



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)



2016年

8月 博士學位論文

Y계
초전도
무선전력전송
시스템의
효율개선을
위한
최적설계

黃俊元

2016年 8月
博士學位論文

Y계 초전도 무선전력전송 시스템의 효율개선을 위한 최적설계

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

黃俊元

Y계 초전도 무선전력전송 시스템의 효율개선을 위한 최적설계

Optimal Design for the Efficiency Improvement of
Y System Superconducting Wireless Power Transfer

2016 年 8 月 25 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

黃俊元

Y계 초전도 무선전력전송 시스템의 효율개선을 위한 최적설계

指導教授 崔 孝 祥

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

2016年 4月

朝鮮大學校 大學院

電 氣 工 學 科

黃 俊 元

黃俊元의 博士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 曹錦培 印

委員 朝鮮大學校 教授 李愚宣 印

委員 朝鮮大學校 教授 金宰弘 印

委員 光州科學技術院 博士 朴晟鎮 印

委員 朝鮮大學校 教授 崔孝祥 印

2016年 6月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT	ix
I. 서 론	1
A. 연구 배경	1
B. 무선전력전송 개발 동향	4
C. 연구 목표 및 내용	6
II. 이론적 배경	7
A. 무선전력전송의 특징	7
1. 무선전력전송 원리	7
2. 공진 주파수	9
3. 품질계수	11
4. 반사손실	13
5. 초전도의 원리	16
III. 실험	18
A. 실험장치 제작 및 구성	18
1. 초전도 소자	18
2. 실험 장치의 구성	20
a) 시뮬레이션 프로그램	20
b) 회로망 분석기	21
c) 공진코일 설계	23
d) Source & Load 코일 설계	26

e) 초전도 코일 및 상전도 코일 제작	26
f) 실험 구성	28
3. 냉각용기 제작	30
a) 시뮬레이션	30
b) 냉각용기 재질에 따른 S-parameter 분석	31
c) 냉각용기 재질에 따른 E-field 분석	34
d) 냉각용기 두께 변화에 따른 S-parameter 분석	36
e) 거리 변화에 따른 S-parameter 분석	41
f) 냉각용기 제작	46
IV. 무선전력전송 시스템의 수치해석	47
A. 무선전력전송 시스템 회로분석	47
B. 초전도 코일을 적용한 무선전력전송 시스템	50
1. 루프코일 인덕턴스	50
2. 루프코일과 초전도 공진 코일의 상호 인덕턴스	51
3. 상호 인덕턴스를 이용한 S_{11} 의 수치해석	54
C. 구리 코일을 적용한 무선전력전송 시스템	55
V. 결과 및 고찰	57
A. 무선전력전송 실험	57
1. 시뮬레이션	57
2. 실험	61
B. 서로 다른 재질을 이용한 무선전력전송	64
1. 시뮬레이션	64
2. 실험	68
C. 송·수신 코일의 각도 변화에 따른 무선전력전송	70

1. 시뮬레이션	70
2. 실험	74
D. n개의 수신 코일을 가졌을 때 무선전력전송 특징	77
1. 2개의 수신 코일	77
2. 3개의 수신 코일	83
VI. 결 론	89
참고문헌	93

List of Tables

Table 2-1 Relation between Q and the Circuit	12
Table 2-2 Classification of S-parameter	13
Table 2-3 Conversion table of VSWR and return loss	15
Table 3-1 Specifications of a superconductor	19
Table 3-2 Specifications of network analyzer	22
Table 3-3 S-parameter according to inductance of a coil	25
Table 3-4 R, L, Q-factor of resonance coils	28
Table 3-5 Conditions of experimental	29
Table 3-6 Aluminum applied S_{11} according to the thickness of the cooling system	37
Table 3-7 Iron applied S_{11} according to the thickness of the cooling system	38
Table 3-8 Polystyrene applied S_{11} according to the thickness of the cooling system	39
Table 3-9 PVC Plastic applied S_{11} according to the thickness of the cooling system	40
Table 3-10 Aluminum applied S_{11} according to the distance	42
Table 3-11 Iron applied S_{11} according to the distance	43
Table 3-12 Polystyrene applied S_{11} according to the distance	44
Table 3-13 PVC plastic applied S_{11} according to the distance	45
Table 4-1 Table of Q_0	52
Table 5-1 Comparison of S-parameter	63
Table 5-2 E-field Comparison	67

List of Figures

Fig. 2-1 Configuration of magnetic resonance WPT system	7
Fig. 2-2 Equivalent circuit of resonance coil	9
Fig. 2-3 The critical temperature of superconductivity	16
Fig. 3-1 Configuration of a superconductor	18
Fig. 3-2 Design of WPT system using HFSS	20
Fig. 3-3 Resonance condition check	21
Fig. 3-4 Network Analyzer	22
Fig. 3-5 Configuration of a helical coil	23
Fig. 3-6 Alteration of resonance characteristics according to the inductance of a coil	25
Fig. 3-7 Configuration of a loop coil	26
Fig. 3-8 Resonance coil	27
Fig. 3-9 Configurations of experimental	29
Fig. 3-10 Configurations of cooling system using simulation	30
Fig. 3-11 S-parameters according to the material of the cooling system	32
Fig. 3-12 E-field according to the material of the cooling system	35
Fig. 3-13 Aluminum applied S-parameters according to the thickness of the cooling system	37
Fig. 3-14 Iron applied S-parameters according to the thickness of the cooling system	38
Fig. 3-15 Polystyrene applied S-parameters according to the thickness of the cooling system	39
Fig. 3-16 PVC Plastic applied S-parameters according to the thickness of the cooling system	40

Fig. 3-17 Aluminum applied S-parameters according to the distance	42
Fig. 3-18 Iron applied S-parameters according to the distance	43
Fig. 3-19 Polystyrene applied S-parameters according to the distance	44
Fig. 3-20 PVC plastic applied S-parameters according to the distance	45
Fig. 3-21 Manufactured cooling system	46
Fig. 4-1 Equivalent circuit of WPT	47
Fig. 5-1 WPT S-parameters using simulation	58
Fig. 5-2 WPT E-fields using simulation	60
Fig. 5-3 WPT S-parameters using network analyzer	63
Fig. 5-4 S-parameters according to material of the Tx·Rx resonance coil	65
Fig. 5-5 E-fields according to material of the Tx·Rx resonance coil	66
Fig. 5-6 S-parameters according to material of the Tx·Rx resonance coil	69
Fig. 5-7 Simulation design according to the alteration of the coil degree	70
Fig. 5-8 S-parameters according to the alteration of the coil degree	72
Fig. 5-9 S-parameters according to the alteration of the coil degree	75
Fig. 5-10 WPT with the two Receiver coils	77
Fig. 5-11 S-parameters with the two Receiver coils Tx-Copper coil Rx1,2-Copper coil	79
Fig. 5-12 S-parameters with the two Receiver coils Tx-Copper coil Rx1,2-Superconducting coil	80
Fig. 5-13 S-parameters with the two Receiver coils Tx-Superconducting coil Rx1,2-Copper coil	81
Fig. 5-14 S-parameters with the two Receiver coils Tx-Superconducting coil Rx1,2-Superconducting coil	82
Fig. 5-15 WPT with the three Receiver coils	83
Fig. 5-16 S-parameters with the three Receiver coils Tx-Copper coil Rx1,2,3-Copper coil	85

Fig. 5-17 S-parameters with the three Receiver coils	
Tx-Copper coil Rx1,2,3-Superconducting coil	86
Fig. 5-18 S-parameters with the three Receiver coils	
Tx-Superconducting coil Rx1,2,3-Copper coil	87
Fig. 5-19 S-parameters with the three Receiver coils	
Tx-Superconducting coil Rx1,2,3-Superconducting coil	88

ABSTRACT

Optimal Design for the Efficiency Improvement of Y System Superconducting Wireless Power Transfer

Hwang Jun-Won

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

The use of portable electronic devices such as smart phones and tablet PCs is abruptly increasing these days. In addition, free information exchange became possible via mobile communication networks, wireless LAN, etc. With the development of electronic devices, communication systems have been developing as well. Despite such development, the power supply for the electronic devices still relies on wired systems. The wired power supply has many limitations in terms of place and mobility. The limited and degraded battery capacity of mobile devices is also requiring the need of the study on the wireless power supply and chargeable wireless power transmission technology.

The wireless power transfer (WPT) uses antenna for wireless power transmission. Although the technology was ignored in the time when it was first suggested by Nikola Tesla in 1914, it is recently drawing attention again. The commercialization of the magnetic induction WPT that uses electromagnetic induction between transmitter and receiver coils has been tried.

However, its efficiency may abruptly reduce according to the distance and arrangement between coils and coils. Another WPT type uses the microwave to transmit large power, over tens of watts, using super-high frequency. However, the microwave method is only used in space development because of the problems including the rectenna size, harmfulness to human body due to the use of high frequency, and reduced efficiency by the surrounding environment.

To address these problems, Professor Marin Soljacic of MIT proposed the magnetic resonance type WPT technology in 2007. Using the resonance between transmitter and receiver coils, this method enables the WPT in a few meters' distance, and causes no harmful effect on human body because it uses a low frequency range. Accordingly, it seems that this technology can be applied to diverse sectors, and it is continuously being studied to improve its efficiency.

In this study, a superconducting coil was fabricated and applied to the magnetic resonance WPT. The superconductor has very low resistance at very low temperature. So it can increase the quality factor (Q-factor), which is the frequency quality characteristic, reducing the reflectivity (S_{11}) in WPT. The superconducting coil requires a cooling system to keep the critical temperature. Therefore, receiver coil was combined with a copper coil with the same resonance frequency considering the use of superconducting coils to real application. A superconducting coil was applied to the transmitter side to increase the Q-factor, and a copper coil was applied to the receiver side to improve the applicability and mobility of the electronic devices. In this setting, the WPT and the 1:n WPT characteristic were considered to derive the performance and characteristic of the magnetic resonance WPT required in real application.

I. 서 론

A. 연구 배경

1891년 Nikola Tesla는 5kW짜리 스파스 송신기로 30피트 떨어진 가이슬러관에 무선 주파수를 자극하여 불이 들어오도록 하는 시범을 선보였다. 테슬라는 이 시범에 사용된 안테나와 공중선, 접지, 단일회로, 송수신 장치 등은 현재의 무선통신의 기본과도 같으며 무선통신 및 전력전송에 대한 많은 가능성을 열게 된다. 이후, Nikola Tesla는 폭풍이 칠 때 생기는 번개를 측정하게 되는데, 이 번개가 일정한 주기를 가지고 있음을 발견한다. 이러한 번개가 일정한 주기를 갖는 것을 보고 정상파라는 것을 인식하고, 지구가 하나의 큰 도체라고 생각하게 된다. 번개의 주기성과 지구라는 도체를 이용하면 지구 곳곳에 무선으로 전력을 전달할 수 있다고 생각한다. 이러한 실험을 위해 인위적인 번개를 만들어 방출하는 실험을 하게 되나 전력의 소모가 심하고 기술적 한계에 이르게 되어 무선에 대한 연구가 중단되었다[1-5].

최근 모바일 전자기기의 수요 증가에 따라 다시금 무선힘전송 기술이 주목받게 되었다. 편리하고 빠른 충전 기술에 대한 요구가 나날이 증가하고 있는데 비해, 전자기기들은 전원 공급을 위해 전선을 이용하고 있으며 잦은 배터리 교체에 따른 충전, 전선 길이에 따른 기기의 이동 공간 제한 등에 대한 문제점이 발생한다 [6-8]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 무선힘전송 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 무선힘전송 기술은 스마트폰, 태블릿 PC, 모바일 전자기기, 가전제품, 전기 자동차에 이르기까지 전원케이블 없이 에너지를 전달한다. 전원공급 케이블을 연결하기 위한 커넥터가 없어지기 때문에 전기기기의 규모와 디자인을 개선할 수 있다[9-15].

무선힘전송 방식은 자기유도, 전자기파, 자기공진 방식으로 나눈다. 자기 유도 방식은 기존에 많이 사용되고 있는 원리와 유사하다. 1차 코일에 교류 전원이 인

가되면 코일에 흐르는 전류에 의해 자기장이 형성된다. 이때, 1차 코일과 근접하여 위치해 있는 2차 코일에 자기장이 영향을 끼치면서 2차 코일에 전류가 유도되는 방식을 자기유도 방식이라 한다. 자기유도 방식은 코일과 코일 사이의 거리가 매우 가까워야 무선으로 전력전송이 가능하며 약 90%의 높은 효율을 나타낸다. 어떤 크기와 모양의 코일에서도 적용이 가능하기 때문에 현재 전동칫솔, 스마트폰 무선충전기 등에 상용화되어 있다. 하지만 송·수신 코일간의 방향이 일치하지 않거나, 거리가 멀어지게 되면 효율이 급감하는 단점이 있다. 현재 무선전력전송 위원회(Wireless Power Consortium)에서 전기유도로 무선 충전되는 인터페이스 표준을 Qi라고 명명하고 개발 중에 있으며, LG전자, 삼성전자, HTC 등 다수의 제조회사들이 기술개발에 참여하고 있다. 전자기파 방식은 마이크로파를 사용하기 때문에 원거리 무선전력전송이 가능하다. 송신부 안테나에서 마이크로파를 방사시켜 레克斯터나를 이용해 수신하는 방식이기에 산이나, 숲 등 주변 환경에 따라 전력전송의 효율이 급변하는 단점을 가지고 있다. 또한 수 GHz의 마이크로파를 사용하기 때문에 인체에 영향을 끼치게 된다. 이러한 문제점들로 인해 실생활에 적용하지 못하고 우주 태양광 발전 시스템 및 군사적 용도로 이용되고 있다. 대표적으로 NASA의 Sun Power Satellite 프로젝트와, 캐나다의 SHARP 프로젝트가 있다. 자기공명 무선전력전송은 2007년 MIT의 Marin Soljacic 교수팀이 제안한 방식으로 2m의 거리에서도 약 40%의 효율을 나타냈다. 동일한 공진주파수를 갖는 송·수신 공진 코일의 공명 현상을 이용하였기 때문에 자기유도방식의 단점인 짧은 전송 거리 및 위치의 자유도를 해결할 수 있다. 또한 비방사형 무선 전력전송 기술이기 때문에 전자기파 방식의 단점 또한 해결할 수 있다. 자기공명 방식의 무선전력전송 효율이 보완될 경우 실생활 적용도 가능할 것으로 판단되어 여러 연구기관에서 연구 중에 있다[15-23].

본 논문에서는 세가지 종류의 무선전력전송 시스템 중 자기공명 무선전력전송 시스템을 기본으로 하고, 여기에 초전도 코일을 제작하여 연구하고자 한다. 기존 자기공명 무선전력전송은 구리 코일을 이용하여 안테나를 제작하였으나, 구리 코일이 가지고 있는 기본 저항값에 의해 Quality-factor(Q-factor)를 증가시키는데

한계가 있다. 그렇기 때문에 여러 가지 권선 방법을 이용하여 최적의 안테나 모델을 설계하여도 일정 값 이상의 Q-factor를 구하지 못한다. 이러한 문제점을 개선한 초전도 코일은 임계 온도 이하에서 저항값이 영에 가깝기 때문에 구리 코일보다 높은 Q-factor 값을 가지게 되면 안테나의 선택성 또한 증가하게 된다. 본 연구에서는 초전도 코일을 적용하였을 때 예상되는 문제점들을 고려하여 실생활 적용에 요구되는 초전도 코일을 적용한 자기공명 무선전력전송 시스템의 성능 및 동작 특성을 등을 도출하고자 한다.

B. 무선전력전송 개발 동향

무선전력전송 시스템은 휴대용기기의 사용이 증가하면서 관심이 매우 높아지고 있으며, 세계 여러 연구기관에서 연구 중이다. 현재 자기유도방식의 무선전력전송 기기가 상용화 되어 사용되고 있으며, 자기공명 시스템 역시 상용화를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

국내의 경우를 살펴보면 삼성전자에서 2015년 4월에 출시한 스마트폰 무선 충전 패드가 대표적이다. 삼성전자는 자기유도방식을 이용하여 무선으로 스마트폰을 충전할 수 있는 패드를 만들었으며, Qi인증을 받았다. 또, 이스라엘 와이치지(Wi-Charge ltd.)는 국내 기업 크리터스와 함께 레이저로 휴대폰을 자동충전하는 기술을 국내 시장에 도입할 예정이다. 특히기술인 광자공명식 원거리 무선충전기술을 활용하여 방이나 카페 같은 한정된 공간에서 휴대폰 및 IT기를 자동으로 충전하는 방식이다. 하나의 송신부로 5대 이상의 수신부를 동시에 충전할 수 있을 것으로 판단되어 많은 기대를 받고 있다. 이케아 코리아에서는 2016년 스마트폰 무선 충전 기능을 갖춘 가구를 선보였다. 침대 및 플로어스탠드, 탁상스탠드 등에 무선 충전 패드를 내장시켜 스마트폰을 올려놓으면 충전할 수 있는 시스템이다. 이케아 역시 자기유도 시스템을 기반으로 하고 있어 Qi인증을 받았으며, 이를 지원하는 모든 제품과 호환도 가능하다. 2015년 12월 한국전자통신연구원(ETRI)은 자기공명 방식을 이용한 60W급 무선충전시스템 기술을 개발하였다. ETRI는 에너지존(E-zone)을 만들어 이 구역 안에서 수신부를 장착한 스마트 기기가 존재하면 자동으로 충전이 된다. 2012년 한국전기연구원(KERI)에서는 6.78MHz 자기 공진형 무선전력전송 기술이 적용된 무선 충전 시제품을 개발하였으며 LS전선에서는 휴대폰 무선충전을 위해 WPC(Wireless Power Consortium) 표준에 부합하는 얇은 권선형 코일 대신 필름 형태의 코일을 개발하여 LED TV 적용 제품을 개발하였다 [2-5].

국외의 경우를 살펴보면, 미국의 전기차 무선 충전기 제조회사 'Plugless Power'는 2016년 테슬라 모델 S 전용 무선 충전 패드 판매를 시작하였다. Plugless

Power사가 만든 테슬라 모델 S 무선 충전 시스템은 240V 전기코드에 연결 가능한 무선충전 패드와 차량 하부에 설치되는 어댑터로 구성되어 있다. 이 모델은 1시간 충전 시 약 20마일을 주행할 수 있으며, 자체적으로 Super Charger 충전소 네트워크를 확대해 나가고 있다. 2015년 10월 미해군연구소에서는 미래의 새로운 에너지 전력시스템으로 우주 태양광 발전을 소개했다. 우주태양광 발전 시스템은 우주에서 생산한 전력을 지구로 보내는 발전 시스템으로 계절 및 날씨의 영향을 받지 않고 태양광 발전 효율도 기본보다 10배 높은 장점을 가진다. 2016년 1월 일본의 TOSHIBA에서는 15W전송 능력을 가진 신형 무선 전력 전송기 IC를 출시하고 올해 봄부터 대량 생산을 한다. 이 IC를 구성하는 15W 무선 전송기는 유선 충전기 보다 신속하게 무선 충전이 가능하며, 스마트폰, 태블릿, 산업용 기기 등 다양한 분야에 적용이 가능하다. 최근 자기결합 무선충전 기술 표준은 크게 WPC, A4WP(Alliance for Wireless Power), SAE(Society of Automotive Engineers)/IEC(International Electreronical Committee)로 구분할 수 있으며 WPC는 2013년 Codeless Kitchen 규격을 개발하는 워킹그룹을 신설하여 100W~2.4kW의 자기유도 방식 규격을 개발하였다. A4WP는 ISM band인 6.78MHz를 사용하여 자기 공진기술을 활용한 50W 미만의 다양한 응용 제품의 표준화를 주도하고 있다 [2-5].

이렇듯 세계적으로 다양한 무선 충전 시스템이 개발되었다. 하지만 기존에 개발된 무선전력전송 시스템은 자기유도 방식을 이용한 무선충전 방식이다. 자기유도 방식은 코일의 배열, 간격에 따라 효율이 급속도로 감소하는 단점이 있어 사용에 불편함이 발생한다. 자기공명 무선전력전송을 이용한 충전 시스템은 현재 개발단계에 있다. 자기공명 무선전력전송이 개발될 경우, 코일의 배열, 간격에 대한 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 전기자동차, 전기 철도 등 대용량 송전도 가능하다. 그렇기 때문에 자기공명 무선전력전송의 효율 및 거리 개선에 관한 연구가 반드시 수반되어야 한다.

C. 연구 목표 및 내용

현재 다양한 형태의 무선전력전송 시스템이 개발되고 있다. 그뿐만 아니라 실생활 적용을 위한 실증시험을 준비하고 있다. 무선전력전송은 주변의 환경과 다양한 차폐 소재에 의해 임피던스가 변화할 수 있기 때문에 이에 대한 연구는 지속적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는 초전도 코일을 적용한 무선전력전송 시스템을 제시하여 무선전력전송의 효율 증대 및 특성 등에 대한 연구를 진행하였다.

본 연구에 사용된 초전도 코일은 임계온도 이하에서 영저항 특성을 가지는 특성을 이용하여 무선전력전송의 Q-factor를 증대시키는데 주안점을 두었다. 초전도 코일의 권선 방법에 따라 공진 주파수 및 임피던스 매칭이 변화하기 때문에 무선전력전송 시스템의 공진 코일에 적용하여 최적화된 효율과 반사손실(S_{11})를 나타낼 수 있는 구조의 초전도 코일을 제안하였다[3].

본 연구에서는 초전도 코일의 무선전력전송 적용 시 다음과 같은 동작 특성을 살펴보자 한다. 먼저 HFSS(High frequency structure simulation) 프로그램을 이용하여 공진 코일의 인덕턴스 변화에 따른 공진 코일의 반사손실을 분석하고 최적의 Q-factor 및 효율을 나타내는 자기공명 무선전력전송의 공진 코일을 설계하였다. 또한 자기공명 무선전력전송 시스템을 설계 및 구현하고 그 특성을 분석하였다. 초전도체는 극저온에서 그 특성이 발현되기 때문에 액체질소를 보관할 수 있는 냉각용기 제작이 필수이다. 여러 가지 재질의 투자율 및 반사손실을 비교·분석하였다. 이러한 시뮬레이션 데이터를 바탕으로 실제 자기공명 무선전력전송 및 초전도 코일을 구현하여 그 특성을 분석하였다. 동일한 조건의 구리코일을 제작하여 초전도 코일의 효율 증대 및 반사손실을 비교 분석하였다. 이후, 기존 무선전력전송 제품과 협조를 위해서 초전도 코일과 구리코일과의 송·수신 특성을 비교하였다.

II. 이론적 배경

A. 무선전력전송의 특징

1. 무선전력전송 원리

그림 2-1은 자기공명 무선전력전송 시스템의 구성을 나타낸다. 소스코일, 공진코일(송신, 수신), 로드코일로 구성되어 있다. 소스코일에 전원을 인가하게 되면 자기유도 현상을 이용하여 소스코일에서 송신부 공진 코일로 전력이 인가된다. 전력이 인가된 송신부 공진 코일은 동일한 공진 주파수로 설계된 수신부 공진 코일에 무선전력전송을 하게 된다. 수신부 공진 코일에 전달된 전력은 다시 자기유도 현상을 이용해 로드코일로 전력을 전달하여 부하단에 전력이 인가된다. 송·수신 공진 코일은 동일한 공진 주파수로 제작되었을 때에만 선택적 무선전력전송이 가능하다. 이를 공명현상이라고 하며, 자기공명 무선전력전송의 핵심 기술이라고 할 수 있다.

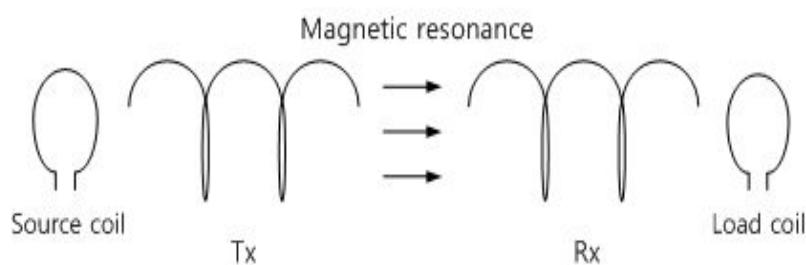


그림 2-1 자기공명 무선전력전송 시스템 구성

Fig. 2-1 Configuration of magnetic resonance WPT system

공명현상을 수식적으로 표기하면 식 (2.1)과 같다[3].

$$Z = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.1)$$

식 (2.1)에서 R, L, C는 각각 저항, 인덕턴스, 커패시턴스를 나타내며, Z, X는 각각 임피던스, 리액턴스를 나타낸다. 이때, 손실 없는 공진주파수를 도출하기 위해서는 L과 C가 존재하면서 허수부가 0이 되어야 한다. 식 (2.2)는 허수임피던스가 0이 되어 없어지는 공진주파수를 나타내는 식이다[3].

