

2023 학년도 후기 전자통신공학과 졸업논문 평가표

졸업논문제목	단일 무선 전력 전송 기술 기반 다중 무선 전력 전송 시스템 설계			
\	학번	이름	전화	E-mail
제출자	2018707038	박형준	010-3461-9007	p8489009@naver.com
팀원구성	2018707006	김종혁	010-5518-8483	skyblue9120@naver.com
논문지도교수 평가내용				
졸업판정 (지도교수)	[]합격, []불합격			
불합격 사유				
논문교수지도	(인)			
최종판정 (학과장)	[]합격, []불합격			
학과장	(인)			

졸업논문 최종 평가서

1. 논문 개요

논문제목	단일 무선 전력 전송 기술 기반 다중 무선 전력 전송 시스템 설계	지도교수	송 익 환 교수님
수행기간	2023.03.02 - 2023.06.14	연구개발비	60800 원

2. 설계 채점표

구 분					평 가 결 과 ('√' 표시)					항 목 별 평가점수		
					탁월 (5)	우수 (4)	보통 (3)	부족 (2)	미흡 (1)			
평가 항목												
제안서 내용 및 과제 수행 (40 점)	목표 설정의 명료성과 타당성											
	과제를 위한 아이디어의 창의성											
	관련 자료 조사 및 분석, 활용 능력											
	조원별 역할 분담											
	추진 일정(수행노력의 성실도)											
	소요 부품 및 예산 편성의 합리성											
	결과의 활용도(기대효과)											
	현실적 설계 제안 요건 반영											
개발 및 제작과정 중간보고 (20 점)	설계에 필요한 주요기술 요약											
	체계적인 설계 수행											
	설계에 활용한 공학도구사용 능력											
	설계과정에서 발생한 문제 해결											
최종 보고서 (35 점)	수학, 기초과학 및 공학 이론 적용											
	최종 결과물에 대한 자기 평가											
	제품의 완성도											
	기존 기술 개선에 미치는 영향											
	설계 완료 보고를 위한 요약발표											
	홈페이지 작성 관리											
	현실적 설계 제안 요건 해결 능력											
소계												
종합의견										종합의견 점수 (5 점)		
평가점수		90 이상	89~80	79~75	74~70	69~65	64~60	59~55	54~50	49 미만	총 점	

* 총점이 60 점 이상일 경우 합격

3. 논문 작성 및 발표 채점표

구 분 평가 항목		평 가 결 과 ('√' 표시)								항 목 별 평가점수	
		탁월 (5)	우수 (4)	보통 (3)	부족 (2)	미흡 (1)					
자세 및 태도 (15 점)	복장 및 자세의 자연스러움										
	시선처리, 속도, 어조, 성량, 유창성, 숨 등의 적절성										
	청자의 관심 유도										
개발 및 제작과정 중간보고 (35 점)	어휘의 다양하고 풍부한 사용(유창성)										
	어휘 및 문법구조 사용의 적절성										
	효과적이고 개성적인 표현										
	내용 전달의 명확성										
	맞춤법 사용의 정확성										
	영어 발표 능력										
최종 보고서 (40 점)	발표자료의 영어 작성 능력										
	필요한 정보 제시										
	중심 내용의 강조										
	내용의 논리성과 타당성										
	구성의 통일성과 일관성(응집성)										
	명료한 끝맺음										
	질문에 대한 명확한 응답										
	시청각 보조 자료의 효과적인 사용										
발표시간 준수 및 내용의 시간 안배											
소계											
종합의견										종합의견 점수 (10 점)	
평가점수	90 이상	89~80	79~75	74~70	69~65	64~60	59~55	54~50	49 미만	총 점	

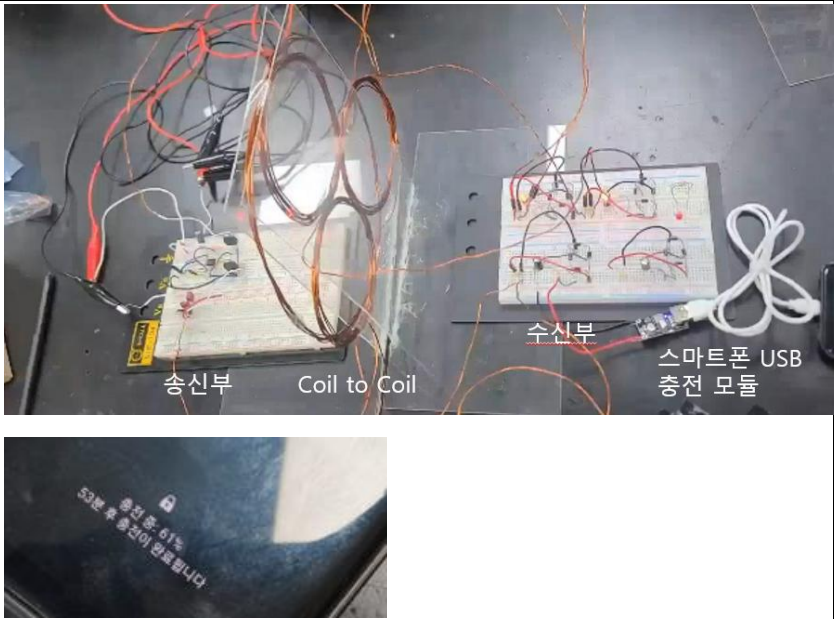
평가자	(인)									
-----	-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--

* 총점이 60 점 이상일 경우 합격

2023 학년도 후기 전자통신공학과 졸업논문 최종보고서

졸업논문제 목	단일 무선 전력 전송 기술 기반 다중 무선 전력 전송 시스템 설계			
	학번	이름	전화	E-mail
제출자	2018707038	박형준	010-3461-9007	p8489009@naver.com
팀원구성	2018707006	김종혁	010-5518-8483	skyblue9120@naver.com
논문지도교 수	송 익 환 교수님			
개발 동기	<p>자기 유도 방식의 소전력 무선 충전 제품이 시장을 주도하고 있음에 따라 기기를 플러그에 직접 연결하지 않고 전력을 공급할 수 있어 편의성이 향상되는 무선 전력 전송 시스템을 설계 하게 되었다. 무선 전력 전송 시스템을 설계함에 있어서 단일 무선 전력 전송 시스템에서 다중 무선 전력 전송 시스템으로 확장하여 다중 무선 전력 전송 시스템의 구성에 따라서 결과를 Pspice 시뮬레이션을 통해 예측해보고 확인해보는 과정을 거치기 위해 다중 무선 전력 전송 시스템을 주제로 선정하게 되었다.</p>			

