



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015年 2月
碩士學位論文

초전도 코일을 적용한 자기공진형
무선전력전송에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

姜 旻 尙

2015年
2月
碩士學位論文

초전도 코일을 적용한 자기공진형
무선전력전송에 관한 연구
姜 旻 尙

초전도 코일을 적용한 자기공진형
무선전력전송에 관한 연구

A Study on the Wireless Power Transmission
of Magnetic Resonance Using Superconducting Coils

2015年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

姜 旻 尙

초전도 코일을 적용한 자기공진형 무선전력전송에 관한 연구

指導教授 崔 孝 祥

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함.

2014年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

姜 旻 尙

姜旻尙의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 李 愚 宣 印

委員 朝鮮大學校 教授 曹 錦 培 印

委員 朝鮮大學校 教授 崔 孝 祥 印

2014年 11月

朝鮮大學校 大學院

Contents

ABSTRACT

I 서론	1
II 이론적 고찰	3
A. 무선전력전송	3
1. 전송 방식	3
2. 주요 이슈	6
B. 자기공명방식 무선전력전송	9
1. 시스템의 구성	9
2. 시스템의 해석	10
C. Quality-Factor	13
D. 초전도체 특성	15
III 시스템의 모델링	16
A. 초전도 공진 코일 설계	16
B. 시뮬레이션 분석 검토	19
1. 초전도 공진 코일과 구리 공진 코일의 S-parameter	20
2. 초전도 공진 코일과 구리 공진 코일의 smith chart	21

3. 송·수신부의 코일 재질이 다른 경우의 S-parameter	22
4. 송·수신부의 코일 재질이 다른 경우의 smith chart	24
IV 실험	26
A. 시스템의 구성	26
B. 실험 결과 분석	28
1. 초전도 공진 코일과 구리 공진 코일의 S-parameter	28
2. 초전도 공진 코일과 구리 공진 코일의 smith chart	29
3. 송·수신부의 코일 재질이 다른 경우의 S-parameter	30
4. 송·수신부의 코일 재질이 다른 경우의 smith chart	32
V 결론	33

REFERENCE

List of Figures

Fig. 1 WPT market step	3
Fig. 2 WPT of microwave using rectenna	4
Fig. 3 Applications of WPT	5
Fig. 4 Protection standards of domestic human body	7
Fig. 5 Circuit for WPT system of magnetic resonance	9
Fig. 6 Equivalent circuit of WPT system of magnetic resonance	11
Fig. 7 The changed magnetic resonance circuit by K-inverter circuit	11
Fig. 8 The 3dB bandwidth of quality-factor	14
Fig. 9 Critical surface of a superconducting element	15
Fig. 10 Configuration of a helical type	16
Fig. 11 Superconducting coil of helical type	17
Fig. 12 A superconducting coil and a copper coil	17
Fig. 13 Construction of a superconducting coil	18
Fig. 14 Arrangement of resonance coils	19
Fig. 15 S-parameters according to applied materials	20
Fig. 16 Smith charts according to applied materials	22
Fig. 17 S-parameter in case of applying the superconducting coil to the transmitter	23
Fig. 18 S-parameter in case of applying the superconducting coil to the receiver	23
Fig. 19 Smith chart in case of applying the superconducting coil to the transmitter	24
Fig. 20 Smith chart in case of applying the superconducting coil to the receiver	25
Fig. 21 Experimental composition	26
Fig. 22 Network analyzer	27
Fig. 23 Cooling system	27
Fig. 24 S-parameters according to applied materials	28

Fig. 25 Smith charts according to applied materials 30

Fig. 26 S-parameter in case of applying the superconducting coil
to the transmitter 31

Fig. 27 S-parameter in case of applying the superconducting coil
to the receiver 31

Fig. 28 Smith chart in case of applying the superconducting coil
to the transmitter 32

Fig. 29 Smith chart in case of applying the superconducting coil
to the receiver 32

List of Tables

Table 1 Comparison of WPT technology	6
Table 2 Specifications of SuperPower® 2G HTS Wire	18
Table 3 Dimension of coils for simulation	19
Table 4 Parameters of a superconducting coil and a copper coil	27

ABSTRACT

A Study on the Wireless Power Transmission of magnetic resonance using Superconducting Coils

Kang, Min-Sang

Advisor: Prof. Choi, Hyo-Sang, Ph. D.
Department of Electrical Engineering,
Chosun University

As the interest in wireless power transmission (WPT) grows, the research and development of a wireless charging system that can be applied to real life have been in progress. WPT is implemented in three methods. One is way through magnetic induction. This method involves transmitting power through the current generated in two coils. It is used for the electric toothbrushes and electric shavers, and it is also fabricated as a wireless vehicle charger of prototype. If the arrays of transmitting and receiving coils do not match, however, the efficiency will decrease rapidly, and the transmission distance will be shortened. The second WPT method is way through microwave. This method involves transferring energy to radiate the electromagnetic wave of high frequency in the air. As long-distance transmission is possible through this method, it is being studied as a technology for renewable-energy-source applications such as power transmission and space-solar power satellites. Due to the use of a high frequency, however, the transmission efficiency is influenced by the surrounding environment, and the method is harmful to the human body. The last WPT method is way through magnetic resonance. It overcomes the disadvantages of the magnetic-induction and microwave methods and can transfer power within a few meters. Also, the power-transfer does not affect the environment because it uses a low frequency. In this method, however, it

is difficult to reduce the size of the transmitting and receiving coils with a high Q-factor, and how to improve the efficiency to enable it to transmit power beyond a few meters has yet to be studied.

In this paper, we analyzed the transmission characteristics of WPT system using a superconducting resonant coil. WPT of magnetic resonance was implemented at a frequency of 12MHz. The superconducting coil was applied for resonance. A resonance coil was wound 8.5 times using a superconductor with a 300 mm diameter. For comparison, a resonance coil was designed using a copper coil. In order to analyze the transmission characteristics, the simulation was performed using the high frequency structure Simulator (HFSS). We analyzed the transmission characteristics through experiments using network analyzer. As a result of the simulation, the S_{11} values of the superconductor and copper were respectively -8.7dB, -23.1dB and the resonance frequency was 9,6MHz. S_{11} the value of the superconductor and copper in the experimental was respectively -9.1dB, -21.65dB and resonance frequency was 12MHz. Through simulations and experiments, the transmission efficiencies of the superconducting resonance coil were confirmed higher than that of the copper resonance coil.

I 서론

무선 통신기술의 발달로 스마트폰 및 테블릿 PC 등 휴대용 IT기기를 이용해 언제 어디서든 정보를 주고 받을 수 있다. 최근 스마트폰 등 IT기기들의 사용자가 급증하고 있으며, 이동통신망, 무선 LAN (Wi-Fi)을 통하여 무선으로 정보전달을 자유롭게 하고 있다. 그러나 이러한 IT기기들의 전원 공급은 유선으로 이루어지고 있다. 유선에 의한 전원공급은 사용장소 및 이동의 제한이 따르며, 미관을 해치는 단점이 있다. 또한, 휴대용 기기의 배터리는 용량의 한계성, 수명저하 등의 문제를 겪고 있는 실정이며, 배터리를 충전하기 위한 유선 충전기가 필수적이다. 따라서 무선으로 전원공급 및 충전이 가능한 무선전력전송 기술의 연구가 절실히 요구되고 있다[1-7].

무선전력전송(Wireless Power Transmission)이란 전자기기나 전기자동차 등에 사용되는 유선케이블을 없애고 이를 무선으로 공급하는 기술을 말한다. 무선전력전송 기술은 1914년 니콜라 테슬라(Nikola Tesla)에 의해 처음 제안되었다[8]. 다양한 주파수 대역에서의 무선전력전송 기술이 개발되었으나 수백 kHz 대의 저주파를 사용하는 자기유도방식(Magnetic Induction)을 제외하고는 상용화에 어려움을 겪고 있다. 자기유도방식을 이용한 무선충전기는 전동칫솔, 스마트폰 무선 충전기 등에 사용되고 있다. 그러나 송·수신 코일의 배열이 효율에 크게 영향을 미치며 전력 전송거리가 수 mm로 짧다는 단점이 있다. 또한, 과거 초고주파를 이용해 수십 W 이상의 대 전력을 전송하기 위한 전자기파방식(Microwave)의 연구가 이루어져 왔으나 고효율 안테나의 크기, 고주파의 사용으로 인한 인체 유해성의 문제, 주위 환경에 의한 전력전송의 불안정 등의 단점으로 상용화에 실패하였다[1-7].

이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 2007년 MIT 물리학과와 마린 솔라치치(Marin Soljagic) 교수 연구팀은 자기공명방식(Magnetic Resonance)의 무선전력전송을 제안하였다. 수 m에서 전력전달이 가능하고 감쇄파 결합으로 전력전송이 주위 환경에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 그러나 전송 거리에 따른 효율 감소의 문제로 상용화에 어려움을 겪고 있다. 따라서 자기공명방식을 이용한 무선전력전송의 효율 개선에 대한 연구가 필수적이다[10-12].

초전도체는 극저온에서 저항이 매우 낮고 상전도체에 비해 전류밀도가 높기 때문에 주파수 품질 특성인 quality-factor를 안정적으로 증가시킬 수 있다[13]. 따라서 본 논

문에서는 자기공명 무선전력전송의 효율을 높이기 위해 공진기에 초전도체를 적용하였다. Ansoft 사의 HFSS (High Frequency Structure Simulator)를 이용하여, 시뮬레이션과 실험을 통해 초전도체와 구리의 공진기를 제작하여 전력전송 특성을 해석하고 초전도 공진기를 제작하여 무선전력전송 시스템의 효율을 개선시키고자 한다.

II 이론적 고찰

A. 무선전력전송

1. 전송 방식

일상생활에서 사용하는 가전제품, 휴대용 IT기기, 전기자동차의 전원 공급은 대부분 유선으로 이루어지고 있다. 몇 년 전까지만 해도 유선에 의한 전원공급은 큰 불편함을 느끼지 못하였다. 그러나 최근 휴대용 IT기기들의 발달과 사용량의 급증으로 유선 충전의 불편함이 부각되고 무선충전의 필요성이 대두되고 있다. 배터리를 이용하여 전원을 공급받는 경우, 소형화로 인한 배터리의 용량감소, 잦은 배터리 충·방전에 의한 수명저하 등의 문제가 있으며 배터리의 전력을 소모한 경우 충전을 위한 장소의 제한이 따른다.

