



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 원저작자를 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 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2018年 2月

碩士學位 論文

고효율 무선전력전송을 위한  
초전도 공진코일에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 努 峨

고효율 무선전력전송을 위한  
초전도 공진코일에 관한 연구

Study on the Superconducting Resonance Coil  
for the High Efficiency Wireless Power Transmission

2018年 2月 23日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 努 峨

고효율 무선전력전송을 위한  
초전도 공진코일에 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

2017年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 努 峨

## 朴努峨의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 曹 錦 培 (印)

委 員 京畿消防署 博士 趙 鎔 善 (印)

委 員 朝鮮大學校 教授 崔 孝 祥 (印)

2017年 11月

朝鮮大學校 大學院

## 목 차

I. 서론 .....	1
II. 이론적 고찰 .....	3
A. 자기공진방식 무선전력전송 .....	3
1. 자기공진방식 무선전력전송 시스템 구성 .....	3
2. 공진 .....	4
B. 초전도체 .....	6
C. 헬리컬 코일의 인덕턴스 .....	8
III. 실험 및 고찰 .....	9
A. 시뮬레이션 설계 및 해석 .....	9
1. 코일 직경에 따른 무선전력전송 특성 .....	10
2. 감은 횟수에 따른 무선전력전송 특성 .....	16
B. 실험장비 .....	22
1. 초전도 선재 .....	22
2. LCR Meter .....	24
3. Network Analyzer .....	25
4. 냉각용기 .....	26
C. 실험 및 고찰 .....	27
1. 코일 직경에 따른 무선전력전송 특성 실험 .....	28
2. 감은 횟수에 따른 무선전력전송 특성 실험 .....	31

IV. 결론 .....	34
참 고 문 헌 .....	36

## List of Tables

Table 3-1 Design parameters of the superconducting resonance coil according to the diameter .....	10
Table 3-2 Inductance and capacitance value due to coil diameter .....	11
Table 3-3 Reactance value of resonance coil by the coil diameter .....	15
Table 3-4 Design parameters of the superconducting resonance coil according to the number of turns .....	16
Table 3-5 Inductance and capacitance value by the number of turns .....	17
Table 3-6 Reactance value of resonance coil by the number of turns .....	21
Table 3-7 Specification of superconducting wire .....	23
Table 3-8 Specification of LCR Meter .....	24
Table 3-9 Specification of network analyzer .....	25
Table 3-10 Simulation and experimental S-parameter according to the diameter of coils .....	29
Table 3-11 Simulation and experimental S-parameters by the turns of the coil .....	32



## List of Figures

Fig. 2-1 Equivalent circuit of magnetic resonance type WPT system .....	3
Fig. 2-2 Correlation between inductance and capacitance .....	5
Fig. 2-3 The critical curve of superconductivity .....	6
Fig. 2-4 Design parameters of helical coil .....	8
Fig. 3-1 The modeling of the superconducting transmitter and receiver resonance coils .....	9
Fig. 3-2 Inductance values according to coil diameter using HFSS .....	12
Fig. 3-3 $S_{11}$ according to the diameter of the coil .....	13
Fig. 3-4 $S_{21}$ according to the diameter of the coil .....	14
Fig. 3-5 Inductance values according to the number of turns of the coil using HFSS .....	17
Fig. 3-6 $S_{11}$ according to the number of turns of the coil .....	19
Fig. 3-7 $S_{21}$ according to the number of turns of the coil .....	20
Fig. 3-8 Superconducting wire .....	22
Fig. 3-9 Component of superconducting wire .....	23
Fig. 3-10 LCR Meter .....	24
Fig. 3-11 Network Analyzer .....	25
Fig. 3-12 Cooling vessel .....	26
Fig. 3-13 Experimental measurement using network analyzer .....	27
Fig. 3-14 Superconducting resonance coils according to the coil diameter .....	28
Fig. 3-15 Experimental S-parameter values according to the coil diameter .....	30
Fig. 3-16 Superconducting resonance coils according to the number of turns .....	31
Fig. 3-17 Experimental S-parameter values by the turns of coil .....	33

## ABSTRACT

### Study on the Superconducting Resonance Coil for the High Efficiency Wireless Power Transmission

No A Park

Advisor : Prof. Hyo Sang Choi, Ph.D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

With the development and availability of various electronic devices such as smart phones, tablet PCs, and laptops, people can use such electronic devices without being restricted by time and space in a fast and convenient manner. Most electronic devices are being charged through wires. As the wired charging method uses cables, such devices that use this charging method cannot move during charging and are restricted by space. In addition, if contact failure or damage occurs at charging terminals, charging may not be performed or electric shock may occur. Interest in wireless power transmission(WPT) has increased rapidly to address such problems of the wired charging method, and related studies have been conducted all over the world. WPT is a technology that can transmit power without using cables. As cables are not used, it is possible to move the devices during charging. Furthermore, there is no risk of contact failure or electric shock because charging terminals are not used.

WPT can be largely classified into three types: A magnetic induction type, a magnetic resonance type, and a microwave type. The most popular type at the moment is the magnetic resonance type, which was proposed for the first time

by the Marin Soljagic research team of MIT in the United States in 2007. This type can transmit several kW of power up to several meters and enable multiple charging by using the resonance phenomenon of transmitting and receiving coils. It is also not harmful for human bodies. However, power loss is large, and the values of the inductance(L) and the capacitance(C) vary significantly depending on the design of the coils, which may dramatically affect the efficiency. To address this problem, research on the efficiency improvement is essential.

In this paper, superconducting coils were used to improve the efficiency of the magnetic resonance type WPT and the optimal design of the superconducting coils was investigated. Resonance is a phenomenon in which a specific frequency is selectively blocked or passed when L and C repeat the process of accumulating and discharging energy in electric and magnetic fields. When resonance occurs, if either L or C is stronger, energy is deflected and loss occurs. When L and C are equal in force, the force equilibrium prevents loss. In other words, when the imaginary part(X) of the impedance(Z) is zero, the force equilibrium is reached and no loss occurs. For this reason, the values of L and C are very important factors in the magnetic resonance type.

The values of L and C were calculated using high frequency structure simulation(HFSS) according to the diameters and the turns of the superconducting resonance coils. The optimal values of the superconducting resonance coils were derived by analyzing their S-parameters. Furthermore, actual coils were fabricated using the optimal design values of the superconducting transmitting and receiving resonance coils found through simulation, and their S-parameters were analyzed. As a result, S11 was approximately -15 dB and S21 was approximately -2.5 dB on average when the coils were designed using arbitrary design values. In the case of the superconducting transmitting and receiving resonance coils designed using the optimal values, S11 decreased by -9.06 dB to -24.06 dB and S21 increased by

1.22 dB to -1.28 dB. If optimal superconducting resonance coils are designed considering the values of L and C, it is possible to implement a WPT system with a high power transmission characteristic value.

## I. 서론

무선전력전송(Wireless Power Transfer) 기술은 편리함과 실용성을 추구하는 이 시대에 가장 필요한 기술이다. 스마트폰, 태블릿 PC, 노트북 등 각종 전자기기의 발전과 보급으로 사용자들은 시간과 장소의 제약 없이 빠르고 편리하게 전자기기를 사용할 수 있게 되었다. 현재 거의 대부분의 전자기기들은 유선 충전 방식을 사용하고 있다. 유선 충전 방식은 케이블을 사용하기 때문에 충전 중에 이동할 수 없으며 공간의 제약을 받는다. 또한 충전 단자 부분에서 접촉 불량이나 발생하거나 파손이 발생하면 충전이 되지 않거나 감전사고가 발생할 수 있다.

이러한 유선 충전 방식의 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 무선전력전송에 대한 관심이 급증하였다. 무선전력전송이란 케이블을 사용하지 않고 전력을 전달할 수 있는 기술을 말한다. 케이블을 사용하지 않기 때문에 자유롭게 이동하면서 충전이 가능하며 공간의 제약을 받지 않는다. 또한 충전 단자를 사용하지 않기 때문에 접촉 불량 및 감전사고의 우려도 없다. 무선전력전송 방식은 크게 자기유도방식, 자기공진방식, 마이크로파방식 3가지로 구분할 수 있다[1-4].

자기유도방식은 송신코일에 교류전원을 인가하면 발생하는 자기장이 수신코일을 통과하면서 발생시키는 유도 기전력을 이용하여 전력을 전송하는 방식이다. 동작 주파수는 수 kHz ~ 수백 kHz 대역의 주파수를 사용하기 때문에 인체 유해성이 없다. 또, 수십 W의 전력을 90% 이상의 높은 효율로 전송할 수 있으며, 시스템의 소형화가 가능하다. 하지만 전송거리가 수 mm 내외로 매우 짧으며, 송신코일과 수신코일간의 배치에 따라 충전효율이 각각 달라지는 단점이 있다. 주로 모바일 기기, 노트북, 전동칫솔 등의 기기에 사용된다.

마이크로파방식은 송신 안테나에서 GHz대역의 마이크로파를 방사하면 수신 안테나가 수신한 후 전력으로 변환하는 방식이다. 동작 주파수는 수 GHz 대역의 마이크로파를 사용하기 때문에 인체에 매우 치명적이다. 고출력의 전력을 수십 km까지 전달할 수 있지만 전송효율이 낮다. 그렇기 때문에 인공위성, 무인 항공기, 우주 태양광 발전 등 초 장거리 전송이 필요한 곳에 사용된다.