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} = 0 \quad (2.2)$$

식 (2.2)를 다시 f로 정리하면 식 (2.3)과 같이 공진 주파수를 도출할 수 있다.

$$\text{Resonance Frequency} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

식(2.3)과 같이 인덕터와 커패시터가 에너지를 축적하고 방출하면서 평형을 이룰 때, 공명 현상이 나타나며, 공진주파수를 이루는 중요한 요소인 것을 확인할 수 있다[3].

2. 공진주파수(Resonance Frequency)

무선전력전송 시스템의 공진코일을 간략하게 표현하면 그림 2-2와 같이 표현할 수 있다. 이 회로에서 총 임피던스는 식 (2.4)과 같다.

$$Z_T = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) \quad (2.4)$$

이때, 교류전압이 인가되면 커패시터(C)는 전압을 전류에 비해 90° 늦게 하고, 인덕터(L)는 전압에 비해 전류가 90° 늦게 하는 성질을 가진다. 또한 X_L 이 X_C 보다 크면 전류는 인가 전압보다 뒤지면서 유도성 회로의 특성을 가지게 되고, X_L 이 X_C 보다 작게되면 전류는 인가전압보다 앞서게 되면서 용량성 회로를 가지게 되는 특성을 가진다. 식 (2.2)를 다시 주파수로 표현하면 식 (2.5)와 같다.

$$Z_T = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서 확인할 수 있듯이 커패시터(C)는 주파수에 반비례하고, 인덕터(L)은 주파수에 비례하는 성질을 가진다. 이와 같이 L과 C는 주파수 특성이 정 반대인 것을 확인할 수 있다. 공진 코일은 주파수에 따라 용량성 혹은 유도성이 된다.

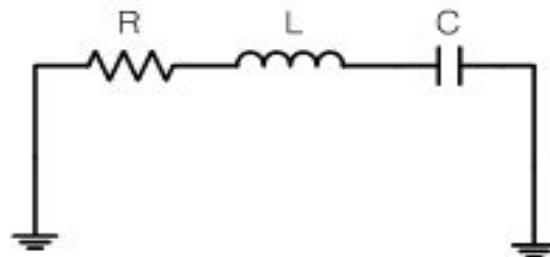


그림 2-2 공진코일 등가회로

Fig. 2-2 Equivalent circuit of the resonance coil

이때, 식 (2.6)와 같이 X_L 이 X_C 와 동일한 크기를 가지게 될 경우 L과 C의 크기는 같고 위상이 반대이므로 상쇄되게 된다. 이때, 회로에서는 순수하게 저항성이 되며, 특정 주파수에서 에너지를 저장하게 된다. 따라서, 이 지점을 공진 각주파수라 하며 식 (2.7)과 같다.

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (2.6)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\omega = 2\pi f) \quad (2.7)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.8)$$

식 (2.8)은 공진 각주파수를 공진 주파수로 변환한 식이다. 공진 코일의 공진 주파수는 L과 C값에 의해 결정된다. 자기공명 무선전력전송 시스템의 송신 공진코일과 수신 공진코일의 L값과 C값을 각각 결정하여 동일한 공진주파수로 특정 주파수에서 무선전력전송이 가능해진다.

3. 품질계수 (Quality-factor)

a. 양호도

Quality-factor(Q-factor)는 무선전력전송에서 가장 중요한 요소인 안테나의 품질 양호도를 나타내는 척도이다. 안테나 코일에 전기장이나 자기장이 발생하게 되면 코일 자체가 보유하고 있는 저항에 의해 소멸하게 된다. 이때, 발생되는 손실의 정도를 Q-factor라고 하며 식 (2.9)과 같다[3].

$$Q\text{-factor} = \frac{\text{저장된 총 에너지}}{\text{한주기 동안 소모되는 에너지}} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} \quad (2.9)$$

식 (2.9)에서 확인할 수 있듯이 안테나에 평균적으로 축적될 수 있는 최대 에너지와 한주기내에 소실되는 에너지와의 상대적인 크기에 의해 Q-factor가 결정된다. 안테나의 품질을 높이기 위해서는 안테나 자체가 가지고 있는 저항 R을 감소시켜야 한다. 하지만 기존의 상전도체 같은 경우 저항값을 감소시킬 수 없기 때문에 Q-factor를 증가시키는데 한계가 발생하게 된다. 하지만 초전도체는 임계온도에서 저항값이 영이 되기 때문에 상전도체에 비해 높은 Q-factor를 가질 수 있다.

b. 선택성

Q-factor는 품질의 양호도 뿐만 아니라 주파수의 대역폭을 정의하기도 한다. 식 (2.10)와 같이 공진 주파수와 대역폭의 비율로서 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{\text{resonance frequency}}{\text{3dB Bandwidth}} \quad (2.10)$$

Q 값이 클수록 공진시 공진 진폭이 커져 주파수의 선택성이 좋아진다. 반대로 Q값이 작을수록 대역폭이 넓어지며, 주파수 선택도가 나빠진다. 표 2-1은 Q와 회

로와의 관계를 나타낸다.

표 2-1 Q와 회로의 관계

Table 2-1 Relation between Q and the Circuit

Value of Q	Circuit
$Q < 1$	The broadband filter circuit
$Q > 1$	The narrow band filter circuit
$Q \geq 5$	High quality circuit

4. 반사손실 S_{11}

Scattering parameter(S-parameter)는 주파수 분포상에서 입력 전압대 출력전압의 비를 의미하는 것으로 Radio frequency(RF)에서 가장 널리 사용되는 회로 결과값이다. S-parameter는 Transmission, Reflection, Coupling, Isolation 이렇게 4가지 특성파라미터로 분류할 수 있으며, 그 특징은 표 2-2와 같다. 안테나의 경우 multi-port를 제외하고 일반적으로 입력포트만 존재한다. 그렇기 때문에 S_{11} 만 출력이 된다. 특정 주파수 대역에서만 S_{11} 이 나타나는데 주파수에서 입력전압이 반사되지 않고 최대한 외부로 방출된다는 것을 의미한다. S_{11} 이 크게 나타날수록 안테나의 방사특성이 좋다는 의미가 된다. 본 연구에서는 자기공명 무선전력전송 시스템의 S-parameter 반사손실인 S_{11} 을 분석하였다.

표 2-2 S-parameter의 분류

Table 2-2 Classification of S-parameters

Classification	Explanation
Transmission	The ratio of the input to the output. (Ratio of the input power to the output power which is likely to transfer till the output port.)
Reflection	The Self reflection value of input/output port respectively. (The reflective value that input and output itself.)
Coupling	The leakage power to the port, besides the port that is likely to transfer. (Meaning of interference of unlinked line or naturally leaking power.)
Isolation	The leakage power to the port (which terminate the power.)

반사계수(Γ)는 송신 코일과 수신 코일단의 임피던스 차에 의해 발생하는 반사량을 계산한 것이다. 반사계수는 식 (2.11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_S}{Z_{in} + Z_S} \quad (2.11)$$

반사손실(R_L)은 반사계수를 전력의 log scale로 변환한 값이다. 반사계수를 이용하여 반사손실을 구하는 식은 식 (2.12)와 같다.

$$R_L = -10\log|\Gamma|^2 \quad (2.12)$$

S-parameter에서는 입력된 전력에 비해 반사된 전력이 작기 때문에 dB값에서 항상 - 부호를 가지게 된다. 그렇기 때문에 반사손실을 S-parameter의 S_{11} 으로 표현하고자 한다면 반사손실에 - 부호를 붙인 것과 같다. 반사계수 혹은 S_{11} 을 또 다르게 표현한 값을 정재파비(VSWR: Voltage Standing Wave Ratio)라고 한다. 식 (2.13)과 같다.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.13)$$

정재파는 파동이 진행하다가 다른 매질을 만나서 반사되어 나온 파동과 합쳐지면서 생기는 파형을 의미한다. 전기적 파동 역시 반사된 경우 고정된 전압을 가진 파형이 존재하게 된다. 이때, 반사량이 많을수록 고정된 정재파의 크기가 커지게 된다. VSWR은 반사가 거의 없는 경우 1에 가깝고, 반사량이 늘어날수록 무한대 (∞)에 가까워진다. 표 2-3은 반사손실과 VSWR의 환산테이블이다. 이 표를 통해 송신 코일이 가지는 손실의 정도와 송신 효율을 확인할 수 있다.

제작된 자기공명 코일과 냉각용기를 적용하여 초전도 코일과 구리 코일의 무선 전력전송 특성을 비교 분석하였다. 먼저 HFSS 시뮬레이션 프로그램을 이용하여

무선전력전송 시스템의 반사손실을 분석하였다. 입력신호가 1일 때, 반사되어 나오는 신호 값의 비를 이용하였다. 또, 초전도 코일 같은 경우 임계온도를 유지하기 위해 액체 질소에 보관되게 된다. 그럴 경우 구리코일과 환경적 요인이 달라질 수 있기 때문에 구리코일 또한 액체 질소에 보관하여 실험을 진행하고 초전도 코일과 특성을 비교하였다.

표 2-3 VSWR과 반사손실의 환산 Table

Table 2-3 Conversion table of VSWR and return loss

VSWR	Return loss(dB)	Transmitter efficiency (%)
1.1	-26.4	99.8
1.2	-20.8	99.2
1.3	-17.7	98.3
1.4	-15.6	97.2
1.5	-14.0	96.0
1.6	-12.7	94.7
1.7	-11.7	93.3
1.8	-10.9	91.8
1.9	-10.2	90.4
2	-9.5	88.9
2.2	-8.5	85.9
2.4	-7.7	83.0
2.6	-7.0	80.2
2.8	-6.5	77.6

VSWR	Return loss(dB)	Transmitter efficiency (%)
3	-6.0	75.0
3.5	-5.1	69.1
4	-4.4	64.0
4.5	-3.9	59.5
5	-3.5	55.6
5.5	-3.2	52.1
6	-2.9	49.0
6.5	-2.7	46.2
7	-2.5	43.8
7.5	-2.3	41.5
8	-2.2	39.5
8.5	-2.1	37.7
9	-1.9	36.0
9.5	-1.8	34.5
10	-1.7	33.1

5. 초전도 원리

구리의 경우 절대온도 0° 에서 저항 값이 $0[\Omega]$ 이 아닌 값을 가지게 된다. 이와 같이 일반적인 금속 물질은 불순물이나 다른 결함을 가지고 있기 때문에 온도가 감소한다고 하여도 저항이 $0[\Omega]$ 이 되지 못한다. 반면에 초전도체는 일정 온도 이하에서 저항이 $0[\Omega]$ 이 되는 현상으로 1911년 Onnes에 의해 발견되었다. 처음 발견된 초전도체는 BCS이론에 의하여 30K 이상에서 초전도성을 보이는 것이 불가능하였다. 하지만 1986년 35K에서 초전도현상을 띠는 물질을 발견하였으며 이후, 92K에서 초전도 현상을 띠는 YBCO가 발견되었다. 기존의 초전도체 같은 경우 액체 헬륨을 냉각물질로 이용하였다. 액체 헬륨의 경우 원재료의 값이 비싸며, 이동 시 고체 에어 플러그가 사용된다. 하지만 77K에서 기화점을 갖는 액체 질소는 원재료의 값이 매우 싸며, 수송 시에도 자유롭다. 92K에서 초전도 현상을 보이는 YBCO는 액체 질소로 냉각시켜 초전도 현상을 발현시킬 수 있기 때문에 상업적으로 아주 중요한 요소로 작용하게 되었다.

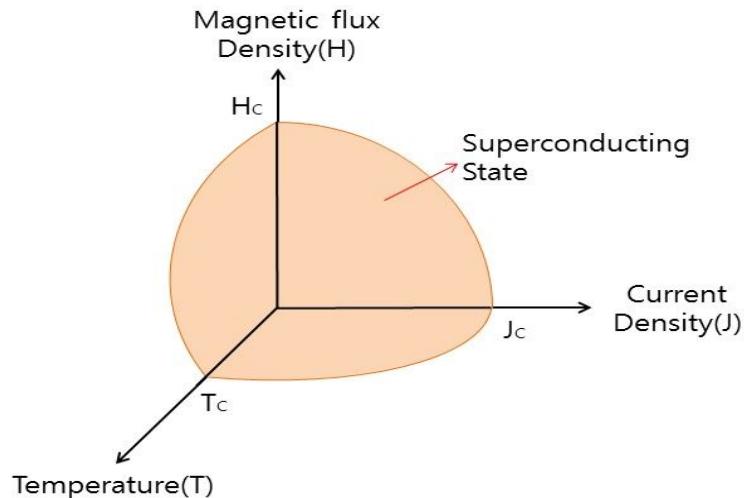


그림 2-3 초전도체 임계곡면

Fig. 2-3 The critical temperature of superconductivity

그림 2-3은 초전도체의 임계곡면을 보여준다. 초전도체는 임계온도, 임계 자장, 임계 전류 3가지 임계 값 안에서 초전도 현상이 발생하게 된다. 초전도 코일은 초전도체의 영저항 특성을 이용한 것으로 코일의 내부 저항이 0이 되면 에너지 저장 능력이 향상되기 때문에 무선전력전송의 효율 및 전송 거리를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 선재형과 같이 초전도체가 얇은 막을 사이에 두고 있는 경우 터널효과에 의해서 전자가 쿠퍼쌍을 이루어 얇은 막을 통과하는 현상인 조셉슨 효과가 발생한다. 접합부분 내의 전자는 나란히 운동하며, 그 모양은 간섭성의 파동으로서 기술된다. 한계전류까지는 막이 있음에도 불구하고 초전도체 사이에 전위차가 발생하지 않고 직류전류가 흐른다. 하지만 직류전류가 한계전류를 초과하면 초전도체 사이에 전위차가 생겨 교류전류가 흐르게 된다. 이때, 교류주파수는 직류전압에 비례하고 외부로부터 전자기파를 조사하면 간섭현상이 발생하여 교류주파수가 전자기파 주파수와 동일한 경우 직류전류가 발생한다.

III. 실험 구성 및 방법

A. 실험장치 제작 및 구성

1. 초전도 소자

초전도 소자의 종류로는 벌크형, 선재형, 박막형으로 나눌 수 있다. 벌크형의 경우 핵융합로, 에너지저장(SMES), 자기부상열차 등 에너지 관련 분야에 사용되고 있다. 박막형의 경우 초전도 양자 간섭 소자, 적외선 센서, 초전도 배선 등으로 주로 센서 분야에 사용되고 있다. 벌크형과, 박막형의 경우 유연성이 없고 기계적 강도가 낮기 때문에 안테나 형태로 가공하기 힘들다. 선재형의 경우 테이프 형상을 하고 있기 때문에 가공이 용이하다. 그렇기 때문에 전력케이블, 변압기, 사고전류 제한기 등 초전도 응용기기에 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 선재형의 YBCO를 사용하여 안테나로 제작하였다. 그럼 3-1은 선재형 초전도체의 구성을 나타낸다.

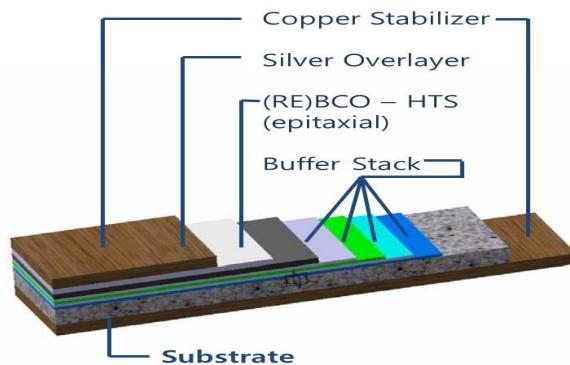


그림 3-1 초전도체 구성

Fig. 3-1 Configuration of a superconductor

표 3-1은 본 연구에서 사용된 초전도 선재형의 사양을 보여주고 있다.

표 3-1 초전도체 특성

Table 3-1 Specifications of a superconductor

Spec	SCS 12050	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

2. 실험 장치의 구성

a) 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서 무선전력전송 시스템 구성 및 분석을 위해서 먼저 시뮬레이션을 이용하였다. 시뮬레이션을 위해 사용된 프로그램은 High frequency structure simulation(HFSS, Ansys사)으로 유한요소, 적분 방정식 또는 고급 하이브리드 방법에 기반한 여러 가지 최첨단 해석기술이 제공되기 때문에 마이크로파, RF 및 고속 디지털 응용분야 시뮬레이션에 적합하다. 시뮬레이션 설계 및 자료 분석을 통해서 실제실험 시 발생하게 될 문제점들을 미리 도출하고 해결해 나갈 수 있다. 그림 3-2는 HFSS를 이용하여 무선전력전송 시스템을 설계한 그림이다. Source, Resonance(Tx, Rx), Load coil로 구성하였으며, source coil에 50Ω 의 Lumped port를 설정하고 1W의 전력을 인가하였다. 이때, S-parameter의 S_{11} 을 측정하였다.

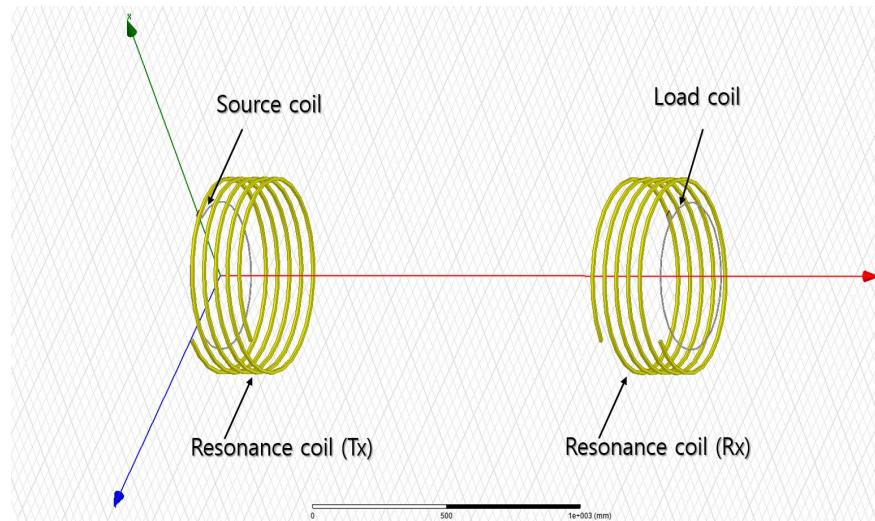
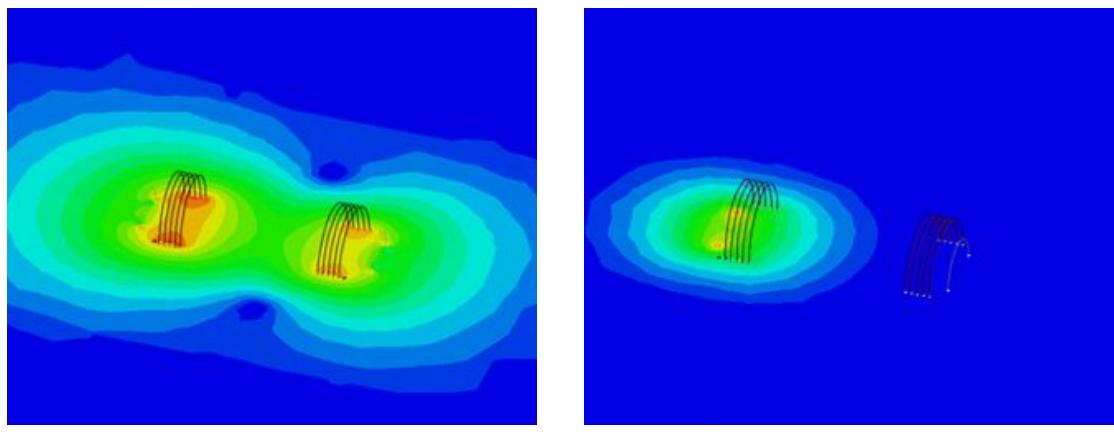


그림 3-2 HFSS를 이용한 무선전력전송 시스템 설계

Fig. 3-2 Design of WPT system using HFSS

S-parameter는 입력값에 대한 출력값에 비를 이용하여 그 값들이 측정된다. 1W의 전력을 인가하였을 때 얼마의 출력이 나오느냐를 비로 계산하게 된다. 그렇기 때문에 많은 값의 전력을 인가하지 않고 1W의 전력만 인가함으로써 S-parameter를 측정할 수 있다.

그림 3-3은 송·수신 코일의 E-field를 나타내고 있다. 자기공명이 이루어질 경우 그림 3-3(a)와 같이 수신부 코일에 전계가 발생하게 된다. 하지만 자기공명이 이루어지지 않을 경우에는 그림 3-3(b)와 같이 송신부에는 전계가 발생하지만 수신부 코일에는 전계가 발생하지 않는다.



(a) Magnetic resonance

(b) Non-resonance

그림 3-3 공명 상태 유무 확인

Fig. 3-3 Resonance condition check

b) 회로망 분석기

그림 3-4는 회로망 분석기(Network analyzer)이다. 회로망 분석기는 하나의 기계 안에 주파수 source와 spectrum analyzer가 들어 있어서, 입력과 출력의 주파수 신호 분포 결과를 S-parameter로 표현한다. 본 연구에서 구현한 무선전력전송 시스템을 network analyzer를 통해 S-parameter S_{11} 을 측정하였으며, 사용된 network analyzer의 사양은 표 3-2와 같다.



그림 3-4 회로망 분석기

Fig. 3-4 Network analyzer

표 3-2 Network analyzer 사양

Table 3-2 Specifications of network analyzer

Measurement of frequency range	30kHz ~ 6GHz
Measurement method of frequency	Frequency and power sweep
Available resistance	50 ~ 75Ω
Method of calibration	Electrical calibration(Ecal)
Maximum dB	110dB

c) 공진코일 설계

공진 주파수를 결정짓는 요소는 L 과 C 이다. C 의 경우 C 의 성분을 가지고 있는 capacitor를 사용한다. L 은 코일이 가지고 있기 때문에 코일의 권선 방법에 따라 그 값이 변하게 된다. 그렇기 때문에 무선전력전송 시스템의 공진 코일 설계는 공진 주파수 및 공진 현상을 결정짓는 중요한 요소가 된다.

코일의 권선 방법에는 크게 헬리컬 코일과 스파이럴 코일로 나눌 수 있다. 헬리컬 코일은 설계하는 간격에 따라 빔패턴의 방향을 축방향 혹은 정상 방향으로 만들 수 있으며, 만드는 방법에 따라 다양한 특성을 나타낼 수 있어 휴대단말기, 라디오, 위성용 등 RF전반에 걸쳐 광범위하게 응용되고 있는 안테나 권선 방법이다. 스파이럴 방법은 소형화가 가능하여 여러 장치에 적용가능하나 L 과 C 의 값을 수식적으로 얻기 어렵다. 본 연구에서는 RF에서 광범위하게 사용되고 있는 헬리컬 타입을 이용하여 공진 코일을 설계하였으며 그림 3-5는 헬리컬 코일의 구성을 보여주고 있다[3].

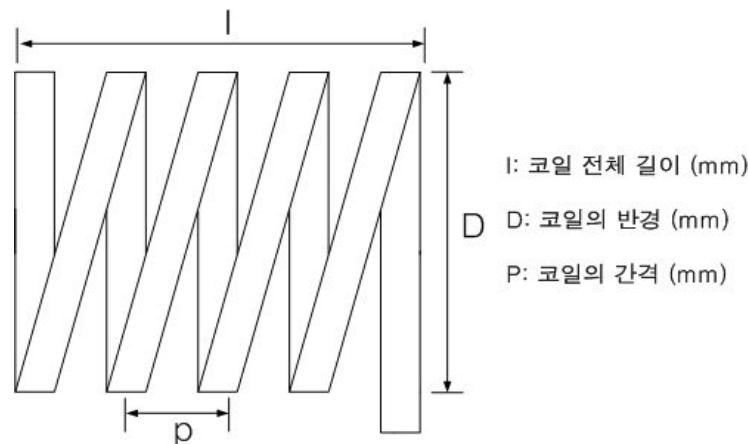


그림 3-5 헬리컬 코일의 구성

Fig. 3-5 Configuration of a helical coil

그림 3-5와 같은 요소들을 이용하여 헬리컬 타입의 안테나의 인덕턴스를 구하는 식은 식 (3.1)과 같다.

$$L(\mu H) = \frac{\mu_0 N^2 D^2}{l} \quad (3.1)$$

식 (3.1)에서 확인 가능 하듯이 헬리컬 코일의 전체 길이와 반경 그리고 코일의 권수비에 따라 인덕턴스 값이 변화하게 된다.