무선전력전송 기술은 가전기기, 로봇, 의료분야 등 전기를 사용하는 모든 분야에 적용 가능하다. 또한, Fig. 1에 나타난 기술시장 예측기관인 Gartner의 2013년 Hype cycle에 따르면 무선전력전송 기술에 대한 관심도가 가장 고조되었고 2~5년 후에 시

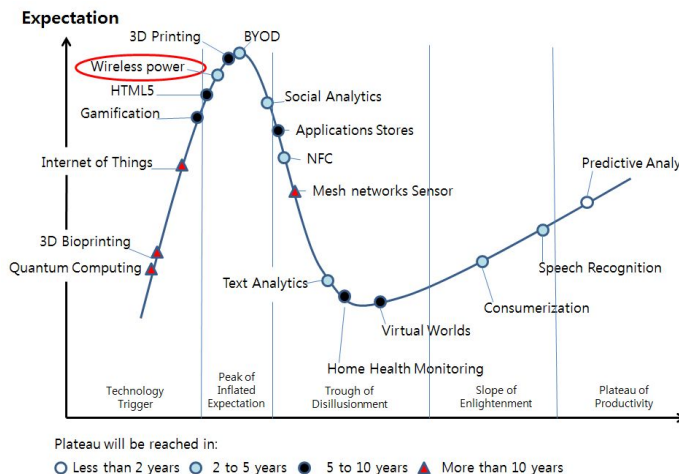


Fig. 1 WPT market step

장이 안정될 것으로 보고 있다[9]. 그러나 무선전력전송은 주파수 할당, 인체 유해성의 검증, 기술적 문제 등으로 상용화에 어려움이 있다. 몇몇의 기기들에 적용되어 사용되고 있으나 낮은 효율, 짧은 전송거리 등의 불편함을 수반하고 있다. 따라서 효율을 개선하고 전송거리를 확보할 수 있는 연구가 필요하다.

무선전력전송은 크게 3가지 방식으로 분류할 수 있다. 자기유도방식은 무선전력전송 방식의 가장 기본적인 방식으로 1차측 코일에 전류가 흐르면서 발생하는 자기장이 2차측 코일에 유도되어 전류가 흐르는 전자기 유도 원리를 이용한다. 대표적인 예로 변압기, 전동 칫솔, 교통카드의 RFID 등에 사용되고 있다.

자기유도방식 무선전력전송 시스템의 송·수신 코일은 품질계수(quality-factor)가 매우 낮다. 낮은 품질계수를 가지므로 전력전송 거리가 매우 짧으며 송·수신 코일의 배열에 따라 효율이 급격히 변하는 단점이 있다. 따라서 효율을 높이기 위해 전송 거리를 작게 하고 송·수신 코일의 중심이 일치하도록 배치하는 것이 중요하다. 또한, 송·수신 코일 사이에 이물질이 놓여 있을 경우 금속 이물질에 전류가 유도되어 발열이 일어나 안전성에 문제가 있다. Fulton Innovation을 중심으로 한 무선 전력 위원회(Wireless Powers Consortium ; WPC)는 5W 급 휴대폰 충전 기술 표준을 제정하였고, 120W 급 노트북 충전 기술의 표준화를 추진 중에 있다.

Fig. 2와 같은 전자기파방식은 송신부에서 전자기파를 발생시켜 에너지를 전달하면 수신부에서는 여러 개의 렉테나(Rectenna)를 이용해 전자기파를 수신한 후 전력 에너지로 변환하는 방식이다. 수십 kW 이상을 수 km 이상 보낼 수 있으므로 3만 6천 km 상공의 인공위성에서 태양광 발전을 이용해 전기를 생산하고 전자기파를 이용해 지상으로 전송하는 연구가 진행되고 있다. 전자기파는 원거리 전송이 가능 하지만 낮

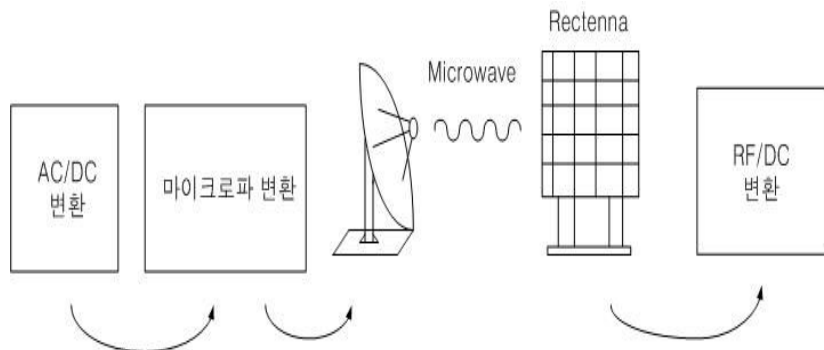


Fig. 2 WPT of microwave using rectenna

은 효율, 고주파 사용에 의한 인체 유해성, 다른 전자기기에 미치는 영향 등의 문제로 상용화에 어려움을 겪고 있다. 따라서 전자기파를 이용한 무선전력전송은 우주, 국방 분야의 대용량 전력 전송 시스템에 사용될 것으로 예상되고 있으며 최근 전자기파를 이용한 전기자동차의 무선 충전 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

자기공명방식 무선전력전송은 1m 가량 떨어진 곳에서의 효율이 약 80%이며, 2m에서도 약 40%의 효율로 전력을 전달할 수 있다. 이는 자기유도방식 무선전력전송에서의 수 cm이내인 전송거리의 단점을 보완할 것으로 사료된다. 또한, 전자기파와 다르게 전달되는 에너지가 공기 중으로 방사되어 사라지지 않고 같은 공진주파수를 갖는 수신부로 흡수되기 때문에 효율이 좋고 송·수신 코일 사이에 장애물이 있어도 문제없이 전력전송이 가능하다. Fig. 3과 Table 1은 각각 무선전력전송 방식별 응용분야와 특징을 나타낸다.



Fig. 3 Applications of WPT

Table 1 Comparison of WPT technology

분류	자기 유도 방식	자기 공명 방식	전자기파 방식
원리	1,2차 코일 간 자기유도 현상 이용	송·수신 코일 간 자기공명 현상 이용	안테나를 통해 마이크로파를 공기중에 방사하여 전력 전달
전송거리	수 mm ~ 수 cm이내	수 m	수 km이상
사용 주파수	125kHz, 13.56MHz	수십 kHz ~ 수백 MHz	2.45GHz, 5.8GHz - ISM 대역
특징	대전력 전송에 유리	근거리 전력 전송에 유리	장거리 전력 전송에 유리
장점	고효율, 기술 구현이 용이	전력전송의 자유도 증가, 멀티 충전의 가능	장거리 전송 가능
문제점	짧은 전송 거리, 송수신 코일 배열에 따른 효율 변화	송·수신 코일의 크기, 인체 유해성	인체 유해성, 주위 환경에 의한 효율 변화
적용	전기 자동차, 스마트폰, 태블릿 PC	스마트폰, TV 등 가전기기, 전기 자동차	위성과 지구 간 전력 전송

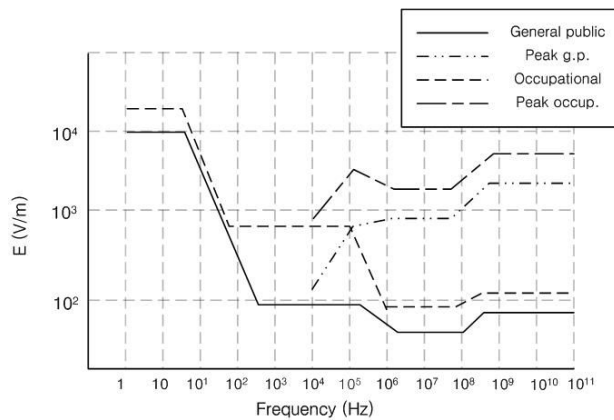
2. 주요 이슈

무선전력전송은 특정 주파수를 사용하고 있으며 이 주파수는 타 시스템 간에 간섭을 일으킬 수 있으며 인체에 영향을 줄 수 있다. 따라서 각 나라에서는 주파수 사용에 대해 엄격하게 규제를 하고 있다. 무선주파수는 통신, 방송, 군사용 레이더, 측위 등의 용도로 사용되고 있으나 아직까지 무선전력전송에 대한 주파수 할당 대역은 없다. 현재 무선전력전송을 위한 주파수 대역으로 수십 kHz에서 수백 KHz 사이, 수 MHz에서 수십 MHz 사이가 후보 주파수 대역으로 고려되고 있으며, ISM(Industrial, Scientific, and Medical) 대역으로 125kHz, 134kHz 및 13.56MHz 정도가 소출력 에너지 전송에 사용되고 있고 기술기준 개정에 의해 무선전력전송용으로 사용이 가능하 다[6][15].

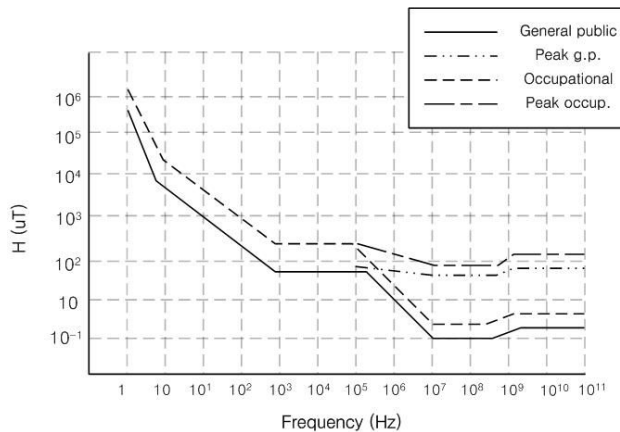
2013년 6월, 스위스 제네바에서 개최된 국제전기통신연합 전파부문(ITU-R) 전파관리분과(Study Group 1 ; SG1) 회의에서 우리나라의 제안으로 무선전력전송의 국제 공통주파수와 기술기준 마련을 위한 표준화 논의가 시작되었다. 이 회의에서 2011년에 분배된 주파수 대역과 KAIST에서 개발한 자기공진형상화 기술(Shape Magnetic

Field in Resonance)을 ITU-R 보고서 초안에 반영하였으며, 무선전력전송 기술 특성, 주파수 이용방안 및 기술기준 항목을 무선전력전송 권고 초안에 반영시켰다. 그러나 ITU-R 보고서 초안에 포함된 국내 주파수 및 일본의 주파수는 국제표준시보 및 무선행행용으로 국제 분배되어 있기 때문에 국제 공통주파수로 이용하기 위해 향후 주파수 이용을 위한 국제적 논의 및 연구가 필수적이다.

전자파의 인체영향은 무선전력전송뿐만 아니라 스마트폰, LCD 모니터, TV 등이 보급된 이후부터 지금까지 핵심적인 이슈이다. Fig. 4는 INCIRP의 1998년도 전자파 인체보호기준을 나타낸다[16-18].



(a) Electric Fields



(b) Magnetic Fields

Fig. 4 Protection standards of domestic human body

세계보건기구(World Health Organization ; WHO)에서는 전자파 안전의 사전예방주의 정책을 권고하고 있고 각 나라에서는 자국의 실정에 맞게 전자파 사전예방정책을 시행 중에 있다. 국내의 전자파 인체보호기준은 INCIRP(International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection)의 1998년도 기준을 채택하고 있다.