3가지 무선전력전송 방식 중 가장 각광받고 있는 방식은 자기공진방식이다. 2007년 미국 MIT의 Marin Soljacic 연구팀이 처음 제안한 방식으로 송신코일과 수신코일이 같은 주파수에서 공진할 때 전자파가 근거리 자기장을 통해 이동하는 방식이다. 동작 주파수는 수십 kHz ~ 수 MHz 대역의 주파수를 사용하기 때문에 인체 유해성이 없다. 수 kW의 전력을 최대 수 m까지 전달할 수 있으며, 다중 충전이 가능하고 충전 시 자유도가 높다. 하지만 전력 손실이 크고, 송·수신 코일의 설계에 따라서 효율이 급격하게 변하는 문제점이 있다. 그렇기 때문에 높은 효율을 갖는 코일 설계에 관한 연구가 필요하다[5-6].

본 논문에서는 초전도 자기공진방식 무선전력전송의 효율을 개선하기 위해 초전도 송·수신 공진코일 최적 설계에 관한 연구를 진행하였다. Ansoft 사의 HFSS(High Frequency Structure Simulation) 프로그램으로 코일의 직경과 감은 횟수의 변화에 따른 특성을 분석하고 무선전력전송 효율을 개선시키고자 한다. 또한 실제 초전도 무선전력전송 시스템을 제작하여 그 특성을 분석하였다.

## II. 이론적 고찰

### A. 자기공진방식 무선전력전송

#### 1. 자기공진방식 무선전력전송 시스템 구성

자기공진방식 무선전력전송 시스템은 송신측 공진코일의 전력이 자기장을 통해서 같은 공진주파수를 가지고 있는 수신측 공진코일로 전달된다[6]. 이때 송신측과 수신측 공진코일은 설계조건이 동일해야 높은 효율로 전력이 전달된다. Fig. 2-1은 자기공진방식 무선전력전송 시스템의 등가회로를 나타낸 회로도이다.  $V_S$ 는 전원,  $R_S$ 와  $R_L$ 은 송·수신 공진코일의 저항,  $C_S$ 와  $C_L$ 은 송·수신 공진코일의 커패시턴스,  $L_S$ 와  $L_L$ 은 송·수신 공진코일의 인덕턴스,  $Z_L$ 은 부하 임피던스를 나타낸다[7].

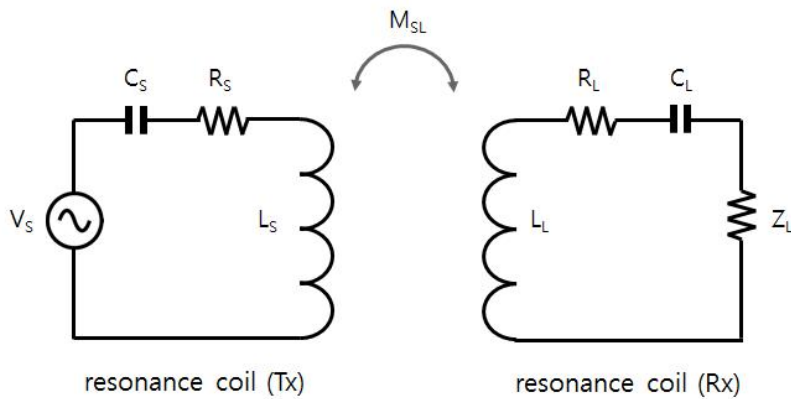


Fig. 2-1 Equivalent circuit of magnetic resonance type WPT system

## 2. 공진

자기공명 무선전력전송에서 인덕턴스(L)와 커패시턴스(C)는 매우 중요한 요소이다. 인덕턴스는 유도용량으로, 회로에 흐르는 전류의 변화에 의해 전자기 유도로 생기는 역기전력의 비율을 나타내는 양이다. 커패시턴스는 정전용량으로, 전압을 가했을 때 축적되는 전하량의 비율을 나타낸다.

LC회로에 주파수를 인가하면 인덕턴스와 커패시턴스가 전기장과 자기장으로 에너지를 축적하고 방출하는 과정을 반복한다. 그 과정에서 특정 주파수를 선택적으로 막거나 통과하게 하는데 이러한 현상을 공진이라고 하며, 공진이 일어나는 특정 주파수를 공진주파수라고 한다. 식 (1)은 공진주파수의 계산식이다. 인덕턴스와 커패시턴스에 따라서 공진주파수가 달라질 수 있다[8].

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

식 (2), (3)에서 Z, R, X는 각각 임피던스, 저항, 리액턴스를 의미한다. 식 (2)는 임피던스의 계산식이다. 코일의 임피던스는 저항과 리액턴스로 구성된다. 리액턴스는 공진이 일어날 때 인덕턴스 또는 커패시턴스 어느 한쪽의 힘이 크면 에너지가 편향되어 손실이 발생한다. 하지만 인덕턴스와 커패시턴스의 힘이 같은 경우 힘의 평형을 이루어 손실이 발생하지 않는다. 즉 임피던스의 허수부인 리액턴스가 0일 때, 인덕턴스와 커패시턴스의 힘이 평형을 이루어 손실이 발생하지 않는다. 식 (3)은 리액턴스를 나타내는 식이며 인덕턴스와 커패시턴스의 차이에 의해 리액턴스 성분을 0으로 만들 수 있다.

$$Z = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} \quad (3)$$



Fig. 2-2는 인덕턴스와 커패시턴스의 상관관계를 나타내는 그래프이다. 인덕턴스와 커패시턴스 성분이 동일한 크기를 나타낼 때, 특정 구간에서 선택적 특성이 나타나게 되며, 이때 이 지점을 공진주파수(Resonance Frequency ;  $F_r$ )이라고 한다. 공진주파수의 선택적 특성을 높이기 위해서는 인덕턴스와 커패시턴스 성분의 합이 매우 중요하다.

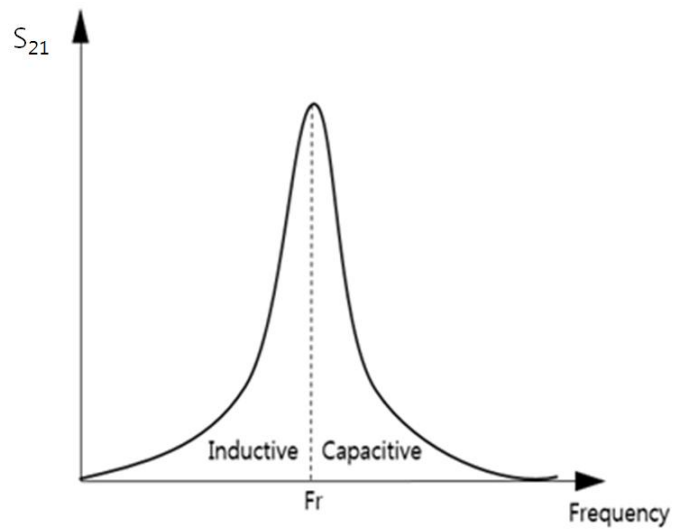


Fig. 2-2 Correlation between inductance and capacitance

## B. 초전도체

일반적인 금속은 절대온도 0 K(-273.16 °C)에서 저항 값을 갖는다. 반면에 초전도체는 특정 온도 이하에서 저항 값이 0이 된다. 이러한 현상은 1911년 Kamerlingh-Onnes에 의해서 발견된다. 4.2K 이하에서 수은의 저항 값이 0이 되는 것을 발견하였고, 이후 주석과 납에서도 같은 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 1913년 국제학회에서 Onnes에 의해 발견된 현상을 나타내는 물체를 초전도체라고 명명하였고 현재까지 사용하고 있다. Fig. 2-3은 초전도체의 임계곡선 그래프이다. 초전도 현상에는 3가지 임계값이 존재한다. 각각 임계온도, 임계자장, 임계전류밀도이다. 온도, 자장, 전류밀도가 모두 임계값 이하가 된다면 저항 값이 0이 된다. 이와 같은 특성을 나타내는 초전도체는 무선전력전송에 적용하여 사용할 수 있다[9-10].

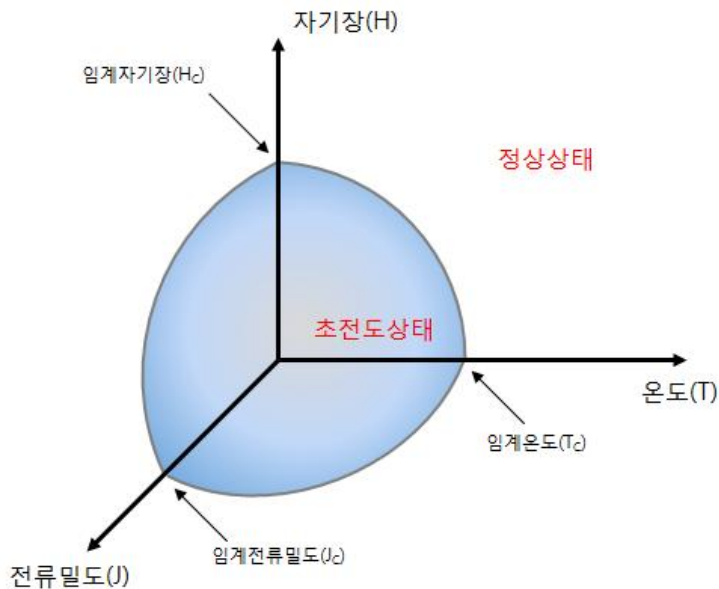


Fig. 2-3 The critical curve of superconductivity

Quality - factor(Q-factor)는 자기공진방식 무선전력전송의 성능을 나타내는 중요한 요소이다. 송·수신 코일에서의 에너지 저장에 대한 자체 손실 정도를 나타내는 계수를 뜻한다. 또한 Q-factor는 주파수의 선택적 특성을 나타내는 값으로 값이 클수록 해당 주파수에서 공진 특성이 좋다고 할 수 있다. 이러한 Q-factor는 식 (4)에서 확인할 수 있듯이 코일의 인덕턴스에 비례하고, 저항 값에 반비례한다. 기존의 무선전력전송에 사용되는 상전도 코일은 저항 값을 가지고 있기 때문에 인덕턴스를 증가시켜도 Q-factor를 향상시키는데 한계가 있었다. 하지만 초전도체는 임계온도 이하에서 저항 값이 0이 되기 때문에 초전도체를 사용하면 상전도체를 사용했을 때 보다 더 높은 Q-factor를 가질 수 있다[10-12].

$$Quality-factor = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi fL}{R} \quad (4)$$

### C. 헬리컬 코일의 인덕턴스

자기공진방식 무선전력전송은 송·수신 공진코일을 이용한 공진현상에 의해 전력을 전송한다. 공진이 일어날 때 코일의 인덕턴스는 매우 중요한 요소이다. 인덕턴스에 의해서 공진주파수가 결정되며, 전력전송 효율도 인덕턴스에 따라 증가하거나 감소한다. 이러한 인덕턴스는 코일의 설계에 따라 변화한다[13-19].