<p>내용 요약</p>	<p>전자기 유도 방식의 다중 무선 전력 전송 시스템의 구성에 따른 결과를 예측하고 확인하기 위해 단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 다중 무선 전력 전송 시스템으로 확장하여 시스템을 설계하였다. 단일 무선 전력 전송 시스템을 설계함으로써 전자기 유도 방식의 무선 전력 전송 시스템에 대해서 공부하며 여러가지 불편한 점이나 어려운 점을 개선하고 시행 착오를 줄여 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하였다. 단일 무선 전력 전송 시스템을 설계하면서 여러가지 불편한 점과 어려운 점이 있었으며 이에 따라 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 Analytic Model 분석 및 다중 Coil 인덕턴스 추출, Pspice 시뮬레이션 수행, Pspice 시뮬레이션 기반 설계 및 성능 예측, 회로 제작 및 측정 검증 순으로 프로젝트를 진행하여 불편한 점과 어려운 점을 해소하였다. Analytic Model 분석을 통해 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 수행에 필요한 Self 인덕턴스, 상호 인덕턴스, k-factor 를 도출하여 Pspice 시뮬레이션을 수행하여 결과를 예측할 수 있었다. Pspice 시뮬레이션은 Qi 기준 전자기 유도 방식의 무선 주파수 대역인 100~200kHz 대역 중 130kHz 를 다중 무선 전력 전송 시스템의 공진 주파수로 정하여 Pspice 시뮬레이션을 진행하였다. Pspice 시뮬레이션의 구성은 송신부의 전력을 증폭시키는 회로 및 직류 신호를 교류 신호로 바꿔주는 인버터, 자기유도를 이용한 Coil to Coil, 수신부의 교류 신호를 직류 신호로 바꿔주는 정류 회로 및 리플을 방지하는 평활 회로를 기반으로 설계하였으며 이에 따라 Analytic Model 을 통해 추출한 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스, k-factor 를 Pspice 시뮬레이션 기반 설계에 적용하여 성능을 예측하였으며 Pspice 시뮬레이션을 통해 제작한 회로를 실제</p>
--------------	--

	<p>측정하여 확인하였으며 부가적으로 수신부 회로에서 스마트폰 USB 충전 모듈을 연결하여 스마트폰을 충전하는 것을 확인하였다. Pspice 시뮬레이션 수행 결과 및 실제 측정을 확인한 결과 수신부로 전달되는 전력이 적어서 Coil to Coil 을 구성하는 회로에서 Coil 간의 거리가 1cm ~ 3cm 일 때 LED 를 점등시키기에는 충분하였지만 스마트폰을 충전할 때 는 Coil to Coil 을 구성하는 회로에서 송신 Coil 과 수신 Coil 이 맞닿아 있을 때만 충전이 되는 것을 확인하였고 충분히 충전이 안되는 것을 확인하였다. Pspice 시뮬레이션 및 실제 측정의 관계를 통해 LED 와 스마트폰 충전을 진행 함으로써 이후에 Pspice 시뮬레이션을 통해 송신부에 전달되는 전력을 조절하여 수신부에 부하되는 전력을 미리 확인하고 실제 회로도를 제작하여 원하는 전자기기를 충전할 수 있는 결과를 얻게 되었다.</p>
결과물	
활용범위	<p>Pspice 시뮬레이션을 통한 예상 값을 도출하여 필요한 전력이 수신부 회로에 부하되는 회로를 구성</p>

학사학위청구논문

2023학년도

단일 무선 전력 전송 기술 기반

다중 무선 전력 전송 시스템 설계

The design multiple wireless power transmission systems
based on single wireless power transmission

광운대학교

전자통신공학과

박 형 준

단일 무선 전력 전송 기술 기반 다중 무선 전력 전송 시스템 설계

The design of multiple wireless power transmission systems
based on single wireless power transmission

지도교수 송 익 환

이 논문을 공학사 학위논문으로 제출함

2023년 09월 27일

광운대학교
전자통신공학과
박 형 준

000의 공학사 학위논문을 인준함

지도교수_____인

광운대학교

전자통신공학과

2023년 09월 27일

국문 요약

단일 무선 전력 전송 기술 기반 다중 무선 전력 전송 시스템 설계

본 논문은 전자기 유도 방식의 단일 무선 전력 전송 시스템을 구성하는 송신부의 전력을 증폭시키는 회로 및 직류 신호를 교류 신호로 바꿔주는 인버터, 자기 유도를 이용한 Coil to Coil, 교류 신호를 직류 신호로 바꿔주는 정류 회로 및 리플을 방지시키는 평활 회로 에서 Coil to Coil 구역에서 Coil의 개수를 늘려 다중 무선 전력 전송 시스템으로 확장하여 분석하는 방법을 제시한다.

본 논문은 단일 무선 전력 전송 시스템에서 다중 무선 전력 전송 시스템으로 확장되어 Coil의 개수가 변동함에 따른 송신부 회로에 연결되는 Coil과 수신부 회로에 연결되는 Coil의 Self 인덕턴스 및 송신부 회로에 연결되는 Coil과 수신부 회로에 연결되는 Coil 간의 상호 인덕턴스를 Analytic Model로 분석하여 Pspice 시뮬레이션 수행을 통해 성능 예측 및 회로 제작 및 측정 검증으로 구성된다.

본 논문에서 제시하는 다중 무선 전력 전송 시스템은 Pspice 시뮬레이션을 통해 송신부 회로에 공급되는 전력을 조절하여 수신부 회로에 부하되는 전력을 예상하여 원하는 전력이 수신부 회로에 부하되는 회로를 구성할 수 있다.

핵심어: 전자기 유도 방식, 다중 무선 전력 전송 시스템, Analytic Model, 인덕턴스, Pspice 시뮬레이션

Abstract

The design of multiple wireless power transmission systems based on single wireless power transmission

xxx

The Dept. of Electronics and Communications Eng.

The College of Electronics & Information Engineering

Kwangwoon University

This paper presents a method for analyzing the resonant frequency generating circuit of the transmitter that constitutes a single wireless power transmission system with electromagnetic induction, an inverter that converts a direct current signal into an alternating current signal, a coil to coil using magnetic induction, a rectification circuit that converts an alternating current signal into a direct current signal, and a smoothing circuit that prevents ripple by increasing the number of coils in the coil to coil area, and extending it to a multiple wireless power transmission system.