무선전력전송 시스템을 위한 전력소자의 개발이 필요하다. 무선전력전송은 수 MHz에서 수십 MHz 사이의 주파수에서 동작하는 스위칭 소자가 필요하지만, 현재 대부분의 스위칭 특성은 이 주파수 영역대에서는 성능이 급격히 저하된다. 또한, 마이크로파 소자를 자기공명방식 무선전력전송에 맞게 주파수를 낮춰 사용한다면 가격의 문제로 상용화에 어려움이 있다.

또한, 자유로운 전력전달을 위한 임피던스 매칭 회로가 필수적이다. 자기유도방식의 경우, 송·수신부 간 중심부 배열이 100% 일치해야 전력전달이 최대로 가능하지만 배열이 틀어지면 효율이 급격히 감소하는 단점이 있다. 자기공명 방식은 송·수신 코일 간 배열이 틀어져도 어느 정도 전력전달이 가능하지만 아직까지 상용화하기에는 무리가 있다. 따라서 전력을 전달하는 기기에 필요한 양만큼 공급할 수 있고 다중 기기에 전력을 효율적으로 전송할 수 있는 매칭 회로의 개발이 필요하다.

자기공명방식은 quality-factor값을 높게 하여 전력을 전달하는 방식이다. 자기유도 방식의 경우 높은 커플링 계수를 가지므로 고효율의 에너지를 전달할 수 있으나 전송거리가 매우 짧다는 단점이 있다. 자기공명방식은 송·수신 코일의 간격을 수 cm~수m 로 하여 커플링 계수가 낮아지는 대신 높은 quality-factor값을 유지하여 전송거리를 확보할 수 있다[6]. 그러나 실생활에 적용하게 되면 동작 상태 및 다양한 기기의 개발로 부하 임피던스가 가변되고 주변 환경 등의 영향으로 quality-factor값을 안정적으로 유지하기 힘들기 때문에 실생활에 적용 시 안정적인 전력전달의 문제점이 발생한다.

B. 자기공명방식 무선전력전송

1. 시스템의 구성

전자기파를 사용한 무선전력전송은 주변기기에 영향을 미치고 전자기 방사에 의해 에너지 손실이 발생한다. 그러나 자기공명방식을 이용한 무선전력전송은 같은 공진 주파수로 설계된 기기만을 대상으로 선택적 전력전송이 가능하고 전력전송 시 방사되는 자기장이 적기 때문에 비교적 인체에 안전하다고 알려져 있다[10~11].

Fig. 5는 자기공명방식 무선전력전송 시스템의 구조를 나타낸다. 네 개의 코일로 이루어져 있으며, 각각 전원코일, 송신 공진코일, 수신 공진코일, 부하코일로 구성된다. 전원코일은 전원에 연결되고 부하코일은 디바이스에 연결되어 수신된 전력을 사용한다. 송·수신 공진코일은 회로적으로 개방되어 있다. 작동원리를 살펴보면, 전원 코일에 전원을 인가하면 자기유도에 의해 송신 공진코일에 자장이 형성된다. 이는 수신 공진코일과 같은 크기의 주파수로 공명하여 에너지가 전달되게 된다. 이 에너지는 수신 공진코일에 전류를 유도해 부하에 전력을 전달하게 된다.

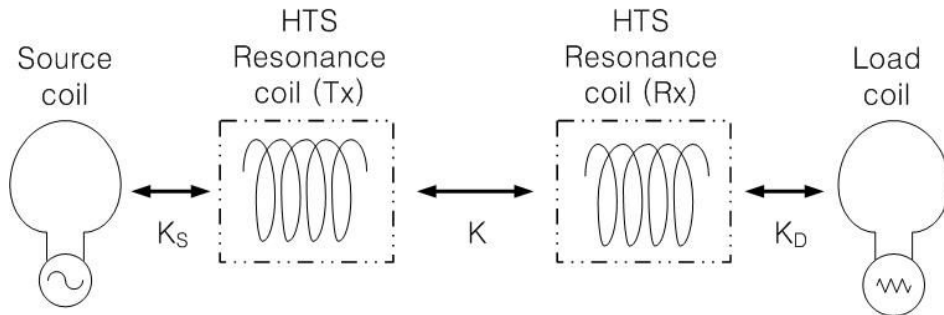


Fig. 5 Circuit for WPT system of magnetic resonance

공진현상을 수식적으로 해석하면 L, C가 존재하는 임피던스의 허수부가 0이 되는 주파수에서 에너지의 손실이 없다. 다음 수식을 통해 무선전력전송 시스템의 임피던스 허수부가 0이 되는 주파수를 찾을 수 있다.

$$Z = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

식 (1)에서 Z, X, j는 각각 임피던스, 리액턴스, 허수부를 의미한다. R, L, C는 능동 소자로 저항, 인덕턴스, 커패시턴스를 나타낸다. 위 식에서 리액턴스 X가 0이 되면 공진이 발생하며, 이 때 공진 주파수를 구할 수 있다. 식 (2)는 공진 주파수를 유도하는 식이다.

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 정리하면 식 (3)과 같이 자기공명 무선전력전송 시스템의 공진 주파수를 구할 수 있다.

$$\text{Resonance Frequency} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

2. 시스템의 해석

자기공명방식 무선전력전송은 송신부와 수신부의 공진주파수를 동일하게 설계해야 전력을 전달할 수 있다. 이는 곧 임피던스 매칭을 통해 전력을 전달하는 것으로 K 인버터 방식으로 해석할 수 있다[19].

Fig. 6은 무선전력전송 시스템의 등가회로를 나타낸 것으로 이를 각 회로 모두 공진이 되었다고 가정하고, K 인버터를 적용시키면 Fig. 7과 같은 회로로 간략화 할 수 있다.

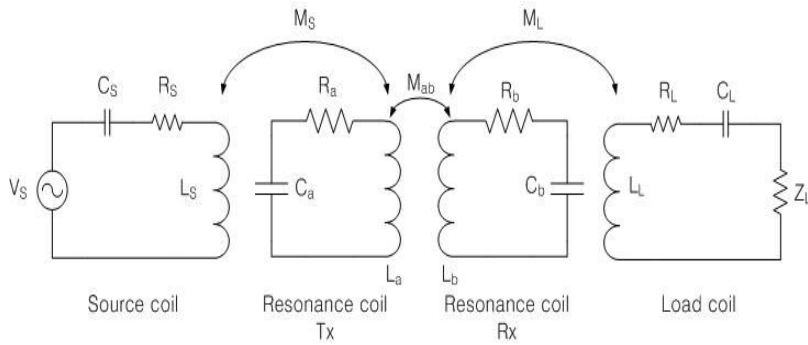


Fig. 6 Equivalent circuit of WPT system of magnetic resonance

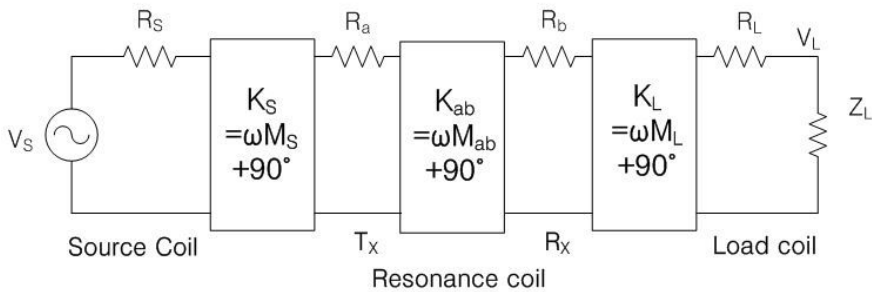


Fig. 7 The changed magnetic resonance circuit by K-inverter circuit

K 인버터 후단에 임피던스 Z 가 있다고 가정했을 때, 전단의 입력 임피던스는 K^2/Z 로 나타낼 수 있으며 전단의 사용전압이 V 라고 가정하면 후단의 전압은 jZV/K 이다. 이처럼 K 인버터를 사용하면 전·후단의 임피던스와 전압의 관계를 쉽게 알 수 있으며, 식 (4)를 통해 Fig. 7의 해석 결과를 간단하게 표현할 수 있다.

$$\alpha_{sl} = \frac{\omega^2 M_{sl}^2}{[R_s(R_t + Z_L)]}, \alpha_s = \frac{\omega^2 M_s^2}{(R_s R_a)} \quad (4)$$

$$\alpha_L = \frac{\omega^2 M_L^2}{[R_s(R_t + Z_L)]}, \alpha_{12} = \frac{\omega^2 M_{12}^2}{(R_a R_b)}$$

Fig. 7으로부터 자기공명방식 무선전력전송의 입력과 출력 전력을 구하면 식 (5)와 식 (6)과 같다. 이를 통해 전달 효율을 구할 수 있으며 그 값은 식 (7)과 같다.

$$P_{in} = \left(\frac{V_S^2}{2R_S} \right) \left[\frac{1 + \alpha_{12} + \alpha_L}{1 + \alpha_s + \alpha_{12} + \alpha_L + \alpha_s \alpha_L} \right] \quad (5)$$

$$P_L = \left(\frac{V_S^2}{2R_S} \right) \left(\frac{Z_L}{R_L + Z_L} \right) \left[\frac{\alpha_s \alpha_{12} \alpha_L}{(1 + \alpha_s + \alpha_{12} + \alpha_L + \alpha_s \alpha_L)^2} \right] \quad (6)$$

$$\eta_{res} = \left(\frac{Z_L}{R_L + Z_L} \right) \left\{ \frac{\alpha_s \alpha_{12} \alpha_L}{(1 + \alpha_{12} + \alpha_L)[(1 + \alpha_s)(1 + \alpha_L) + \alpha_{12}]} \right\} \quad (7)$$

식 (8)은 최대 효율 조건을 구하는 식으로 부하코일의 인덕턴스, 부하코일과 수신부 공진 코일 간의 상호 인덕턴스, 부하저항 등을 통해 최대 효율이 되는 변수를 확인할 수 있다. 식 (8)을 식 (7)에 대입하면 임피던스 매칭이 되는 최대 효율을 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 그리고 이상적인 입력 전력 공급원(소스)을 구하기 위해서는 식 (8)을 식 (5)에 대입하면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_L^{opt} = \sqrt{\frac{(1 + \alpha_{12})(1 + \alpha_s + \alpha_{12})}{(1 + \alpha_s)}} \quad (8)$$

$$\eta_{res}^{opt} = \left(\frac{Z_L}{R_L + Z_L} \right) \left[\frac{\sqrt{\alpha_s \alpha_{12}}}{\sqrt{(1 + \alpha_s)(1 + \alpha_{12})} + \sqrt{(1 + \alpha_s + \alpha_{12})}} \right]^2 \quad (9)$$

$$P_{in}^{opt} = \left(\frac{V_S^2}{2R_L} \right) \sqrt{\frac{(1 + \alpha_{12})}{(1 + \alpha_s)(1 + \alpha_s + \alpha_{12})}} \quad (10)$$

헬리컬 방식의 공진기의 결합 계수를 높이기 위해서는 상호 인덕턴스는 증가하고 자체 인덕턴스는 감소해야 한다. 따라서 공진기의 재질은 높은 전도율의 재료를 사용해야 하며, 단위 길이당 넓은 면적의 선재를 사용해야 한다. 또한 송·수신 공진코일의 상호 인덕턴스를 높이기 위해서는 두 공진기의 형태와 크기를 동일하게 설계해야 높은 전력 전송효율을 얻을 수 있다[10][20].

