 있다. 2007년 MIT 물리학과와 마린 솔라지치 (Marin Soljačić) 교수팀이[5-6] 제시한 4개의 공진코일로 구성된 근거리 무선전송기술은 13.56 MHz의 고주파 전원증폭기를 사용하여 나선형(Helical) 형태의 송수신 코일로 2 m 거리에서 60 W의 전구에 전력을 성공적으로 전송(전송효율은 40% @ 2m)하였고 이는 무선전력전송 연구의 기폭제 역할을 하였다.

현재 근-단거리 무선전송 기술의 송수신 코일은 상전도 선재(구리코일)를 사용하고 있어 기술의 접근성과 설치의

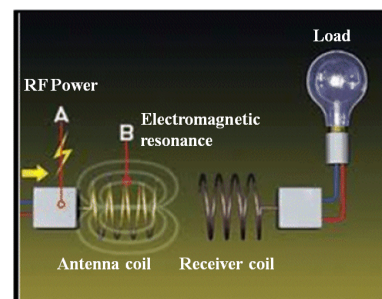


Fig. 1. Schematic diagram of contactless power transfer (CPT) technology [1].

간편성의 장점이 있다. 반면 구리선재를 사용하므로 대용량의 전력 전송에 원천적인 한계가 있다. 또한 코일간의 임피던스 변화가 거리에 따라 매우 민감하기 때문에 전송효율에 직접적인 영향을 미치게 된다[7]. 따라서 상전도 선재를 활용한 무선전력전송 기술은 무 접촉 전력전송이라는 장점에도 불구하고, 이동거리에 따른 임피던스 변화로 인한 전송효율의 한계로 아직 상용화를 위한 다양한 선재를 활용한 연구가 요구되어지고 있다.

무선전력전송기술은 초전도 코일 시스템에서는 매우 중요한 옵션으로 장점이 된다. 즉, 초전도 선재는 극저온의 냉각용기에서 냉각시켜야 하기 때문에, 상온에서 전력을 인가하기 위해서는 전원 선이 반드시 필요하다 [8]. 초전도 선재는 근본적으로 전류리드를 통한 열 침입으로 인해 문제를 해결하는 것이 초전도 전력기기 시스템에서 반드시 요구되는 기술이다 [9].

따라서, 이와 같은 초전도 선재의 접촉저항을 줄일 수

* Corresponding author: ydchung@ssc.ac.kr

있는 해결방법으로, 본 연구팀은 무선전력전송기술에 고온 초전도 선재를 활용하는 초전도 무선전력전송 (Superconducting Contactless Power Transfer: SUCPT) 시스템을 제안하였다[10]. 초전도 무선전력전송 기술은 상전도에서 극저온의 초전도 코일에 전력을 무선으로 전송하는 기술로 전류 리드선에서 발생하는 에너지 손실을 없앨 수 있을 뿐 아니라, 모바일 특성을 갖기 때문에 설치의 편리성, 안정성의 장점을 갖게 된다. 더 나아가, 초전도 선재는 상전도 선재와 비교하여 전류밀도가 매우 높기 때문에 대용량의 에너지 저장능력이 있으므로 다양한 초전도 전력기기 시스템에 활용이 가능하다.

본 논문에서는 구리선의 송신 안테나와 고온 초전도 수신코일을 이용한 공진결합방식의 초전도 무선전력전송 (SUCPT) 시스템의 구성과 동작 메커니즘에 대해 설명한다. 또한, 전송 거리 변화에 따른 상전도 코일과 고온초전도 공진코일의 전송특성을 실험적으로 조사하였다.

2. 본 론

2.1. 초전도 무선전력전송 시스템의 구성 및 메커니즘

그림 2는 공진결합 방식의 초전도 무선전력전송 시스템의 기본 구조를 보여준다. 전원코일 Sx, 전송코일 Tx, 수신코일 Rx, 부하 코일 Lx의 4개의 공진코일로 구성되었다. 송신부분은 구리 선재 그리고 수신부분은 고온초전도 선재로 각각 구성되었다. 4개의 공진코일은 각각 자기 저항 R , 자기 인덕턴스 L , 자기 커패시턴스 C 값을 갖는다. Tx와 Rx코일은 임피던스 일치에 의한 전자기 공진현상으로 공간을 통해 전력이 전송되며 두 코일간의 거리가 증가하게 되면 코일간의 임피던스 차이가 발생하게 되어 결합계수 값이 변하게 되어 전송효율이 떨어지게 된다.