This paper consists of performance prediction and circuit fabrication and measurement verification by performing Pspice simulation by analyzing the self-inductance of the coil connected to the transmitter circuit and the

coil connected to the receiver circuit and the mutual inductance between the coil connected to the transmitter circuit and the coil connected to the receiver circuit as the number of coils varies by Analytic Model, which is extended from a single wireless power transmission system to a multiple wireless power transmission system.

The multi-radio power transfer system presented in this paper can be configured by adjusting the power supplied to the transmitter circuit through Pspice simulation to estimate the power loaded on the receiver circuit, so that the desired power is loaded on the receiver circuit.

Keywords: Electromagnetic Induction, Multiple Wireless Power Transfer Systems, Analytic Model, Inductance, Pspice Simulation

차 례

국문 요약	10
Abstract	11
차 례	13
그림 차례	15
제 1 장 서론.....	18
제 2 장 배경 이론.....	20
2.1 NE555 타이머 비안정 회로.....	20
2.2 Push-Pull 회로.....	22
2.3 Coil to Coil	23
2.4 Bridge 정류 회로	27
2.5 평활 회로.....	28
제 3 장 다중 무선 전력 전송 시스템 설계	30
3.1 단일 무선 전력 전송 시스템 설계	32
3.2 수신부 회로에 부하 되는 전력 증가	40
3.3 다중 무선 전력 전송 시스템의 예상 Topology	42

3.4 Analytic Model 분석 및 다중 Coil 인덕턴스 특성 추출.....	51
3.5 회로 제작 및 측정 검증.....	68
3.6 최종 결과물	72
 제 4 장 Pspice 시뮬레이션 수행	 77
4.1 Pspice 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값의 정합성 확보	77
4.2 Pspice 시뮬레이션 기반 설계 및 성능 예측.....	79
 제 5 장 결론.....	 84
 참고문헌	 86

그림 차례

[그림 1.1] 다중 무선 전력 전송 시스템 Block Diagram	19
[그림 2.1] NE555 타이머 내부 회로도	20
[그림 2.2] NE555 타이머 Output 파형	21
[그림 2.3] Push Pull 회로도	22
[그림 2.4] Q-factor 양호도	26
[그림 2.5] Bridge 정류 회로도	27
[그림 2.6] Bridge 정류 회로 동작 원리	28
[그림 2.7] 평활 회로도	29
[그림 3.1] 단일에서 다중으로 확장하는 무선 전력 전송 시스템 구성도	30
[그림 3.2] 단일 무선 전력 전송 시스템 Block Diagram	32
[그림 3.3] 상호 인덕턴스 측정 원리	34
[그림 3.4.a] 단일 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 회로도	37
[그림 3.4.b] 단일 무선 전력 전송 시스템의 시뮬레이션 기반 실제 회로	38
[그림 3.5.a] AWG규격과 SQ 규격의 전선을 직경에 따라 저항과 허용 전 류에 맞춰 정리한 표	41
[그림 3.5.b] AWG규격과 SQ 규격의 전선을 직경에 따라 저항과 허용 전 류에 맞춰 정리한 표	42
[그림 3.6] 송신부 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 할 경우	44
[그림 3.7] 하나의 송신부 회로와 다중 Coil이 연결된 경우	45

[그림 3.8] 다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 경우.....	46
[그림 3.9] 다중 Coil이 하나의 수신부 회로와 연결된 경우.....	47
[그림 3.10] 다중 Coil이 송신부와 수신부 회로와 각각 연결된 경우..	48
[그림 3.11] 다중 Coil이 하나의 송신부 회로와 각각의 수신부 회로와 연결된 경우.....	49
[그림 3.12] 다중 Coil이 각각의 송신부 회로와 하나의 수신부 회로와 연결된 경우.....	49
[그림 3.13] 다중 Coil이 하나의 송신부 회로와 하나의 수신부 회로와 연결된 경우.....	50
[그림 3.14] 기존 문헌에서의 Self 인덕턴스 Analytic Model	52
[그림 3.15.a] 송신 Coil의 Self 인덕턴스 측정.....	53
[그림 3.15.b] 수신 Coil의 Self 인덕턴스 측정	54
[그림 3.16] 테일러 전개를 응용한 Neumann-Neumann Analytic model 방법에서의 상호 인덕턴스 Analytic Model.....	55
[그림 3.17] 축의 거리와 평면상의 거리를 고려한 Neumann-Neumann Analytic model 방법에서의 상호 인덕턴스 Analytic Model.....	57
[그림 3.18] 벡터 자기장 포텐셜 관점에서 타원 적분을 활용한 방법에서의 상호 인덕턴스 Analytic Model	59
[그림 3.19.a] 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정	61
[그림 3.19.b] 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정.....	62
[그림 3.20.a] 송신 Coil과 첫번째 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정	64
[그림 3.20.b] shifted된 Coil을 수신 Coil에 이어 붙여서 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정.....	65

[그림 3.21.a] 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정.....	66
[그림 3.21.b] Shifted된 수신 Coil을 추가한 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정.....	67
[그림 3.22.a] 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 회로도	68
[그림 3.22.b] 다중 무선 전력 전송 시스템의 시뮬레이션 기반 실제 회로	69
[그림 3.23.a] 다중 무선 전력 전송 시스템 Pspice 시뮬레이션 수행 결과	70
[그림 3.23.b] 다중 무선 전력 전송 시스템의 측정 결과.....	70
[그림 3.23.b] 다중 무선 전력 전송 시스템의 측정 결과.....	73
[그림 3.24] 다중 무선 전력 전송 시스템의 시뮬레이션 기반 실제 회로	75
[그림 3.26] 스마트폰 USB 충전 모듈을 수신부 회로에 연결하여 스마트폰 을 충전하는 모습.....	75
[그림 4.1] LED 색상에 따른 허용 전압과 허용 전류	79

제 1 장 서론

무선 전력 전송 기술은 전력을 전선이나 케이블 없이 무선으로 전송하는 기술을 의미한다. 이 기술은 전력 공급을 위해 사용되는 전선 및 케이블의 한계를 극복하고, 전력을 무선으로 전송함으로써 편의성과 유연성을 제공한다.