C. Quality-Factor

진동 시스템은 외력이 가해지면 다른 주파수에 비해 특정 주파수에서 더 크게 진동한다. 이러한 현상을 공명 또는 공진이라고 하는데, 이때의 특정 주파수를 공명 주파수 또는 공진 주파수라고 한다. 이 공진 주파수에 의해 설계된 시스템의 특성은 Quality-factor(Q-factor)에 의해 결정된다. Q-factor값은 식 (11)과 같이 한 주기 동안에 손실되는 에너지에 대한 시스템에 저장되는 전체 에너지의 비로서 정의된다.

$$Q = \frac{\text{저장된 총 에너지}}{\text{한주기 동안 소모되는 에너지}} \quad (11)$$

Q-factor의 값은 두 가지 관점에서 해석할 수 있다. 첫째로 R, L, C 소자에 의한 Q-factor값의 해석이다. 식 (12)에서 확인할 수 있듯이 Q-factor를 향상시키기 위해서는 저항 R은 작고 인덕턴스 L은 높아야 한다. 기존의 무선전력전송에 사용되는 구리 코일의 저항은 온도가 내려감에 따라 어느 정도 저항이 감소되지만 한계가 있다. 그러나 초전도체는 임계온도에서 영저항 특성을 보이기 때문에 이 특성을 이용해 Q-factor를 향상시킬 수 있다.

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (12)$$

둘째로 주파수 영역에서의 Q-factor값의 해석이다. 공진 회로에서 Q-factor는 주파수의 선택적 특성을 나타내는 값으로 그 값이 클수록 특정 주파수에서 공진 특성이 좋다고 할 수 있다. Q-factor값은 식 (13)에 나타낸 것과 같이 공진 주파수의 값과 대역폭의 비율로서 정의된다.

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (13)$$

여기서 f_0 는 공진 주파수를 나타내고, Δf 는 대역폭으로 공진 주파수에서 진폭에 대비해 1/2의 진폭을 가지는 두 주파수 f_2 와 f_1 의 차이를 나타낸다. 주파수 영역에서

Q-factor가 클수록 주파수 대역이 협대역이 되고 낮을수록 광대역이 된다는 것을 의미한다. Fig. 8은 공진 주파수와 q-factor에 의한 주파수 대역을 나타낸다.

위에서 언급한 두 가지 관점에서의 해석은 저장 에너지와 손실되는 에너지에 주파수 개념을 적용한 것으로 사실상 물리적으로는 같은 의미이다. 자기공명방식은 송·수신 코일의 거리가 멀어지면서 자기 결합 정도가 낮아지더라도 Q-factor값을 증가시켜 원거리 전력전송을 가능하게 한다. 따라서 자기공명방식 무선전력전송에서 Q-factor를 높이는 것은 매우 중요하다.

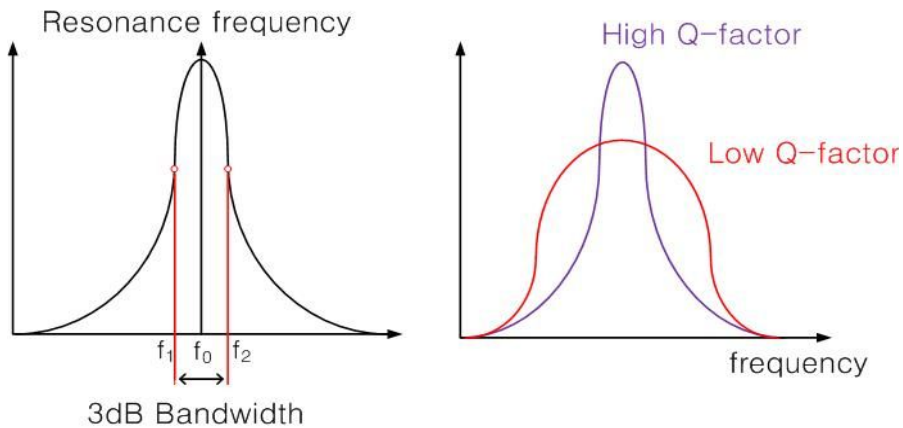


Fig. 8 The 3dB bandwidth of quality-factor

D. 초전도체 특성

1911년 H. K. Onnes는 액체헬륨을 이용해 고체수은을 냉각하면서 전기저항을 측정하던 중, 4K 근처에서 수은의 저항이 0으로 떨어지는 것을 처음 발견하였다. 어느 특정한 임계온도를 넘어 전기저항이 0이 되는 물질을 초전도체(Superconductor)라고 한다. 초전도 현상은 임계온도, 임계자장, 임계전류밀도의 3가지 임계값(Critical value)이 있다. 이는 Fig. 9와 같이 임계값 이하일 때, 초전도 현상이 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 초전도체는 극저온에서 저항이 없기 때문에 전류가 흘러도 전력 손실이 발생하지 않으므로 대량의 전기를 손실 없이 저장하거나 송전이 가능하다. 또한, 대 전류를 흐르게 하여 강한 자장을 얻을 수 있기 때문에 자기부상열차, MRI 등에 응용이 가능하다[20-23].

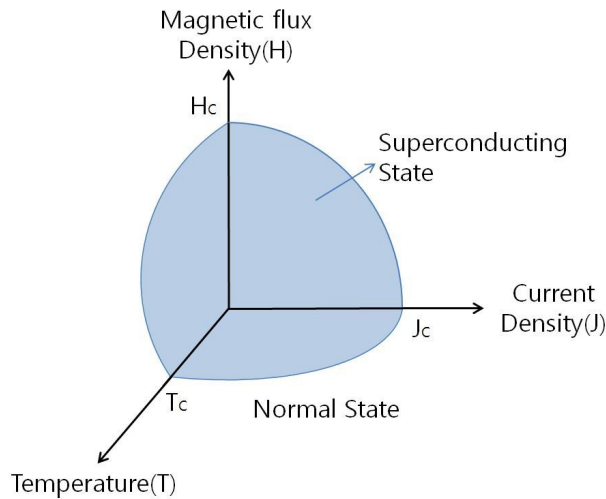


Fig. 9 Critical surface of a superconducting element

자기공명방식 무선전력전송 시스템의 송·수신 코일은 효율 및 전송 거리에 있어 매우 중요하다. 기존의 연구에서 상전도체를 이용해 무선전력전송 시스템을 구현해 시스템의 최적화를 가능하게 하였지만 Q-factor값을 높이기에는 기술적인 한계가 있다. 일반적으로 상전도 코일의 Q-factor값은 10^4 을 가지며, MIT에서 구현한 자기공명방식 무선전력전송의 Q-factor값은 약 10^3 을 갖는다. 그러나 초전도체는 극저온에서 저항이 매우 낮기 때문에 Q-factor값을 $10^4 \sim 10^7$ 까지 구현할 수 있다. 또한, 상전도체와 비교해 에너지 저장 능력이 뛰어나 보다 큰 전력을 전달할 수 있어 효율 및 전송거리를 향상시킬 수 있다[10-12].

III 시스템의 모델링

A. 초전도 공진 코일 설계

공진 코일의 설계를 위해서는 코일의 인덕턴스와 커패시턴스의 설계가 필요하다. Fig. 10은 helical type의 권선방법을 나타낸다. A는 코일 전체의 길이, B는 코일반경, d는 코일의 두께, s는 코일과 코일 사이의 거리를 나타낸다.

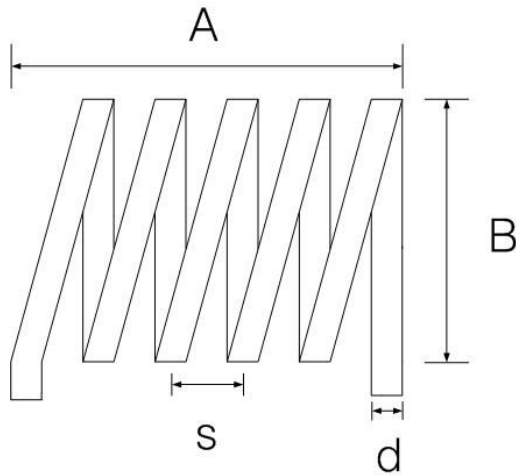


Fig. 10 Configuration of a helical type

식 (14) ~ 식 (17)은 각각 헬리컬 코일의 인덕턴스, 커패시턴스, 전도 저항, 방사 저항을 나타낸다.

$$L(nH) = \frac{B^2 n^2}{0.45B + A} \quad (14)$$

$$C(pF) = \frac{B\epsilon_r}{11.45 \cosh^{-1} \left[\frac{(n-1)(s-d)}{d} \right]} \quad (15)$$

$$R_0(\Omega) = \sqrt{\frac{u_0 w}{2\sigma}} \frac{l}{4\pi d} \quad (16)$$

$$R_r(\Omega) = \sqrt{\frac{u_0}{\epsilon_0}} \left[\frac{\pi}{12} n^2 \left(\frac{wr}{c} \right)^4 + \frac{2}{3\pi^2} \left(\frac{wA}{c} \right)^2 \right] \quad (17)$$

여기서 c 는 진공에서의 빛의 속도, l 은 도선의 길이, ω 는 각 주파수, σ 은 도체의 유전율, r 은 코일의 반지름, n 은 코일의 감은 수, ϵ_0 는 진공에서의 유전율, ϵ_r 은 유전 상수, μ_0 는 진공에서의 투자율을 나타낸다[24-27]. Fig. 11은 초전도 코일을 이용해 제작한 헬리컬 코일이다.