그림 3-6은 코일 인덕턴스 변화에 따른 공진 특성 변화 그래프를 나타낸다. 초전도 코일의 경우 제작된 초전도체를 사용하기 때문에 두께의 변화가 어렵다. 그렇기 때문에 길이와 반경에 변수를 주고 그에 따른 최대 공진 특성을 보고자 한다. 실험결과 인덕턴스가 $22\mu\text{H}$ 일 때 공진주파수 11MHz 에서 최대 공진 특성을 보였다. 그렇기 때문에 인덕턴스 $22\mu\text{H}$ 로 공진 코일을 제작하여 무선전력전송 시스템에 적용하였다. 표 3-3은 인덕턴스 변화에 따른 공진 주파수와 S_{11} 의 변화를 정리한 것이다.

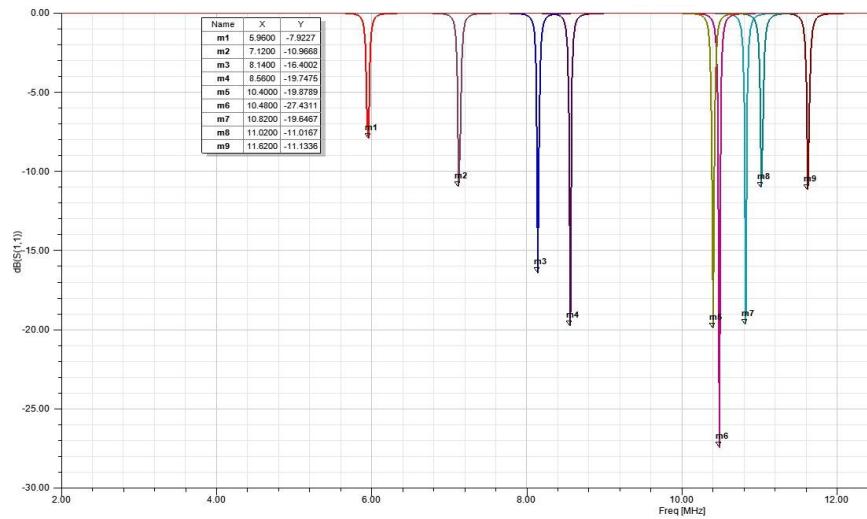


그림 3-6 코일 인덕턴스 변화에 따른 공진 특성 변화

Fig. 3-6 Alteration of resonance characteristics according to the inductance of a coil

표 3-3 인덕턴스 변화에 따른 S-parameter

Table 3-3 S-parameter according to inductance of a coil

Inductance (μH)	Resonance frequency (MHz)	S_{11} (dB)
17	5.96	-7.92
18	7.12	-10.96
19	8.14	-16.4
20	8.56	-19.74
21	10.4	-19.87
22	11	-27.43
23	10.82	-19.64
24	11.02	-11.01
25	11.62	-11.13

d) Source & Load 코일 설계

Source coil과 Load coil은 전력을 인가하고, 인가 받는 역할을 한다. Source coil과 Load coil은 Loop 형태의 코일로 제작한다. Loop coil은 그림 3-7과 같다. Loop 코일 또한 코일의 형태에 따라 인덕턴스가 존재하며 인덕턴스를 나타내는 식은 식(3.2)와 같다.

$$L = r\mu_0\mu_r \left(\ln \left[\frac{8r}{a} \right] - 2 \right) \quad (3.2)$$

r : 루프코일 반지름 a : 도선의 두께 ($2a$) μ_o : 투자율 μ_r : 비투자율

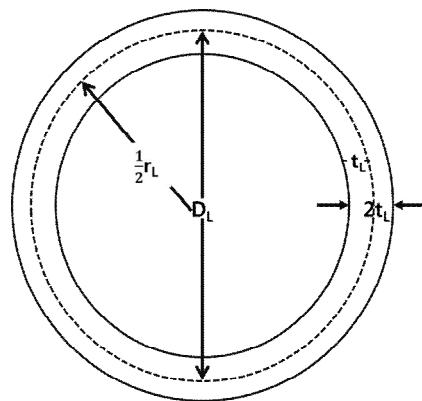


그림 3-7 Loop coil 구성

Fig. 3-7 Configuration of a loop coil

e) 초전도 코일 및 상전도 코일 제작

초전도 코일의 비교 실험을 위해 기존의 여러 연구에서 사용되고 있는 구리 재질을 선정하였다. 초전도 코일과 동일한 실험 조건 설계를 위해 동일한 크기와 모양으로 구리를 제작하였다. 본 연구에서는 MIT 연구팀에서 발표한 자기공명 무선 전력 전송 방식을 사용하였기 때문에 공진 코일 또한 MIT 연구팀에서 제안한 크기와 모양을 차용하였다[13]. MIT 연구팀에서 제안한 코일의 반경(D)과 길이 (l)는

각각 325.7mm와 260mm이다. 이때, 인덕턴스는 $22\mu\text{H}$ 로 설정하였으므로, 식 (3.1)을 이용하여 코일의 턴수(n)를 설정하였다. 그럼 3-8은 연구를 통해 제작한 초전도 공진 코일과 구리 공진 코일이다.

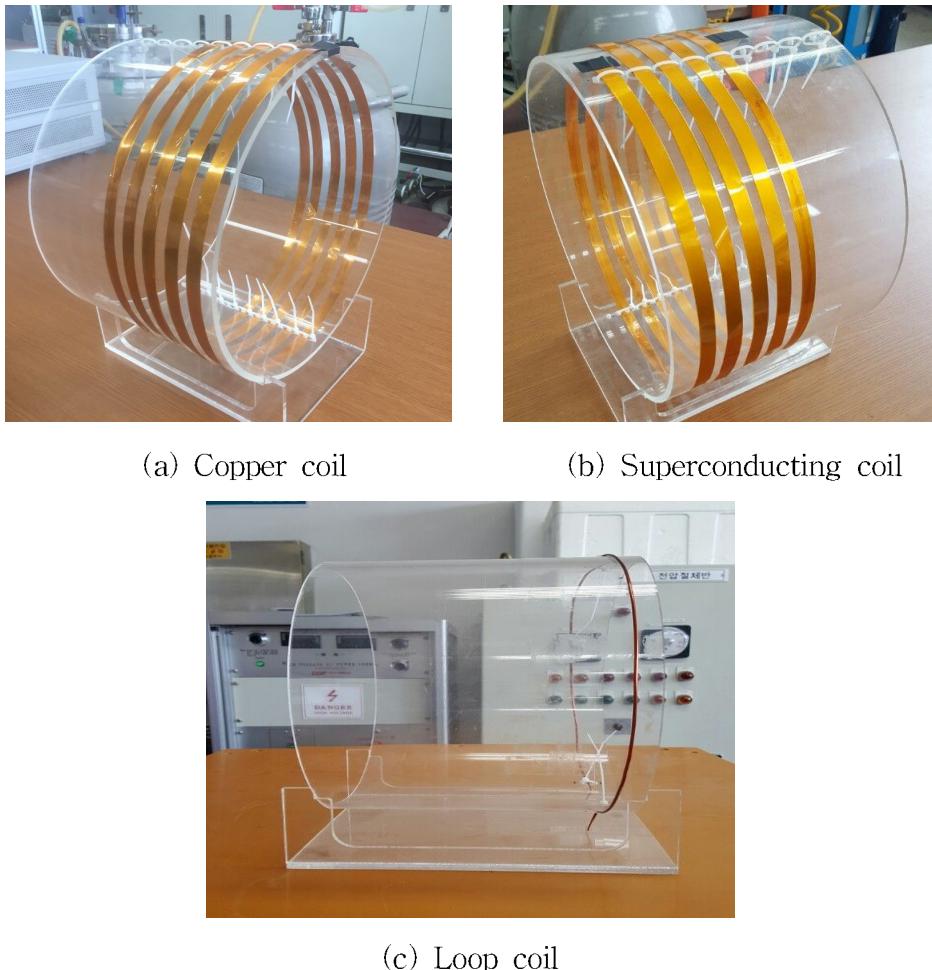


그림 3-8 공진 코일

Fig. 3-8 Resonance coil

제작된 코일의 반경과 길이 그리고 턴수는 각각 325.7mm, 260mm, 5turn으로 설정하였다. 공진 코일에 적용된 커패시턴스 값은 9.37pF이며, 식(2.17) 이용해 공진 주파수를 도출할 수 있었다. 저항과 인덕턴스, Q-factor 및 공진주파수는 표 3-4와 같다.

표 3-4 공진 코일의 R, L, Q-factor

Table 3-4 R, L, Q-factors of resonance coils

	Normal conductor coil	Normal conductor coil at liquid nitrogen	Superconducting coil
Resistance (Ω)	0.8	0.2	0.01
Inductance (μH)	22	22	22
Q-factor	1.9×10^4	7.6×10^4	15.3×10^5
Resonance frequency (MHz)	11.1	11.1	11.1

f) 실험 구성

그림 3-9는 실제 실험을 위해 무선전력전송 시스템을 구성한 그림이다. 시뮬레이션과 동일하게 source, resonance(Tx, Rx), load coil로 구성하였고, network analyzer를 통해 S-parameter를 측정하였다. 시뮬레이션과 동일하게 network analyzer를 통해 1W가 인가되며, 이때, 반사손실인 S_{11} 을 분석하고자 한다. 표 3-5는 실험 조건 표이다. 실생활 적용을 위해서는 초전도코일과 구리 코일간 결합이 불가피하다 그렇기 때문에 초전도 코일과 구리 코일의 공명 특성을 분석하고자 한다.

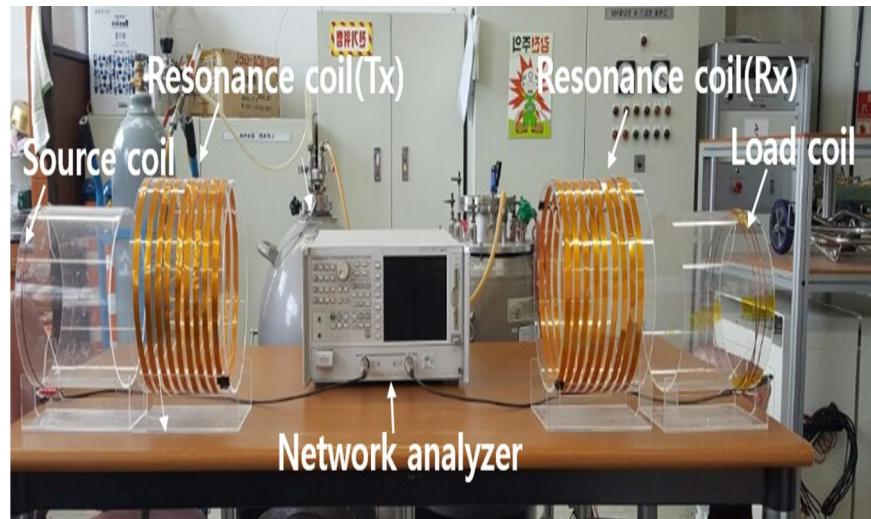


그림 3-9 실험 구성

Fig. 3-9 Configurations of experimental setup

표 3-5 실험 조건

Table 3-5 Conditions of experimental setup

	Source coil	Resonance coil (Tx)	Resonance coil (Rx)	Load coil
Materials of coils	Copper	Copper	Copper	Copper
	Superconductor	Superconductor	Copper	Copper
	Copper	Copper	Superconductor	Superconductor
	Superconductor	Superconductor	Superconductor	Superconductor

3. 냉각용기 제작

a) Simulation

초전도 무선전력전송 시스템은 임계온도 이하에서 그 특징이 발현되기 때문에 냉각용기 제작이 필수이다. 무선전력전송은 외함 매질의 종류 및 두께에 따라 전자기장과 전자기파를 반사 또는 흡수한다. 그렇기 때문에 매질 종류 및 두께에 따라 전송효율이 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 냉각용기 제작을 위해 초전도 소자의 냉각용기로 가장 많이 사용되는 Aluminum, Iron, Polystyrene, PVC Plastic을 시뮬레이션을 이용하여 무선전력전송 효율에 얼마나 영향을 끼치는지 분석하였다. 그림 3-10은 HFSS 시뮬레이션을 이용하여 냉각용기를 구성한 그림이다. 이때, 냉각용기의 재질 및 두께에 변수를 두고, 변수의 변화에 따른 S-parameter S_{11} 을 분석하였다.

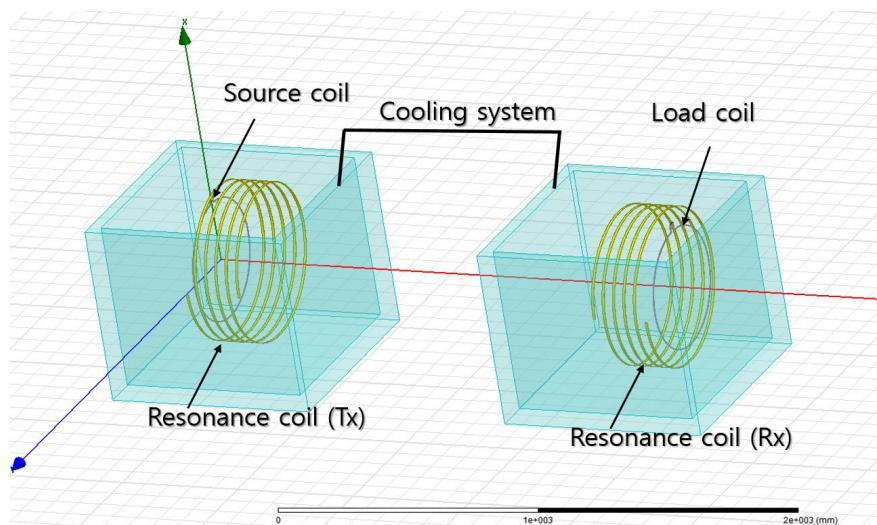
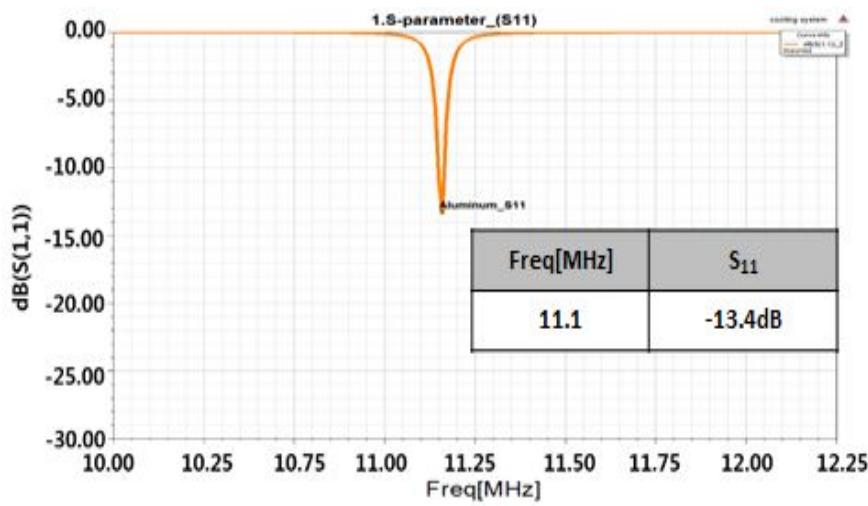


그림 3-10 시뮬레이션을 이용한 냉각용기 구성

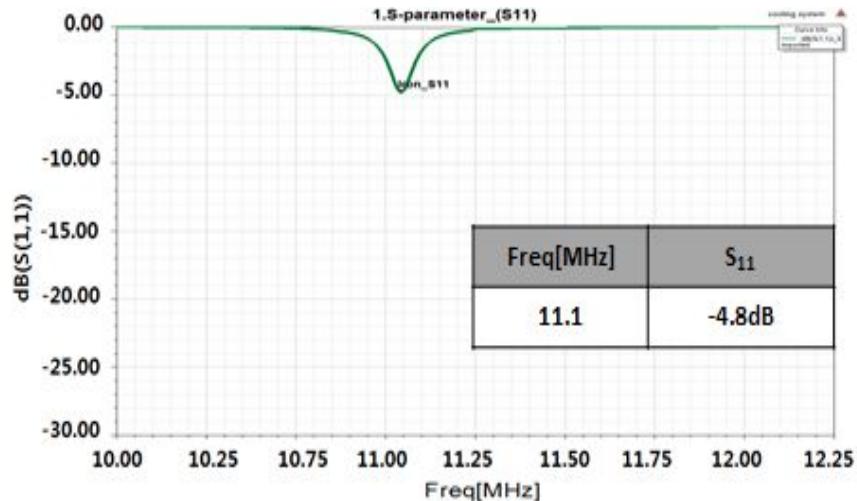
Fig. 3-10 Configurations of cooling system using simulation

b) 냉각용기 재질에 따른 S-parameter 분석

그림 3-11은 냉각용기 재질에 따른 S-parameter이다. 공진주파수는 11.1MHz이다. 그림 3-11 (a)는 냉각용기 재질에 Aluminum을 적용하였을 때 반사손실이다. 이때, 반사손실은 약 -13.4dB이다. 그림 3-11 (b)는 냉각용기 재질에 Iron을 적용하였다. 이때, 반사손실은 약 -4.8dB를 나타냈다. 그림 3-11 (c)는 Polystyrene을 냉각용기에 적용하였으며, 반사손실은 약 -17.8dB를 나타냈다. 그림 3-11 (d)는 냉각용기에 PVC plastic을 적용하였을 때 S-parameter이다. 이때, 반사손실은 약 -15.35dB인 것을 확인할 수 있었다. Aluminum과 Iron은 Polystyrene과 PVC Plastic에 비해 에너지를 원활하게 전달하지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 투자율에 따라 전자기파가 투과하는 정도가 다르기 때문이다. Aluminum과 Iron은 자성체적 성질을 띠고 있기 때문에 전자기파를 흡수하게 되고, Polystyrene과 PVC Plastic은 비자성체이기 때문에 전자기파를 비교적 많이 투과시키게 된다. 그렇기 때문에 재질에 따른 반사손실에 차이가 발생하게 된다.



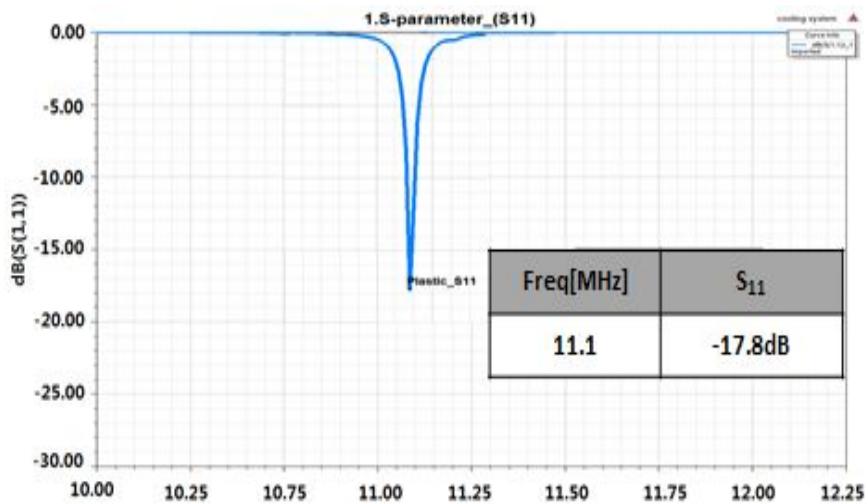
(a) Aluminum



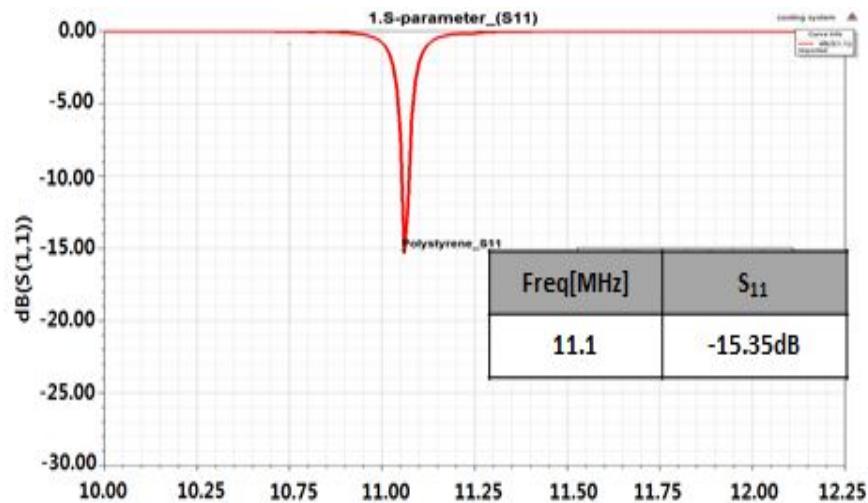
(b) Iron

그림 3-11 냉각용기 재질에 따른 S-Parameters

Fig. 3-11 S-parameters according to the material of the cooling system



(c) Polystyrene



(d) PVC Plastic

그림 3-11 냉각용기 재질에 따른 S-Parameters (계속)

Fig. 3-11 S-parameters according to the material of the cooling system
(continued from the previous page)

c) 냉각용기 제질에 따른 E-field 분석

그림 3-12는 냉각용기 제질 변화에 따른 E-field를 나타낸다. 송신 코일에서 전달된 전력에 의해 수신 코일에 얼마만큼의 전계가 발생하였는지 측정하기 위해 수신부 측에서 E-field를 측정하였다. 그림 3-12 (a)는 Aluminum을 냉각용기에 적용하였을 때 E-field이다. 이때, 수신부측의 전계 세기는 약 $4.08e^{-001}V/m$ 이다. 또 송신부에서 발생하는 전계가 냉각용기에 차단되는 모습을 확인할 수 있었다. 그림 3-12 (b)는 Iron을 적용하였을 때 E-field이다. 수신부측 E-field는 약 $3.785e^{-001}V/m$ 로 Aluminum보다 더 낮아졌다. 또한 Aluminum과 마찬가지로 냉각용기에 전계가 차단되는 모습을 확인할 수 있었다. 그림 3-12 (c)는 Polystyrene을 적용하였을 때 모습이다. 수신부측 전계의 세기는 약 $7.172e^{-001}V/m$ 로 Aluminum과 Iron보다 전계의 세기가 높으며, 냉각용기에 차단되지 않고 전계가 투과하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 3-12 (d)는 냉각용기에 PVC Plastic을 적용하였을 때 전계의 세기를 나타낸다. Polystyrene과 마찬가지로 송신부의 전계가 냉각용기를 투과하는 것을 확인할 수 있었으며, 이때, 수신부측 전계의 세기는 약 $5.426e^{-001}V/m$ 이다.