그림 3은 4개의 공진코일로 구성된 초전도 무선전력전송 시스템의 등가회로를 나타낸다. 각각의 공진코일에서는 폐루프(closed loop)를 형성하기 때문에 각 코일 간에 유도결합에 의해 기전력이 발생하며 키르히호프의 전류법칙을 이용하여 각 루프의 전압, 전류 관계를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_s = Z_1 I_1 + j\omega M_{12} I_2 - j\omega M_{13} I_3 - j\omega M_{14} I_4 \quad (1)$$

$$0 = j\omega M_{12} I_1 + Z_2 I_2 + j\omega M_{23} I_3 - j\omega M_{24} I_4 \quad (2)$$

$$0 = -j\omega M_{13} I_1 - j\omega M_{23} I_2 + Z_3 I_3 + j\omega M_{34} I_4 \quad (3)$$

$$0 = -j\omega M_{14} I_1 - j\omega M_{24} I_2 + j\omega M_{34} I_3 + Z_4 I_4 \quad (4)$$

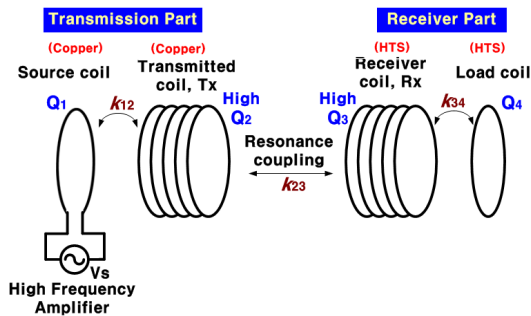


Fig. 2. Schematic diagram of superconducting contactless power transfer (SUCPT) system with four-separate resonance coils.

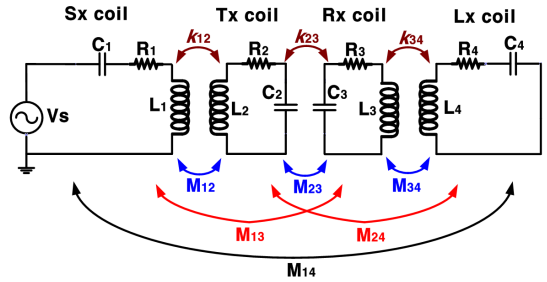


Fig. 3. Equivalent circuit diagram of SUCPT with four separate resonance coils.

Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 와 I_1, I_2, I_3, I_4 는 각 공진코일의 임피던스와 루프 전류를 나타낸다. 입력전원 V_s , 각 공진코일의 임피던스 값과 상호인덕턴스 M 값을 측정하고 식 (1)~(4)를 이용하여 각 공진코일에 유도되는 전류 값을 계산할 수 있다.

2.2. 설계요소

초전도 무선전력전송 시스템을 구성함에 있어 전송효율에 영향을 미치는 설계요소는 다음과 같이 구성된다. 전송효율의 정도를 나타내며 공진을 가지는 장치의 성능지수를 나타내는 quality factor Q값은 다음과 같이 표현된다.

$$Q = \omega_0 \left(\frac{\text{최대에너지저장}}{\text{평균전력손실}} \right) = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

높은 Q factor는 좁은 대역폭을 의미함과 동시에 주파수영역에서 높은 선택성을 지니고 있으므로 전송효율이 높음을 의미한다. 결합계수 k 는 두 코일 사이의 일치 상태를 나타내며 코일 사이의 거리와 상대적인 크기에 따라 영향을 받는다. k_{ij} 코일간의 결합계수 (Coupling coefficient)를 나타내며 M_{xy} 는 상호 인덕턴스 값을 나타내며 계산식은 다음 식과 같다.

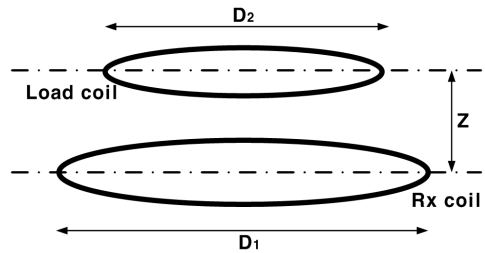


Fig. 4. Illustration of coil size and position for resonance coils.