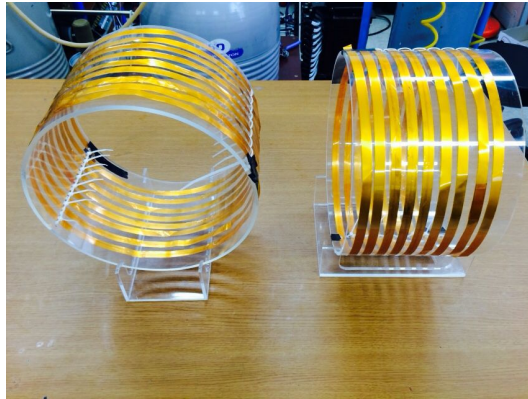


Fig. 11 Superconducting coil of helical type

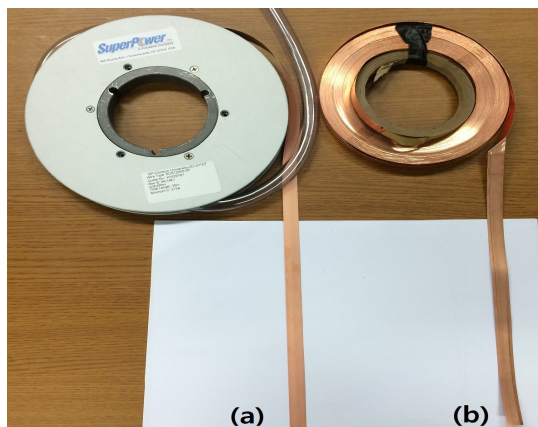


Fig. 12 A superconducting coil and a copper coil

본 논문에서는 MIT 연구팀에서 구현한 4코일 방식의 자기공명방식 무선전력전송 시스템을 구현하였다. 단일 원형 루프 형태의 소스코일의 직경은 250mm이며 공진코일의 직경은 300mm, 권선수는 8.5번 권선하여 설계하였다. 공진 주파수는 12MHz이다. 송·수신 공진 코일은 SuperPower사의 SCS12050 초전도체를 적용하였으며 비교를 위해 Fig. 12와 같이 초전도체와 같은 모양의 구리코일을 이용해 공진코일을 제작하였다. Fig. 13과 Table 2는 각각 SCS12050 초전도체의 구성 및 특징을 나타낸다.

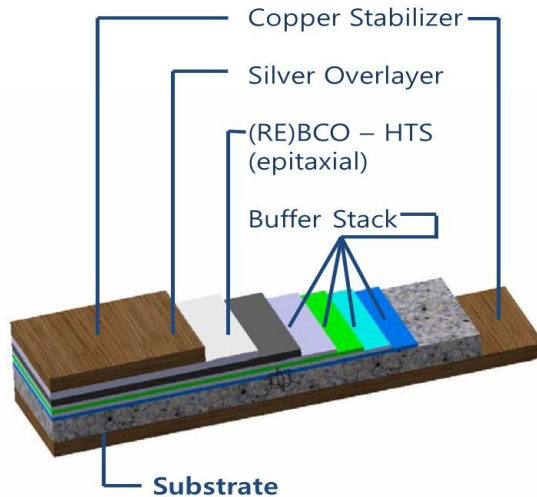


Fig. 13 Construction of a superconducting coil

Table 2 Specifications of SuperPower® 2G HTS Wire

Spec	SCS12050	Unit	Comment
Minimum I_c	240	amp	measured by continuous direct current
Widths	12	mm	
Total Wire Thickness	0.1	mm	
Standard Copper Stabilizer Thickness	0.04	mm	surround stabilizer with rounded corners
Critical Tensile Stress	>550	MPa	at 77K
Critical Axial Tensile strain	0.45%		at 77K
Critical Bend Diameter in Tension	11	mm	at room temperature
Critical Bend Diameter in Compression	11	mm	at room temperature

B. 시뮬레이션 분석 검토

전원코일, 송·수신 공진코일, 부하코일은 Fig. 14와 같이 일직선이 되도록 배열했으며, 송·수신 공진 코일의 간격은 300mm이다. 소스 코일과 로드 코일은 각각 송·수신 부 공진 부근에 위치시키고 소스 코일에 50Ω의 lumped port를 주었다. 1W의 전력을 입력하고 공진코일의 재질을 바꿔가며 S₁₁ 및 스미스 차트를 측정하였다.

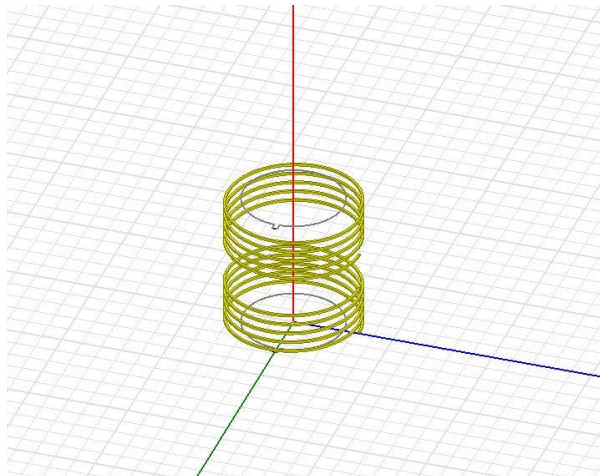


Fig. 14 Arrangement of resonance coils

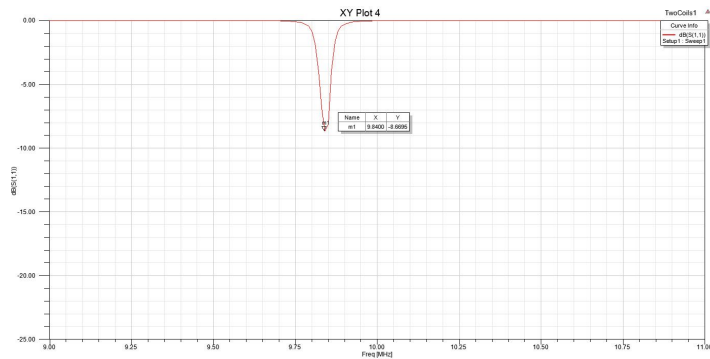
Table 3은 시뮬레이션에 사용된 헬리컬 공진코일의 수치를 나타낸다.

Table 3 Dimension of coils for simulation

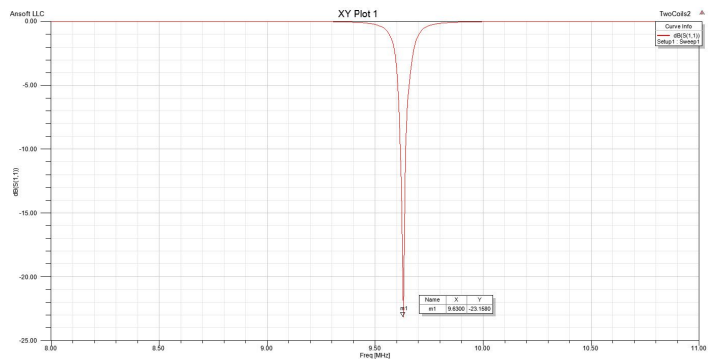
	Turn	Diameter	Thickness	Pitch
Source coil (mm)	1	250	0.1	0
Resonance coil (mm)	8.5	300	0.1	8

1. 초전도 공진 코일과 구리 공진 코일의 S-parameter

Fig. 15는 초전도 공진 코일과 구리 공진 코일을 적용한 무선전력전송 시스템의 S_{11} 을 시뮬레이션 한 결과이다. Fig. 15-(a)는 송·수신부 공진 코일에 구리를 적용한 경우의 S-parameter값이다. 송·수신부 거리가 300mm일 때, 반사 손실은 -9.8147dB 를 나타낸다. 이 때 공진 주파수는 9.57MHz 이다. Fig. 15-(b)는 송·수신부 공진 코일에 초전도체를 적용한 경우의 S-parameter이다. 구리 코일과 마찬가지로 300mm의 거리에서 반사 손실은 -23.158dB 를 나타내며, 공진 주파수는 9.63MHz 이다.



(a) A copper



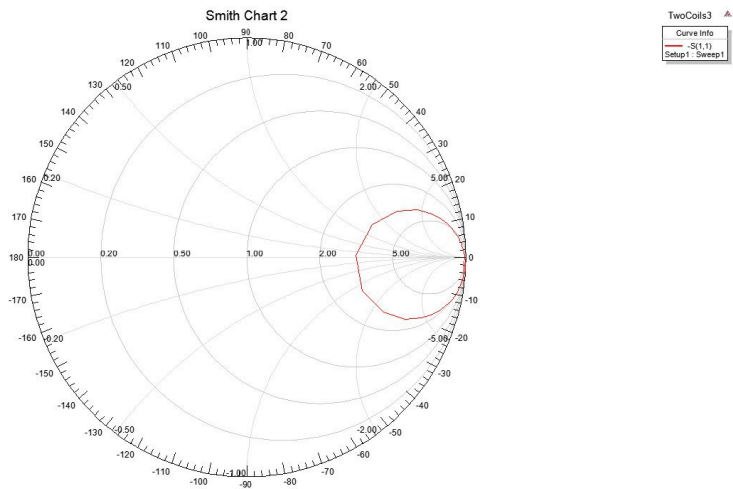
(b) A superconductor

Fig. 15 S-parameters according to applied materials

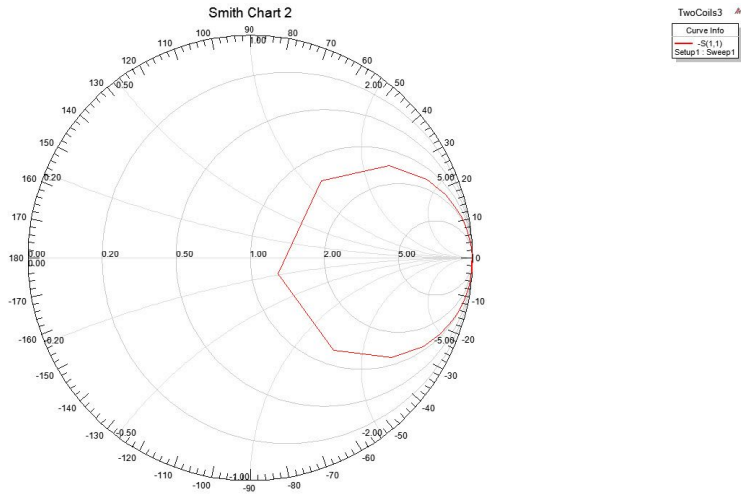
초전도 공진 코일과 구리 공진 코일의 반사손실의 차이는 약 -13.3dB를 나타낸다. 반사 손실은 네트워크 분석기에서 측정한 반사 계수를 전력의 log scale (dB)로 변환한 값으로 그 값이 클수록 반사가 작아 임피던스 정합이 잘 되었다는 의미이다. 또한, Fig. 15의 (a)와 (b)의 그래프를 보면 각각 9.57MHz, 9.63MHz의 특정 주파수에서 S_{11} 이 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 공진 주파수에서 입력전압이 반사되지 않고 최대한 수신부에 전력을 전달했다는 뜻이다. 따라서 송·수신부에 초전도체를 적용한 무선전력전송의 에너지 전달이 구리를 적용했을 때와 비교해 S_{11} 그래프가 협대역을 이루며 특정 주파수에서 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있으며, 반사 손실 값이 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도체를 적용한 송·수신부의 임피던스 정합이 효과적으로 이루어져 구리를 적용한 경우에 비해 효율이 약 10% 이상 향상되었다.