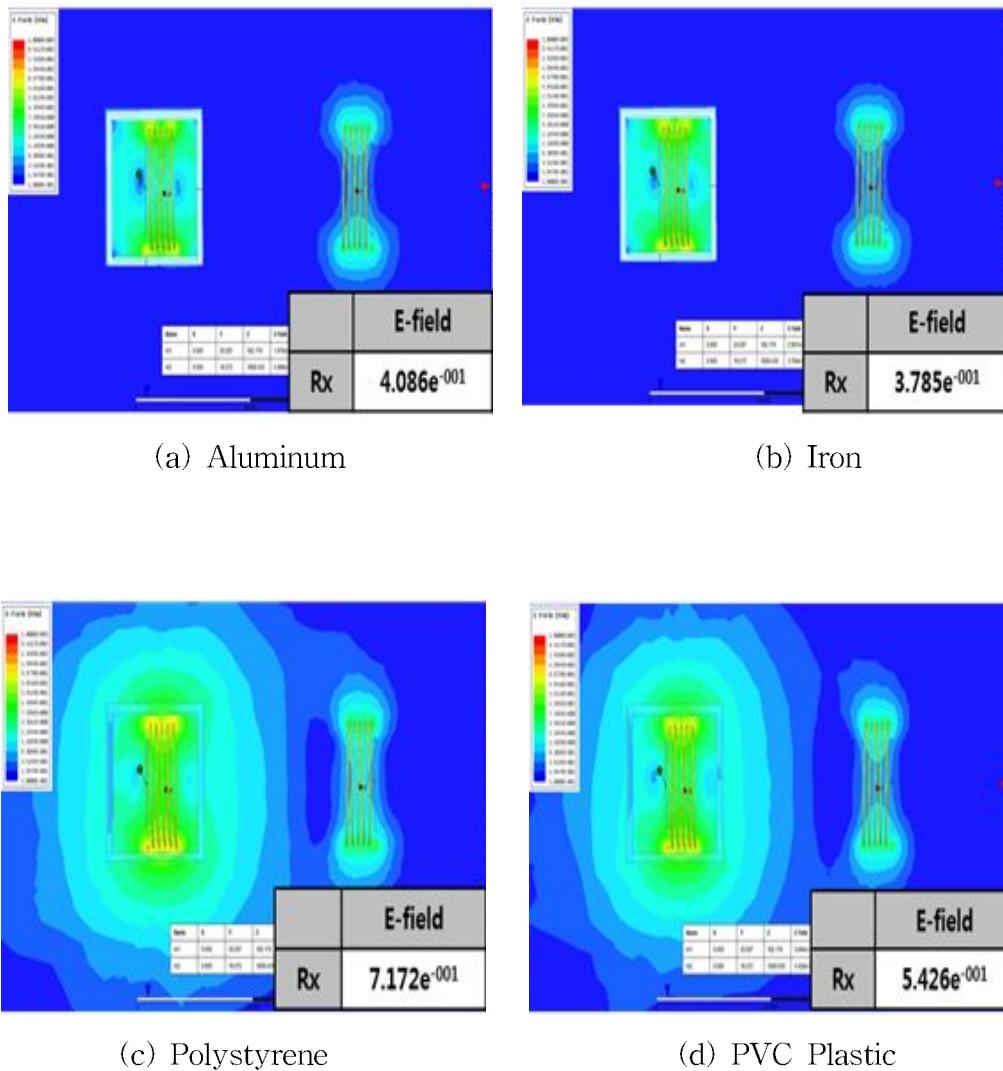


그림 3-12 냉각용기 재질에 따른 E-fields

Fig. 3-12 E-fields according to the material of the cooling system

d) 냉각용기 두께 변화에 따른 S-parameter 분석

투자율에 따라 송신부의 전계 투과량이 변화하게 된다. 하지만 냉각용기의 두께가 매우 두꺼워진다면 투자율과 상관없이 전계의 투과량은 극도로 낮아질 것이다. 그렇기 때문에 각 재질별 냉각용기 두께에 따른 투과계수가 어떻게 변화하는지 확인하였다. 두께의 변화는 1cm부터 0.5cm 변수를 주어 5cm까지 설정하였다. 1cm 이하의 두께에서는 액체질소의 낮은 온도에 의해 냉각용기가 파괴될 우려가 있다. 또한 5cm 이상의 두께의 냉각용기가 제작될 경우 실생활 적용에 불편함을 초래할 것으로 판단되어 5cm이하의 두께에서 실험을 진행하였다. 그림 3-13은 Aluminum 두께 변화에 따른 S-Parameter이다. 두께의 변화에 따라 큰 변화 없이 약 -12dB의 반사손실을 나타냈다. 표 3-6은 Aluminum 적용시 S-parameter의 변화를 정리한 것이다. 그림 3-14는 Iron을 적용하였을 때, 두께 변화에 따른 S-parameter이다. 두께의 변화에 따라 약 -4dB의 반사손실을 나타냈다. 표 3-6은 Iron 적용시 반사손실의 변화를 정리하였다. 그림 3-15는 Polystyrene 적용시, 냉각용기 두께 변화에 따른 S-parameter이다. 대체적으로 2-3.5cm구간에서 낮은 반사손실을 나타냈으며, 2.5cm의 두께에서 반사손실이 -22dB인 것을 확인할 수 있었다. 표 3-8은 Polystyrene 두께 변화에 따른 S_{11} 을 정리한 표이다. 그림 3-16은 PVC Plastic을 냉각용기에 적용하였을 때 두께 변화에 따른 S-parameter이다. 2cm 두께에서 가장 낮은 반사손실인 -26dB를 보였다. 표 3-9는 실험결과 값인 S_{11} 을 정리한 표이다. 본 논문에서는 반사손실이 가장 높게 나온 Polystyrene과 PVC Plastic을 이용하여 냉각용기를 제작하였다. Polystyrene의 경우 낮은 내구성 때문에 냉각용기로 사용하기에 무리가 있기 때문에 PVC Plastic을 이용하여 내구성 문제를 해결하였다.

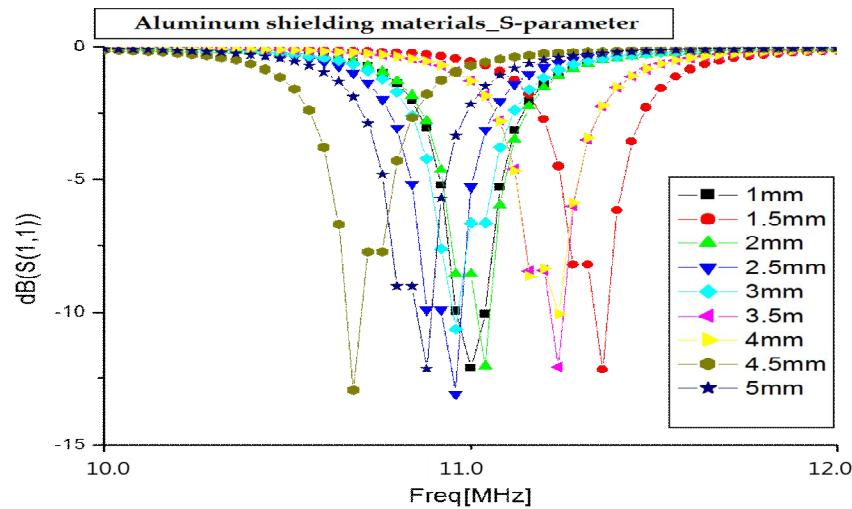


그림 3-13 Aluminum 적용시 냉각용기 두께 변화에 따른 S-parameters

Fig. 3-13 Aluminum applied S-parameters according to the thickness of the cooling system

표 3-6 Aluminum 적용시 냉각용기 두께에 따른 S₁₁

Table 3-6 Aluminum applied S₁₁ according to the thickness of the cooling system

Thickness (cm)	S ₁₁ (dB)
1	-12
1.5	-12
2	-12
2.5	-13
3	-10
3.5	-12
4	-10
4.5	-12
5	-12

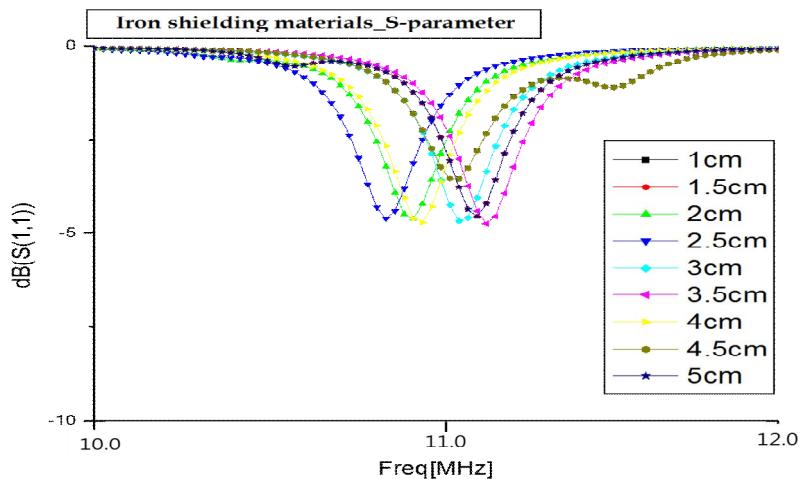


그림 3-14 Iron 적용시 냉각용기 두께 변화에 따른 S-parameters

Fig. 3-14 Iron applied S-parameters according to the thickness of the cooling system

표 3-7 Iron 적용시 두께에 따른 S_{11}

Table 3-7 Iron applied S_{11} according to the thickness of the cooling system

Thickness (cm)	S_{11} (dB)
1	-4
1.5	-3
2	-5
2.5	-5
3	-5
3.5	-4
4	-4
4.5	-3
5	-4

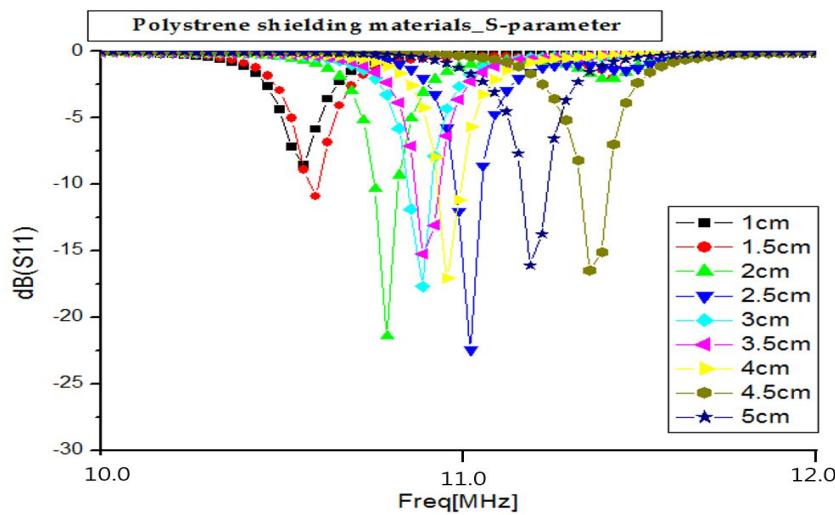


그림 3-15 Polystyrene 적용시 냉각용기 두께 변화에 따른 S-parameters

Fig. 3-15 Polystyrene applied S-parameters according to the thickness of the cooling system

표 3-8 Polystyrene 적용시 두께에 냉각용기 따른 S₁₁

Table 3-8 Polystyrene applied S₁₁ according to the thickness of the cooling system

Thickness (cm)	S ₁₁ (dB)
1	-8
1.5	-11
2	-21
2.5	-22
3	-17
3.5	-15
4	-12
4.5	-12
5	-12

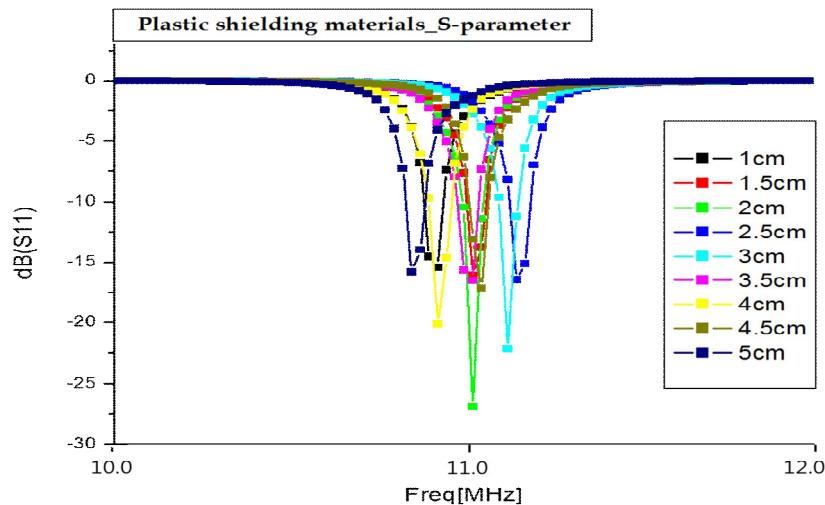


그림 3-16 PVC Plastic 적용시 냉각용기 두께 변화에 따른 S-parameters
Fig. 3-16 PVC Plastic applied S-parameters according to the thickness of the cooling system

표 3-9 PVC Plastic 적용시 두께에 냉각용기 따른 S_{11}

Table 3-9 PVC Plastic applied S_{11} according to the thickness of the cooling system

Thickness (cm)	S_{11} (dB)
1	-10
1.5	-11
2	-16
2.5	-14
3	-15
3.5	-12
4	-14
4.5	-11
5	-10

e) 거리 변화에 따른 S-parameter 분석

거리에 따라 송·수신부의 상호 인덕턴스에서 결합계수가 달라진다. 그렇기 때문에 거리에 따라 효율이 변화하게 된다. 본 연구에서는 재질별로 반사손실이 가장 낮은 두께의 냉각용기를 초전도 코일에 적용하였을 때 거리에 따른 반사손실 변화 실험을 하였다. 실험은 800mm에서 2000mm까지 100mm의 변수를 설정하였다. 거리는 송신부 공진 코일의 중간 지점과 수신부 공진 코일의 중간 지점을 기준으로 설정하였다. 또, 800mm 이하의 거리에서는 냉각용기로 인해 실험이 불가피해 800mm 이상의 거리에서부터 반사손실을 측정하였다. 그림 3-17은 Aluminum 냉각용기를 적용하였을 때 거리에 따른 S-parameter이다. 800mm에서는 약 -5dB의 낮은 반사손실을 나타냈지만 1000mm부터 2000mm까지는 약 -7dB로 일정한 반사손실이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 표 3-10은 거리에 따른 S-parameter 반사손실 값을 정리한 것이다. 그림 3-18은 Iron을 냉각용기에 적용하였을 때 거리에 따른 반사손실을 보여준다. 약 -4dB의 높은 반사손실을 보여주고 있다. 이는 Iron의 전자기를 차폐시켰기 때문이다. 표 3-11은 Iron 적용 시 거리 변화에 따른 S_{11} 을 정리하였다. 그림 3-19는 Polystyrene을 냉각용기에 적용시켰을 때 거리에 따른 반사손실을 나타낸다. 1500mm의 거리에서 약 -22.3dB의 낮은 반사손실을 확인할 수 있었다. Polystyrene을 적당한 두께와 일정한 거리에 설정하였을 경우 높은 효율을 보여줄 것으로 판단된다. 표 3-12는 Polystyrene 적용 시 거리 변화에 따른 반사손실을 정리하였다. 그림 3-20은 PVC plastic을 냉각용기에 적용하였을 때 거리 변화에 따른 S-parameter 그래프이다. 1400mm의 거리에서 약 -21.67 dB의 낮은 반사손실을 확인할 수 있었다. 표 3-13은 PVC plastic을 냉각용기에 적용하였을 때 거리 변화에 따른 반사손실이다.

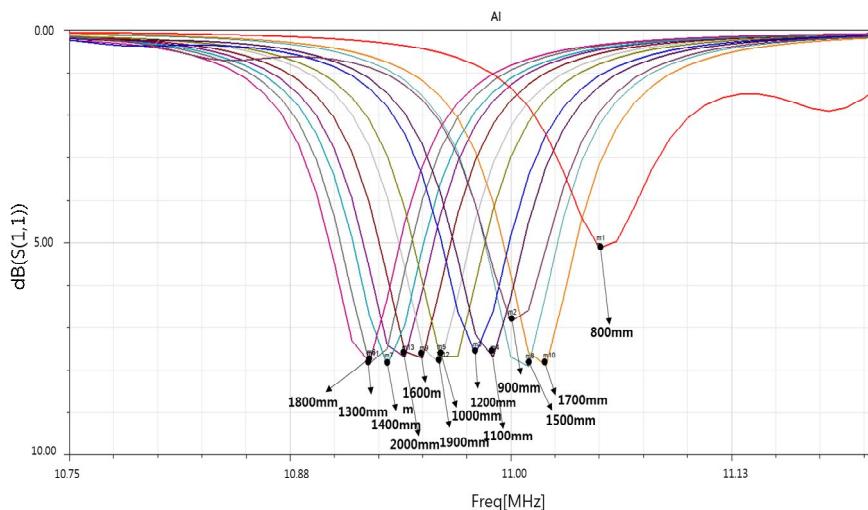


그림 3-17 Aluminum 적용시 거리에 따른 S-parameters

Fig. 3-17 Aluminum applied S-parameters according to the distance

표 3-10 Aluminum 적용시 거리 변화에 따른 S_{11}

Table 3-10 Aluminum applied S_{11} according to the distance

distance(mm)	$S_{11}(\text{dB})$	distance(mm)	$S_{11}(\text{dB})$
800	-5.12	1500	-7.91
900	-6.86	1600	-7.72
1000	-7.62	1700	-7.89
1100	-7.69	1800	-7.84
1200	-7.68	1900	-7.86
1300	-7.81	2000	-7.71
1400	-7.88		

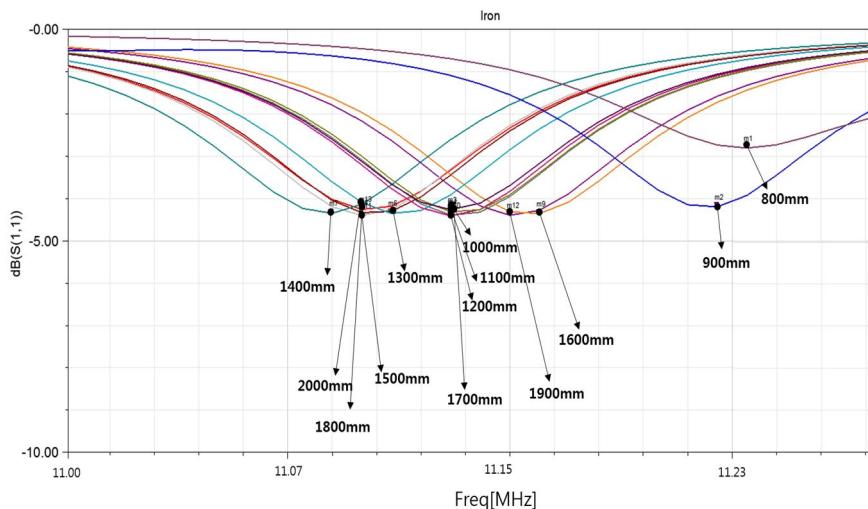


그림 3-18 Iron 적용 시 거리에 따른 S-parameters

Fig. 3-18 Iron applied S-parameters according to the distance

표 3-11 Iron 적용 시 거리 변화에 따른 S_{11}

Table 3-11 Iron applied S_{11} according to the distance

distance(mm)	$S_{11}(\text{dB})$	distance(mm)	$S_{11}(\text{dB})$
800	-2.81	1500	-4.33
900	-4.20	1600	-4.36
1000	-4.26	1700	-4.39
1100	-4.31	1800	-4.40
1200	-4.41	1900	-4.40
1300	-4.35	2000	-4.26
1400	-4.35		

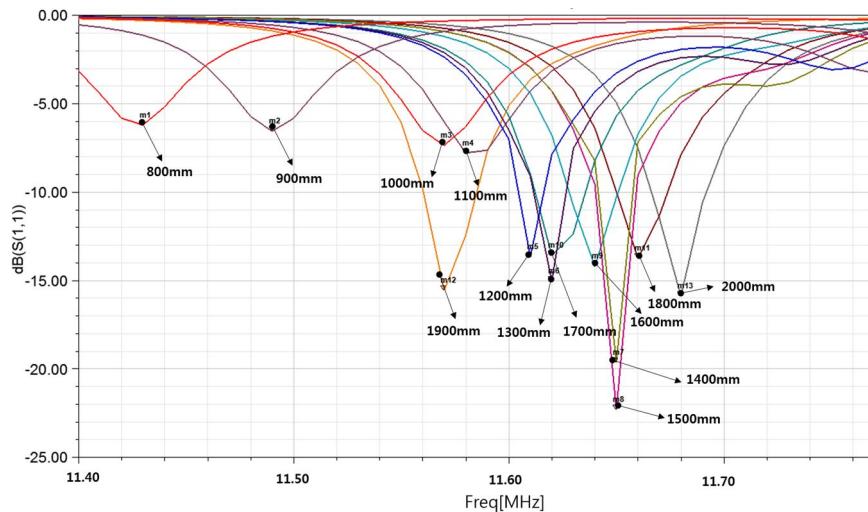


그림 3-19 Polystyrene 적용시 거리에 따른 S-parameters

Fig. 3-19 Polystyrene applied S-parameters according to the distance

표 3-12 Polystyrene 적용시 거리 변화에 따른 S_{11}

Table 3-12 Polystyrene applied S_{11} according to the distance

distance(mm)	S_{11} (dB)	distance(mm)	S_{11} (dB)
800	-6.22	1500	-22.30
900	-6.57	1600	-14.19
1000	-7.37	1700	-13.59
1100	-7.79	1800	-15.74
1200	-13.66	1900	-15.56
1300	-15.03	2000	-15.88
1400	-19.64		

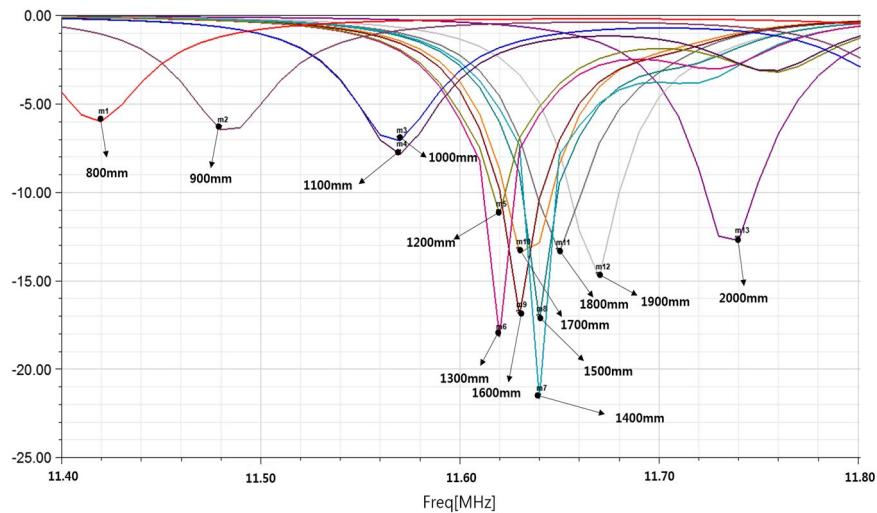


그림 3-20 PVC plastic 적용시 거리에 따른 S-parameters

Fig. 3-20 PVC plastic applied S-parameters according to the distance

표 3-13 PVC plastic 적용시 거리 변화에 따른 S₁₁

Table 3-13 PVC plastic applied S₁₁ according to the distance

distance(mm)	S ₁₁ (dB)	distance(mm)	S ₁₁ (dB)
800	-6.01	1500	-17.17
900	-6.47	1600	-16.95
1000	-7.09	1700	-13.40
1100	-7.86	1800	-13.41
1200	-11.24	1900	-14.79
1300	-18.17	2000	-12.72
1400	-21.67		

f) 냉각용기 제작

그림 3-21은 시뮬레이션 데이터를 바탕으로 제작한 냉각용기이다. 제작된 코일보다 냉각용기가 커야 하므로, 코일의 직경과 길이 325.7mm와 260mm를 고려하여 가로, 세로, 높이를 각각 300x300x400mm로 제작하였다. 3cm 두께의 Polystyrene을 내장으로 하고 외장에는 PVC plastic을 이용하여 제작하였으며, 냉각을 위해 사용되는 냉매는 액체질소를 이용하였다. 또한, 코일이 냉각용기와 직접적으로 맞닿지 않고, 액체질소 안에서도 안정적으로 고정될 수 있도록 냉각용기 안에 고정 장치를 설치하였다. 2개의 냉각용기를 제작하여 각각 송신부 코일과 수신부 코일에 적용하였으며, 액체 질소 주입 후에도 냉각용기와 코일이 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.