Fig. 2-4는 헬리컬 코일의 파라미터를 나타낸다. 이때, H는 코일의 높이, D는 코일의 지름, P는 도선간의 간격, N은 감은 횟수이다. 식 (5)는 헬리컬 코일의 인덕턴스를 계산하는 식이다. 식 (5)에서 확인할 수 있듯이 헬리컬 코일의 지름, 높이, 감은 횟수에 따라 코일의 인덕턴스가 변화하게 된다.

$$L = \frac{D^2 N^2}{0.45D + H} [\mu H] \quad (5)$$

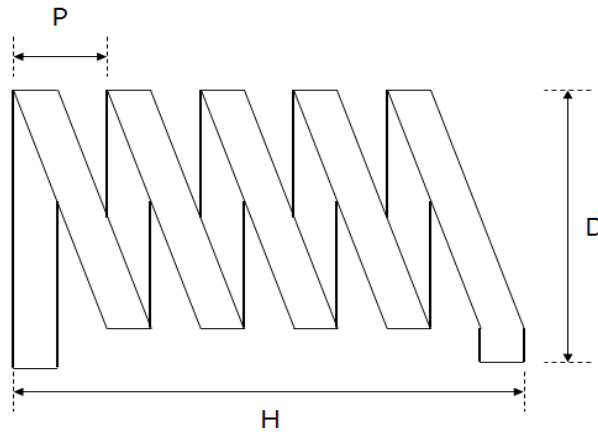


Fig. 2-4 Design parameters of helical coil

### Ⅲ. 실험 및 고찰

#### A. 시뮬레이션 설계 및 해석

ANSYS의 HFSS(High frequency structure simulation) 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 3-1과 같이 냉각용기 내부를 각각 송신 코일( $T_x$ ), 수신 코일( $R_x$ )로 구성하였으며, 헬리컬 방식으로 권선하였다[20]. 1 W의 전력을 인가하였으며 송·수신 공진코일간의 거리는 30 cm로 고정시켰다. 송·수신 공진코일의 재질은 초전도체를 적용하였다. 공진주파수는 AirFuel Alliance의 표준 주파수인 6.78 MHz로 설정하였다.

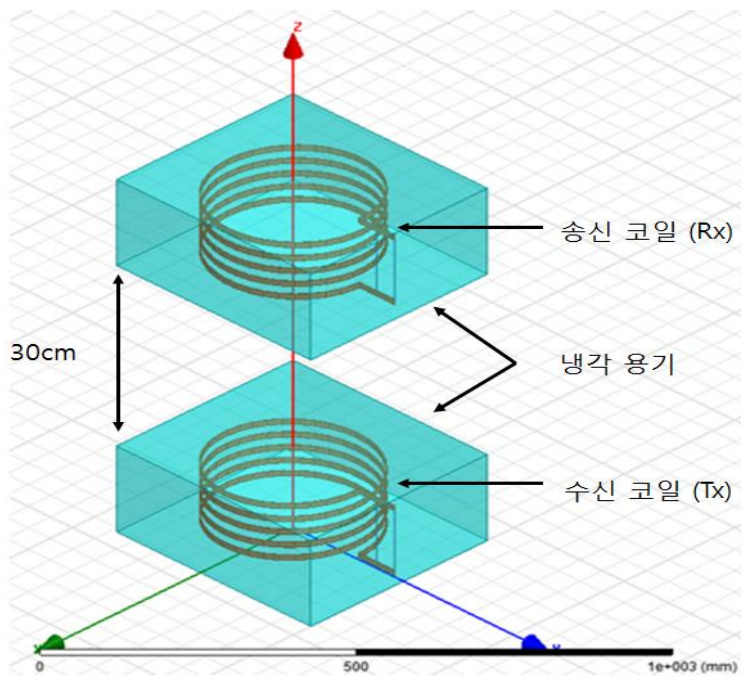


Fig. 3-1 The modeling of the superconducting transmitter and receiver resonance coils

## 1. 코일 직경에 따른 무선전력전송 특성

우선 초전도 송·수신 공진코일 직경의 변화에 따른 무선전력전송 특성을 분석하였다. Table 3-1은 초전도 송·수신 공진코일의 파라미터 값이다. 초전도 송·수신 공진코일의 감은 횟수는 3회로 설정하였고, 높이는 67.5 mm, 도선간의 간격은 22.5 mm, 공진주파수는 6.78 MHz로 설정하였다. 직경의 값을 50 mm부터 400 mm까지 50 mm간격으로 증가시키면서 각각의 반사계수( $S_{11}$ )와 투과계수( $S_{21}$ )를 측정하였다.  $S_{11}$ 은 송신측과 수신측의 임피던스 차에 의해서 발생하는 반사량을 입력전압과 반사전압의 비로 계산한 지표를 말하며, 값이 작을수록 특성이 좋다고 할 수 있다.  $S_{21}$ 은 송신측에서 보낸 전자기파가 수신측을 통과했을 때 그 정도를 가리키는 것으로, 값이 클수록 특성이 좋다고 할 수 있다.

Table 3-1 Design parameters of the superconducting resonance coil according to the diameter

D (mm)	H (mm)	N (turn)	p (mm)	Fr (MHz)
50	67.5	3	22.5	6.78
100				
150				
200				
250				
300				
350				
400				

Table 3-1의 파라미터 값을 가지고 식 (5)를 이용하여 코일의 인덕턴스를 산출하였다. 그리고 식 (1)을 이용하여 6.78 MHz에서 공진할 수 있는 커패시턴스를 계산하였다. Table 3-1의 파라미터 값과 동일한 값으로 모델링 하였으며, 모델링 한 무선전력전송 코일의 인덕턴스를 HFSS를 통하여 측정하였다. 식 (5)를 통해 알 수 있듯이 초전도 공진코일의 직경이 증가할수록 인덕턴스는 증가하였다.

Table 3-2는 HFSS를 이용하여 측정된 인덕턴스와 식 (5)를 이용하여 계산한 인덕턴스이다. 이때 식 (1)을 이용하여 6.78 MHz에서 공진되는 커패시턴스를 산출하였다. Fig. 3-2는 HFSS를 이용하여 측정된 공진 코일의 직경에 따른 인덕턴스 그래프이다. 코일의 직경을 50 mm부터 400 mm까지 증가시켰을 때 코일의 인덕턴스는 각각 0.31, 0.85, 1.53, 2.29, 3.11, 3.96, 4.8, 5.7  $\mu\text{H}$  측정되는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3-2 Inductance and capacitance value due to coil diameter

D (mm)	L ( $\mu\text{H}$ ) by HFSS	L ( $\mu\text{H}$ ) by calculation	C (pF)
50	0.31	0.25	2204.1
100	0.85	0.79	697.5
150	1.53	1.48	372.3
200	2.29	2.25	244.9
250	3.11	3.08	178.9
300	3.96	3.94	140
350	4.8	4.82	114.3
400	5.7	5.73	96.2