2. 초전도 공진 코일과 구리 공진 코일의 smith chart

Smith chart는 일반적으로 특성 임피던스 값으로 50Ω 을 사용한다. Smith chart 상의 원의 중심인 1이 곧 특성임피던스 값을 의미하며 1에 가까울수록 임피던스 정합이 되어 전력전달이 잘 된다는 의미이다.



(a) A copper



(b) A superconductor

Fig. 16 Smith charts according to applied materials

Fig. 16은 초전도코일과 구리코일의 smith chart를 나타낸다. Fig. 16-(a)는 송·수신부 공진 코일에 구리를 적용했을 때의 smith chart이며 Fig. 16-(b)는 초전도 코일을 적용했을 때의 smith chart이다. Fig. 16의 (a)와 같이 송·수신부 공진코일에 구리를 적용했을 경우, Smith chart 상의 값이 중심에서 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 송·수신부 공진코일에 초전도체를 적용했을 경우, smith chart 상의 값이 중심에 오는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도체를 적용했을 때, 임피던스 정합이 잘 이루어짐을 확인할 수 있다. Fig. 16의 결과로부터 송·수신부에 초전도체를 적용했을 경우, 임피던스 정합에 의한 전달 특성이 향상되어 에너지를 효율적으로 전달할 수 있었다.

3. 송·수신부의 코일 재질이 다를 경우 S-parameter

초전도 코일은 극저온 상태를 유지하기 위해 냉각용기 및 냉각재를 이용해야 한다. 냉각용기의 사용은 부피가 커지는 문제가 발생하며 기기의 사용에 제한을 초래할 수 있다. 예를 들어 전기자동차의 충전에 초전도 무선전력전송 시스템을 적용했을 때, 전기자동차의 무게 및 가격이 올라가며 액체질소를 보충해야하는 번거로움이 발생한

다. 따라서 충전소인 송신부에는 초전도코일을, 전기자동차의 수신부에는 구리코일을 적용하여 일상생활에서 사용하는 기기들의 자유도를 보장할 수 있다.

Fig. 17은 송신부에 초전도 코일, 수신부에 구리 코일을 적용한 무선전력전송 시스템의 S_{11} 을 나타낸다. S_{11} 은 -7.8268dB 를 나타내며 공진 주파수는 9.49MHz 이다. Fig. 18은 송신부에 구리 코일, 수신부에 초전도 코일을 적용하였으며 S_{11} 은 -8.3256dB 이며, 공진 주파수는 9.54MHz 이다. 송신부에만 초전도 코일을 적용했을 경우와 수신부에만 초전도 코일을 적용했을 경우의 반사 손실의 차이는 약 -0.5dB 로 차이가 거의 없다는 것을 확인할 수 있다.

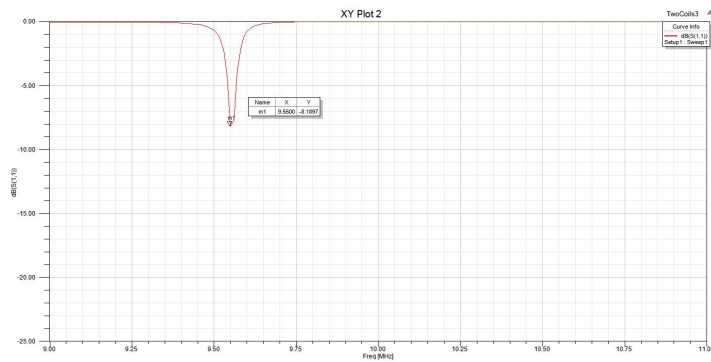


Fig. 17 S-parameter is case of applying the superconducting coil to the transmitter

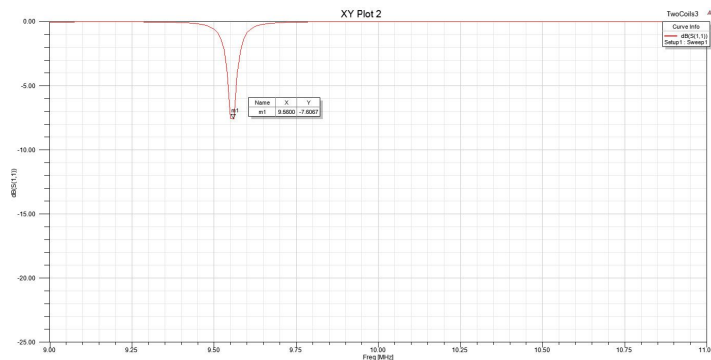


Fig. 18 S-parameter in case of applying the superconducting coil to the receiver

이는 무선전력전송 시스템을 실생활에 적용했을 경우, 송·수신 부의 초전도 시스템의 배치로 효율적인 전력 전달을 가능하도록 할 수 있다. 그러나 Fig. 17와 Fig. 18의 경우, 송·수신 부의 공진 코일에 모두 구리를 적용했을 때보다 반사 손실 값이 작았다. 이는 자기공명방식을 이용한 무선전력전송의 경우, 송·수신 코일의 공진 주파수를 동일하게 설계하는 것이 매우 중요하지만, 본 시뮬레이션의 경우에는 각각의 송·수신부의 재질이 다르기 때문에 임피던스 부정합에 의한 전달 특성의 감소로 에너지 전달이 효율적으로 이루어지지 않았기 때문으로 사료된다.

4. 송·수신부의 코일 재질이 다를 경우 smith chart

Fig. 19는 송신부에 초전도 코일을 적용했을 때, Fig. 20은 수신부에 초전도 코일을 적용했을 때의 smith chart를 나타낸다. smith chart 상의 반사 계수는 Smith chart의 중심에 올수록 임피던스 정합에 의해 에너지 전달이 효율적으로 이루어진다.

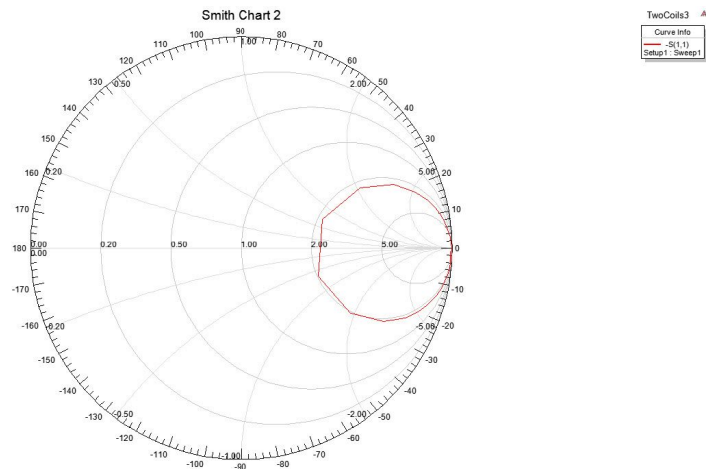


Fig. 19 Smith chart in case of applying the superconducting coil to the transmitter

그러나 송·수신부의 재질을 다르게 설정하여 시뮬레이션한 결과, 두 경우 모두 임피던스 부정합에 의해 반사 계수 값이 Smith chart 상의 중심에서 멀어지는 것을 확인할 수 있었다. 앞에서 언급한 바와 같이, 송·수신 코일의 공진 주파수를 동일하게 설계하는 것이 매우 중요하며, 송·수신부의 어느 한 곳에 초전도체를 적용하는 경우, 임피던스 정합을 위한 회로 설계가 필수적이다.

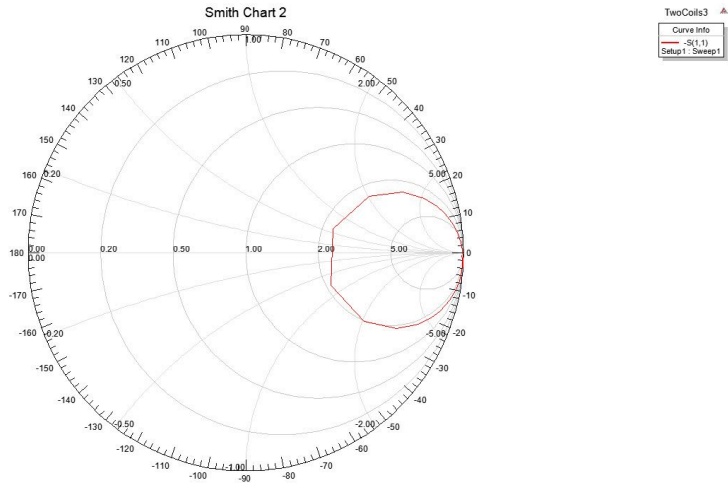


Fig. 20 Smith chart in case of applying the superconducting coil to the receiver

IV 실험

A. 시스템의 구성

Fig. 21은 상온에서의 자기공명방식 무선전력전송 시스템의 실험 환경을 나타낸다. 송·수신부 거리 300mm에서 네트워크 분석기를 이용해 S-parameter와 smith chart를 측정하였다. Fig. 22는 실험에 사용된 네트워크 분석기이다. 송·수신 공진 코일은 초전도체를 이용해 Fig. 11과 같이 helical type으로 코일직경 300mm에 8.5번 권선하였고 전원코일 및 부하코일은 직경 250mm의 아크릴 원통에 단일 루프 형태로 권선하였다. 비교를 위해 구리를 이용해 공진 코일 및 전원코일, 부하코일을 제작하였다.

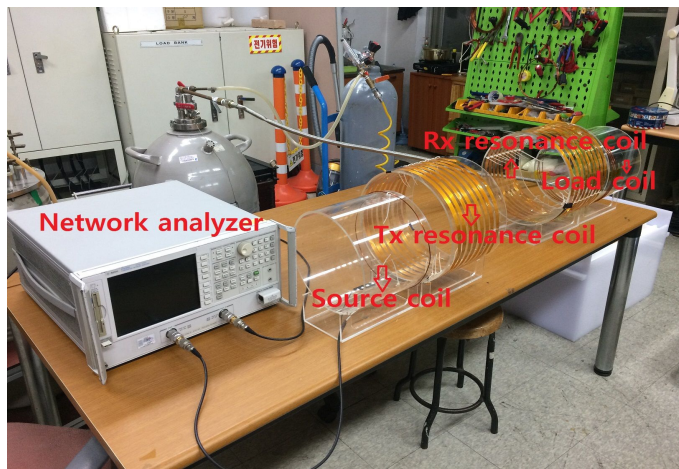


Fig. 21 Experimental composition

실험은 초전도코일의 극저온을 위해 Fig. 23과 같이 냉각용기 및 액체질소를 사용하여 77K의 온도에서 수행하였다. 실험 방법은 송·수신 공진코일을 초전도체와 구리를 이용해 그 전송 특성을 비교하였으며, 송신부에 초전도체, 수신부에 구리를 적용했을 경우와 송신부에 구리, 수신부에 초전도체를 적용했을 경우의 전송 특성을 비교하였다.