그림 3-21 제작된 냉각용기

Fig. 3-21 Manufactured cooling system

IV. 무선전력전송 시스템의 수치해석

A. 무선전력전송 시스템 회로분석

그림 4-1은 본 실험에서 사용되는 자기공명 무선전력전송의 등가회로이다. 소스 코일과 공진코일, 로드코일로 구성되어 있으며, 각각 코일이 가지고 있는 인덕턴스(L)과 커페시턴스(C)값을 나타내고 있으며, 코일간의 상호인덕턴스는 M_s , M_{12} , M_L 로 나타냈다. 이때, 이 회로의 구성요소를 임피던스(Z) 계산식으로 나타내면 다음 식과 같다[24].

$$V_s = I_1(Z_s + R_s + jwL_s) - I_2 \cdot jwM_s \quad (4.1)$$

$$0 = I_2(R_1 + j(wL_1 - \frac{1}{wC_1})) - I_1 \cdot jwM_s - I_3 \cdot jwM_{12} \quad (4.2)$$

$$0 = I_3(R_2 + j(wL_2 - \frac{1}{wC_2})) - I_2 \cdot jwM_{12} - I_4 \cdot jwM_L \quad (4.3)$$

$$0 = I_4(Z_L + R_L + jwL_L) - I_3 \cdot jwM_L \quad (4.4)$$

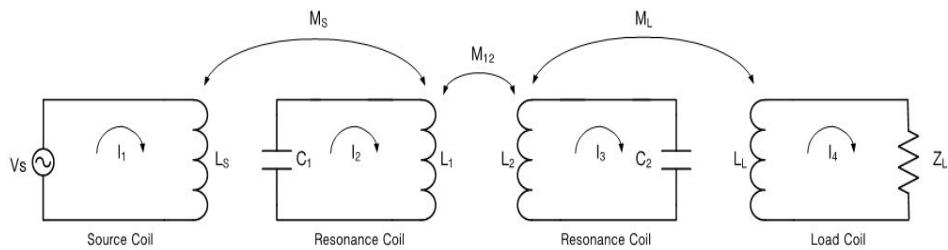


그림 4-1 무선전력전송 등가회로

Fig. 4-1 Equivalent circuit of WPT

Z_S 는 소스임피던스이며, Z_L 은 부하임피던스이다. 식 (4.1)~(4.4)를 간단하게 정리하면 다음과 같다[24].

$$V_s = I_1 Z_1 - I_2 + j\omega M_S \quad (4.5)$$

$$0 = I_2 Z_2 - I_1 + j\omega M_S - I_3 + j\omega M_{12} \quad (4.6)$$

$$0 = I_3 Z_3 - I_2 + j\omega M_{12} - I_4 + j\omega M_L \quad (4.7)$$

$$0 = I_4 Z_4 - I_3 + j\omega M_L \quad (4.8)$$

식 (4.5)~(4.8)를 Crammer's rule을 이용하면 행렬로 표현할 수 있는데, 다음과 같다[24].

$$\begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M_S & 0 & 0 \\ -j\omega M_S & Z_2 & -j\omega M_{12} & 0 \\ 0 & -j\omega M_{12} & Z_3 & -j\omega M_L \\ 0 & 0 & -j\omega M_L & Z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$|A_S| = \begin{vmatrix} V_s - j\omega M_S & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & -j\omega M_{12} \\ 0 & -j\omega M_{12} & Z_3 & -j\omega M_L \\ 0 & 0 & -j\omega M_L & Z_4 \end{vmatrix} \quad (4.10)$$

$$|A_L| = \begin{vmatrix} Z_1 & -j\omega M_S & 0 & V_s \\ -j\omega M_S & Z_2 & -j\omega M_{12} & 0 \\ 0 & -j\omega M_{12} & Z_3 & -j\omega M_L \\ 0 & 0 & -j\omega M_L & 0 \end{vmatrix} \quad (4.11)$$

식 (4.9)를 통해 A_S 와 A_L 을 구할 수 있고, 이 행렬을 간단하게 정리하면 다음

식과 같다[24].

$$|A| = Z_1 Z_2 Z_3 Z_4 - w^4 M_s^2 M_L^2 \quad (4.12)$$

$$|A_s| = V_s Z_2 Z_3 Z_4 \quad (4.13)$$

$$|A_L| = jw^3 M_S M_{12} M_L V_s \quad (4.14)$$

이) 식들을 통해 회로에 흐르는 전류를 다음과 같이 구할 수 있다[24].

$$I_S = \frac{|A_s|}{|A|} \quad (4.15)$$

$$I_L = \frac{|A_L|}{|A|} \quad (4.16)$$

입력전압 V_S 와 소스임피던스 Z_S 를 결정하면 식 4.17과 같이 Z_{in} 을 구할 수 있다 [24].

$$Z_{in} = \frac{V_S - I_S Z_s}{I_S} \quad (4.17)$$

회로해석을 통해 구한 Z_{in} 을 통해 S-parameter의 S_{11} 을 수치해석 할 수 있으며 식 (4.18)과 같다[24].

$$T = \left| \frac{Z_{in} - Z_S}{Z_{in} + Z_S} \right| \quad (4.18)$$

B. 초전도 코일을 적용한 무선전력전송 시스템

1. 루프코일의 인덕턴스

초전도 코일을 적용한 무선전력전송 시스템의 S_{11} 을 구하기 위해서는 먼저 소스 코일의 인덕턴스를 계산하여야 한다. 소스코일은 루프코일로 구성되어 있기 때문에 식 (3.2)를 이용하여 계산할 수 있으며, 계산된 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L &= 0.253 \times 1.256637061 \times 10^{-6} \times 0.999991 \times \left(\ln \left[\frac{8 \times 253}{5} \right] - 2 \right) \\ &= 1.272784022 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (4.19)$$

루프 코일의 측정저항(R)은 0.4Ω 이며 루프코일에 입력되는 입력저항 값은 50Ω 이다. 식 (4.20)을 통해, 인덕턴스 값과 저항 값을 이용하여 루프코일의 임피던스를 구하면 $Z_1 = 50.4 + j88.7682303\Omega$ 된다. 이때, 주파수의 값은 11.1MHz 이다.

$$Z_1 = Z_s + R + j\omega L = Z_s + R + j2\pi f L \quad (4.20)$$

이를 이용하여 Z_1 과 그 크기를 구하게 되면 식 (4.21)과 같다.

$$|Z_1| = \sqrt{50.4^2 + 88.7682303^2} = 102.078199\Omega \quad (4.21)$$

2. 루프코일과 초전도 공진 코일의 상호 인덕턴스

루프코일과 초전도 공진 코일의 상호 인덕턴스를 구하는 식은 식 (4.22)과 같다 [24].

$$M = 0.002\pi^2 a\alpha\rho NQ_0 \quad (4.22)$$

식 (4.20)에서 a 는 루프 코일의 반지름이며, N 는 코일의 턴수이다. 루프코일의 반지름과 코일의 턴수는 각각 253mm와 5턴이다. α 와 ρ 는 각각 식 (4.23)와 (4.24)으로 나타낼 수 있다[24].

$$\alpha = \frac{a}{A} \quad (4.23)$$

$$\rho^2 = \frac{A^2}{A^2 + x} \quad (4.24)$$

a 는 루프코일의 반지름이고, A 는 공진 코일의 반지름이며, x 는 공진코일의 높이를 나타낸다. a , A , x 파라미터는 각각 253mm, 325.7mm, 260mm이다. 식 (4.23)와 (4.24)에 각각의 파라미터 값을 대입하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{253}{325.7} = 0.7767 \quad (4.25)$$

$$\rho^2 = \frac{325.7^2}{325.7^2 + 260} = 0.9975, \quad \rho = 0.99874921 \quad (4.26)$$

파라미터 값을 대입하여 구한 값을 표 4-1를 이용하여 Q_0 값을 도출해낼 수 있다

[24]. 식 (4.22)를 이용하여 루프코일과 공진 코일의 상호 인덕턴스 값을 구하면 다음과 같다. 이때, 초전도 공진코일의 저항(Z_2)은 0.01Ω 이다.

$$M_S = 0.002\pi^2 \times 253 \times 0.7767 \times 0.99874921 \times 5 \times 1.4978 \times 10^{-9} = 14.506nH \quad (4.27)$$

표 4-1 Q_0 Table
Table 4-1 Table of Q_0

$\rho^2 \backslash \alpha$	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
0	1	1	1	1	1	1
0.05	1.0002	1.0002	1.0003	1.0004	1.0005	1.0005
0.10	1.0009	1.0011	1.0013	1.0016	1.0018	1.0020
0.15	1.0020	1.0024	1.0029	1.0034	1.0040	1.0046
0.20	1.0036	1.0044	1.0052	1.0061	1.0070	1.0080
0.25	1.0057	1.0068	1.0081	1.0094	1.0108	1.0124
0.30	1.0082	1.0098	1.0116	1.0136	1.0156	1.0178
0.35	1.0111	1.0134	1.0158	1.0185	1.0213	1.0242
0.40	1.0146	1.0176	1.0208	1.0242	1.0279	1.0317
0.45	1.0186	1.0224	1.0264	1.0308	1.0355	1.0404
0.50	1.0231	1.0278	1.0330	1.0384	1.0444	1.0506
0.55	1.0282	1.0340	1.0404	1.0471	1.0544	1.0622
0.60	1.0338	1.0410	1.0487	1.0570	1.0660	1.0756
0.65	1.0402	1.0488	1.0582	1.0683	1.0792	1.0910
0.70	1.0479	1.0575	1.0688	1.0812	1.0945	1.1089
0.75	1.0552	1.0674	1.0810	1.0960	1.1124	1.1301
0.80	1.0640	1.0785	1.0947	1.1126	1.1324	1.1545
0.85	1.0739	1.0911	1.1106	1.1324	1.1568	1.1843
0.90	1.0850	1.1054	1.1289	1.1558	1.1866	1.2220
0.95	1.0976	1.1216	1.1502	1.1842	1.2245	-
1.00	1.1117	1.1403	1.1752	1.2157	1.2733	1.3630

표 4-1 Q_0 Table (계속)Table 4-1 Table of Q_0 (continued from the previous page)

ρ^2	α	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0	1	1	1	1	1	1
0.05		1.0006	1.0007	1.0008	1.0008	1.0009
0.10		1.0023	1.0026	1.0029	1.0032	1.0035
0.15		1.0051	1.0057	1.0063	1.0070	1.0077
0.20		1.0090	1.0101	1.0112	1.0123	1.0135
0.25		1.0140	1.0156	1.0172	1.0190	1.0208
0.30		1.0200	1.0224	1.0248	1.0273	1.0299
0.35		1.0272	1.0304	1.0337	1.0372	1.0406
0.40		1.0358	1.0400	1.0443	1.0488	1.0534
0.45		1.0456	1.0510	1.0566	1.0623	1.0683
0.50		1.0571	1.0640	1.0710	1.0784	1.0858
0.55		1.0704	1.0790	1.0878	1.0970	1.1064
0.60		1.0857	1.0964	1.1076	1.1189	1.1305
0.65		1.1036	1.1168	1.1304	1.1446	1.1593
0.70		1.1242	1.1405	1.1579	1.1754	1.1941
0.75		1.1491	1.1693	1.1908	1.2134	1.2372
0.80		1.1786	1.2044	1.2320	1.2612	1.2922
0.85		1.2150	1.2490	1.2864	-	-
0.90		1.2623	1.3080	1.3589	1.4150	1.4763
1.00		1.4978	-	1.7430	-	∞

3. 상호 인덕턴스를 이용한 S_{11} 의 수치해석

루프코일과 공진코일의 상호인덕턴스와 루프코일의 인덕턴스 그리고 각각의 임피던스 값을 식 (4.15)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{V_s Z_2 Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 Z_3 Z_4 - w^4 M_s^2 M_L^2} \\ &= \frac{0.01^2 \times 102.078199}{(0.01^2 \times 102.078199^2) - (2\pi \times 11.1 \times 10^6 \times 14.506 \times 10^{-9})^4} = -1.816328837 A \end{aligned} \quad (4.28)$$

소스코일과 로드코일, 송신부 공진코일과 수신부 공진코일은 각각 동일한 모양으로 제작되었다. 그렇기 때문에 Z_1 과 Z_4 , Z_2 와 Z_3 그리고 M_S 와 M_L 은 동일한 크기를 가진다. 또한, 공진시 허수부인 리액턴스 성분은 제거된다. 입력 전압 V_s 는 network analyzer를 통해 입력되는 전압 1V이다. I_s 값을 이용하여 식 (4.17)에 대입하면 Z_{in} 값을 도출할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{V_s - I_s Z_s}{I_s} = \frac{1 - (-1.816328837 \times 50)}{-1.816328837} = -50.5505611 \quad (4.29)$$

도출한 Z_{in} 값을 이용하여 반사계수 값을 도출하면 다음과 같다.

$$\Gamma = \left| \frac{Z_{in} - Z_S}{Z_{in} + Z_S} \right| = \frac{-50.5505611 - 50}{-50.5505611 + 50} = 182.6328833 \quad (4.30)$$

반사계수를 식 (2.12)에 대입하여 S-parameter의 반사손실 값을 구하면 다음과 같다.

$$R_L(S_{11}) = -10\log(182.63) = -22.62 dB \quad (4.31)$$

C. 구리 코일을 적용한 무선전력전송 시스템

구리코일 역시 초전도 코일과 동일하게 루프코일의 인덕턴스와 상호인덕턴스를 이용하여 회로해석할 수 있다. 구리 코일의 루프코일은 초전도 코일 시스템과 동일하기 때문에 식 (4.19)와 동일한 인덕턴스 값을 갖는다. 이를 통해 계산된 Z_1 과 Z_4 의 크기 또한 동일하다.

루프코일과 구리 공진 코일의 상호 인덕턴스를 구하는 식 역시 (4.22)와 동일하다. 식 (4.22)에서 a 는 253mm이고, A 와 x 는 각각 325.7mm, 260mm이다. 이를 이용하여 α 와 ρ^2 값을 구하면 각각 0.7767과 0.9975 값이 나온다. 이 두 파라미터 값을 대입하여 표 4-1를 통해 Q_0 값을 도출해낼 수 있다. Q_0 의 파라미터 값은 1.4978×10^{-9} 이며, 이를 식 (4.22)에 대입하면 상호인덕턴스 값 14.506 nH를 도출할 수 있다. 이때, 구리 공진코일의 저항(Z_2)은 0.8Ω이다.

위 식을 통해 구해진 각각의 파라미터를 식 (4.15)에 대입하면 전류(I_S) 값을 도출할 수 있으며, 도출된 I_S 값은 -0.0401187 A이다. 이 값을 이용하여 식 (4.17)에 대입하면 Z_{in} 값을 도출할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{V_S - I_S Z_s}{I_S} = \frac{1 - (-0.0401187 \times 50)}{-0.0401187} = -74.926032 \quad (4.32)$$

Z_{in} 값과 Z_S 값을 식 (4.18)에 대입하면 다음과 같다.

$$\Gamma = \left| \frac{Z_{in} - Z_S}{Z_{in} + Z_S} \right| = \frac{-74.926032 - 50}{-74.926032 + 50} = 5.01187 \quad (4.33)$$

반사계수를 식 (2.12)에 대입하여 S-parameter의 반사손실 값을 구하면 식 (4.34)와 같다.

$$R_L(S_{11}) = -10\log(5.01187) = -6.999997 \text{ dB} \quad (4.34)$$

수치해석을 통해 초전도 코일과 구리 코일의 S_{11} 값을 도출하였다. 초전도 코일의 경우 구리코일에 비해 낮은 저항값을 가지기 때문에 수치 해석 또한 높은 반사계수를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 높은 반사계수는 높은 송신 효율을 보여주기 때문에 무선전력전송 시스템의 효율 향상이 가능하다. 시뮬레이션과 실제 실험을 통해 동일한 값의 S_{11} 이 나오는지 확인하고자 한다.

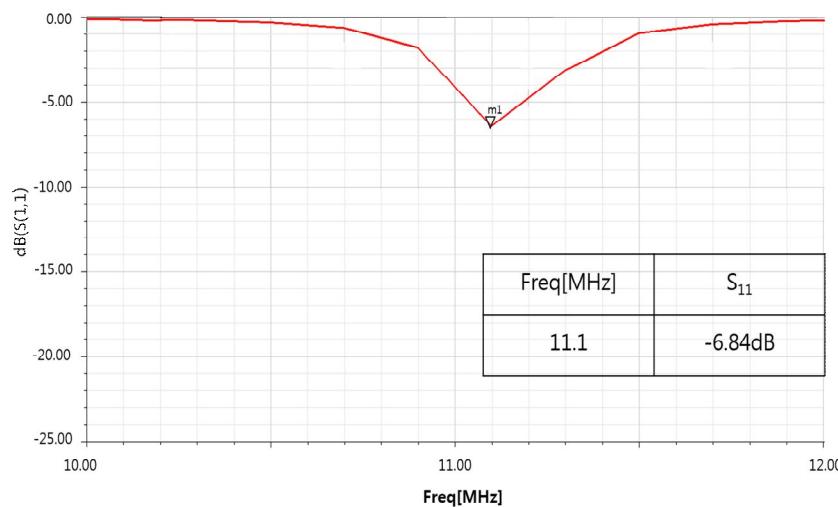
V. 실험 및 고찰

A. 무선전력전송 실험

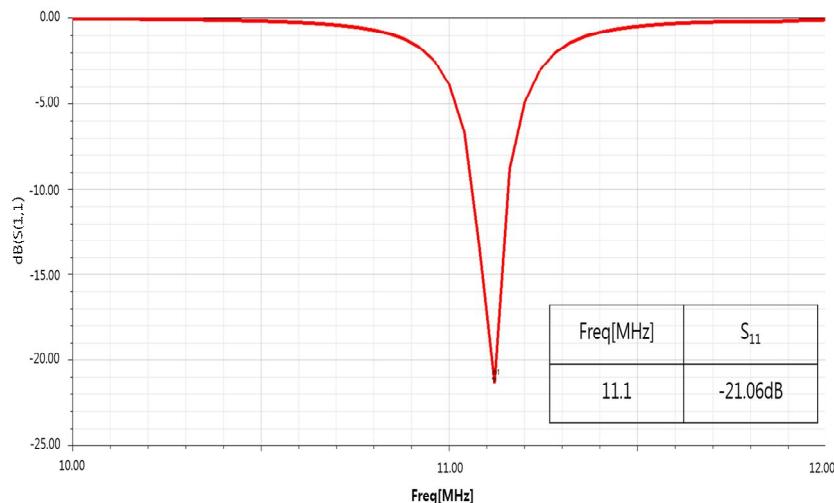
1. 시뮬레이션

그림 5-1은 HFSS를 이용하여 자기공명 무선전력전송 시스템의 S-parameter의 S_{11} 을 나타낸 그래프이다. 그림 5-1 (a)는 코일에 구리를 적용하였을 때 S-parameter S_{11} 그래프이다. 11.1MHz에서 약 -6.84dB의 반사손실을 나타냈다. 회로해석을 통해 구해낸 반사손실 값 -6.99dB와 크게 다르지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이때, 식 (2.21)를 통해 반사계수를 구하게 되면 약 0.455의 반사계수를 구할 수 있다. 또 식 (2.22)을 이용하여 VSWR로 변환시키면 약 2.67이 된다. VSWR의 환산 송신 효율은 약 80%이다.

그림 5-1 (b)는 초전도 코일의 반사손실을 나타낸다. 반사손실은 약 -21.06dB를 나타냈다. 구리 코일에 비해 반사손실이 많이 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 식 (2.21)를 통해 구한 반사계수는 약 0.089이다. 입력신호 1을 보냈을 때, 반사되어 나오는 신호는 약 0.089인 것을 확인할 수 있었다. 이를 송신효율로 환산해보면 약 99.3%로 구리 코일보다 약 19% 향상하였다. 이는 초전도 코일의 저항값이 매우 작기 때문에 송신 코일의 Q-factor 및 송신 효율이 구리코일에 비해 증가하기 때문이다. 그림 5-1 (c)는 구리코일을 액체질소에 보관하였을 때 S-parameter를 측정하였다. 구리 코일은 임계온도 이하에서 영저항이 되진 않지만 저항이 일정부분 감소하기 때문에 공기 중의 구리 코일 보다 Q-factor가 상승한다. 그렇기 때문에 반사손실 또한 공기 중의 구리 코일 보다 약 -14.12dB로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.



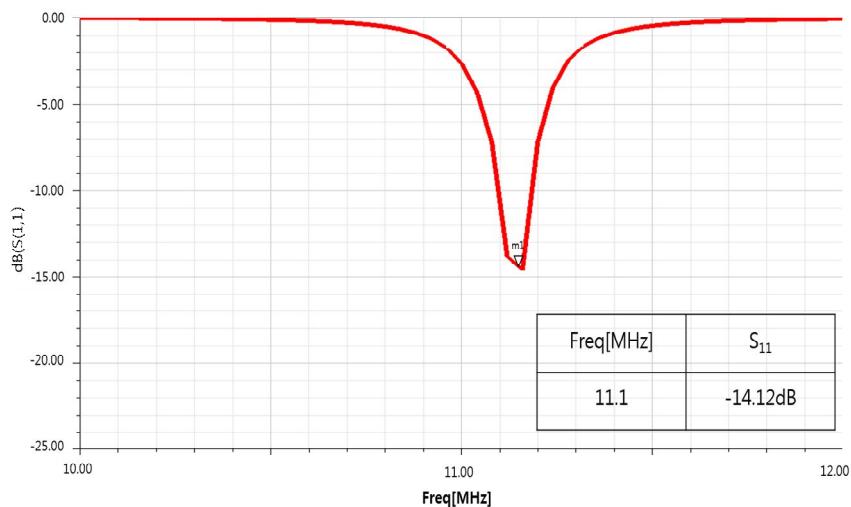
(a) Copper coil



(b) Superconducting coil

그림 5-1 시뮬레이션을 이용한 무선전력전송 S-parameters

Fig. 5-1 WPT S-parameters using simulation



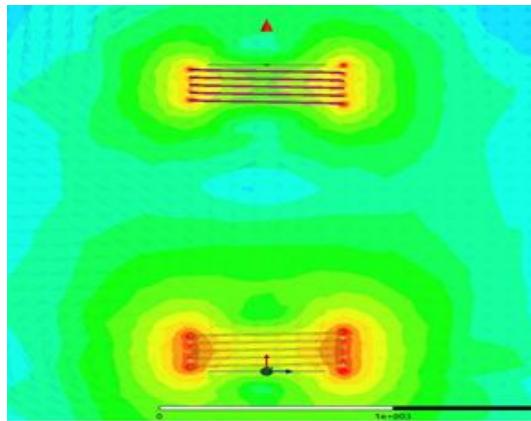
(c) Copper coil at liquid nitrogen

그림 5-1 시뮬레이션을 이용한 무선전력전송 S-parameters

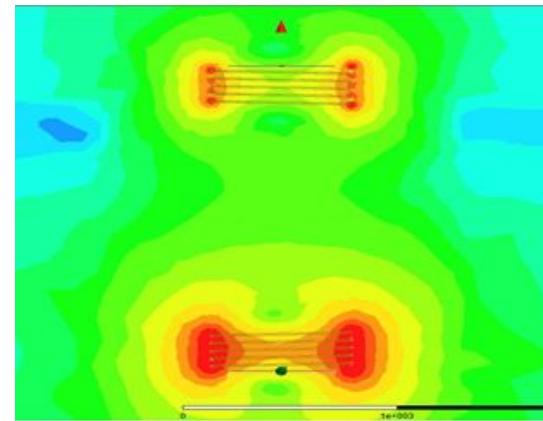
Fig. 5-1 WPT S-parameters using simulation

(continued from the previous page)

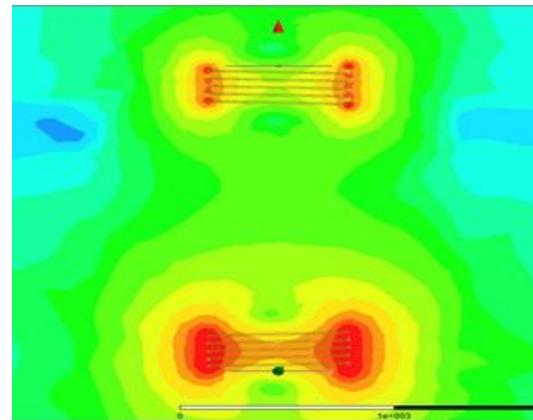
그림 5-2는 구리 코일과 초전도 코일의 E-field를 나타내는 그림이다. 그림 5-2 (a)는 코일에 구리를 적용하였을 때 E-field이다. 송신 코일의 전계세기는 약 8.577E V/m을 나타내고 수신 코일의 전계 세기는 약 2.5119E V/m인 것을 확인할 수 있었다. 그림 5-2 (b)는 초전도 코일을 적용하였을 때 E-field이다. 송신 코일의 전계 세기는 약 2.9286E² V/m을 이고, 수신 코일의 전계 세기는 약 7.7623E V/m이다. 그림 5-2 (c)는 구리 코일을 액체질소에 보관하였을 때 E-field이다. 송·수신 코일의 전계 세기는 각각 1.5849E² V/m과 4.6416E V/m인 것을 확인할 수 있었다. E-field를 통해 알 수 있듯이 초전도 코일을 적용하였을 때 송신 코일의 전계 세기가 강한 것을 확인할 수 있었다. 초전도 코일은 강한 전계를 발생하기 때문에 수신 코일에 발생되는 전계 또한 구리 코일에 비해 강한 것을 확인할 수 있었다.