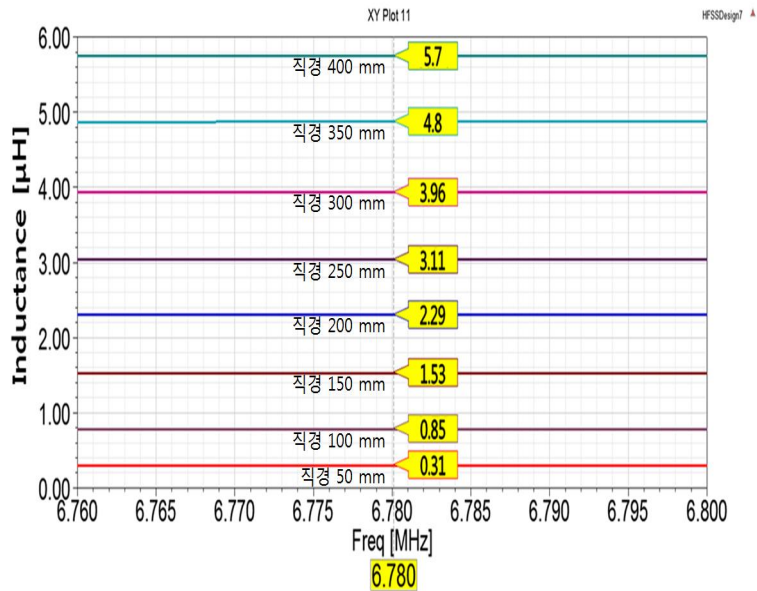
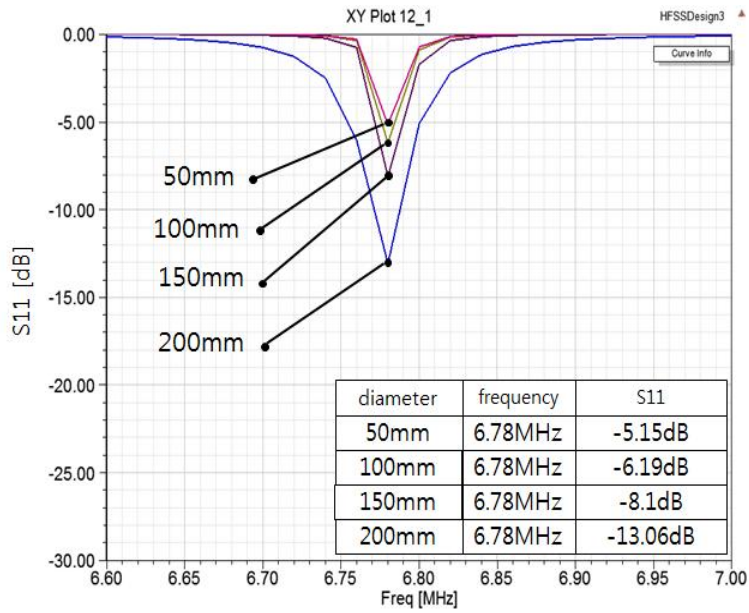


Fig. 3-2 Inductance values according to coil diameter using HFSS

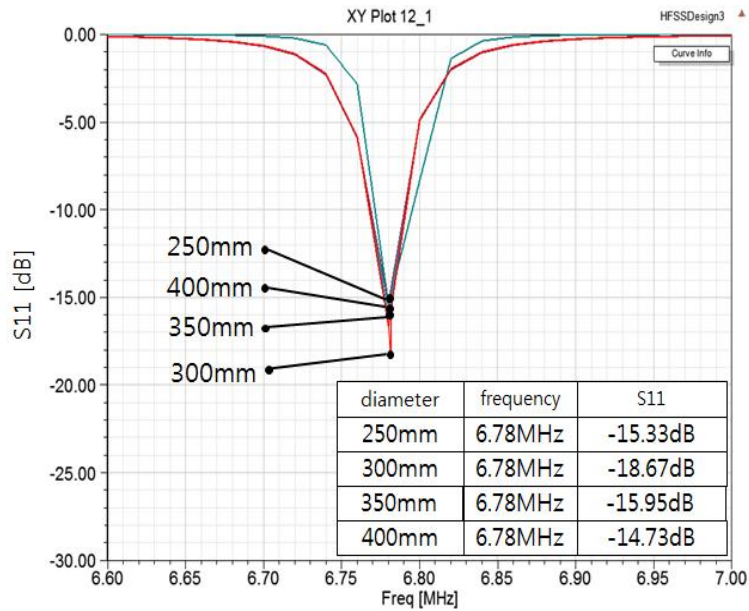
Fig. 3-3은 코일의 직경 변화에 따른 S-parameter 그래프이다. Fig. 3-3 (a)는 초전도 공진코일의 직경을 50 mm부터 200 mm까지 증가시켰을 때의  $S_{11}$  그래프이고, Fig. 3-3 (b)는 250 mm부터 400 mm까지 증가시켰을 때의  $S_{11}$  그래프이다. 50 mm부터 400 mm까지  $S_{11}$  값은 각각 -5.15, -6.19, -8.1, -13.06, -15.33, -18.67, -15.95, -14.73 dB인 것을 확인할 수 있었다. 직경을 50 mm부터 300 mm까지 50 mm씩 증가시켰을 때  $S_{11}$  값이 조금씩 감소했다. 하지만 350 mm부터  $S_{11}$  값이 증가했다. 초전도 공진코일의 직경이 300 mm일 때  $S_{11}$  값이 -18.67 dB로 가장 작은 값을 나타냈다.

Fig. 3-4 (a)는 초전도 공진코일의 직경을 50 mm부터 200 mm까지 증가시켰을 때의  $S_{21}$  그래프이고, Fig. 3-4 (b)는 250 mm부터 400 mm까지 증가시켰을 때의  $S_{21}$  그래프이다. 50 mm부터 400 mm까지  $S_{21}$  값은 각각 -3.45, -3.02, -2.84, -2.53, -2.24, -1.95, -2.13, -2.35 dB인 것을 확인할 수 있었다. 직경을 50 mm부터 300 mm까지 50 mm씩 증가시켰을 때  $S_{21}$  값이 점차적으로 증가했다. 하지만 350 mm부터  $S_{21}$  값이 감소했다. 초전도 공진코일의 직경이 300 mm일 때  $S_{21}$  값이 -1.95 dB로 가장 높은 값을 나타냈다.



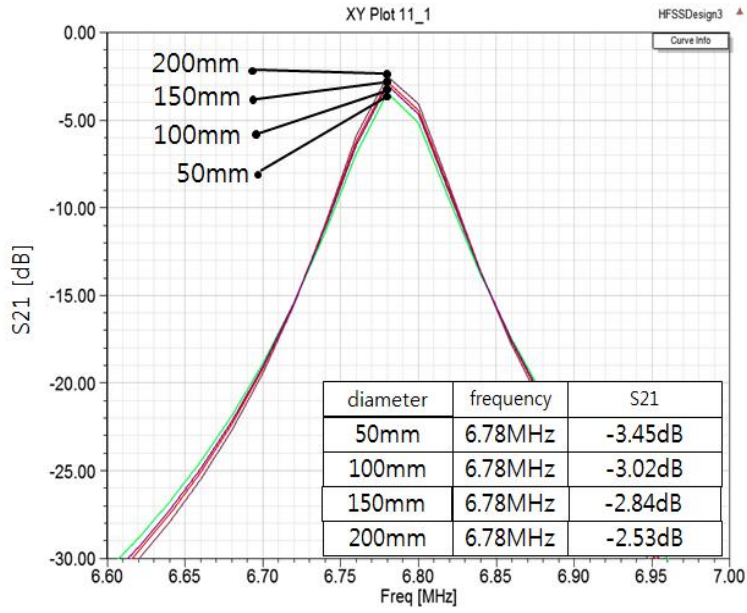


(a) 50 mm ~ 200 mm

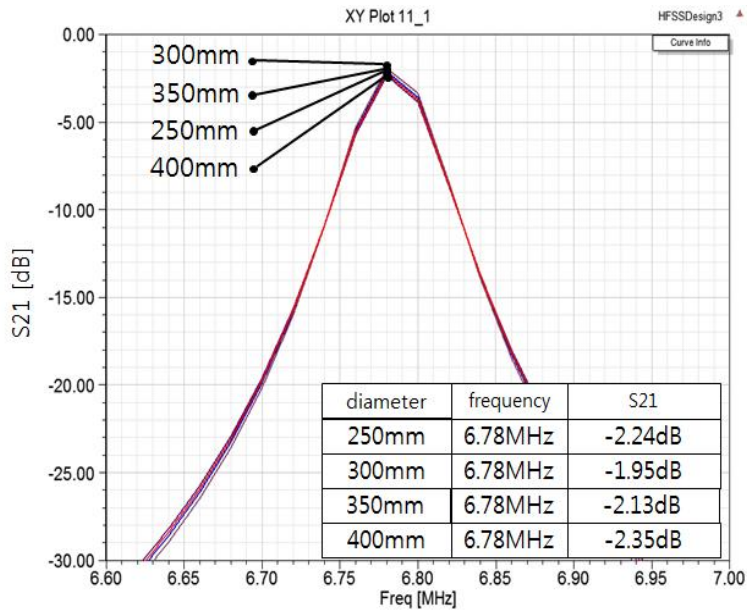


(b) 250 mm ~ 400 mm

Fig. 3-3 S<sub>11</sub> according to the diameter of the coil



(a) 50 mm ~ 200 mm



(b) 250 mm ~ 400 mm

Fig. 3-4  $S_{21}$  according to the diameter of the coil

초전도 공진코일 임피던스의 허수부인 리액턴스가 0일 때 인덕턴스와 커패시턴스의 힘은 평형을 이루게 되고, 그때 손실이 발생하지 않는 공진이 이루어진다. Table 3-3은 식 (3)을 이용하여 계산한 공진코일의 직경을 50 mm부터 400 mm까지 증가시켰을 때의 리액턴스이다. 50 mm부터 400 mm까지 인덕터의 리액턴스는 13.2, 36.19, 65.14, 97.5, 132.42, 168.61, 204.38, 242.7 Ω이 나타났고, 커패시터의 리액턴스는 10.66, 33.67, 63.08, 95.9, 131.28, 167.76, 205.48, 244.14 Ω이 나오는 것을 확인할 수 있었다. 인덕터의 리액턴스와 커패시터의 리액턴스를 식 (3)에 대입하여 리액턴스를 계산한 결과 50 mm부터 400 mm까지 리액턴스는 각각 2.54, 2.52, 2.06, 1.6, 1.14, 0.85, -1.1, -1.44 Ω인 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 코일의 세부단위까지 활용한 정교한 설계가 아닌 일반적으로 가장 많이 활용되는 파라미터 값을 변수로 지정하였다. 그리고 코일의 인덕턴스를 식 (5)를 통해 산출하였다. 이때, 6.78 MHz의 공진주파수를 갖기 위해 코일의 인덕턴스를 이용하여 커패시턴스를 산출하였다. 그렇기 때문에 허수부의 리액턴스(X)가 완벽한 0 Ω이 될 수 없었다. 하지만 일반적인 코일의 파라미터 값에서 최대 전송 효율을 위해 리액턴스가 0 Ω에 가장 가까운 파라미터를 확인할 수 있었다. S<sub>11</sub>과 S<sub>21</sub>의 특성이 가장 좋았던 300 mm일 때의 리액턴스가 0.85 Ω으로 가장 0 Ω에 가까운 것을 확인할 수 있었다.