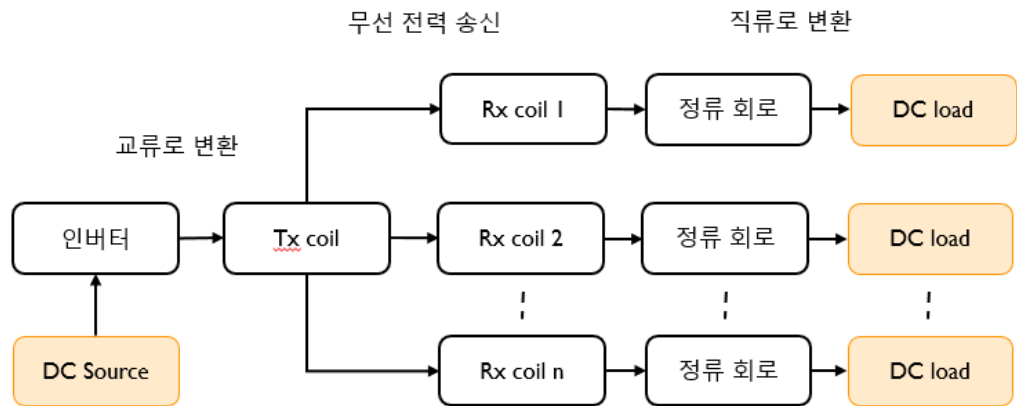
무선 전력 전송 기술의 필요성은 다양한 분야에서 나타난다. 무선 충전을 통해 스마트폰, 노트북, 태블릿 등을 편리하게 충전할 수 있고, 이동 중에도 전력 공급을 유지할 수 있다. 또한, 전력 케이블의 부재나 장거리 전력 전송의 어려움을 극복할 수 있다. 무선 전력 전송을 통해 전기차 충전 인프라를 개선하거나 원격지역이나 해양 플랫폼과 같은 장소에서 전력을 제공할 수 있어 무선 전력 전송 기술에 대한 필요성이 제기되고 있다. [1, 2]

이에 따라 사회에서 주목받고 있는 전자기 유도 방식의 무선 전력 전송 기술의 단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 전력을 여러 개의 부하로 에너지를 공급하는 다중 무선 전력 전송 시스템으로 확장하는 연구가 필요하다.

아래의 [그림 1.1]은 전자기 유도 방식의 단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 하여 수신부 회로의 개수를 늘려 여러 개의 부하로 에너지를 공급할 수 있는 다중 무선 전력 전송 시스템의 전체 구조도를 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다.

다중 무선 전력 전송 시스템은 송신부의 전력을 증폭시키는 회로 및 직류 신호를 교류 신호로 바꿔주는 인버터, 자기유도를 이용한 Coil to Coil, 수신부의 교류 신호를 직류 신호로 바꿔주는 정류 회로 및 리플을 방지하는 평활 회로로 구성되는 단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 아래의 [그림 1.1]과 같이 Coil to Coil 단계의 Coil과 수신부 회로를 늘려 설계할 수 있으며 여러

개의 부하로 에너지를 공급할 수 있다, 또한 밑의 [그림 1.1]뿐만 아니라 여러가지 형태의 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계할 수 있다.



[그림 1.1] 다중 무선 전력 전송 시스템 Block Diagram

단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 하여 다중 무선 전력 전송 시스템으로 확장함에 따라 Coil의 개수가 변동하기 때문에 송신부 회로에 연결되는 Coil과 수신부 회로에 연결되는 Coil의 Self 인덕턴스 및 송신부 회로에 연결되는 Coil과 수신부 회로에 연결되는 Coil 간의 상호 인덕턴스를 분석하는 것이 중요하다. [2, 3, 4]

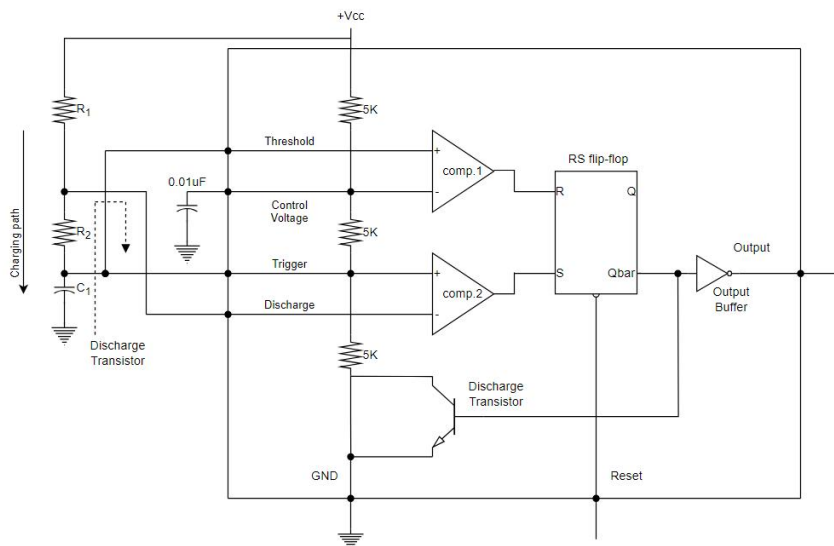
이에 따라 다중 무선 전력 전송 시스템으로 확장하는 과정을 Analytic Model로 분석하여 Pspice 시뮬레이션 수행을 통해 성능 예측 및 회로 제작 및 측정 검증으로 구성하여 정합성을 확보하여 향후 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 원하는 전력이 수신부 회로 부하 저항에 전달되는 것이 목표이다. [3, 4]

제 2 장 배경이론

이 장에서는 본 논문에서 제안한 다중 무선 전력 전송 시스템의 설계를 이해하기 위해 기본적으로 알아야 하는 배경이론을 다루고자 한다.

2.1 NE555 타이머 비안정 회로

다중 무선 전력 전송 시스템의 송신부 회로에서 직류 신호를 교류 신호로 전달하기 위해 사용하는 인버티 회로이다. NE555 타이머는 3개의 5k Ω 저항으로 입력 전압이 분배되어 비교기의 입력단에 걸리는 전압으로 작동한다. NE555 타이머 내부에서 High와 Falling Edge, Low, Rising Edge, High 단계로 펄스파를 만들어낸다. [1]



[그림 2.1] NE555 타이머 내부 회로도

위의 [그림 2.1] 에서 상태가 High 일때 두 비교기는 Low를 출력한다. RS flip-flop의 Reset과 Set이 Low를 저장하고 있고 discharging path가 off 시

킨 상태이며 커패시터가 충전되면서 Output은 인버터를 통해 반전되어 나오기 때문에 High가 출력된다.