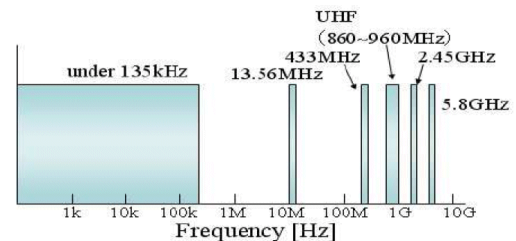


Fig. 5. Usable RF scope of ISM band [11].

$$k_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}}, \quad M_{ij} = \frac{|L_i - L_j|}{4} \quad (6)$$

전력손실요소 λ 는 전력 전송시 고주파의 영향으로 코일에서 발생하는 열 때문에 전력 손실이 발생하게 되는데 이는 무선전력전송 시스템에서 효율의 한계를 가지게 된다. 전력손실요소는 다음 계산식과 같이 표현된다[11].

$$\lambda = \frac{P_{loss}}{P_{out}} \quad (7)$$

$$\lambda_{min} = \frac{2}{(Qk)^2} \left(1 + \sqrt{1 + (Qk)^2} \right) \quad (8)$$

따라서 결합계수 k 와 quality factor Q 값이 클수록 전력손실요소를 줄일 수 있다. 따라서 초전도 무선전력전송 시스템에서 전송효율을 향상시키기 위해서는 Tx 와 Rx코일이 높은 Q 값과 높은 k 값을 유지해야 한다.

또한 4개의 공진코일의 구성에서 Sx 코일 vs Tx 코일, Rx 코일 vs Lx코일 사이에 각각의 직경과 간격도 전송효율에 영향을 미친다. 그림 4는 송수신 결합코일간의 직경과 위치를 보여준다. 두 코일간의 거리가 멀어질수록 효율은 급격히 감소한다. 또한 두 코일의 직경차이가 커질수록 효율은 감소한다. 다음과 같은 설계 조건에서 높은 전송효율을 만족시키게 된다[1].

$$\frac{z}{D} < 0.1, \quad \frac{D_2}{D_1} = 0.5 \sim 1 \quad (9)$$

무선전력전송 시스템에서는 고주파의 발전기가 필요하다. 최근에는 통신용도가 아닌 산업, 과학, 의료분야를 위해 예약이나 사전 허가 없이 사용 가능한 주파수영역을 주파수 대역 ISM(Industrial Science Medical) band 라는 영역에서 자유롭게 사용 가능한 주파수 대역이 국제적으로 설정되어 있다. 그림 5는 ISM band 영역을 보여주고 있다[11]. 본 연구에서는 ISM band에서 허용하는 13.56 MHz의 주파수 영역의 RF 전원 증폭기를 자체 개발하여 무선전력전송특성을 조사하였다.

3. 실험구성 및 결과

3.1. 실험구조 및 설계사양

본 연구에서 공진결합방식의 초전도무선전력전송시스템의 송수신(상온에서 극저온으로) 코일간의 전송특성을 조사하기 위해 그림 6과 같은 실험 장치를 구성하였고, Sx 코일과 Tx코일은 구리관 형태의 코일을 사용하였고 Rx 코일과 Lx코일은 테이프형태의 고온 초전도선재를 각각 사용하였다. 4개의 공진코일은 안정적인 전자기파의 전송을 위해 동일 직선상에 배열하였다. 각 공진코일의 특성은 표 2와 같다. Rx 와 Lx 코일은 액체질소에 냉각되어 있고 Tx 와 Rx코일간의 임피던스를 일치시키기 위해 50 Ω 급 저항과 100 pF용 가변 커패시터를 사용하였다.

냉각용기는 스티로폼으로 제작된 용기가 사용 되었고 추후 다양한 형태와 재질의 냉각용기에 대한 전송효율을 측정할 계획이다. Sx, Tx, Rx, Lx 코일과 같은 4개의 공진코일의 전압과 전류를 측정하기 위해 오실로스코프용 전압, 전류 프로브(probe)를 각각 사용하였다. 그림 7은 제작된 4개의 공진코일과 데이터 검출장치와 RF 전원

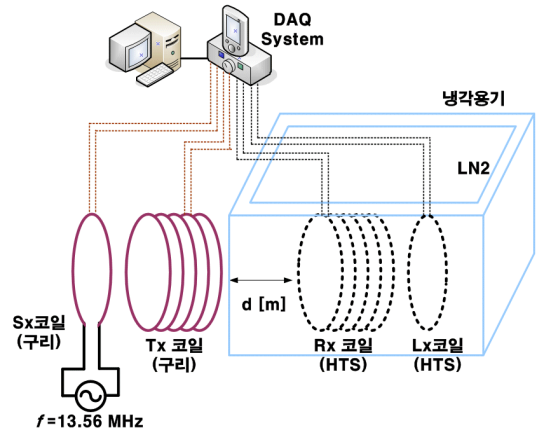


Fig. 6. Illustration of experimental setup for SUCPT with four-separate resonance coils.