Table 3-3 Reactance value of resonance coil by the coil diameter

D (mm)	X <sub>L</sub> (Ω)	X <sub>C</sub> (Ω)	X (Ω)
50	13.2	10.66	2.54
100	36.19	33.67	2.52
150	65.14	63.08	2.06
200	97.5	95.9	1.6
250	132.42	131.28	1.14
300	168.61	167.76	0.85
350	204.38	205.48	-1.1
400	242.7	244.14	-1.44

## 2. 감은 횟수에 따른 무선전력전송 특성

다음으로 초전도 송·수신 공진코일의 감은 횟수에 따른 무선전력전송 특성을 분석하였다. Table 3-4는 초전도 송·수신 공진코일의 파라미터 값이다. 초전도 송·수신 공진코일의 직경은 300 mm로 설정하였고, 도선간의 간격은 22.5 mm, 공진주파수는 6.78 MHz로 설정하였다. 감은 횟수를 2회부터 9회까지 증가시키면서 각각의 반사계수( $S_{11}$ )와 투과계수( $S_{21}$ )를 측정하였다.

Table 3-4 Design parameters of the superconducting resonance coil according to the number of turns

N (turn)	H (mm)	D (mm)	p (mm)	Fr (MHz)
2	45	300	22.5	6.78
3	67.5			
4	90			
5	113			
6	135			
7	158			
8	180			
9	203			

Table 3-5는 Table 3-4의 파라미터 값을 이용하여 계산한 코일의 인덕턴스와 HFSS 모델링을 통해 측정한 인덕턴스를 비교한 표이다. 또, 6.78 MHz에서 공진될 수 있도록 식 (1)을 이용하여 커패시턴스를 산출하였다. 측정한 결과 계산한 인덕턴스와 측정한 인덕턴스가 거의 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 식 (5)를 통해 알 수 있듯이 초전도 공진코일의 감은 횟수가 증가할수록 인덕턴스는 증가하였다. Fig. 3-5는 HFSS를 이용하여 측정한 공진 코일의 감은 횟수에 따른 인덕턴스 그래프이다. 코일의 감은 횟수를 2회부터 9회까지 증가시켰을 때 코일의 인덕턴스는 각각 2, 3.96, 6.31, 8.95, 11.8, 14.85, 18, 21.26  $\mu\text{H}$ 가 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3-5 Inductance and capacitance value by the number of turns

N (turn)	L ( $\mu$ H) by HFSS	L ( $\mu$ H) by Calculation	C (pF)
2	2	1.97	279.7
3	3.96	3.94	140
4	6.31	6.3	87.5
5	8.95	8.95	61.6
6	11.8	11.81	46.7
7	14.85	14.84	37.1
8	18	18	30.6
9	21.26	21.26	25.9

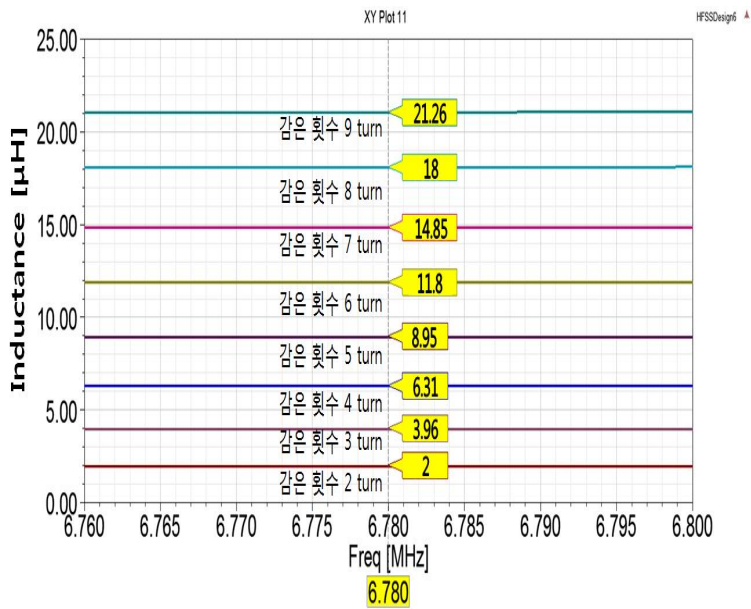
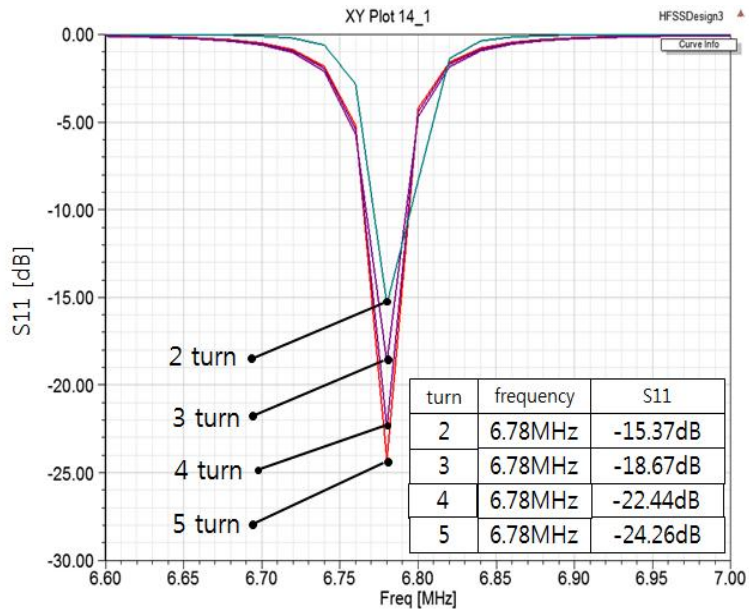


Fig. 3-5 Inductance values according to the number of turns of the coil using HFSS

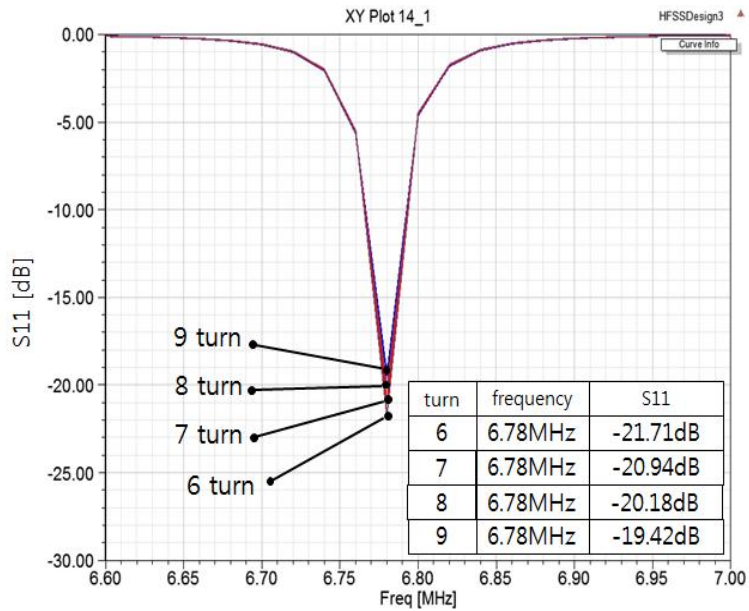
Table 3-4의 파라미터 값으로 설계한 각각의 초전도 공진코일에 계산된 커패시턴스를 입력하여 6.78 MHz에서 공진이 일어나도록 설계한 후  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 을 측정하였다. 설계된 초전도 공진코일은 6.78 MHz에서 정확하게 공진이 이루어졌다.

Fig. 3-6 (a)는 초전도 공진코일의 감은 횟수를 2회부터 5회까지 증가시켰을 때의  $S_{11}$  그래프이고, Fig. 3-6 (b)는 6회부터 9회까지 증가시켰을 때의  $S_{11}$  그래프이다. 2회부터 9회까지  $S_{11}$  값은 각각 -15.37, -18.67, -22.44, -24.26, -21.71, -20.94, -20.18, -19.42 dB인 것을 확인할 수 있었다. 감은 횟수를 2회부터 5회까지 1회씩 증가시켰을 때  $S_{11}$  값은 감소했다. 하지만 6회부터  $S_{11}$  값이 증가했다. 초전도 공진코일의 감은 횟수가 5회일 때  $S_{11}$  값이 -24.26 dB로 가장 작은 값을 나타냈다.

Fig. 3-7 (a)는 초전도 공진코일의 감은 횟수를 2회부터 5회까지 증가 시켰을 때의  $S_{21}$  그래프이고, Fig. 3-7 (b)는 6회부터 9회까지 증가시켰을 때의  $S_{21}$  그래프이다. 2회부터 9회까지  $S_{21}$  값은 각각 -2.13, -1.95, -1.33, -1.27, -1.43, -1.47, -1.51, -1.58 dB인 것을 확인할 수 있었다. 감은 횟수를 2회부터 5회까지 1회씩 증가시켰을 때  $S_{21}$  값이 점차적으로 증가했다. 하지만 6회부터  $S_{21}$  값이 감소했다. 초전도 공진코일의 감은 횟수가 5회일 때의  $S_{21}$  값이 -1.27 dB로 가장 높은 값을 나타냈다.