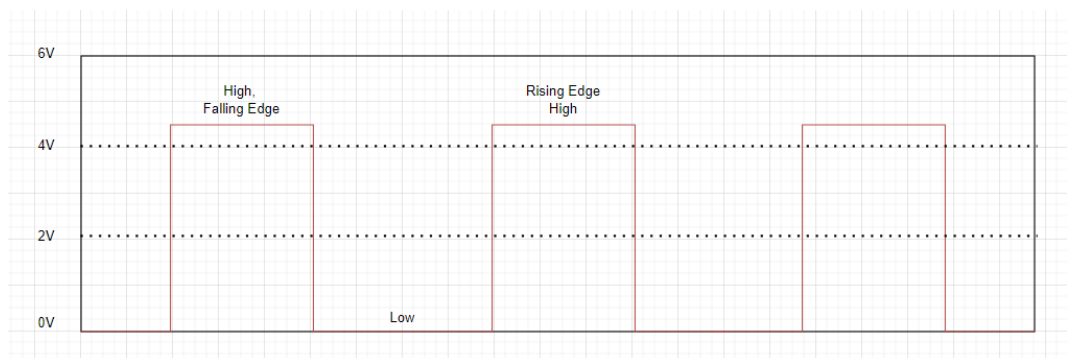
커패시터가 충전되어 전압이 4V를 넘으면 1번 비교기의 출력이 High로 변한다, 이때 Reset 입력이 High가 되어 Qbar는 High로 출력되고 Output(3번 핀)은 Low로 바뀐다. Discharge transistor는 on 상태가 되어 커패시터가 방전되면서 전압이 내려가기 시작해서 4V이하가 된다

커패시터가 방전하여 전압이 4V 이하로 내려가고 RS flip-flop의 Set과 Reset이 모두 Low이므로 이전 입력상태를 유지한다.

커패시터의 전압이 2V이하로 내려가면, 2번 비교기의 출력이 High로 변하고 Qbar의 상태가 Low로 바뀌어서 Output으로 High상태가 출력된다. Discharge transistor는 off 되어, capacitor는 충전을 시작하고 다시 커패시터 양단의 전압이 올라간다.

커패시터가 충전되어 전압이 2V이상으로 올라가고 Set과 Reset입력이 모두 Low이므로 이전 입력 상태를 유지한다.

충전시간은 R_1 , R_2 , C_1 에 방전시간은 R_2 , C_1 에 비례한다. R_1 , R_2 , C_1 을 바꾸면 펄스파의 duty cycle과 주파수를 바꿀 수 있으며 아래의 [그림 2.2]는 각 단계에 대한 Output 파형을 나타낸 것이다.

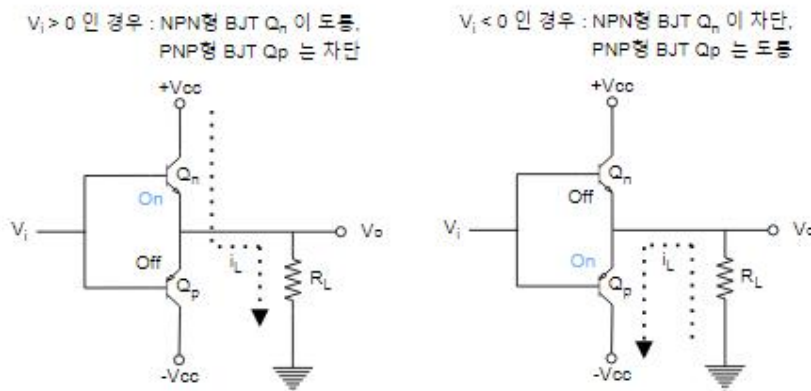


[그림 2.2] NE555 타이머 Output 파형

2.2 Push-Pull 회로

다중 무선 전력 전송 시스템의 전력을 증폭시켜 주는 회로이다. Push-Pull 회로는 신호를 증폭하는 역할을 하는 전자 회로이다. 주로 출력단자가 양쪽으로 밀고 당기는 구조로 구성되어 있다. 이러한 구조로 인해 출력 신호는 양쪽으로 대칭적으로 증폭 된다.

Push-Pull 회로는 일반적으로 NPN 트랜지스터와 PNP 트랜지스터의 조합으로 이루어진다. NPN 트랜지스터는 양수 전압 신호를 증폭시키는 역할을 담당하며, PNP 트랜지스터는 음수 전압 신호를 증폭시키는 역할을 담당한다.



[그림 2.3] Push Pull 회로도

Push-Pull 회로는 위의 [그림 2.3]과 같이 입력 신호는 NPN 트랜지스터의 베이스와 PNP 트랜지스터의 베이스에 연결된다. 이로 인해 입력 신호의 상승 및 하강 변화에 따라 NPN 트랜지스터와 PNP 트랜지스터는 각각 전류를 제어하게 되어 출력을 생성하게 된다. 입력 신호가 0보다 큰 경우 NPN

트랜지스터는 켜지고 PNP 트랜지스터는 꺼져서 양수 전압 신호 신호를 증폭시키고, 입력 신호가 0보다 작은 경우 NPN 트랜지스터는 켜지고 PNP 트랜지스터는 꺼져서 음수 전압 신호를 증폭시키는 역할을 한다. 이렇게 Push-Pull 회로는 입력 신호를 상보적으로 증폭시켜 출력으로 제공하는 역할을 수행하며 다양한 장점을 갖고 있어 다양한 응용 분야에서 사용된다.

Push-Pull 회로의 장점은 출력의 대칭성, 높은 출력 전류, 작동 효율성이 있으며 Push-Pull 회로를 NE555 타이머 불안정 회로에서 발생하는 공진주파수를 증폭시켜 Coil을 통해 수신부 회로로 전달 할 수있다.

2.3 Coil to Coil

전자기 유도 방식 무선 전력 전송 시스템의 구성 단계 중에 송신부 회로에서 파워 서플라이를 통해 공급받은 직류 신호를 인버터 회로에서 교류 신호로 변환한 후에 Coil을 통해 무선으로 수신부 회로에 교류 신호를 전달하는 단계이다.