(a) Copper coil



(b) Superconducting coil



(c) Copper coil at liquid nitrogen

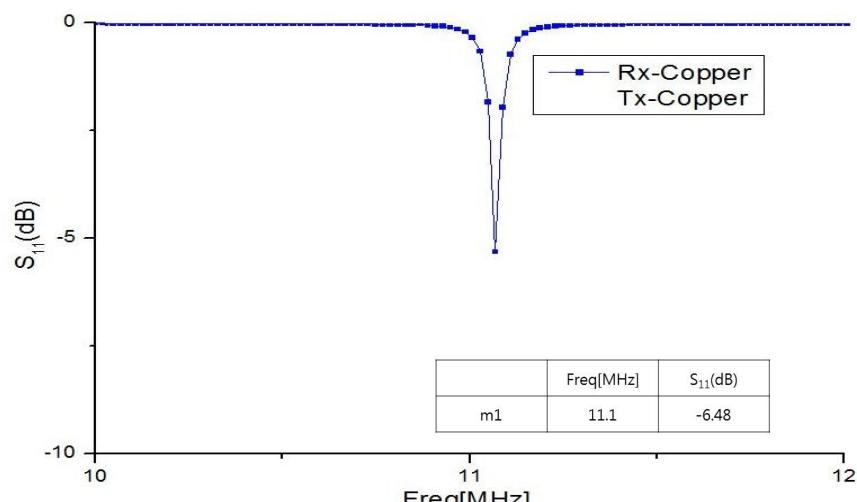
그림 5-2 시뮬레이션을 이용한 무선전력전송 E-fields

Fig. 5-2 WPT E-fields using simulation

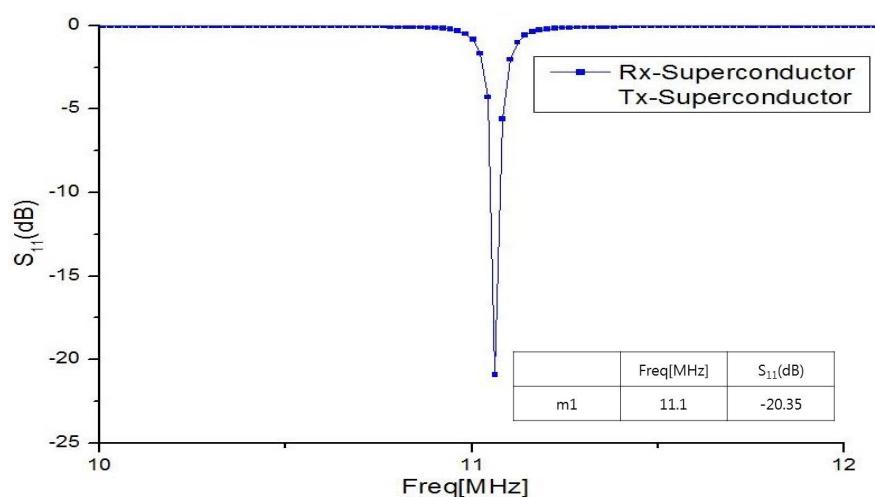
2. 실험

시뮬레이션과 동일한 조건의 실험 환경을 만들어 실제 실험을 진행하였다. 같은 공진 주파수로 제작된 초전도 코일과 구리 코일을 이용하였으며, 초전도 코일을 냉각시키기 위해 액체질소를 사용하였다. 이때, 초전도 코일과 똑같은 외부 환경을 위해 구리 코일을 액체질소에 보관하여 실제 실험을 진행하였다.

그림 5-3은 Network analyzer를 이용하여 자기공명 무선전력전송 시스템의 S-parameter를 측정한 그래프이다. 그림 5-3 (a)는 코일에 구리를 적용하였을 때 S-parameter의 반사손실 그래프이다. 공진주파수는 11.1MHz이며 이때, 약 -6.48dB의 반사손실을 확인할 수 있었다. 반사손실을 통해 각각 반사계수와 VSWR을 구하게 되면 각각 0.474와 2.804인 것을 확인할 수 있었다. 이때, 송신효율은 약 77.6%이다. 그림 5-3 (b)는 초전도 코일의 S_{11} 그래프이다. 반사손실은 약 -20.35dB를 나타냈다. 시뮬레이션과 동일하게 구리 코일에 비해 초전도 코일의 반사손실이 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 그림 5-3 (c)는 구리코일을 액체질소에 보관하였을 때 S-parameter 그래프이다. 시뮬레이션과 비슷한 값이 -13.78dB를 나타냈다. 표 5-2는 시뮬레이션과 실제 실험 데이터를 비교한 표이다. 실제 실험에서도 시뮬레이션과 비슷하게 초전도 코일이 구리 코일보다 낮은 반사손실을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

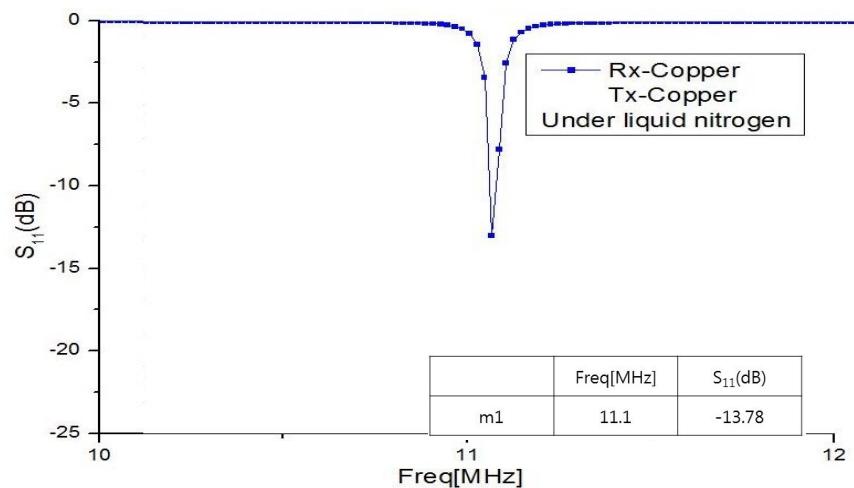


(a) Copper coil



(b) Superconducting coil

그림 5-3 Network analyzer를 이용한 무선전력전송 S-parameters
Fig. 5-3 WPT S-parameters using network analyzer



(c) Copper coil at liquid nitrogen

그림 5-3 Network analyzer를 이용한 무선전력전송 S-parameters (계속)

Fig. 5-3 WPT S-parameters using network analyzer

(continued from the previous page)

표 5-1 S-parameters 비교

Table 5-1 Comparison of S-parameters

	S ₁₁ of simulation(dB)	S ₁₁ of experimental(dB)
Normal conductor coil	-6.84	-6.48
Normal conductor coil under liquid nitrogen	-14.12	-13.78
Superconducting coil	-21.06	-20.35

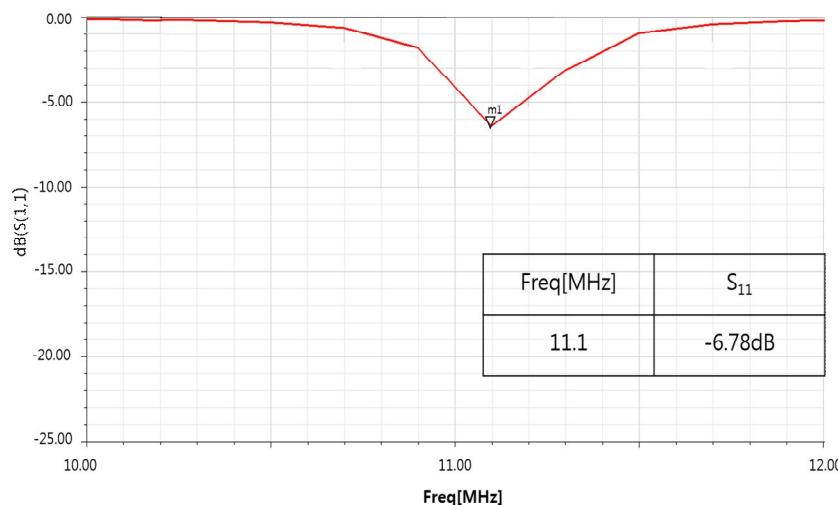
B. 서로 다른 재질을 이용한 무선전력전송

1. 시뮬레이션

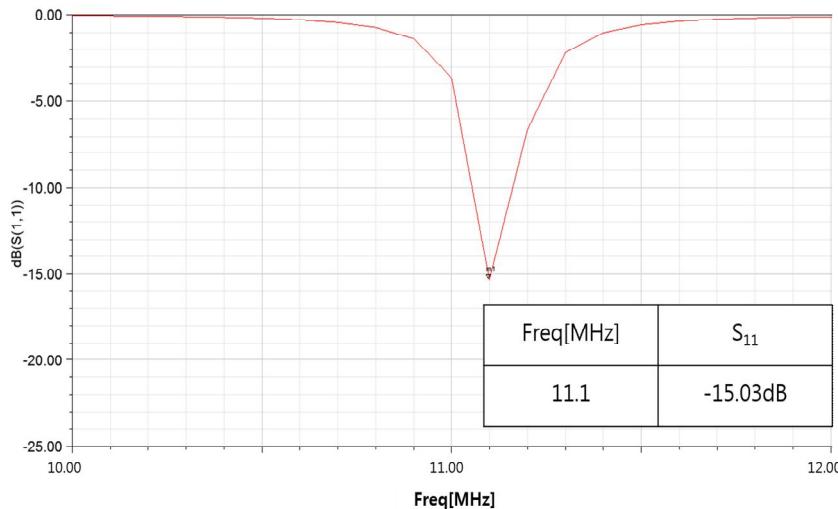
본 논문에서는 초전도 코일을 적용한 무선전력전송 실험을 진행하여 반사손실을 확인하였다. 초전도 코일의 경우 낮은 저항을 갖기 때문에 높은 Q-factor를 가져 반사손실이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

초전도 코일의 실생활 적용을 위해서는 다양한 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 냉각용기 때문에 이동성과 적용성이 떨어지지만 높은 Q-factor를 가지는 초전도 코일을 송신부 측에 적용하고, 이동성과 적용성이 뛰어난 구리코일을 수신부 측에 적용하는 방안을 제안하였다. 또한 송신부에 구리 코일을 적용하고 수신부에 초전도 코일을 적용한 반대 실험도 진행하여 비교하였다.

그림 5-4는 서로 다른 재질을 적용하였을 때 S-parameter 그래프이다. 그림 5-4 (a)는 소스 코일과 송신부에 구리코일을 적용하고, 수신부와 로드 코일에 초전도 코일을 적용하였을 때 S-parameter를 나타낸다. 이때, 반사손실 값은 약 -6.78dB인 것을 확인할 수 있었다. 반사손실을 반사계수와 VSWR로 환산해보면 각각 0.458과 2.691이었으며, 송신효율은 약 79%이다. 그림 5-4 (b)는 소스 코일과 송신부 코일에 초전도체를 적용하고 수신부 코일과 로드 코일에 구리를 적용하였을 때 S-parameter 그래프이다. 반사손실 값은 약 -15.03dB인 것을 확인할 수 있었다. 이때, 반사 계수와 VSWR은 각각 0.177과 1.431이며, 송신 효율은 약 97%이다. 그림 5-4 (a)의 경우 모든 코일에 구리를 적용하였을 때와 반사손실 값이 비슷하다. 하지만 그림 5-4 (b)와 같이 소스와 송신부에 초전도 코일을 적용하였을 경우에는 반사손실 값이 낮아질 뿐만 아니라 송신효율에서 약 18%가 차이나는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Tx-copper coil, Rx-superconducting coil

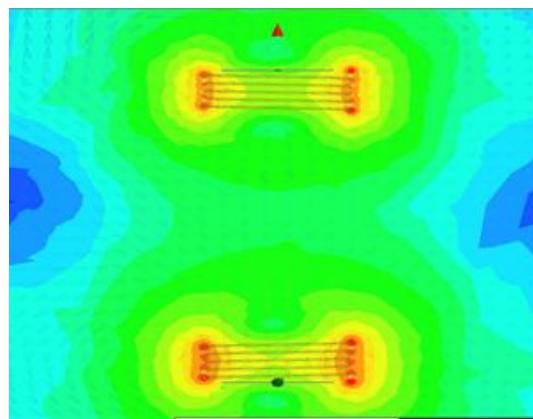


(b) Tx-superconducting coil, Rx-copper coil

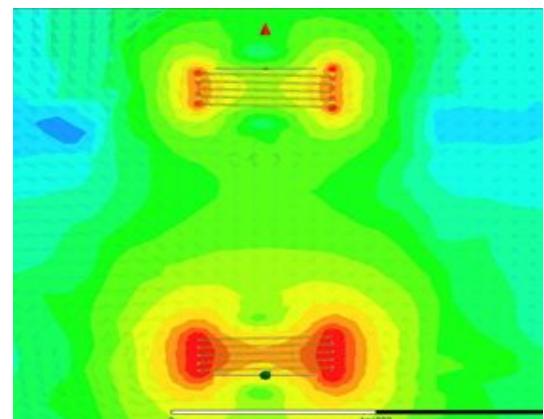
그림 5-4 송·수신 공진코일별 재질에 따른 S-parameters

Fig. 5-4 S-parameters according to material of the Tx·Rx resonance coil

그림 5-5는 송·수신 코일에 서로 다른 재질을 적용하였을 때 무선전력전송 시스템의 E-field이다. 그림 5-5 (a)는 소스 코일과 송신 코일에 구리를 적용하고, 수신 코일과 로드코일에 초전도체를 적용하였을 때 E-field이다. 송신부 측 전계 세기는 약 $8.577E$ V/m이었고, 수신부 측 전계 세기는 약 $3.2833E$ V/m이었다. 그림 5-5 (b)는 소스와 송신부 측에 초전도 코일을 적용하고, 수신부와 로드에 구리 코일을 적용하였을 때 E-field이다. 송신부 측 전계 세기는 약 $2.9286E^2$ V/m이며, 수신부 측 전계 세기는 약 $5.6416E$ V/m인 것을 확인할 수 있었다. 그림 5-5에서 송신 코일에 초전도 코일을 적용하였을 때 구리 코일을 적용하였을 때 보다 더 높은 전계 세기를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 5-2의 연구와 동일한 이유 때문인 것으로 판단된다.



(a) Tx-copper coil,
Rx-superconducting coil



(b) Tx-superconducting coil
Rx-copper coil

그림 5-5 송·수신 공진코일별 재질에 따른 E-fields

Fig. 5-5 E-fields according to material of the Tx·Rx resonance coils

표 5-3은 각 코일에 적용된 재질에 따라 발생한 E-field의 크기를 비교한 표이다. 구리 코일과 초전도 코일에 따라 전계의 세기에 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다.

표 5-2 E-field 비교

Table 5-2 E-field Comparison

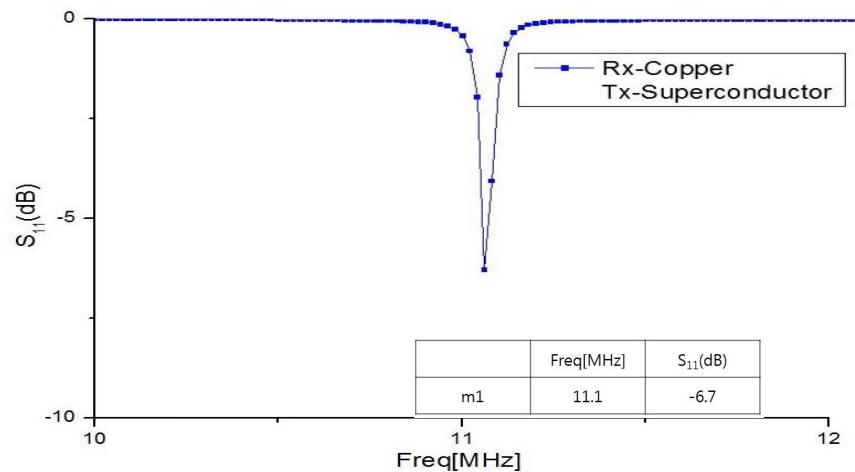
	E-field of transmitter coil [V/m]	E-field of receiver coil [V/m]
Source, Tx-Copper coil Load, Rx-Copper coil	8.577E	2.5119E
Source, Tx-Copper coil Load, Rx-Superconducting coil	8.577E	3.2863E
Source, Tx-Superconducting coil Load, Rx-Copper coil	2.9286E ²	5.6416E
Source, Tx-Superconducting coil Load, Rx-Superconducting coil	2.9286E ²	7.7623E

2. 실험

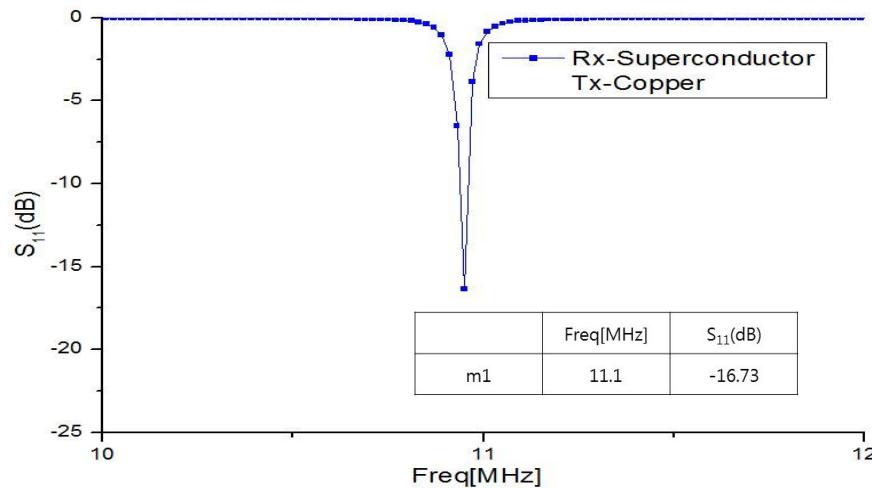
시뮬레이션 실험과 동일하게 송·수신부의 코일 재질을 각각 다르게 설정하여 실험을 진행하였다.

그림 5-6 (a)는 소스와 송신부에 구리코일을 적용하고 수신부와 로드에 초전도 코일을 적용한 그래프이다. 공진주파수는 11.1MHz이며, 반사손실은 시뮬레이션과 비슷한 -6.7dB인 것을 확인할 수 있었다. 이때, 송신 효율은 약 78%이다. 그림 5-6 (b)는 소스코일과 송신부 코일에 초전도체를 적용하고 수신부 코일과 로드 코일에 구리를 적용한 S-parameter이다. 이때, 반사손실은 -16.73dB인 것을 확인할 수 있었다. 식 (4.2)와 (4.3)을 통해 구한 반사계수와 VSWR은 각각 0.146과 1.341이다. 송신효율은 약 98%인 것을 확인할 수 있었다.

실제 실험에서도 시뮬레이션과 비슷한 반사손실 값을 나타냈다. 초전도 코일을 송신부 공진 코일에 적용하였을 경우, 반사손실이 낮아지고 송신 효율이 약 19% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 초전도 코일의 실생활 적용을 위하여 실생활에서 다양한 패턴에서 무선전력전송을 사용하였을 경우를 예상하고 그 경우를 분석 해보고자 한다.



(a) Tx-copper coil, Rx-superconducting coil



(b) Tx-superconducting coil, Rx-copper coil

그림 5-6 송·수신 공진코일별 재질에 따른 S-parameters

Fig. 5-6 S-parameters according to material of the Tx·Rx resonance coils

C. 송·수신 코일의 각도 변화에 따른 무선전력전송

1. 시뮬레이션

자기유도 방식의 무선전력전송 보다 자기공명 방식의 무선전력전송 방식이 가지는 가장 큰 장점은 전송 거리이다. 자기유도 방식은 무선전력전송이긴 하지만 송·수신부 코일 거리가 수cm 이기 때문에 유선충전 방식과 크게 달라질게 없다. 하지만 자기 공명 방식은 수m에서도 무선전력전송이 가능한 장점을 가지고 있다. 실생활에 자기공명 무선전력전송 방식을 적용하였을 때에도 이 장점이 강조될 것이다.

이와 같은 경우 송신부 코일과 수신부 코일의 각도 변화가 불가피하게 된다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 송신부 코일과 수신부 코일의 각도에 따라 반사손실이 어떻게 변화되는지 실험하였다. 그림 5-7은 송신부와 수신부 코일의 각도에 따른 Simulation 설계 그림이다. 그림과 같이 송신부 코일을 기준으로 수신부 코일을 각각 30, 60, 90, 120, 150, 180°로 변화시켜 반사손실을 분석하고자 한다.

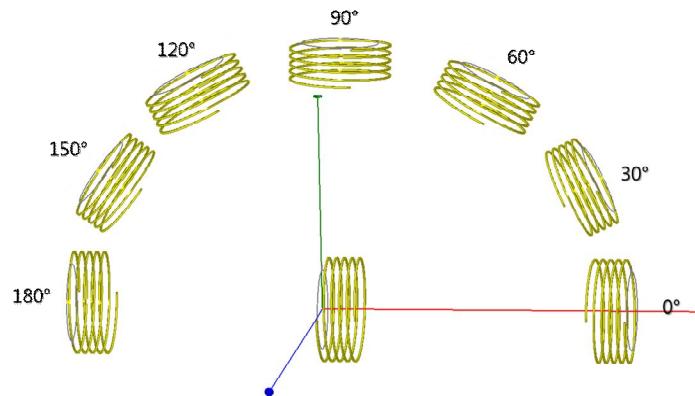
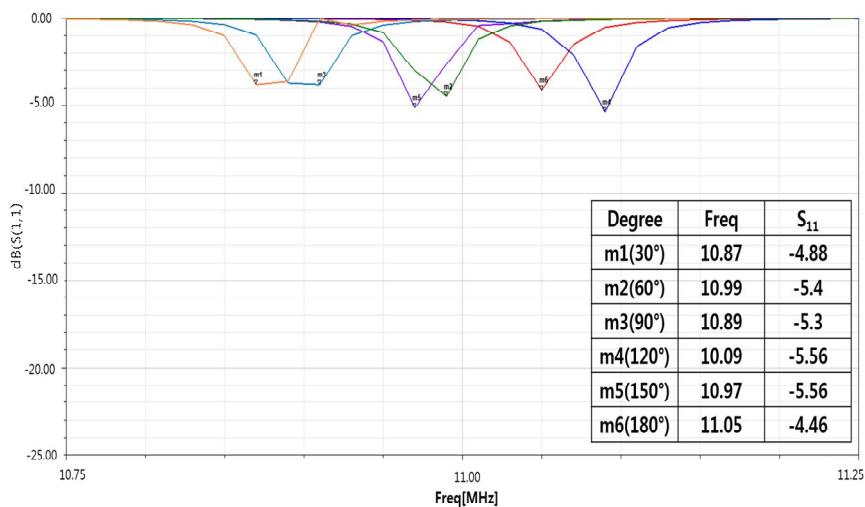


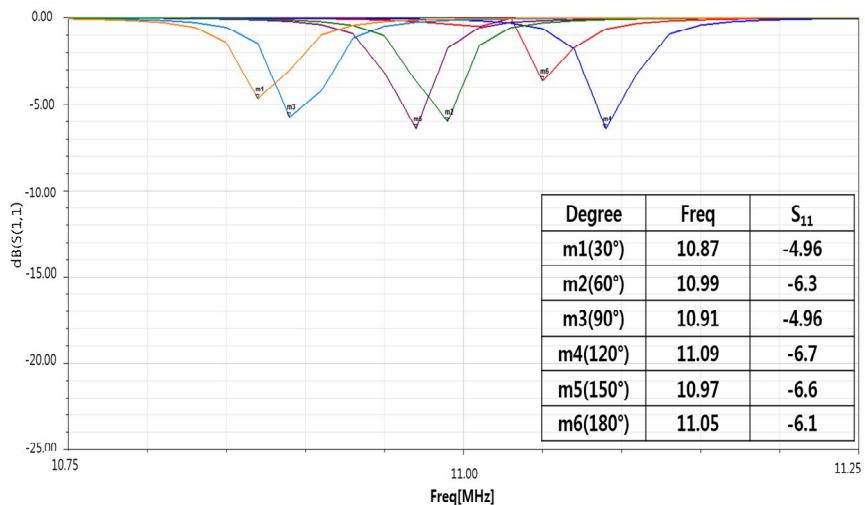
그림 5-7 코일 각도 변경에 따른 시뮬레이션 설계

Fig. 5-7 Simulation design according to the alteration of the coil degree

그림 5-8 (a)는 모든 코일에 구리 코일을 적용하였을 때, 수신부 각도 변화에 따른 S-parameter이다. 전체적으로 반사손실이 약 -5dB를 나타냈다. 이는 기준의 0°의 각도에 위치했을 때보다 약 -2dB정도의 반사손실이 증가한 것을 확인할 수 있는데, 각도 변화에 따라 송·수신부 간의 결합계수가 낮아졌기 때문이다. 그림 5-8 (b)는 소스 코일과 송신부 코일에 구리재질을 적용하고 수신부 코일과 로드 코일에 초전도체를 적용하였을 때, 수신부 각도 변화에 따른 반사손실을 나타낸다. 수신부 코일의 각도 변화에 따라 반사손실이 약 -6dB 정도인 것을 확인할 수 있었다. 그림 5-8 (c)는 소스 코일과 송신부 코일에 초전도 재질을 적용하고 수신부 코일과 로드 코일에 구리 재질을 적용하였을 때, 수신부 각도 변화에 따른 S-parameter이다. 그림 5-7 (d)는 모든 코일에 초전도 코일을 적용하였을 때, 수신부 각도 변화에 따른 S-parameter이다. 그림 5-8 (c), (d) 모두 수신부 코일이 120°일 때 높은 반사손실을 보였으나, 전체적으로 일정한 반사손실을 보였다.