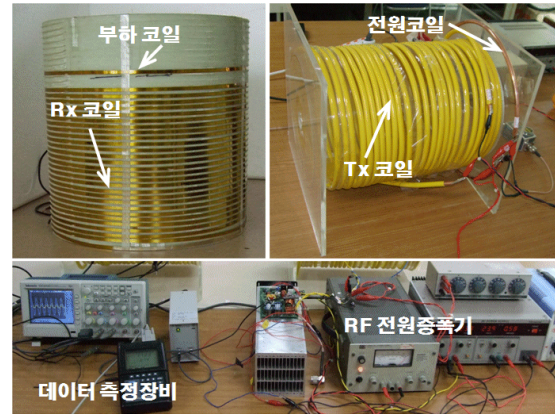


Fig. 7. Photograph of fabricated experimental components for SUCPT system with four-separate resonance coils.

TABLE I
ILLUSTRATIONS OF EXPERIMENTAL SETUP FOR SUCPT WITH
FOUR-SEPARATE RESONANCE COILS.

Parameters	Dimensions
HTS coil (AMSC 344S) (thickness, width)	$l_c = 72 \text{ A @ } 77 \text{ K}$ (0.3 mm, 4.5 mm)
Inner diameter of copper tube coil/ thickness	9.52 / 0.7 mm
Turn number of Tx & Rx coils	25 / 28 turns
Bobbin diameter of Tx & Rx coils	33 / 30 cm
Diameter of Sx & Lx coils	35 / 30 cm
Length of Sx & Lx coils	1.1 / 0.9 m
Length of Tx & Rx coils	22 m
Inductance of Rx coil (@4.2 K, 13.56 MHz)	11.24 mH
Inductance of Tx coil (@ 300 K, 13.56 MHz)	15.98 mH

증폭기시스템을 보여준다. 또한 제작된 200 W급 13.56 MHz의 RF 전원 증폭기의 동작 사양은 표 3과 같다.

3.2. 실험결과

본 실험에서 Sx 와 Tx 코일 또한 Rx와 Lx 코일 간의 거리는 각각 3 cm로 고정하였고, Tx 와 Rx 코일간의 거리가 0.4 m, 0.8 m일 경우 각각의 공진코일 에서의 전압, 전류의 전송효율을 측정하였다. 고주파 증폭기는 최대정격 200 W, 13.56 MHz를 사용하였다.

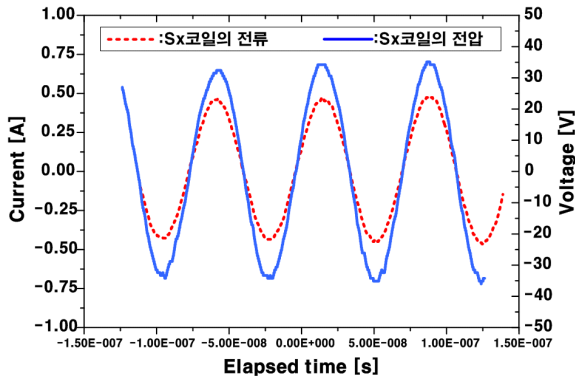


Fig. 8. Experimental results of current and voltage distributions at Sx coil.

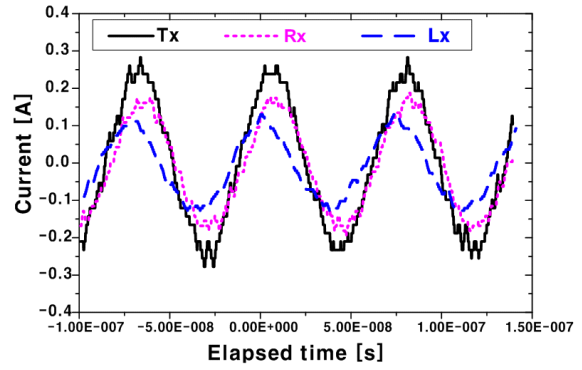


Fig. 10. Experimental results of current distributions of Tx, Rx and Lx coils in the case of $d = 0.8$ m.