Coil to Coil 단계에서는 Coil을 이용하여 무선으로 전력을 전송하기 때문에 Coil의 Self 인덕턴스 및 상호 인덕턴스와 k-factor, 공진 주파수, Q-factor를 고려해야한다.

2.3.1 Self 인덕턴스 및 상호 인덕턴스

Self 인덕턴스는 자기장을 생성하는 물질이 전류가 흐를 때 전기 에너지를 저장하는 능력을 나타내는 개념이다. 인덕턴스는 단위 시간당 변하는 전류에 대한 전압의 비율로 정의한다.

인덕턴스가 높을수록 Coil에 저장되는 에너지가 많아지며, 전류의 변화에

더 민감해진다. 이러한 특성은 인덕턴스를 다양한 전기/전자 장치 및 회로에서 활용할 수 있게 해준다.

상호 인덕턴스는 두 개 이상의 인덕터(Coil)가 서로의 자기장에 영향을 미쳐 상호작용하는 현상을 말한다. 즉, 하나의 Coil에 전류를 흘리면 주변에 생성된 자기장이 다른 Coil에도 전달되어 그 Coil에도 전류가 유도되는 현상을 의미한다.

상호 인덕턴스는 두 개 이상의 Coil 사이에 존재하며, 이는 Coil들이 가까이 위치하고 서로의 자기장이 상호작용하기 때문에 발생한다. 상호 인덕턴스를 통해 전력을 전달하거나 전기적으로 연결된 다른 회로에 영향을 미치는 등 다양한 응용이 가능하다. 상호 인덕턴스는 전력 전달과 효율적인 에너지 전환에 중요한 역할을 한다.

Coil의 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 Pspice 시뮬레이션을 수행을 하는데 있어서 중요한 요소이므로 Coil의 권수와 외경을 고려하여 기존 문헌의 Analytic Model을 분석하여 정확하게 구하는 것이 중요하다. [3,4]

2.3.2 k-factor

k-factor는 Coil들의 배치와 형태에 따라 결정되는 상수이다. k-factor의 값은 일반적으로 Coil들의 위치와 방향, Coil들 사이의 거리, Coil들의 감수 등에 따라 달라진다. 따라서 회로를 시뮬레이션을 통해 설계할 때에는 k-factor 값을 정확하게 계산하는 것이 중요하다.

k-factor 값은 실험적으로 측정될 수 있으며 $k = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 계산식을 통해 계산할 수 있다. 전력 전달이나 변압기 등에서 중요한 요소이므로, 시뮬레이션 설계나 전자기학 분야에서 k-factor를 고려하는 것이 중요하다.

2.3.3 공진 주파수

무선 전력 전송 시스템에서의 공진 주파수는 전력을 전송하는 시스템에서 공진 현상이 발생하는 주파수를 의미한다. 이는 무선 전력 전송 시스템에서 발생하는 고유한 특성으로, 시스템의 구성요소와 특성에 따라 결정된다.

무선 전력 전송 시스템은 일반적으로 주파수를 이용하여 전력을 전송한다. 발신기에서 전력을 생성하고 이를 수신기로 전파하여 무선으로 전력을 전송한다. 이때, 시스템의 각 구성 요소(Coil, 커패시터)의 특성에 따라 특정 주파수에서 공진 현상이 발생한다.

공진 주파수는 인덕터와 커패시터가 에너지를 허수로 축적한다. 주파수에 따라서 허수부의 임피던스 값이 달라지고 공진 주파수 지점에서 허수 임피던스의 값이 최소화 된다. 즉 출력 임피던스가 낮은 주파수는 방해성분이 적어서 신호가 더 잘 흐를 수 있고, 나머지 주파수는 허수 임피던스 값이 사라지지 않고 커져서 손실로 이어져 신호의 통과가 어려워진다. 인덕터는 주파수가 올라갈수록 신호의 흐름을 막고 커패시터는 주파수가 올라갈수록 신호의 흐름을 흐르게 해서 둘 간의 힘의 평형이 이루어지는 공진점에서 발생하는 주파수를 통해 전력을 전송한다. 공진 주파수 계산식은 $f = \frac{2\pi}{\sqrt{LC}}$ 로 나타낼 수 있고 커패시터의 커패시턴스와 Coil의 인덕턴스를 송신부 회로의 주파수와 정확히 맞춰 전자기 유도를 이용하여 무선으로 전력을 전송할 수 있다. [4]

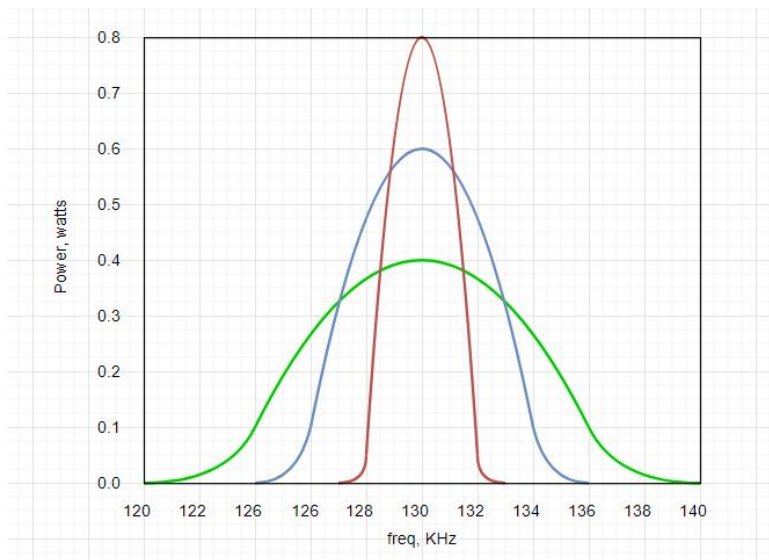
공진 주파수를 이용한 무선 전력 전송은 광범위한 응용 분야에 사용되며 스마트폰의 무선 충전이나 전기 자동차의 무선 충전 시스템에서 공진 주파수를 활용하여 효율적인 전력 전송을 구현하고 있다. 전자기 유도 방식의 무선 주파수 대역은 Qi 기준 100~200kHz 대역이며 이번 다중 무선 전력 전송 시스템에서 사용할 공진 주파수는 130kHz로 정하여 진행하였다.