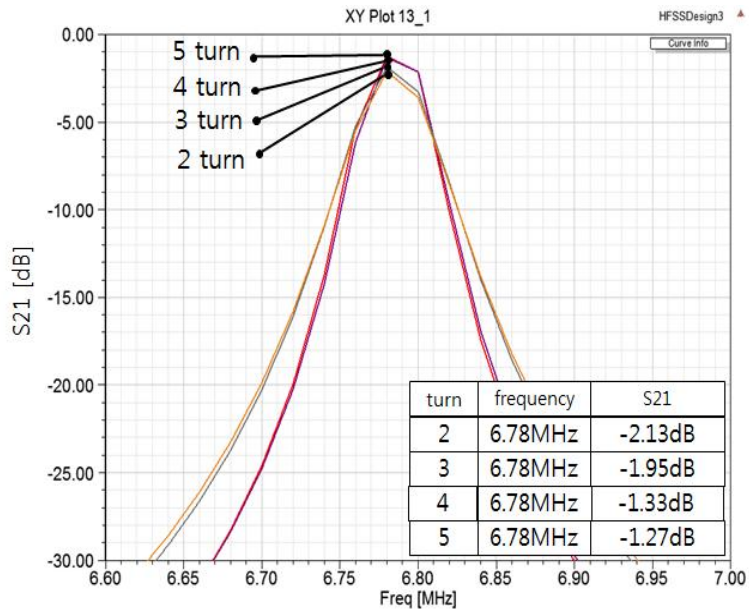


(a) 2turn ~ 5turn

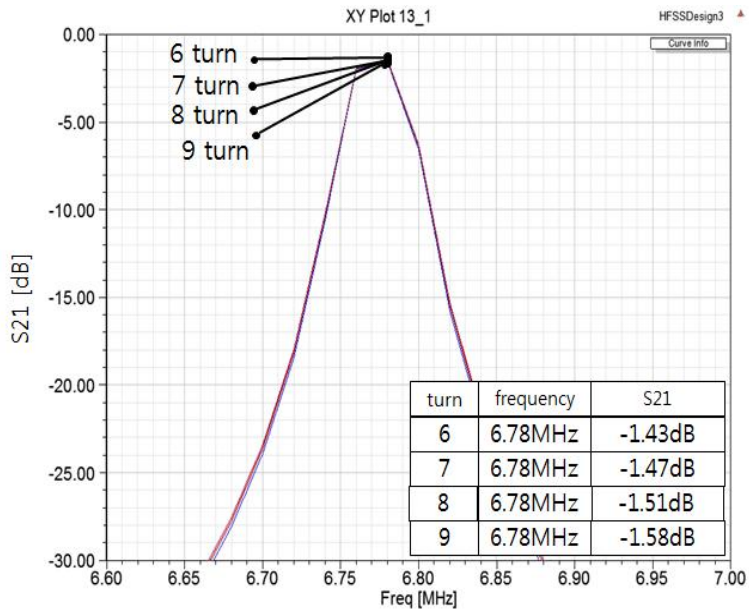


(b) 6turn ~ 9turn

Fig. 3-6  $S_{11}$  according to the number of turns of the coil



(a) 2turn ~ 5turn



(b) 6turn ~ 9turn

Fig. 3-7  $S_{21}$  according to the number of turns of the coil



Table 3-6은 식 (3)을 이용하여 공진코일의 리액턴스를 산출한 표이다. 식 (3)을 이용하여 공진코일의 감은 횟수를 2회부터 9회까지 증가시켰을 때의 리액턴스를 계산했다. 2회부터 9회까지 인덕터의 리액턴스는 85.16, 168.61, 268.67, 381.08, 502.43, 632.29, 766.41, 905.22  $\Omega$ 이 나타났고, 커패시터의 리액턴스는 83.97, 167.76, 268.41, 381.27, 502.92, 633.05, 767.52, 906.8  $\Omega$ 이 나오는 것을 확인할 수 있었다. 인덕터의 리액턴스와 커패시터의 리액턴스를 식 (3)에 대입하여 리액턴스를 계산한 결과 2회부터 9회까지 리액턴스는 각각 1.19, 0.85, 0.26, -0.19, -0.49, -0.76, -1.11, -1.58  $\Omega$ 인 것을 확인할 수 있었다. 코일의 직경 변화에 따른 인덕턴스 변화와 동일하게 코일의 감은 횟수 또한 정교한 설계가 아닌 일반적으로 많이 사용되는 파라미터 값을 변수로 설정하였다. 그렇기 때문에 리액턴스 값이 0  $\Omega$ 이 되지 못하였다. 하지만 코일의 일반적인 파라미터에서 리액턴스가 가장 0에 가까운 값을 확인할 수 있었다.  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 의 특성이 가장 좋았던 5회일 때의 리액턴스가 -0.19  $\Omega$ 으로 가장 0  $\Omega$ 에 가까운 것을 확인할 수 있었다.

Table 3-6 Reactance value of resonance coil by the number of turns

N (turn)	$X_L$ ( $\Omega$ )	$X_C$ ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )
2	85.16	83.97	1.19
3	168.61	167.76	0.85
4	268.67	268.41	0.26
5	381.08	381.27	-0.19
6	502.43	502.92	-0.49
7	632.29	633.05	-0.76
8	766.41	767.52	-1.11
9	905.22	906.8	-1.58

## B. 실험장비

HFSS 시뮬레이션 데이터를 기반으로 실제 실험을 진행하였다. 감은 횟수 3회, 높이 67.5 mm, 도선간의 간격 22.5 mm로 고정하고, 공진코일의 직경이 250 mm, 300 mm, 350 mm일 때의 S-parameter 특성을 시뮬레이션과 비교분석하였다. 또, 직경 300 mm, 도선간의 간격은 22.5 mm로 고정하고, 공진코일의 감은 횟수가 4회, 5회, 6회일 때의 S-parameter 특성을 시뮬레이션과 비교분석하였다.

### 1. 초전도 선재

Fig. 3-8은 실험에 사용된 SuperPower사의 SCS12050 초전도 선재이다. 초전도 선재의 구성 물질은 Fig. 3-9와 같이 Copper Stabilizer, Silver Overlayer, (RE)BCO-HTS(epitaxial), Buffer Stack, Substrate로 이루어져 있다, Table 3-7은 SCS12050 초전도 선재의 제원 값이다. 초전도 선재의 두께는 0.1 mm이며 폭은 12 mm이다.



Fig. 3-8 Superconducting wire

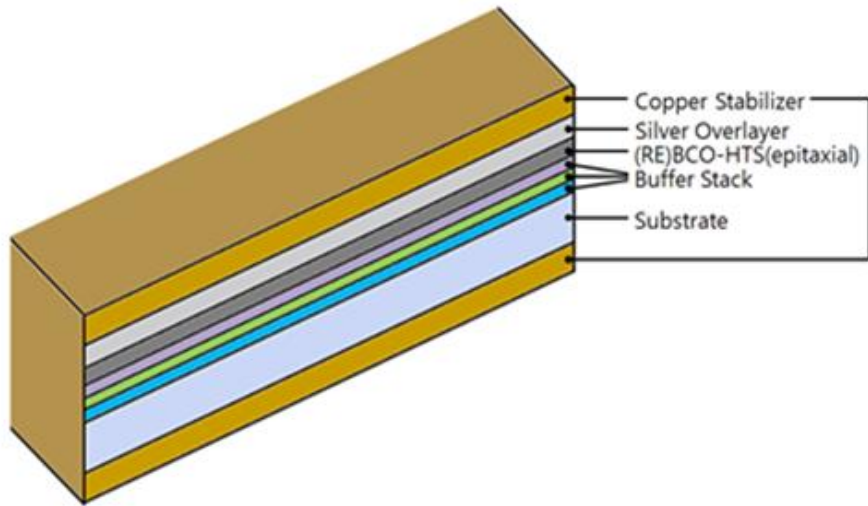


Fig. 3-9 Component of superconducting wire

Table 3-7 Specification of superconducting wire

Spec	SCS12050	Unit	Comment
Minimum $I_c$	240	amp	measured by continuous direct current
Width	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	at77 K
Critical Axial Tensile strain	0.45 %		at77 K
Critical Bend Diameter in Tension	11	mm	atroom temperature
Critical Bend Diameter in Compression	11	mm	atroom temperature

## 2. LCR Meter

Fig. 3-10은 LCR Meter의 사진이다. 코일의 저항, 인덕턴스, 커패시턴스를 측정할 때 사용하는 기기로, 초전도 송·수신 공진코일의 인덕턴스를 측정할 때 사용하였다. Table 3-8은 LCR Meter의 제원이다.



Fig. 3-10 LCR Meter

Table 3-8 Specification of LCR Meter

LCR Meter 제원	
Vrms	20 mV ~ 1 Vrms
High speed measurement	25 ms

### 3. Network Analyzer

Fig. 3-11은 Network Analyzer의 사진이다. 초전도 송·수신 공진코일의 S-parameter를 측정할 때 사용하였다. Table 3-9는 Network Analyzer의 제원이다. Frequency Range는 30 kHz ~ 6 GHz, Output Range는 -85 dBm ~ 10 dBm, Max Input은 10 dBm, S-parameter Test Set은 2채널이다.