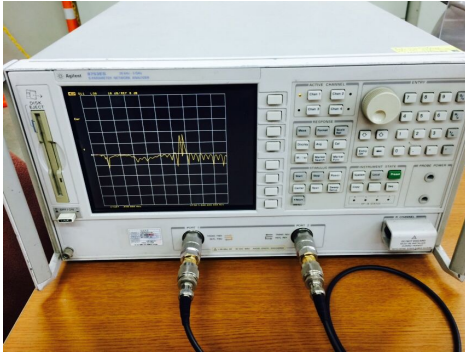


Fig. 22 Network analyzer

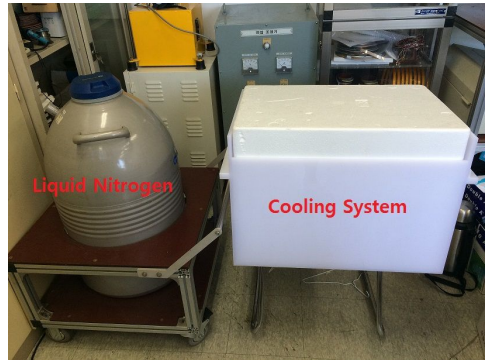


Fig. 23 Cooling system

Table 4는 LCR meter를 이용해 초전도체와 구리의 저항, 인덕턴스를 측정한 값이다. 측정한 값에서 초전도체의 저항이 영을 나타내지 못하였다. 이는 Fig. 13에서 나타난 바와 같이 초전도체를 구성하는 코일의 복잡성과 단자와의 접촉부분에서 약간의 저항이 나타났기 때문으로 사료된다.

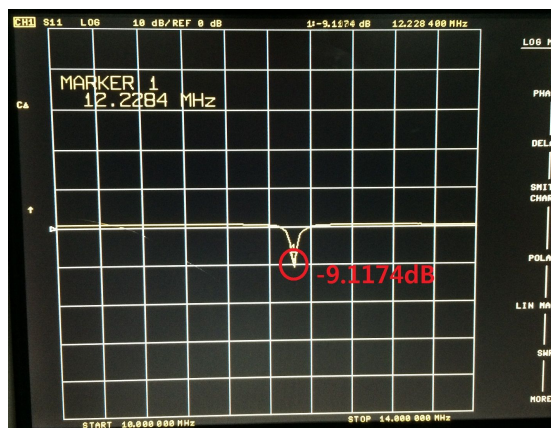
Table 4 Parameters of a superconducting coil and a copper coil

		Superconductor	copper
Resistance		0.1	0.4
Inductance (μH)	Capacitor (pF)	4.34e8	4.05e-4
Q-factor		13.9e11	34.7e10

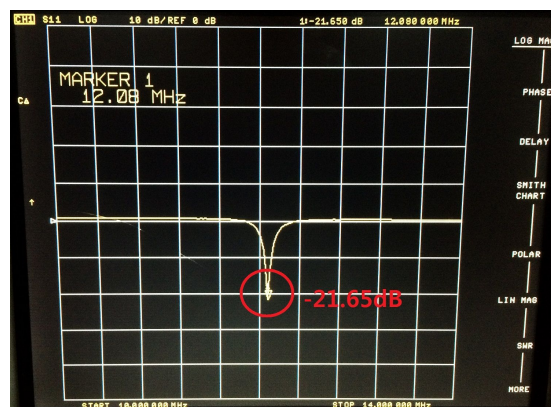
B. 실험 결과 분석

1. 초전도 공진코일과 구리 공진코일의 S-parameter

Fig. 24는 송·수신부에 구리코일을 적용한 경우와 초전도코일을 적용한 경우의 S_{11} 을 나타낸다. Fig. 24-(a)는 송·수신부에 구리코일을 적용했을 때의 S-parameter이며 그 값은 -9.1174dB 이고 공진주파수는 12.2284MHz 이다.



(a) A copper



(b) A superconductor

Fig. 24 S-parameters according to applied materials

Fig. 24-(b)는 송·수신부에 초전도코일을 적용했을 때이며 S_{11} 의 값은 -21.65dB 이고 공진주파수는 12.08MHz 이다. 송·수신 공진 코일에 초전도체를 적용한 경우와 구리코일을 적용한 경우의 반사 손실의 차이는 약 -12.55dB 를 나타낸다. 또한, 두 경우 모두 약 12MHz 의 공진 주파수에서 S_{11} 값이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 송·수신부 공진 코일에 초전도체를 적용했을 때의 그래프가 협대역을 이루며 반사 손실 값이 크기 때문에 전력 전달 특성이 좋아 효율이 약 10% 이상 향상되었다.

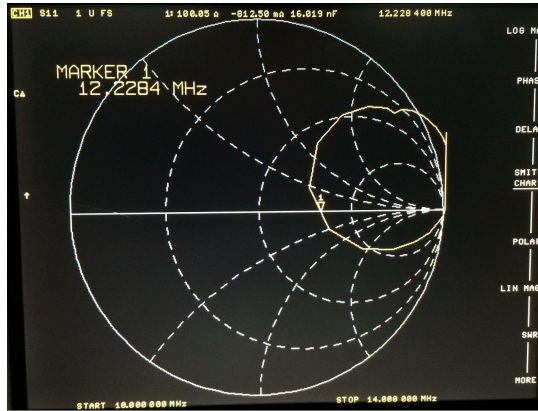
시뮬레이션 결과와 비교했을 때, 실제 실험과의 반사 손실 값은 거의 차이가 없으나 공진 주파수 대역에서는 차이를 보였다. 3장 B의 1번 시뮬레이션에서 송·수신부 공진 코일에 초전도체를 적용했을 경우, 반사 손실 값은 -23.158dB , 공진 주파수는 9.63MHz 를 나타내었고 실제 실험에서는 각각 -21.65dB , 12.08MHz 를 나타냈다. 이는 이상적인 시뮬레이션의 설정 값과 다르게 실제 실험 시 초전도체의 저항 및 AC loss, 주변 환경의 영향 등으로 공진 주파수를 결정하는 인덕턴스와 커패시턴스 값에 변화가 있었기 때문으로 사료된다.

2. 초전도 공진코일과 구리 공진코일의 smith chart

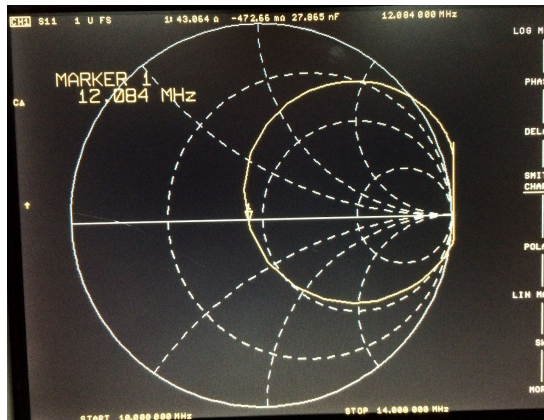
Fig. 25는 송·수신부에 구리 코일을 적용한 경우와 초전도 코일을 적용한 경우의 smith chart를 나타낸다. Fig. 25-(a)는 송·수신부에 구리 코일을 Fig. 25-(b)는 초전도 코일을 적용했을 때의 결과이다. 구리 코일을 적용했을 때 smith chart 상의 값이 도표의 중심에서 멀어지는 현상이 발생했다. 그러나 초전도체를 적용했을 경우, 반사 계수의 값이 원의 중심에 위치하며 임피던스 정합이 되는 것을 확인할 수 있었다.

Smith chart는 식 (3.1)에 의해 허수부의 +값은 인덕턴스를, -값은 커패시턴스를 나타내므로 smith chart의 원의 중심을 기준으로 위쪽 반원은 인덕턴스 영역을 아래쪽 반원은 커패시턴스 영역을 나타낸다. 3장 B의 2번 시뮬레이션에서의 smith chart 값은 인덕턴스와 커패시턴스가 거의 동일하게 원을 이루고 있다. 그러나 실제 실험에서의 smith chart의 값은 원이 인덕턴스 영역으로 치우쳐져 있다. 이는 본 연구팀이 설계한 자기공명방식 무선전력전송 시스템은 전원코일, 송·수신 공진 코일, 부하코일의 거리에 의해 커패시턴스가 결정이 된다. 그러나 이상적인 시뮬레이션의 설정과 달리, 실제 실험에서는 냉각 용기의 사용, 습도, 주변 환경 등으로 커패시턴스와 인덕턴

스 값이 다소 영향을 받았기 때문으로 사료된다.



(a) A copper



(b) A superconductor

Fig. 25 Smith charts according to applied materials

3. 송·수신부의 코일 재질이 다를 경우 S-parameter

Fig. 26은 송신부에 초전도코일, 수신부에 구리코일을 적용했을 때의 S_{11} 값이다. 반사계수는 -6.3436dB 를 나타내며 공진주파수는 12.2296MHz 이다. Fig. 27은 송신부에 구리코일, 수신부에 초전도코일을 적용했을 때이며 S_{11} 값은 -7.3052dB 를 나타낸다. 이 때 공진주파수는 12.2216MHz 이다. 송신부에만 초전도체를 적용했을 경우와 수신부에

만 초전도체를 적용했을 때의 반사 손실 값의 차는 약 -0.96dB 이다. 공진 주파수와 반사 손실의 값에 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있었다. 시뮬레이션과 비교했을 때, 반사 손실의 값은 비슷하지만 공진 주파수의 값은 시뮬레이션과 실험에서 각각 9.5MHz , 12.2MHz 의 차이를 보였다. 또한, 송·수신 부에 모두 구리 코일을 적용했을 때보다 반사 손실 값이 적었다. 이는 송·수신 코일의 공진 주파수가 일치하지 않아 임피던스 부정합으로 전달 특성이 감소했기 때문이다.

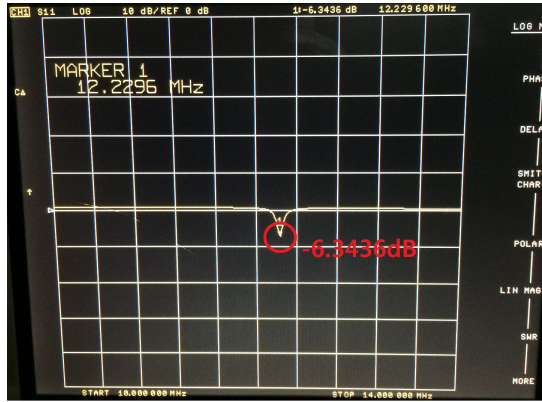


Fig. 26 S-parameter in case of applying the superconducting coil to the transmitter

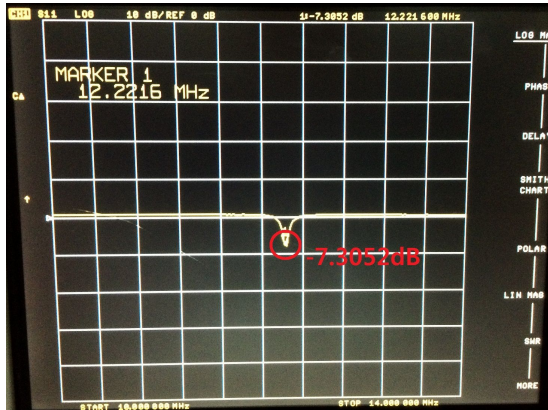


Fig. 27 S-parameter in case of applying the superconducting coil to the receiver

4. 송·수신부의 코일 재질이 다를 경우 smith chart

Fig. 28은 송신부에 초전도 코일을 적용했을 때, Fig. 5.29는 수신부에 초전도 코일을 적용했을 때의 smith chart를 나타낸다. 두 경우 모두 smith chart 상의 값이 중심에서 멀어지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 송·수신부의 공진 주파수가 다르기 때문에 임피던스 부정합에 의한 전달 특성이 감소하기 때문이다.