2.3.4 Q-factor

Q-factor(품질 계수)는 주파수 응답을 평가하는 데 사용되는 중요한 물리적인 파라미터이다. 주로 공진 현상이나 필터링 특성과 관련하여 사용되며, 다양한 시스템과 회로에서 중요한 역할을 한다.

Q-factor는 물체나 시스템의 에너지 저장 및 손실에 대한 비율을 나타낸다. 물체나 시스템이 특정 주파수에서 공진을 경험할 때, 에너지가 가장 크게 저장되고 주파수 응답이 최대화된다고 한다. [1]

Q-factor는 Coil의 직경과 권선을 조절하여 조절할 수 있으며 $Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f * u_r * u_0 * N^2 * \pi * r^2}{L * R}$ 계산식을 이용하여 구할 수 있다. 아래의 [그림 2.4]와 같이 Q-factor는 높고 낮음에 따라서 높은 Q-factor는 시스템이 좁은 주파수 대역에서 높은 응답을 보여주며, 시스템의 에너지 손실이 적다는 것을 의미한다.



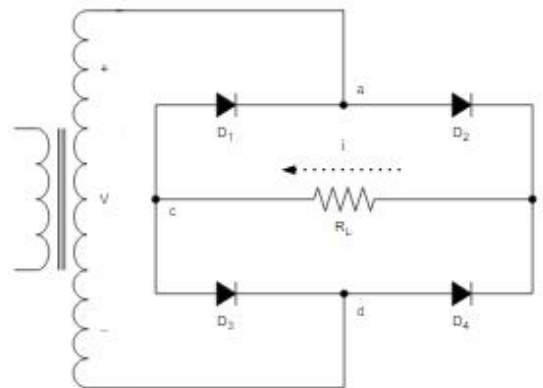
[그림 2.4] Q-factor 양호도

반면에 낮은 Q-factor는 폭 넓은 주파수 대역에서 비교적 둔감한 응답을 보여주며, 에너지 손실이 크다는 것을 나타낸다. Q-factor가 증가할수록 Coil의

품질을 높여 더 높은 전력을 보낼 수 있지만 Coil간의 전력 송수신 부분에서 안정성이 떨어질 수 있고 Coil간의 미세한 기울기 차이로 전력 송신이 불안정해질 수 있다. 이에 따라서 Coil의 크기를 적당한 크기로 유지하면서 Coil을 지탱해주는 지지대를 견고하게 하는 것이 중요하다. [2, 3]

2.4 Bridge 정류 회로

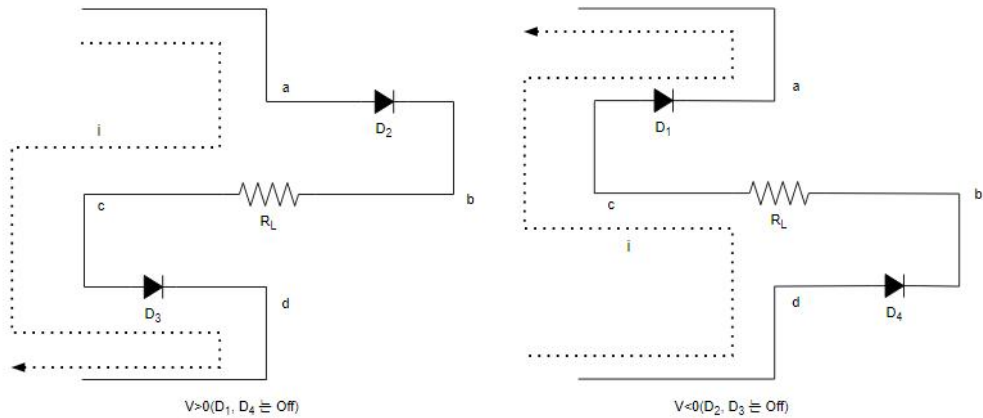
다중 무선 전력 전송 시스템의 교류 신호를 직류 신호로 바꾸는 정류 회로이다. Bridge 정류 회로는 교류 전압을 직류 전압으로 변환하는 기본적인 회로 중 하나이다. 이 회로는 아래의 [그림 2.5] 와 같이 네 개의 다이오드를 사용하여 구성되며, Bridge 정류 회로는 가장 일반적으로 사용되는 정류 회로 중 하나이다. [1]



[그림 2.5] Bridge 정류 회로도

Bridge 정류 회로는 입력으로 주기적으로 변하는 교류 전압을 받아서, 출력으로 연속적인 직류 전압을 생성한다. 이 회로는 아래의 [그림 2.6]과 같이 다이오드의 반도체 특성을 활용하여 양 반주기(Positive half-cycle)와 음 반

주기(Negative half-cycle)의 전압을 따로 정류한다. 공급 받는 전압이 양 전압 일 때 D_2 과 D_3 가 켜지고 D_1 과 D_4 는 꺼져서 양 반주기(Positive half-cycle)의 전압을 정류하고 음 전압 일 때 D_1 과 D_4 가 켜지고 D_2 과 D_3 는 꺼져서 음 반주기(Negative half-cycle)의 전압을 정류한다.



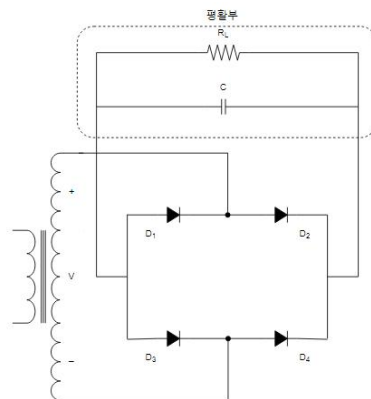
[그림 2.6] Bridge 정류 회로 동작 원리

본 논문에서 사용한 Bridge 정류 회로의 장점으로서는 반파 정류기에 비해 동일한 변압기 전압으로 2배의 DC 부하전류를 흘릴 수 있다. 변압기 전압이 양 주기(Positive cycle)와 음 주기(Negative cycle)일 때의 전류는 항상 같은 방향으로 흐른다. Bridge 정류 회로의 단점으로는 4개의 다이오드가 필요하고 양 주기(Positive cycle)와 음 주기(Negative cycle)일 때 각각 2개의 다이오드 전력 소비가 있으며, 양 주기(Positive cycle)와 음 주기(Negative cycle)일 때 부하전압이 2개의 다이오드 전압강하만큼 낮아진다.