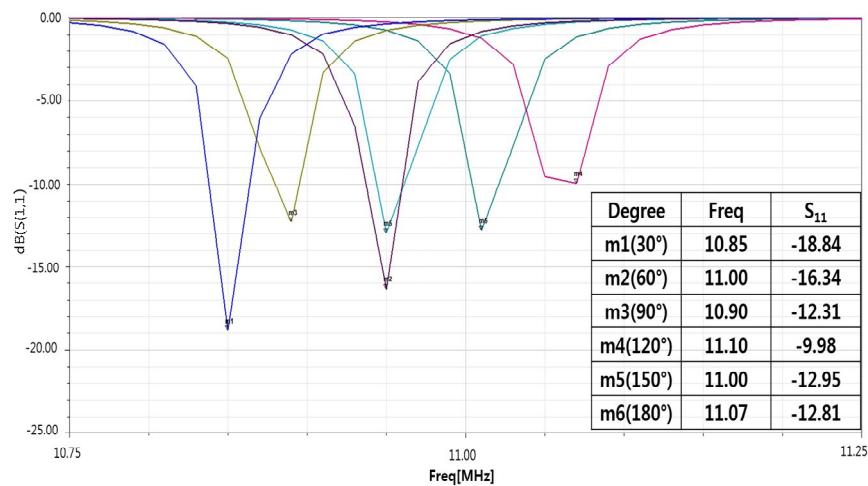
(a) Tx-copper coil, Rx-copper coil



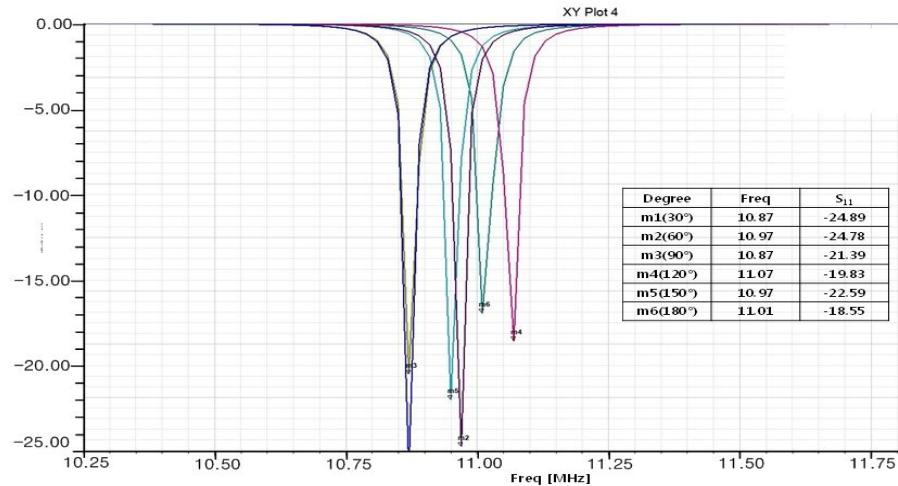
(b) Tx-copper coil, Rx-superconducting coil

그림 5-8 코일 각도 변경에 따른 S-parameters

Fig. 5-8 S-parameters according to the alteration of the coil degree



(c) Tx-superconducting coil, Rx-copper coil



(d) Tx-superconducting coil, Rx-superconducting coil

그림 5-8 코일 각도 변경에 따른 S-parameters

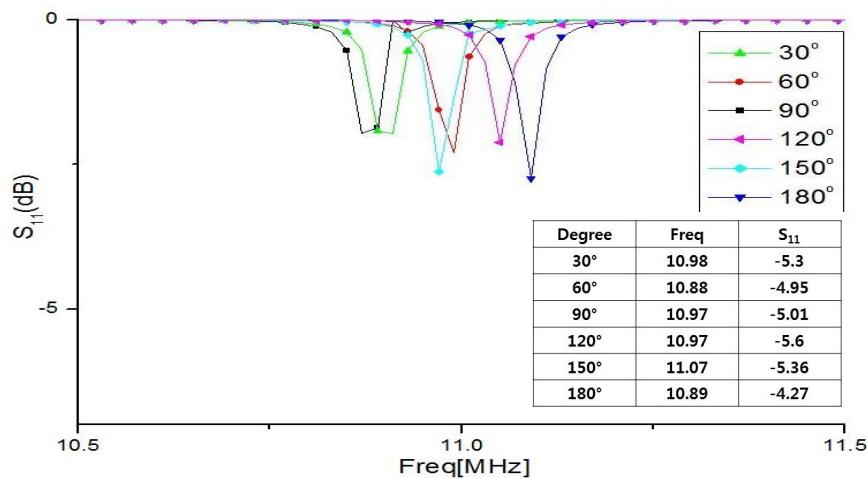
Fig. 5-8 S-parameters according to the alteration of the coil degree
(continued from the previous page)

2. 실험

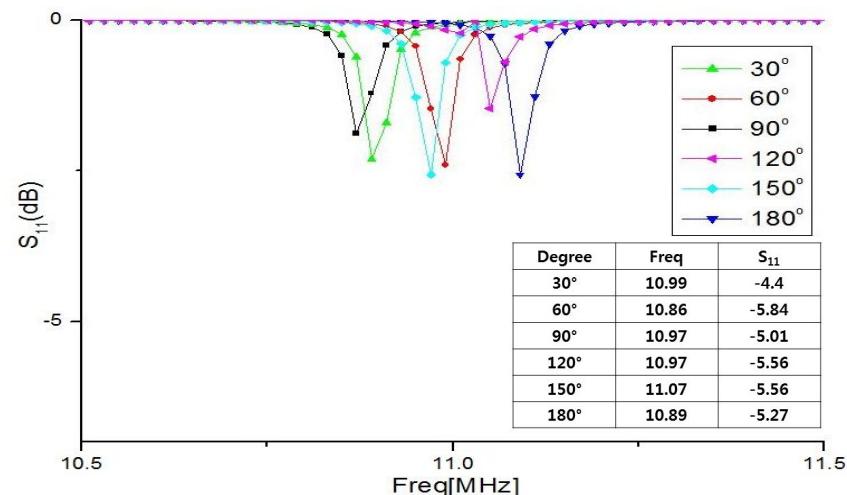
시뮬레이션과 동일한 조건으로 실험을 설계하여 송신부 코일과 수신부 코일 각도 변화에 따른 실제 실험을 진행하였다.

그림 5-9 (a)는 모든 코일에 구리 코일을 적용하였을 때, 수신부 각도 변화에 따른 반사손실 그래프이다. 시뮬레이션과 비슷하게 전체적으로 반사손실이 약 -5dB를 나타냈다. 그림 5-9 (b)는 소스 코일과 송신부 코일에 구리 코일을 적용하고 수신부 코일과 로드 코일에 초전도 코일을 적용하였을 때, 수신부 각도 변화에 따른 S-parameter이다. 전체적으로 -5dB의 안정적인 반사손실을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그림 5-9 (c)는 소스 코일과 송신부 코일에 초전도 코일을 적용하고 수신부 코일과 로드 코일에 구리 코일을 적용하였을 때, 수신부 각도 변화에 따른 S-parameter이다. 약 -15dB의 반사손실이 나타났다. 그림 5-9 (d)는 모든 코일에 초전도 코일을 적용하였을 때, 수신부 각도 변화에 따른 S-parameter이다. 약 -23dB의 낮은 반사손실을 나타냈다.

시뮬레이션과 실제 실험 모두 송신부와 수신부의 각도가 0°일 때보다 반사손실이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 송신부 코일과 수신부 코일의 결합계수 감소 때문이다. 하지만 결합계수가 감소하였음에도 다양한 각도에서 안정적인 반사손실이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 자기공명 무선전력전송 시스템은 공명 현상을 이용한 무선전력전송이기 때문에 송·수신 위치 변화에도 안정적인 무선전력전송이 가능할 것으로 판단된다.



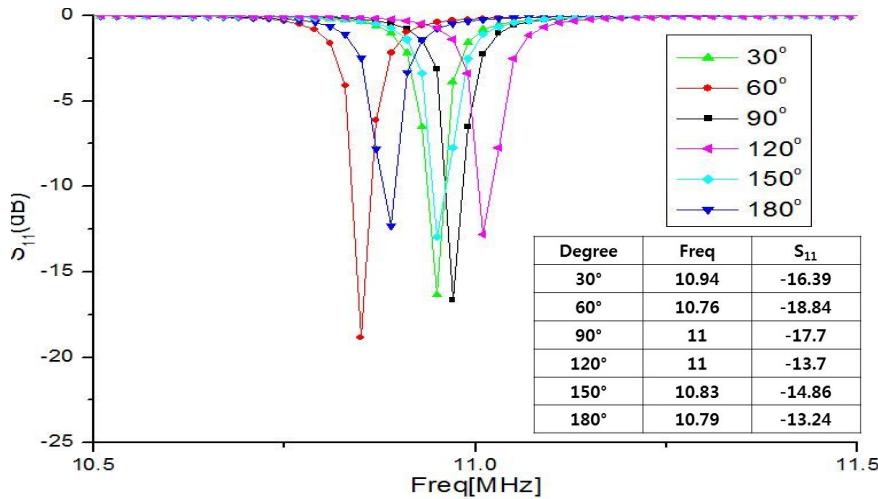
(a) Tx-copper coil, Rx-copper coil



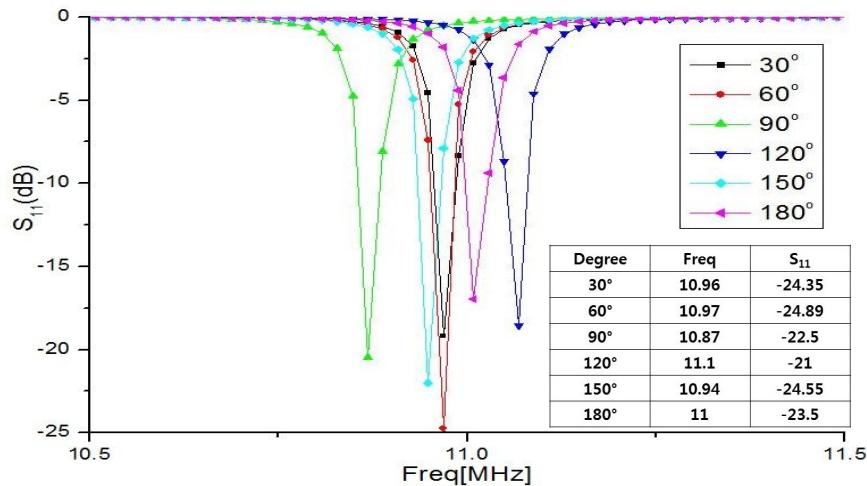
(b) Tx-copper coil, Rx-superconducting coil

그림 5-9 코일 각도 변경에 따른 S-parameters

Fig. 5-9 S-parameters according to the alteration of the coil degree



(c) Tx-superconducting coil, Rx-copper coil



(d) Tx-superconducting coil, Rx-superconducting coil

그림 5-9 코일 각도 변경에 따른 S-parameters

Fig. 5-9 S-parameters according to the alteration of the coil degree
(continued from the previous page)

D. n개의 수신 코일을 가졌을 때 무선전력전송 특징

1. 2개의 수신 코일

무선전력전송의 실생활 적용 시 송신부와 수신부가 1:1이 되어 수신하는게 가장 이상적인 무선전력전송 방식이다. 실제로 유선방식으로 전력을 전송할 때도 기계 당 1개의 전력이 전송 가능하도록 설계가 되어 있다. 하지만 무선전력전송은 특정 공진주파수에서 선택성을 가진다. 이는 1개의 송신 코일일지라도 동일한 공진 주파수로 설계된 수신 코일이 여러개일 때 1:n의 무선전력전송이 가능하다는 것이다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 1:n의 무선전력전송 실험을 진행했다. 1:n으로 진행되었을 때 송신부의 반사손실과 수신부의 투과계수를 분석하였다. 수신 코일의 개수는 각각 2개와 3개일 때 실험을 진행하였다. 그럼 5-9는 송신부와 수신코일의 비율이 1:2일 때 실험 설계도이다. 수신 코일은 0° 를 기준으로 각각 30° 와 -30° 에 위치시켰으며, 재질은 구리와 초전도 재질을 혼합으로 사용하였다.

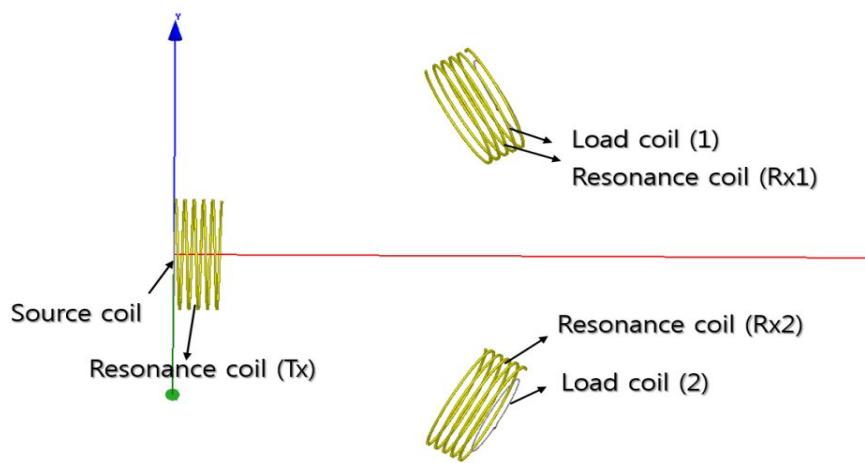


그림 5-10 2개의 수신코일을 가졌을 때 WPT

Fig. 5-10 WPT with the two Receiver coils

그림 5-11은 송·수신 코일에 모두 구리코일을 적용하였을 때 반사손실을 나타낸다. m1은 송신 코일의 반사손실을 나타내고 있다. 약 -3.87dB를 나타내고 있다. m2와 m3는 각각 Rx1과 Rx2의 반사손실을 나타낸다. Rx1의 반사손실은 약 -3.28dB이고 Rx2의 반사손실은 약 -4.37dB인 것을 확인할 수 있다. 그림 5-12는 송신코일에는 구리 코일을 적용하고 수신 코일에는 초전도 코일을 적용하였을 때 반사손실이다. 송신 코일의 반사손실은 -5dB이고 Rx1과 Rx2의 반사손실은 각각 -3.63dB와 -2.87dB인 것을 확인할 수 있었다. 송신부에 구리 코일을 적용하였을 때 전체적인 반사손실 값이 높아진 것을 확인할 수 있었다. 수신 코일이 2개이기 때문에 상호간의 결합계수도 낮아질 뿐만 아니라 1개의 신호가 2개의 수신 코일로 나누어져서 보내지기 때문이다 것으로 판단된다.

그림 5-13은 송신 코일에 초전도 코일을 적용하고 2개의 수신코일에 구리 코일을 적용하였을 때 반사손실을 나타내는 그래프이다. 송신 코일의 반사손실은 약 -11.18dB이였으며, Rx1과 Rx2의 반사손실은 각각 -18.22, -12.25dB인 것을 확인 할 수 있었다. 1:1의 무선전력전송 때보다 송신부의 반사손실이 높아졌다. 그림 5-14는 송·수신 코일 모두 초전도 코일을 적용하였을 때 S-Parameter이다. 송신 코일의 반사손실은 -22dB 였으며, 수신 코일의 반사손실은 각각 -13.77과 -15.54dB인 것을 확인할 수 있었다.

전체적으로 2개의 수신 코일을 적용하였을 때, 공진 주파수 및 반사손실이 불균형하다. 이는 1:1 매칭이 아닌 1:2의 매칭으로 인한 임피던스 매칭의 불균형이 생겼기 때문이다. 그렇기 때문에 차후 연구에서는 1:n 매칭 시 균일한 임피던스 매칭이 가능한 코일 설계나 매칭 기술이 필요할 것으로 판단된다.

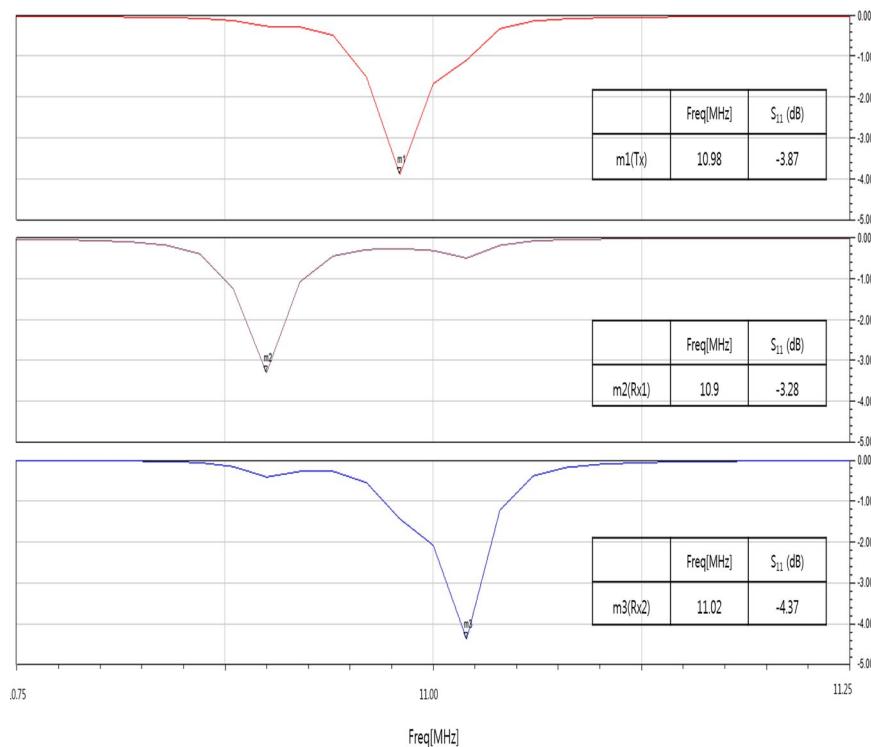


그림 5-11 2개의 수신코일을 가졌을 때 S-parameters
송신부-구리 코일, 수신부1,2-구리 코일

Fig. 5-11 S-parameters with the two Receiver coils
Tx-copper coil, Rx1,2-copper coil

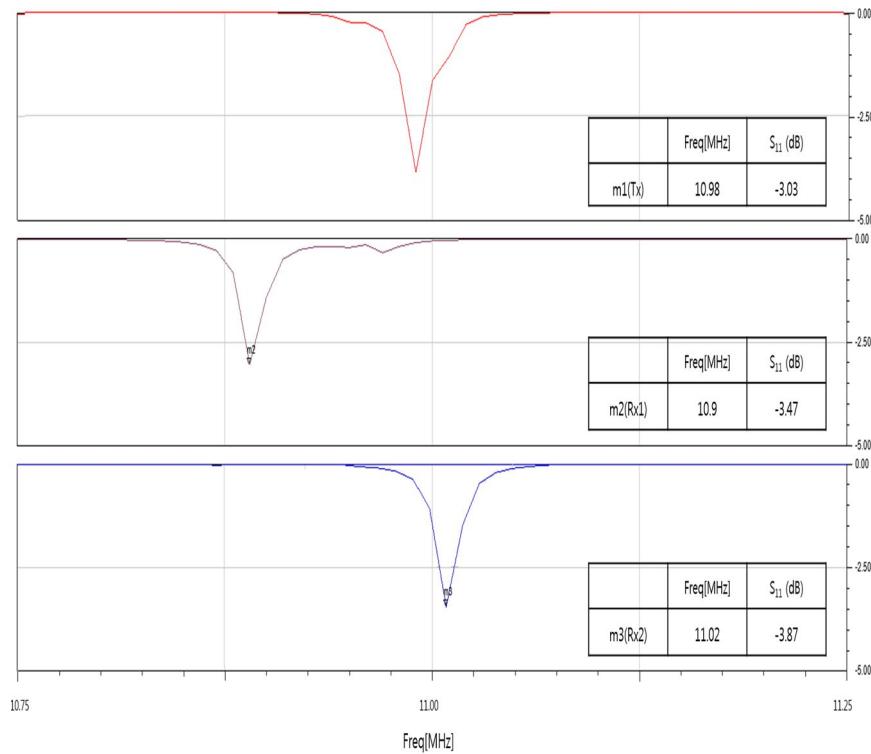


그림 5-12 2개의 수신코일을 가졌을 때 S-parameters
송신부-구리 코일, 수신부1,2-초전도 코일

Fig. 5-12 S-parameters with the two Receiver coils
Tx-copper coil, Rx1,2-superconducting coil

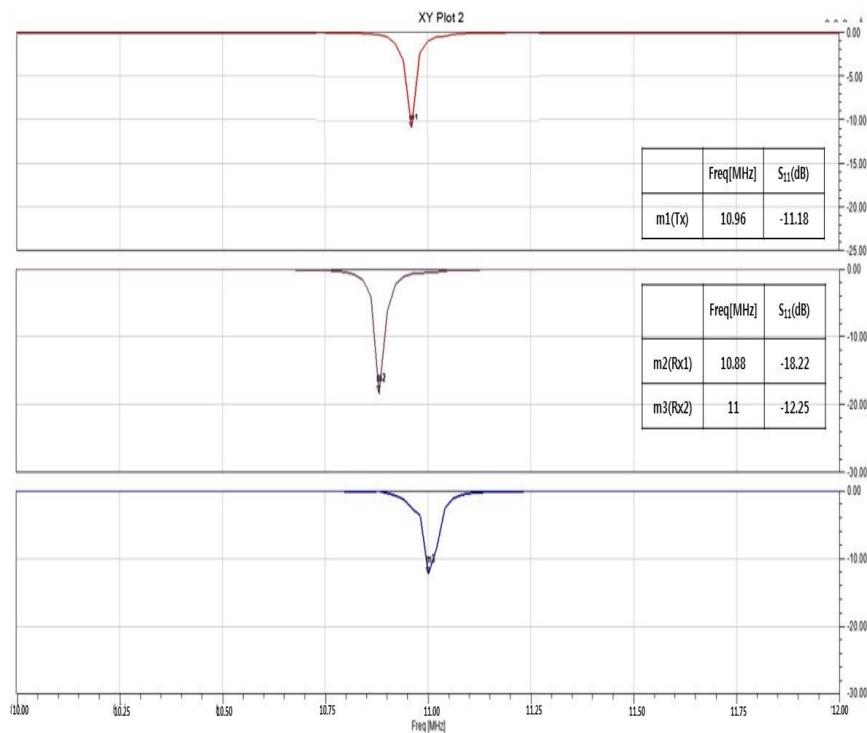


그림 5-13 2개의 수신코일을 가졌을 때 S-parameters
송신부-초전도 코일, 수신부1,2-구리 코일

Fig. 5-13 S-parameters with the two Receiver coils
Tx-superconducting coil, Rx1,2-copper coil

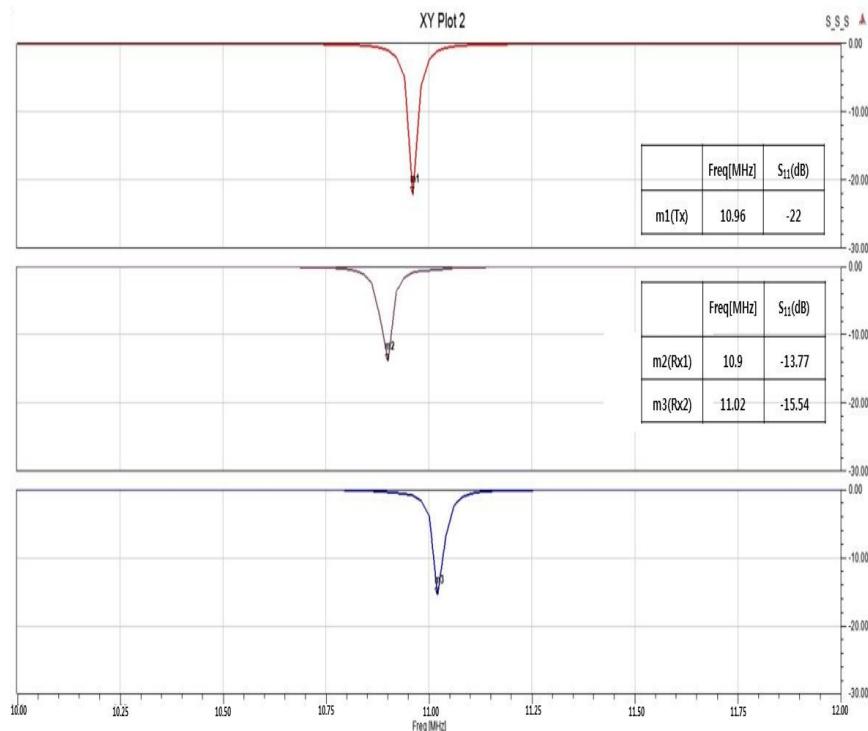


그림 5-14 2개의 수신코일을 가졌을 때 S-parameters
송신부-초전도 코일, 수신부1,2-초전도 코일

Fig. 5-14 S-parameters with the two Receiver coils
Tx-superconducting coil, Rx1,2-superconducting coil

2. 3개의 수신 코일

그림 5-15는 수신 코일이 3개일 때 반사손실에 대한 실험 설계이다. 수신 코일은 각각 0° , 30° , -30° 로 배치하였다. 2개의 수신코일 때와 동일하게 각 코일의 반사손실을 분석하였다.