3장 B의 4번의 시뮬레이션 결과와 비교해 볼 때 실제 실험에서 smith chart의 값이 원의 중심에서 위쪽인 인덕턴스 영역에 치우쳐 있는 것을 확인할 수 있다.

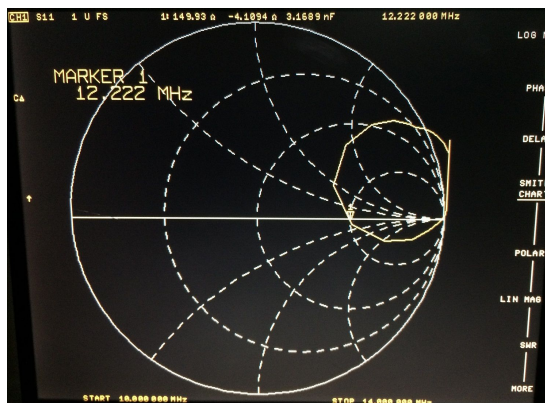


Fig. 28 Smith chart in case of applying the superconducting coil to the transmitter

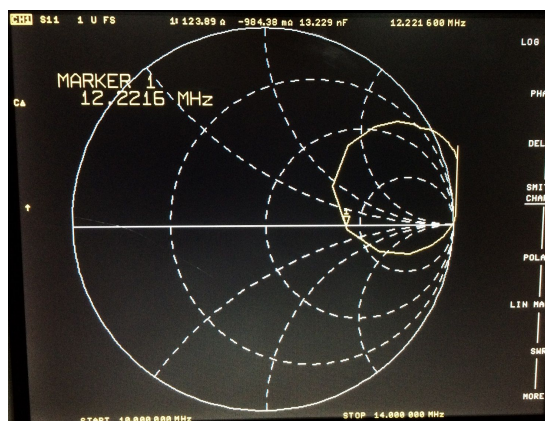


Fig. 29 Smith chart in case of applying the superconducting coil to the receiver

V 결론

본 논문에서는 자기공명방식 무선전력전송 시스템의 효율을 증가시키기 위해 송·수신 공진코일에 초전도체를 적용하였다. 기존의 상전도 코일보다 저항값이 낮고 전류밀도가 높은 초전도체를 공진코일에 대체함으로써 Q-factor를 증가시킬 수 있었다. 최대한 초전도 특성을 살리기 위해 MIT에서 구현한 4코일 방식의 무선전력전송 시스템을 구현하여 시뮬레이션을 바탕으로 실제 실험에서 네트워크 분석기를 이용해 전송 특성을 분석하였다.

시뮬레이션의 결과, 송·수신 공진 코일에 모두 구리와 초전도체를 적용하였을 경우, 각각의 S_{11} 은 약 -9.8dB, -23.1dB이며, 공진주파수는 각각 9.57MHz, 9.63MHz이다. 이 때 smith chart 상의 반사계수는 구리와 비교해 송·수신 코일 모두 초전도체를 적용했을 때, smith chart의 중심에 가까운 것을 확인할 수 있었다. 송·수신부의 재질을 다르게 설정해 송신부 공진 코일에만 초전도체를 적용했을 경우의 S_{11} 은 약 -7.8dB를 나타냈고 공진주파수는 약 9.5MHz를 나타냈다. 또한, 수신부에만 초전도체를 적용했을 경우의 S_{11} 은 약 -8.3dB, 공진주파수는 약 9.5MHz를 나타냈다. 이 때 smith chart 상의 반사 계수는 두 경우 모두 비슷한 값을 나타냈다.

실험 결과, 송·수신 공진 코일에 모두 구리와 초전도체를 적용하였을 경우, 각각의 S_{11} 은 약 -9.1dB, -21.6dB이며, 공진주파수는 각각 12.2MHz, 12MHz이다. 이 때 smith chart 상의 반사계수는 시뮬레이션과 마찬가지로 구리와 비교해 송·수신 코일 모두 초전도체를 적용했을 때, smith chart의 중심에 가까운 것을 확인할 수 있었다. 송·수신부의 재질을 다르게 설정해 송신부 공진 코일에만 초전도체를 적용했을 경우의 S_{11} 은 약 -6.3dB를 나타냈고 공진주파수는 약 12.2MHz를 나타냈다. 또한, 수신부에만 초전도체를 적용했을 경우의 S_{11} 은 약 -7.3dB, 공진주파수는 약 12.2MHz를 나타냈다. 이 때 smith chart 상의 반사 계수는 두 경우 모두 비슷한 값을 나타냈다.

시뮬레이션과 실험 결과를 바탕으로 초전도 공진코일을 적용한 무선전력전송 시스템의 반사 손실 값이 높아 전력 전달이 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션과 실험결과를 비교했을 때, 공진주파수 및 전송 특성이 완벽히 일치하지 않았다. 이것은 시뮬레이션의 이상적인 실험설정이 실제 실험에서는 초전도체 및 구리의 저항, 인덕턴스 값의 변화가 생겨 Q-factor값이 달라졌기 때문이다.

초전도체는 고주파에서 교류에 의한 손실이 생기는데 이러한 손실을 최소화하기 위해서는 차후 공진코일의 설계를 통해 수 kHz 영역의 공진 주파수로 낮추는 설계가 필요하다. 또한, 초전도 코일을 적용한 무선전력전송 시스템은 극저온을 위해 냉각용기 및 액체질소가 필수적이다. 이는 냉각용기의 부피로 인해 사용 장소의 제한이 따르며, 액체 질소의 유지에 따른 유지비용 및 충전의 불편함이 따른다. 따라서 전도냉각방식을 이용해 초전도 코일의 극저온 상태를 유지시킬 수 있는 연구가 필요하다.

자기공명방식 무선전력전송은 기존의 방식의 단점을 보완한 유망한 기술이다. 본 논문에서 제시한 초전도 공진코일은 무선전력전송의 효율을 향상시킬 수 있으며, 지속적인 연구를 통해 전기자동차 및 전기철도 등의 대전력 충전 시스템에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCE

- [1] 김종대, “무선전력전송 마지막 남은 케이블로부터의 해방”, LGERI Report, 2012.
- [2] 신용희, 오용승, 안강순, 김창선, “근거리 무선전력전송 고찰”, vol. 2009, no. 1, pp. 702-704, 2009.
- [3] 신용희, 김창선, “근거리 무선 전력전송 장치 연구”, 전기의 세계, vol. 59, no. 1, pp. 56~59, 2010.
- [4] 대한전기학회 기획시리즈, “무선 전력 전송 기술의 동향 및 현황“, 대한전기학 회지, Vol. 9, no. 1, 2010.
- [5] 안성덕, “무선전력전송 기술개발 동향”, TTA Journal, Vol. 138, pp. 45-51, 2011.
- [6] 한국전파진흥협회, “무선전력전송 기술개발 및 표준화 동향”, 2011.
- [7] 김정호, 장병준, 안준오 “무선전력전송 기술개발 및 표준화 동향“, 한국 전파진흥협회, 2011.
- [8] Nikola Tesla, “Apparatus for transmitting electrical energy“, U.S.patent 1119732, 1914.
- [9] Hype Cycle for Emerging Technologies, 2012.
- [10] Andre Kurs, Aristlidis Karalis, J. D. Joannopoulos and Marin Soljagic, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances“, Science, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, 2007.
- [11] Aristlidis Karalis, J. D. Joannopoulos and Marin Soljagic, “Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer“, annals of Physics, vol. 323, no. 1, pp. 34-38, 2008.
- [12] 2010 Technical Report, US Particle Accelerator School of Physics, MIT, 2010.

- [13] I.S.Jeong, H.S.Choi, “Characteristics of Wireless Power Transmission applying the Superconducting coil“, KIEE, Vol. 62, No. 6, pp. 762~766, 2013.
- [14] <http://www.wirelesspowerconsortium.com>
- [15] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, “무선 에너지 전송 기술”, 전자통신 동향분석, 제23권, 제6호, pp. 59~69, 2008.
- [16] ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300GHz),“ Health Physics, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [17] ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz to 100 kHz),“ Health Physics, vol. 99, no. 6, pp. 818-863 2010.
- [18] IEEE Std C95.1, IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, 1999.
- [19] 김진욱, 손현창, 김도현, 김관호, 박영진 “K 인버터를 이용한 전자기 유도 방식과 자기 공명 방식의 특성비교” 대한전기학회, vol. 2011, no. 7, pp. 9-7, 2011.
- [20] 김용해 “자기공진형 무선전력전송 기술” 전자공학회지, vol.38, no.9, pp. 17-22, 2011.
- [21] H. S. Choi, O. B. Hyun, H. R. Kim, K. B. Park, “Switching properties of hybrid type superconducting fault current limiter using YBCO stripes,“ IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 12, pp. 1833~1838, 2002.
- [22] M. Yagami, S. Shibata, T. Murata, J. Tamura, “Improvement of power system transient stability by superconducting fault current limiter“, Trans. and Distri. Conf. and Exhi., vol. 1, pp. 359~364, 2002.
- [23] S. H. Lim, J. C. Kim, B. W. Lee, “Improvement of recovery characteristics of a flux-lock type SFCL using a superconductor’s trigger“, IEEE Trans. Appl.

Supercond., vol. 20, pp. 1182~1185, 2010.

- [24] H.A. Wheeler, "Simple Inductance Formulas for Radio Coils", Proc.IRE, vol.16, pp.1398-1400;"Discussion", Proc.IRE, vol. 17, pp. 580-582, 1929.
- [25] Peter Vizmuller, RF Design Guide; systems, circuit and equations, Artech House, 1995.
- [26] 장요한, 권재순, 박재수, 최재훈 "무선전력전송용 고효율 공진기 설계" 한국 전자파 학회 논문지, vol. 22, no. 9, pp. 820-826, 2011.
- [27] J.W.Kim, H.H.Ji, Y.G.Choi, Y.H.Yun, H.C.Son, K.H.Kim, Y.J.Park, "자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구", IEEK, Vol. 21, no. 6, pp. 564-572, 2010.