Fig. 3-11 Network Analyzer

Table 3-9 Specification of network analyzer

Network Analyzer 제원	
Freq. Range	30 kHz ~ 6 GHz
Output Range	-85 dBm ~ 10 dBm
Max. Input	10 dBm
S-parameter Test Set	IN (2 Channel)

#### 4. 냉각용기

Fig. 3-12는 초전도 송·수신 공진코일을 냉각시킬 때 사용하는 냉각용기이다. 폴리스티렌과 PVC를 이용하여 제작하였으며, 초전도 코일을 냉각용기에 배치하고, 액체질소를 주입하여 초전도체의 특성을 유지하였다.



Fig. 3-12 Cooling vessel

### C. 실험 및 고찰

본 연구의 실제 실험을 위해 초전도 선재를 사용하여 초전도 송·수신 공진코일을 제작하였다. 제작한 초전도 송·수신 공진코일에 커패시터를 연결하여 6.78 MHz에서 동작하는 초전도 자기공진방식 무선전력전송 시스템을 구현하였다. 이를 가지고 Network Analyzer를 이용하여 S-parameter를 측정하였다. Fig. 3-13은 Network Analyzer를 사용하여 초전도 무선전력전송 시스템의 S-parameter를 측정하는 사진이다.



Fig. 3-13 Experimental measurement using network analyzer

## 1. 코일 직경에 따른 무선전력전송 특성

Fig. 3-14는 감은 횟수 3회, 높이 67.5 mm, 도선간의 간격 22.5 mm로 고정시키고, 공진코일의 직경을 250 mm부터 350 mm까지 증가시키면서 코일을 제작한 사진이다. 공진코일은 시뮬레이션 데이터를 기반으로 제작하였으며, 코일의 인덕턴스를 LCR Meter를 사용하여 측정하였다. 그 결과, 공진코일의 직경에 따른 인덕턴스는 각각 3.11, 3.96, 4.8  $\mu\text{H}$ 이다.



(a) 250 mm

(b) 300 mm

(c) 350 mm

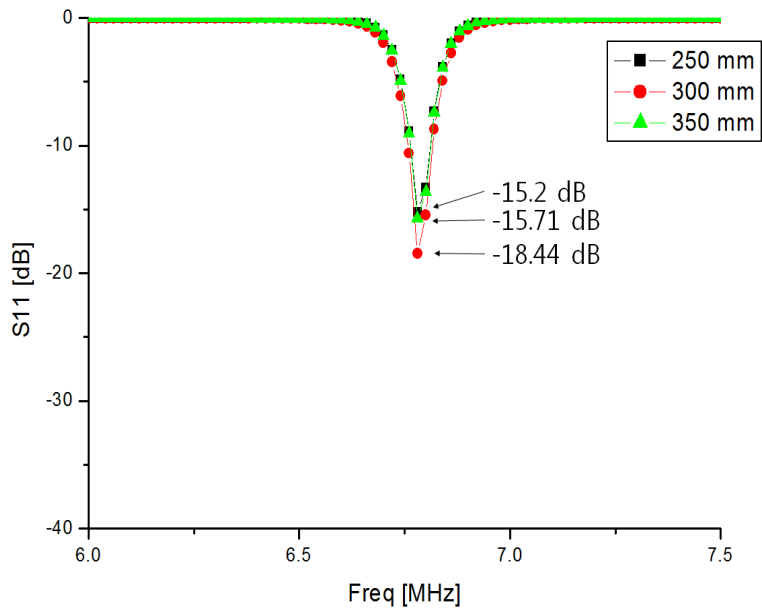
Fig. 3-14 Superconducting resonance coils according to the coil diameter



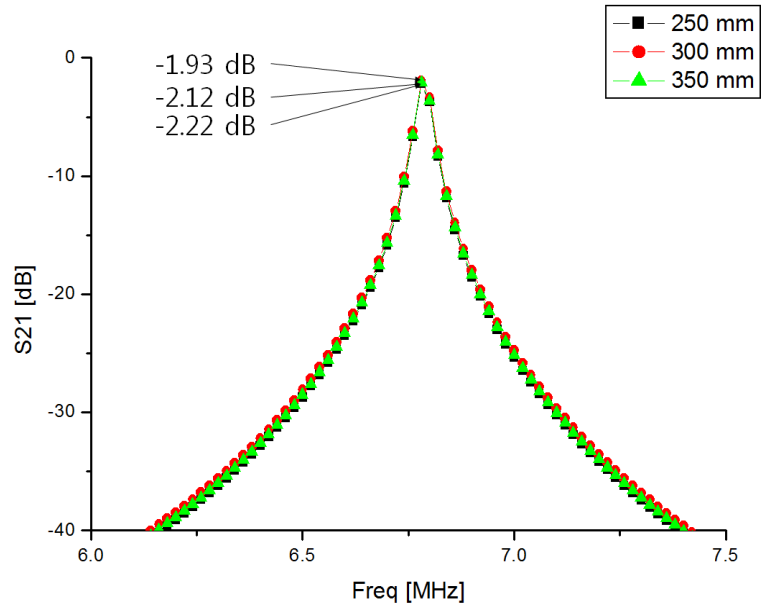
Fig. 3-15는 실험을 통해 측정된 S-parameter의  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 이다. Fig. 3-15 (a)는 코일의 직경이 각각 250, 300, 350 mm일 때 S-parameter의  $S_{11}$  그래프이다. 이 때,  $S_{11}$ 은 각각 -15.2, -18.44, -15.71 dB인 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3-15 (b)는 Fig. 3-15 (a)와 동일한 직경일 때  $S_{21}$  그래프이다. 그 결과  $S_{21}$ 은 각각 -2.22, -1.93, -2.12 dB인 것을 확인할 수 있었다. Table 3-10은 코일의 직경 변화에 따른 시뮬레이션과 실제 실험값을 비교한 표이다. 그 결과, 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 비교했을 때  $S_{11}$ 은 약 0.2 dB,  $S_{21}$ 은 약 0.01 dB만큼 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션과 실제 실험의 측정값이 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3-10 Simulation and experimental S-parameter  
according to the diameter of coils

D (mm)		250	300	350
$S_{11}$ (dB)	시뮬레이션	-15.33	-18.67	-15.95
	실험	-15.2	-18.44	-15.71
$S_{21}$ (dB)	시뮬레이션	-2.24	-1.95	-2.13
	실험	-2.22	-1.93	-2.12



(a)  $S_{11}$



(b)  $S_{21}$

Fig. 3-15 Experimental S-parameter values according to the coil diameter

## 2. 감은 횟수에 따른 무선전력전송 특성

Fig. 3-16은 직경 300 mm, 도선간의 간격 22.5 mm로 고정시키고, 감은 횟수를 4턴부터 6턴까지 증가시키면서 코일을 제작한 사진이다. 공진코일은 시뮬레이션 데이터를 기반으로 제작하였으며, 코일의 인덕턴스를 LCR Meter를 사용하여 측정하였다. 공진코일의 직경에 따른 인덕턴스는 각각 6.31, 8.95, 11.8  $\mu\text{H}$ 가 측정되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 4턴