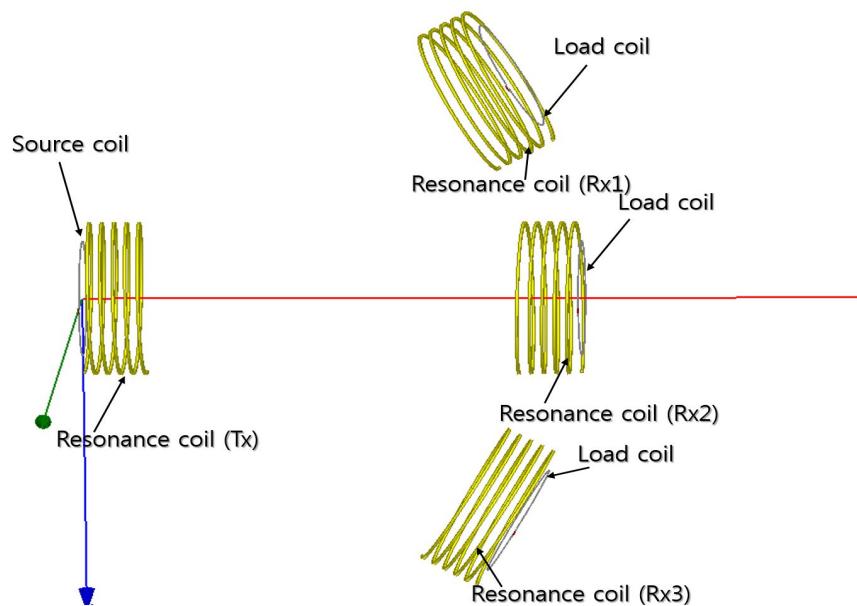


그림 5-15 3개의 수신코일을 가졌을 때 WPT

Fig. 5-15 WPT with the three Receiver coils

그림 5-16은 모든 코일이 구리일 때 반사손실 그래프이다. 공진주파수는 약 10.9MHz에서 공진되었다. 이때, 송신 코일의 반사손실은 약 -2.76dB이다. 수신 코일 Rx1,2,3의 반사손실은 각각 -5.57, -5.57, -7.78dB인 것을 확인할 수 있었다. 수신 코일의 S-parameter 반사손실이 분할되었다. 이는 1:n의 무선전력전송 시, 송신 코일과 수신 코일의 결합계수와 임피던스 매칭의 불균형으로 인해 원활한 무선 전력전송이 되지 못하기 때문이다. 그림 5-17은 송신 코일에 구리 코일을 적용하고, 수신 코일에는 초전도 코일을 적용하였을 때, S-parameter이다. 이때, 송신 코일의 반사손실은 -2.88dB이며, 수신 코일의 반사손실은 각각 -8.07, -8.24, -17.48dB인 것을 확인할 수 있었다. 그림 5-16과 비교하여 수신 코일의 반사손실은 낮아졌지만, S-parameter가 모두 분할되어 불안한 무선전력전송을 보였다. 그림 5-18은 송신 코일에 초전도 코일을 적용하고 수신 코일에는 구리 코일을 적용한 그래프이다. 송신 코일의 반사손실은 -11.1dB이며, 수신 코일의 반사손실은 각각 -5.95, -5.73, -7.54dB인 것을 확인할 수 있었다. 그림 5-19는 모든 코일에 초전도 코일을 적용하였을 때 반사손실 그래프이다. 송신 코일의 반사손실은 약 -10.52dB이고, 수신 코일의 반사손실은 각각 -14.69, -12.12, -13.74dB인 것을 확인할 수 있었다. 송신 코일에 초전도 코일을 적용하였을 때, 송신 코일과 수신 코일의 반사손실이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 1:1 무선전력전송 때보다 높은 반사손실을 나타냈으며, 1:3의 무선전력전송의 경우 수신 코일의 S-parameter가 분할되는 것을 확인할 수 있었다.

무선전력전송은 1:1의 무선전력전송이 이루어졌을 때 가장 효율적인 무선전력전송이 가능한 것을 확인하였으며, 1:n 무선전력전송이 필요할 경우 이에 대한 임피던스 매칭과 상호 결합계수를 증가시킬 수 있는 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

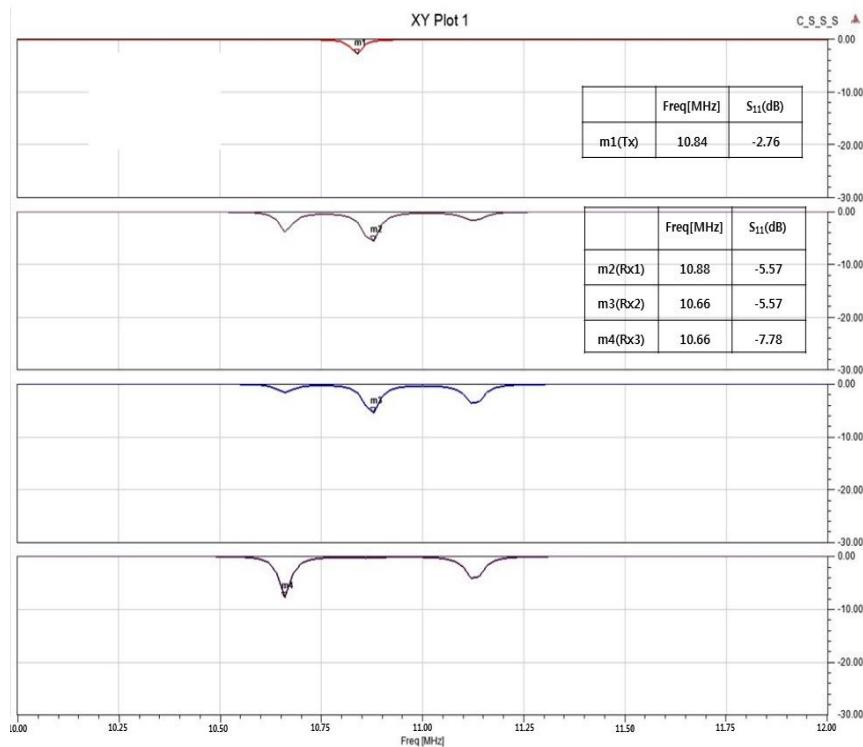


그림 5-16 3개의 수신코일을 가졌을 때 S-parameters

송신부-구리 코일, 수신부1,2,3-구리 코일

Fig. 5-16 S-parameters with the three Receiver coils

Tx-copper coil, Rx1,2,3-copper coil

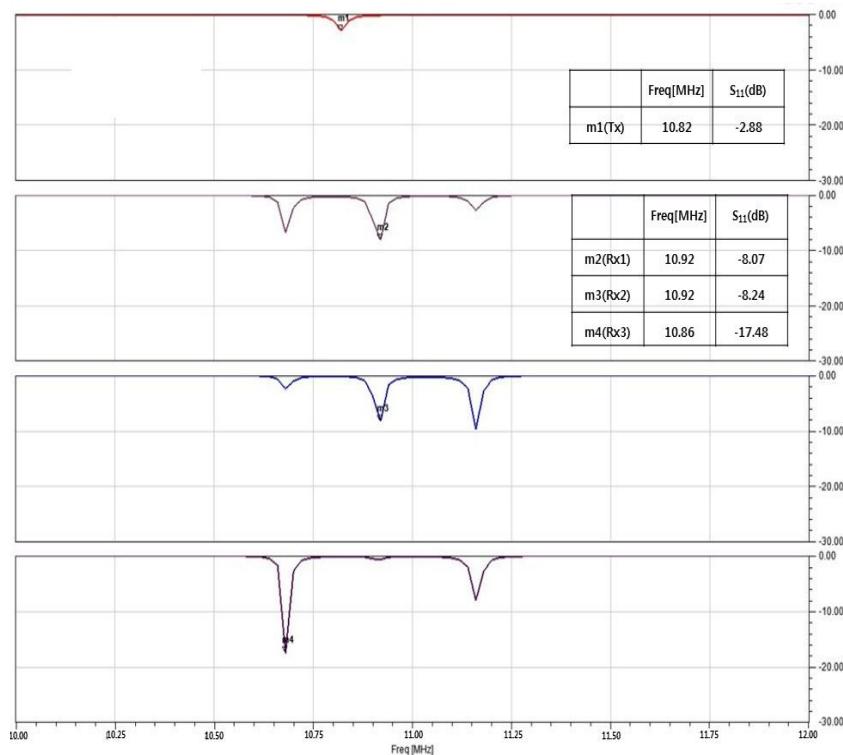


그림 5-17 3개의 수신코일을 가졌을 때 S-parameters

송신부-구리 코일, 수신부1,2,3-초전도 코일

Fig. 5-17 S-parameters with the three Receiver coils

Tx-copper coil, Rx1,2,3-superconducting coil

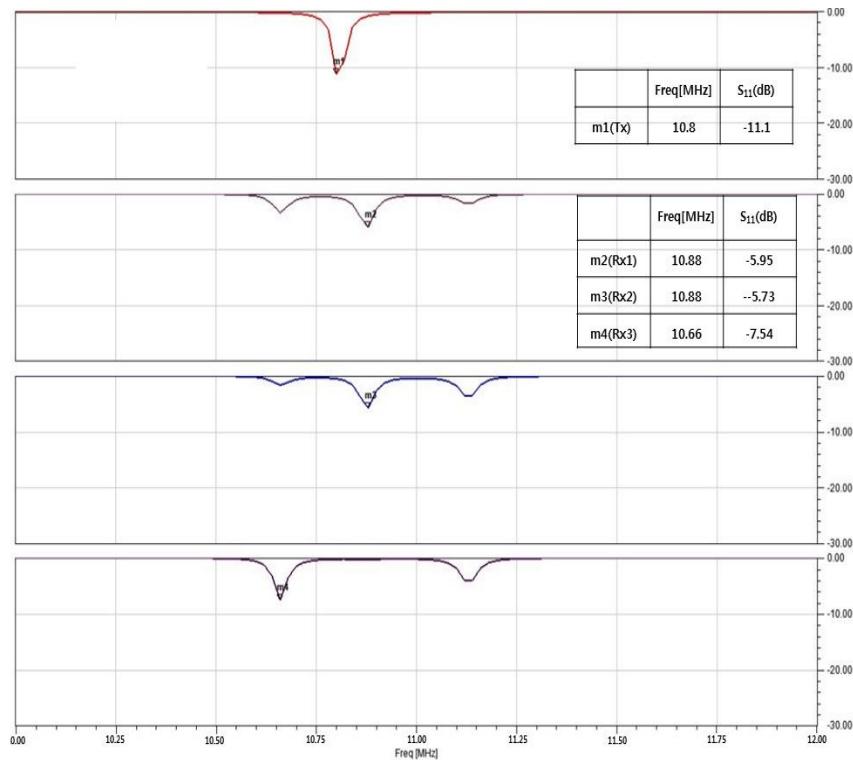


그림 5-18 3개의 수신코일을 가졌을 때 S-parameters
송신부-초전도 코일, 수신부1,2,3-구리 코일

Fig. 5-18 S-parameters with the three Receiver coils

Tx-superconducting coil, Rx1,2,3-copper coil

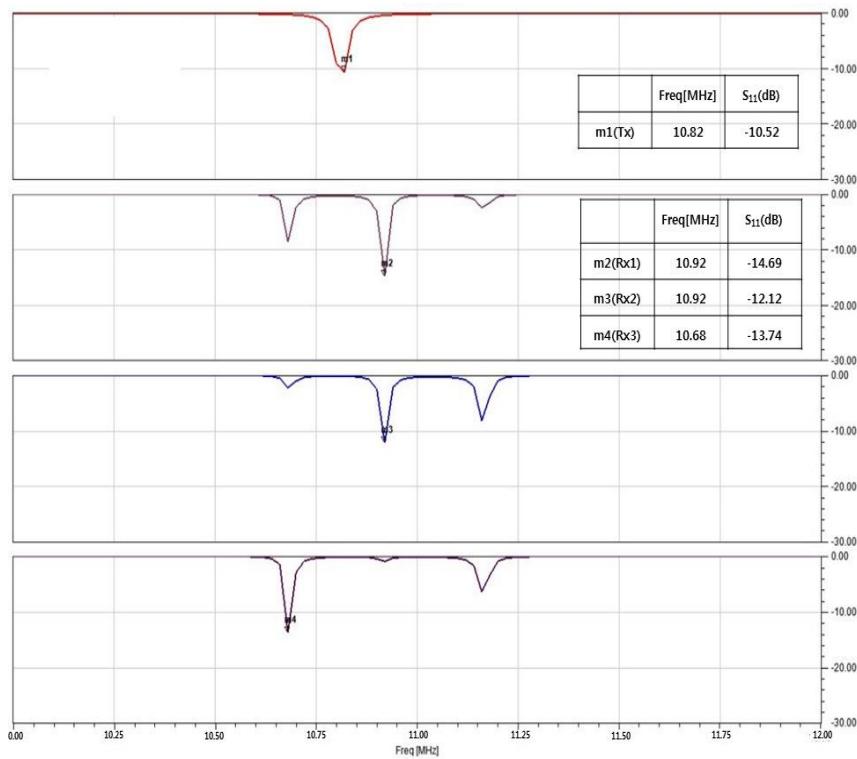


그림 5-19 3개의 수신코일을 가졌을 때 S-parameters

송신부-초전도 코일, 수신부1,2,3-초전도 코일

Fig. 5-13 S-parameters with the three Receiver coils

Tx-superconducting coil, Rx1,2,3-superconducting coil

VI. 결 론

전 세계적으로 전자기기의 사용은 해를 거듭할수록 증가하고 있고, 전자기기의 휴대성을 위해 휴대용 배터리 용량 증가도 이루어지고 있다. 하지만 휴대용 배터리의 용량 증가는 한계에 도달하고 있으며, 유선 충전 방식에 따른 불편함도 증가하고 있다. 무선전력전송 시스템은 유선과 휴대용 배터리에 대한 문제를 해결하기 위해 제안되었다. 특히 자기공명 무선전력전송 시스템은 긴 전송거리 뿐만 아니라 높은 효율을 보이고 있어 가장 효과적인 대안으로 기대된다.

본 논문에서는 자기공명 무선전력전송 시스템에 초전도 코일을 적용하는 방법을 제안하였다. 초전도 코일은 임계온도에서 낮은 저항을 갖기 때문에 안테나의 반사손실을 낮출 수 있다. 실험을 위해 초전도 코일과 냉각용기를 제작하였고, 무선전력전송에 가장 많이 쓰이는 재질인 구리 코일을 함께 제작하여 비교 실험을 진행하였다. 실생활 적용을 위해 동일한 주파수로 제작된 초전도 코일과 구리 코일의 혼합 사용 시 안테나의 반사손실을 분석하였다.

그 결과 초전도 코일은 낮은 저항값으로 인해 높은 Q-factor 뿐만 아니라 안테나의 반사손실을 줄일 수 있었고, 구리코일과의 혼합사용에도 낮은 반사손실을 나타내는 것을 확인하였다. 이러한 본 논문의 결과들을 아래와 같이 요약하였다.

1. 공진코일 설계

HFSS프로그램을 이용하여 자기공명 무선전력전송 시스템을 설계하였다. 초전도 코일은 퀸션 방법에 따라 인덕턴스 값이 달라진다. 헬리컬 코일의 인덕턴스 값을 분석하여 $22 \mu\text{H}$ 의 최적값을 도출하였다. 또한 인덕턴스 값을 통해 11.1MHz 의 공진주파수를 도출할 수 있었다.

2. 냉각용기 재질에 따른 투자율 분석

본 연구의 초전도 코일은 임계온도 이하에서만 초전도 현상이 발현되기 때문

에 임계온도 유지가 필요하다. 임계온도 유지를 위해서는 액체질소에 초전도 코일을 보관하여야 하는데 액체질소와 초전도 코일을 보관할 수 있는 냉각용기가 필요이다. 이때, 냉각용기 재질에 의해 무선전력전송의 전송 특성이 변화 할 수 있다. 그렇기 때문에 냉각용기 재질에 따른 안테나 반사손실을 분석하여 안정적인 무선전력전송이 가능한 냉각용기를 제작하였다. 냉각용기 재질에는 가장 많이 사용되는 Aluminum, Iron, Polystyrene, PVC plastic을 선정하였으며, Polystyrene과 PVC plastic의 반사손실이 가장 낮게 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 비자성체 물질이기 때문에 투자율이 높기 때문이다. 또, 냉각용기의 두께 및 거리에 따른 반사손실을 분석하여 최적의 냉각용기 조건을 도출하였다.

3. 자기공명 무선전력전송 시스템

시뮬레이션을 통해 초전도 코일과, 냉각용기에 대한 최적의 값을 도출할 수 있었다. 이를 실제로 제작하여 실제 실험에 적용하여 network analyzer를 통해 반사손실을 측정하였다. 그 결과 초전도 코일은 구리 코일에 비해 낮은 반사손실을 보였다. 또, 동일한 실험 조건을 위해 구리 코일을 액체질소에 보관하였을 때 반사손실을 확인하였다. 일반 구리 코일도 낮은 온도에서 저항이 어느 정도 감소하지만 초전도 코일보다는 높은 저항을 가지고 있다. 그렇기 때문에 초전도 코일이 구리 코일보다 높은 Q-factor를 가질 수 있었고, 안정적인 무선전력 전송 동작이 이루어짐을 확인하였다.

4. 초전도 코일과 구리 코일의 혼합 사용

초전도 코일의 냉각용기는 부피가 커지고, 지속적인 액체질소 충전이 필요하다. 본 연구에서는 초전도 코일의 실생활 적용을 위해 송신부에 초전도 코일을 적용하고 수신부에 구리 코일을 적용하는 방식을 제안하였다. 초전도 코일을 송신부에 적용하게 되면 높은 Q-factor로 인해 많은 양의 전력을 전송할 수 있다. 구리 코일을 수신부에 적용하게 되면 부피를 줄이고 이동성을 증가시킬 수

있는 장점이 있다. 초전도 코일과 구리 코일의 혼합 사용 시 안테나의 반사손실이 낮아졌고, 다양한 각도에서도 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

초전도체는 뛰어난 특성을 가졌음에도 불구하고 경제성 및 임계온도 유지에 따른 냉각용기 적용 등의 불편함으로 인해 상용화가 어려웠다. 하지만, 최근 초전도체를 이용한 초전도 케이블이 상용화하면서 초전도체에 대한 관심이 다시금 주목되고 있다.

본 연구를 통해 초전도 코일을 송신 코일에 적용하였을 때, 약 99%의 높은 송신 효율을 확인할 수 있었다. 초전도 코일을 적용한 송신 코일과 어떤 기기에도 적용이 용이하고 경제성, 실용성을 갖춘 재질로 수신코일을 제작한다면 높은 효율의 무선전력전송이 가능할 것으로 판단된다. 또한, IT기기, 모바일폰 등 소전력 무선 전력전송 뿐만 아니라 전기자동차의 무선충전, 철도의 무선급전시스템 등 대전력 무선전력전송도 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 신용희, 오용승, 안강순, 김창선, “근거리 무선전력전송 고찰”
- [2] 대한전기학회 기획시리즈, “무선 전력 전송 기술의 동향 및 현황”, 대한전기학회지, Vol. 9(1), 2010.
- [3] I.S.Jeong, H.S.Chi, "Characteristics of Wireless Power Transmission applying the Superconducting coil", KIEE, Vol. 62, No.6, pp. 762~766, 2013.
- [4] 김종대, “무선전력전송 마지막 남은 케이블로부터의 해방”, LGERI Report, 2012.
- [5] 안성덕, “무선전력전송 기술개발 동향”, TTA Journal, Vol. 138, 2011.
- [6] J.W.Kim, H.H.Ji, Y.G.Chi, 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, 2010.
- [7] 신용희, 김창선, “근거리 무선 전력전송 장치 연구”, 전기의 세계, 제59권 제1호, pp. 56~59, 2010.
- [8] M.R.Lee, S.U.Kang, Y.H.Kim, S.H.Cheon, T.H.Jung, “wireless transfer”, KIEE, Vol. 59, No. 1, 2010.

- [9] Nikola Tesla, "Apparatus for transmitting electrical energy", U.S.patent 1119732, 1914.
- [10] S.H.Lee, H.M.K, H.J.Kim, S.W.Kim, "Wireless Power Transmission using Electromagnetic Inductive Coupling and LC Resonant", KIEE, Vol.62, No.3, pp. 349~354, 2013.
- [11] K.-B. Kim, E. Levi, Z. Zabar, and L. Birenbaum, "Mutual inductance of noncoaxial circular coils with constant current density," IEEE Tran. on mag., Vol. 33. No. 5, pp. 4303~4309, 1997.
- [12] C. M. Zierhofer, and E. S. Hochmair, "Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils," IEEE Tran. on Biomed. Eng., Vol. 43, No. 7, pp. 708~714, 1996.
- [13] Andre Kurs, Aristlidis Karalis, J. D. Joannopoulos and Marin Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, pp. 83~86, 2007.
- [14] Aristlidis Karalis, J. D. Joannopoulos and Marin Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", annals of Physics 323, pp. 34~38, 2008.
- [15] 한국전파진흥협회, "무선전력전송 기술개발 및 표준화 동향", 2011.
- [16] Hype Cycle for Emerging Technologies, 2012.

- [17] 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.
- [18] 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., pp. 359~364, 2002.
- [19] 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.
- [20] 2010 Technical Report, US Particle Accelerator School of Physics, MIT.
- [21] Peter Vizmuller, RF Design Guide; systems, circuit and equations, Artech House, 1995.
- [22] 장요한, 권재순, 박재수, 최재훈 “무선전력전송용 고효율 공진기 설계”한국 전자과학회 논문지, Nol. 22, No. 9, pp. 820~826, 2011.
- [23] J.W.Kim, H.H.Ji, Y.G.Chi, 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. 565~572, 2010.
- [24] 장주엽, 허정, 김용남, “헬리컬 코일을 이용하는 자기공진형 무선 전력 전송 시스템에서 새로운 상호 인덕턴스의 계산식 제안”, KJKIEES, Vol. 23, No 6, pp. 669~681, 2012.