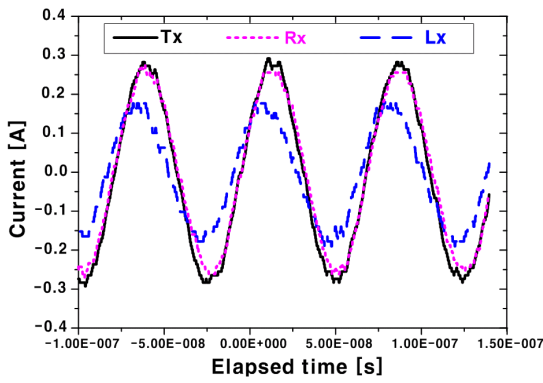


Fig. 9. Experimental results of current distributions of Tx, Rx and Lx coils in the case of $d = 0.4$ m.

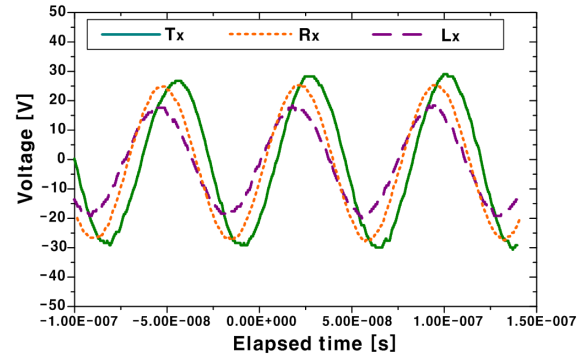


Fig. 11. Experimental results of voltage distributions of Tx, Rx and Lx coils in the case of $d = 0.4$ m.

그림 8은 고주파 증폭기와 연결된 전원코일, Sx에서의 동상의 전압, 전류의 파형분포를 나타낸다. 전압과 전류의 최대값은 각각 $35.4 V_{peak}$, $0.41 A_{peak}$ 이다. 그와 같은 전원의 조건에서 Tx와 Rx 코일간의 거리 $d = 0.4$ m 일 경우, 그림 9는, Tx, Rx, Lx 코일의 전류분포를 보여준다. Tx와 Rx 코일간의 임피던스의 일치가 효과적으로 수행되었음을 알 수 있다. 또한 상전도 Tx 코일에 대한 초전도 Rx, Lx 코일간의 위상변화가 거의 없음을 알 수 있으며, 각각 공진코일의 최대값은 0.293 , 0.281 , $0.177 A_{peak}$ 값을 갖는다. 그림 10은 $d = 0.8$ m 인 경우의 공진코일간의 전류분포이다. 그림 9와 비교할 때, 상전도 Tx 코일과 초전도 Rx 코일간의 결합이 이동거리에 영향을 크게 받게 됨을 알 수 있다. 또한 공진코일간의 전송효율도 크게 낮아짐을 확인할 수 있다. 각각 공진코일의 전류 최대값은 0.283 , 0.161 , $0.124 A_{peak}$ 값을 갖게 됨을 확인하였다.

그림 11은 Sx 코일에 인가된 전압이 그림 7과 같은 조건일 때 $d = 0.4$ m인 경우의 공진코일간의 전압분포를 보여준다. 상전도 Tx 코일에 대해 초전도 Rx, Lx 코일의 위상차이가 발생함을 알 수 있다. 공진코일 각각의 최대 전압값은 28.8 , 25.2 , $17.8 V_{peak}$ 값을 갖게 됨을 확인하였다.

그림 12는 $d = 0.8$ m 인 경우의 공진코일간의 전압분포를 보여준다. 공진코일에 전송된 최대 전압값은 각각 26.3 , 20.1 , $14.2 V_{peak}$ 이다. 이동거리가 증가함에 따라 전송효율이 급격히 낮아짐을 확인할 수 있고 또한 초전도 Rx, Lx 코일의 위상차가 점점 증가함을 알 수 있다.