(b) 5턴

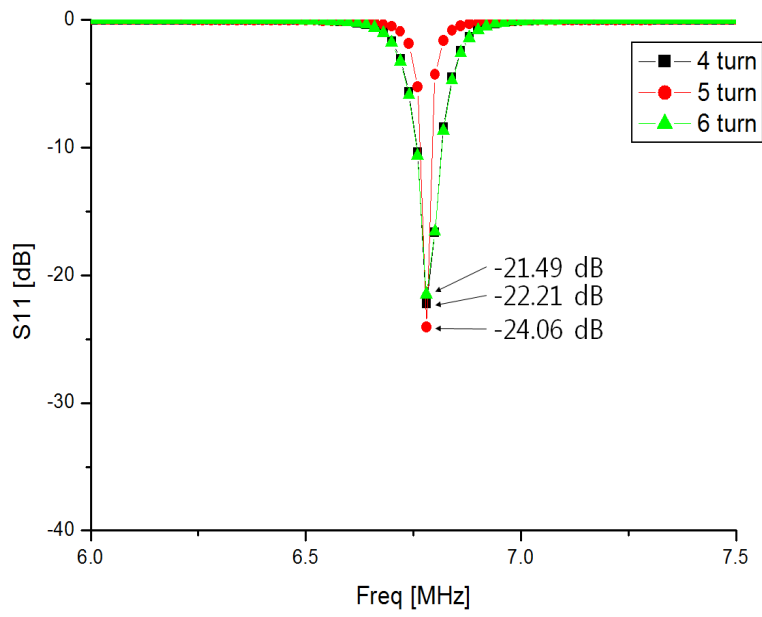
(c) 6턴

Fig. 3-16 Superconducting resonance coils  
 according to the number of turns

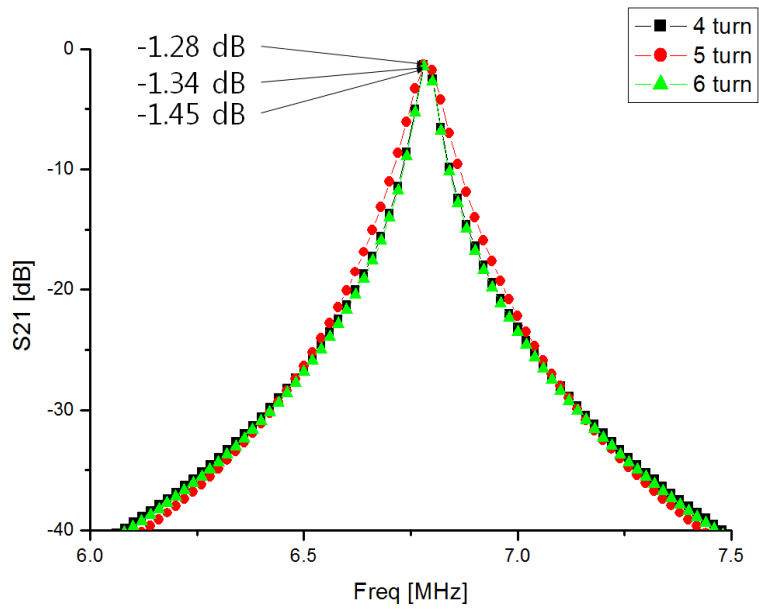
Fig. 3-17은 실험을 통해 측정된 S-parameter이다. Fig. 3-17 (a)는 코일의 감은 횟수가 각각 4, 5, 6회일 때 S-parameter의  $S_{11}$  그래프이다. 이때,  $S_{11}$ 은 각각 -22.21, -24.06, -21.49 dB이다. Fig. 3-17 (b)는 코일의 감은 횟수 변화에 따른  $S_{21}$  그래프이다. 코일의 감은 횟수는 각각 4, 5, 6회으로 변화하였으며,  $S_{21}$ 은 각각 -1.34, -1.28, -1.45 dB인 것을 확인할 수 있었다. Table 3-11은 코일의 감은 횟수에 따른 시뮬레이션과 실제 실험값을 비교한 표이다. 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 비교했을 때  $S_{11}$ 은 약 0.21 dB,  $S_{21}$ 은 약 0.01 dB만큼 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션과 실제 실험의 측정값이 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 6.78 MHz에서 실험을 통해 최적의 공진코일을 설계할 수 있었다.

Table 3-11 Simulation and experimental S-parameters by the turns of the coil

N (turn)		4	5	6
$S_{11}$ (dB)	시뮬레이션	-22.44	-24.26	-21.71
	실험	-22.21	-24.06	-21.49
$S_{21}$ (dB)	시뮬레이션	-1.33	-1.27	-1.43
	실험	-1.34	-1.28	-1.45



(a)



(b)

Fig. 3-17 Experimental S-parameter values by the turns of coil

(a)  $S_{11}$  (b)  $S_{21}$

## IV. 결론

본 논문에서는 6.78 MHz에서 동작하는 초전도 자기공진방식 무선전력전송 시스템의 효율을 개선시키기 위해 초전도 송·수신 공진코일 최적 설계에 관한 연구를 진행하였다. 초전도 자기공진방식 무선전력전송 시스템은 수신 코일( $T_X$ ), 송신 코일( $R_X$ )로 구성하였다. 이때 송·수신 공진코일의 직경과 감은 횟수를 변화시키면서 그에 따른 인덕턴스(L), 커패시턴스(C), S-parameter 특성을 시뮬레이션으로 분석하였다.

먼저, 초전도 송·수신 코일의 직경 변화에 따른 S-parameter를 분석하기 위해 직경을 50 mm부터 400 mm까지 50 mm간격으로 증가시키면서 S-parameter를 시뮬레이션을 이용하여 측정하였다. 그 결과 코일의 직경이 300 mm일 때,  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 이 각각 -18.67, -1.95 dB로 가장 좋은 특성을 나타냈다. 실제 초전도 코일을 제작하여 동일한 조건에서 S-Parameter를 측정하였을 때에도 300 mm에서 최대 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

다음으로 초전도 코일의 감은 횟수에 따른 S-parameter의  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 을 분석하였다. 이때, 감은 횟수는 2회에서 9회까지 증가시켰으며, 시뮬레이션과 실제 실험을 통해 비교 분석하였다. 그 결과, 코일의 감은횟수가 5회일 때,  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 이 약 -24.26, -1.27 dB로 가장 좋은 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

자기공진 무선전력전송 시스템은 공진이 일어날 때 인덕턴스 또는 커패시턴스 어느 한쪽의 힘이 크면 에너지가 편향되어 손실이 발생한다. 하지만 인덕턴스와 커패시턴스의 힘이 같은 경우 힘의 평형을 이루어 손실이 발생하지 않는다. 즉 임피던스(Z)의 허수부인 리액턴스(X)가 0이 되면서 최대전력전송을 할 수 있다. 코일의 직경과 감은 횟수가 증가하면, 코일이 가지고 있는 인덕턴스가 증가하게 되고, 커패시턴스는 상대적으로 줄어든다. 이와 같은 경우 두 리액턴스 값이 평형을 이루지 못하게 되면서 초전도 무선전력전송 시스템의 S-parameter 값이 서로 다른 특성을 나타내게 된다.

자기공진 무선전력전송 시스템은 효율과 거리에 대한 문제점이 해결된다면 즉각적인 상품화가 가능한 기술로써 수많은 산·학·연에서 효율과 거리 개선에 관한 연구를 진행하고 있다. 그 중, 초전도 코일은 임계온도 이하에서 0저항 특성을

갖기 때문에 무선전력전송 시스템의 효율 및 거리를 증가시킬 수 있어 많은 관심을 받고 있다. 초전도 코일의 0저항 특성을 이용한 효율 증가뿐만 아니라 본 연구에서 제안한 최적의 설계를 통해 효율을 극대화 시킨다면 무선전력전송 기술의 상용화를 앞당길 수 있을 뿐만 아니라, 전기자동차, 전기철도 등 중형, 대형 전기기기에도 무선전력전송이 가능하기 때문에 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 최효상, 정인성, “무선전력전송(Wireless Power Transfer) 시스템의 기술 개발 현황과 동향”, 전기의 세계, vol. 66, no.2, pp. 24-28, 2017.
- [2] 김광호, “무선전력전송 기술의 현황 및 표준화”, 전기저널, vol. 413, pp. 28-33, 2011.
- [3] Ambarnath Banerji, Tirthankar Datta, Gautam Bandyopadhyay, Sujit K. Biswas, Ayan Banerji, Arpan Banerji, “Wireless transfer of power: Status and challenges”, 2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation, pp. 251-257, 2016.
- [4] Mohammade Shidujaman, Hooman Samani, Mohammad Arif, “Wireless power transmission trends”, 2014 International Conference on Informatics, pp. 1-6, 2014.
- [5] 박영진, “자계 공명 무선전력전송 기술 연구”, 전력전자학회지, vol. 15, no.6, pp. 47-53, 2010.
- [6] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljacic, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” Science, vol. 317, 2007.
- [7] Tomohiro Amano, Hiroshi Hirayama, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, “A consideration of helical antennas for coupled resonant wireless power transfer using equivalent circuit”, 2012 International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 435-438, 2012.



- [8] 유은경, 고영호, “무선전력전송을 위한 High Q-factor LC 공진코일 설계 및 해석”, 한국정보기술학회논문지, vol. 12, no.1, pp. 9-16, 2014.
- [9] 정윤도, “초전도 코일을 이용한 무선전력전송기술”, 조명·전기설비, vol. 31, no.2, pp. 23-29, 2017.
- [10] In-Sung Jeong, Byung-Ik Jung, Don-Sang You, and Hyo-Sang Choi, “Analysis of S -Parameters in Magnetic Resonance WPT Using Superconducting Coils,” IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 26, Issue. 3, April 2016.
- [11] Yoon Do Chung, Chang Young Lee, Hyoungku, Young Gun Park, “Design Considerations of Superconducting Wireless Power Transfer for Electric Vehicle at Different Inserted Resonators”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no.4, 2016.
- [12] 정인성, 최효상, 정병익, 이유경, “초전도 수신 코일의 무선전력전송 특성”, 2015 대한전기학회 제 46회 하계학술대회, pp. 1561-1562, 2015.
- [13] 최재훈, “무선전력전송 기술 동향 및 자기공명방식 안테나 설계”, 전자공학회지, vol. 38, no.9, pp. 23-30, 2011.
- [14] 박노아, 최효상, 정인성, 최혜원, 박상용, 황선호, 김준범, “초전도 공진코일 설계에 따른 무선전력전송 효율 분석”, 2017년도 대한전기학회 제 48회 하계학술대회, pp 18-19, 2017.
- [15] 강재현, 최종호, 정봉식, “무선전력전송을 위한 공진코일 최적설계”, Proceedings of KIIT Summer Conference, pp. 326-328, 2014.

- [16] Ju-yeop Jang, “Design of Helical Coil for the Magnetic Resonance Wireless Power Transmission System,” master’s thesis, 2012.
- [17] J. P. K. Sampath, A. Alphones, D. M. Vilathgarmuwa, Andrew Ong, X. B. Nguyen, “Coil enhancements for high efficiency wireless power transfer applications”, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2978-2983, 2014.
- [18] Zhao-Hong Ye, Zhi-Juan Liao, Yue Sun, Xin Dai, “Study on optimal design of WPT resonators based on genetic algorithm”, 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference, pp. 1-3, 2016.
- [19] J. P. K. Sampath, A. Alphones, Hitoshi Shimasaki, “Coil design guidelines for high efficiency of wireless power transfer (WPT), 2016 IEEE Region 10 Conference, pp. 726-729, 2016.
- [20] U. Surendrakumaran, Alamelu Nachiappan, “Performance analysis of wireless power transfer(WPT) through two-coil and three-coil structure”, 2017 International Conference on Innovative Reserach In Electrical Sciences, pp. 1-6, 2017.