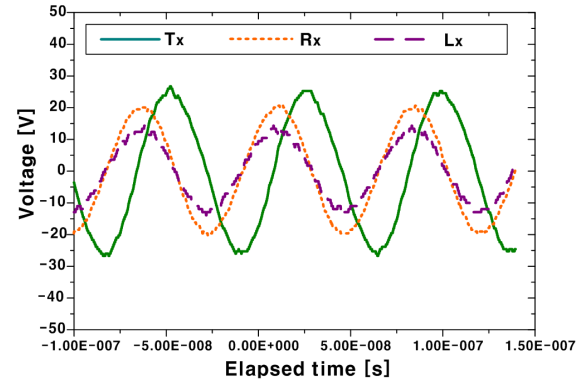


Fig. 12. Experimental results of voltage distributions of Tx, Rx and Lx coils in the case of $d = 0.8$ m.

위상차의 변화는 Lx코일에 전송된 전력의 rms값이 낮다는 것을 의미한다. 즉 전송효율이 낮다는 것을 의미한다.

따라서 거리의 변화에 따른 임피던스의 일치를 효과적으로 보정해주는 보정 피드백 시스템이 필요함을 실험적으로 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 무선전력전송기술과 고온초전도 선재를 결합하여 접합선을 사용하지 않고 상온에서 극저온의

초전도 선재에 전력을 안정적으로 전송할 수 있는 초전도 무선전력전송 시스템을 실험을 통해 구현하였다. 특히 13.56 MHz의 고주파에서도 상전도 Tx 코일과 초전도 Rx 코일간의 임피던스의 일치 가능한 무선전력전송 특성이 있음을 확인하였다. 코일간의 임피던스를 일치시키기 위해 50Ω 급 저항과 100 pF용 가변 커패시터를 사용하여 서로 다른 재질의 상전도(구리판 형태) 코일과 (테이프형태) 초전도 선재의 임피던스의 일치 가능성이 확인하였다. 그러나 전압의 경우 이동거리가 증가함에 따라 각 코일간의 임피던스 값이 변화하여 코일간의 위상차가 발생함을 확인하였다. 향후, 본 연구결과를 근거로 다양한 재질의 냉각용기에서 전송효율을 점검하여 실질적으로 상용화를 위한 기반조사를 수행할 것이다. 또한 대용량의 RF 증폭기를 제작하여 다양한 부하에 대해 안정적이고 효율적인 초전도 무선전력전송시스템에 대한 실험적으로 조사 할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 “2012년도 전력산업 기초연구” 과제의 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: R13XA01).

REFERENCES

- [1] 변영재 "무선전력전송기술 단기강좌" 대한전기학회 무선전력전송 연구회, pp. 36-38, 2012.
- [2] K. Finkenzeller, RFID Handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards and identification, 2nd ed. New York: Wiley, 2003, ch. 4.
- [3] Y.H. Kim, S.Y. Kang, M.L. Lee, B.G. Yu, and T. Zyung, "Optimization of wireless power transmission through resonant coupling," *Compat. Power Electron.*, pp. 426-431, May 2009.
- [4] Brown, W.C., "The History of power transmission by radio waves," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Trans.*, vol. 32, no. 9, pp. 1230- 1242, Sep. 1984.
- [5] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83- 86, 2007.
- [6] A. Karalis, J. Joannopoulos, and M. Soljačić, "Efficient wireless nonradiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, pp. 34- 48, 2008.
- [7] T. Imura, Y. Hori, "Maximizing air gap and efficiency of magnetic resonant coupling for wireless power transfer using equivalent circuit and Neumann formula," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, pp. 4746- 4752, 2011.
- [8] Y. D. Chung, D. W. Kim, H. C. Jo, Y. S. Yoon, H. K. Kim, and T. K. Ko, "Fundamental performance of novel power supply for HTS magnet using solar energy," *Cryogenics*, vol. 51, issue 6, pp. 220-224, 2011.
- [9] Y. D. Chung, T. Hoshino, and T. Nakamura, "Current pumping performance of linear-type magnetic flux pump with use of feedback control circuit system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, no. 2, pp. 1638-1641, 2006.
- [10] D. W. Kim, Y. D. Chung, H. K. Kang, Y. S. Yoon, T. K. Ko, "Characteristics of contactless power transfer for HTS coil based on electromagnetic resonance coupling," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, pp. 5400604, 2012.
- [11] T. C. Beh, T. Imura, M. Kato, Y. Hori, "Basic study of improving efficiency of wireless power transfer via magnetic resonance coupling based on impedance matching," *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp.2011-2016, 2010.