따라서 다이오드 전압강하를 최소화하기 위해 전압 강하가 낮은 쇼트키 다이오드를 이용하여 Bridge 정류 회로를 구성하는 것이 전력의 효율을 높일 수 있으며 스위칭 속도가 빨라 역회복시간을 빠르게 할 수 있다.

2.5 평활 회로

다중 무선 전력 전송 시스템의 수신부 회로도의 에너지를 공급하는 부하의 리플을 방지하기 위한 회로이다. 평활 회로는 아래 [그림 2.7]과 같이 정류 회로를 거친 후에 사용되며 직류 전원에서 나온 변동이 있는 전압이나 전류를 더 안정적인 평활한 직류 신호로 변환하는데 사용되는 전자 회로이다. 이 회로는 커패시터를 주요 구성 요소로 사용하여 전원 신호의 펄스나 노이즈를 제거하고, 안정적인 전원을 제공하여 다른 전자 장치의 안정성과 성능을 향상시키는 데에 유용하다.



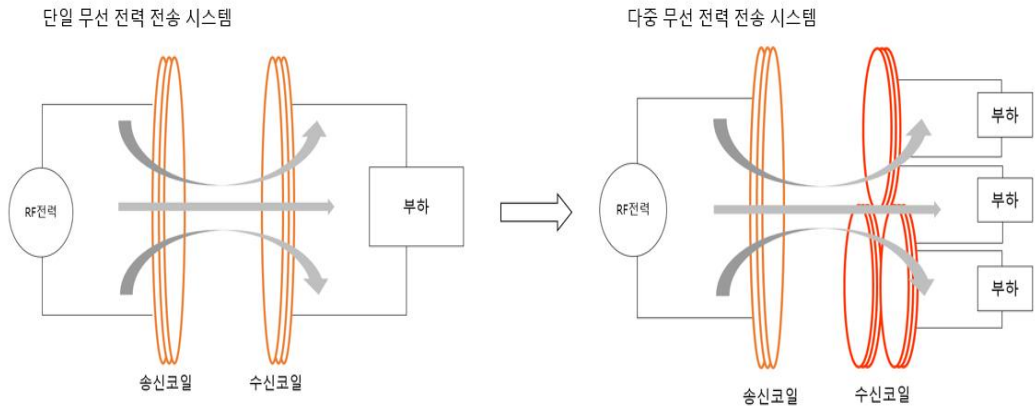
[그림 2.7] 평활 회로도

평활 회로의 기본 작동 원리는 커패시터가 직류 신호를 축적하고, 일시적인 직류 신호의 변동이나 펄스를 완화시켜주는 것이다.

평활 회로에서 리플을 방지하기 위해 용량이 큰 커패시터를 사용하지만 용량이 클수록 콘덴서의 충전시간이 늘어나기 때문에 적정 커패시터를 사용하는 것이 중요하다. 적정 커패시턴스의 값은 $C(\mu F) \cong \left[\frac{I_L * t}{0.12 r_R} \right] * 10^4$ 계산식으로 계산할 수 있고 I_L = 부하전류이며 r_R = 리플율, t 는 $t = \frac{1}{120} = 8.3 * 10^{-3} sec$ 이다.

제 3 장 다중 무선 전력 전송 시스템 설계

단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 하여 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계한다. 단일 무선 전력 전송 시스템과 다중 무선 전력 전송 시스템의 차이점은 아래의 [그림 3.1]과 같이 전자기 유도 방식의 무선 전력 전송 시스템의 Coil to Coil 단계에서 다중 무선 전력 전송 시스템의 Coil의 개수가 늘어난다는 점이다. 이에 따라 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 단일 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때와는 다른 방법이 필요하다.



[그림 3.1] 단일에서 다중으로 확장하는 무선 전력 전송 시스템 구성도

먼저 다중 무선 전력 전송 시스템의 Coil간의 관계를 정한다. 다중 무선 전력 전송 시스템과 단일 무선 전력 전송 시스템의 차이점은 Coil to Coil 단계에서 다중 무선 전력 전송 시스템의 Coil의 개수가 늘어난다는 점이며 송신부 회로 및 수신부 회로 각각의 회로에서 어떤 방식으로 Coil을 연결할 것인지에 대해서 예상되는 topology를 예상하고 경우의 수를 정리한다.

다중 무선 전력 전송 시스템의 예상되는 topology를 예상하여 경우의 수를 정리한 후에 다중 무선 전력 전송 시스템 설계의 수행 단계는 Analytic

Model 분석과 Pspice 시뮬레이션 수행, 측정 및 검증 순으로 진행한다. 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 Coil의 인덕턴스 성분 및 Coil간의 k-factor 가 필요하다.

Coil의 인덕턴스 성분 및 Coil간의 k-factor를 구할 때 다중 무선 전력 전송 시스템은 위의 그림[3.1]과 같이 Coil의 개수가 늘어나기 때문에 각각의 Coil의 크기가 줄어들어서 송신 Coil과 수신 Coil의 규격을 달리해야 하며 Coil의 규격에 따른 송신 Coil과 수신 Coil의 Self 인덕턴스를 구하고 송신 Coil과 수신 Coil 간의 상호 인덕턴스 및 수신 Coil 간의 상호 인덕턴스를 구해서 송신 Coil과 수신 Coil 간의 k-factor 및 수신 Coil간의 k-factor를 구해야 한다.

Coil간의 상호 인덕턴스 및 k-factor를 구할 때 주의할 점이 있다. 위의 [그림 3.1]을 보았을 때 단일 무선 전력 전송 시스템을 구성할 때 Coil간의 관계는 정렬 되어있지만 다중 무선 전력 전송 시스템을 구성할 때는 Coil간의 관계가 오정렬되어 있어서 송신 Coil과 수신 Coil이 Shifted 되어있으며 수신 Coil과 수신 Coil간의 관계도 Shifted 되어있는 것을 확인 할 수 있다.

이에 따라 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계 할 때 기존 문헌을 참고하여 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스에 대한 Analytic Model을 분석하여 LCR 미터기로 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 측정한 후에 설계하고자 하는 다중 무선 전력 전송 시스템의 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 Analytic Model을 선정하고 선정한 Analytic Model을 이용하여 계산한 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 Pspice 시뮬레이션에 적용해서 수행하여 시뮬레이션 예상 값을 기반으로 실제 다중 무선 전력 전송 시스템을 구성하며 실제 구성한 회로를 시뮬레이션 예상 값과 비교하여 측정하고 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값의 정합성을 확보한 후에 다음 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 정확성

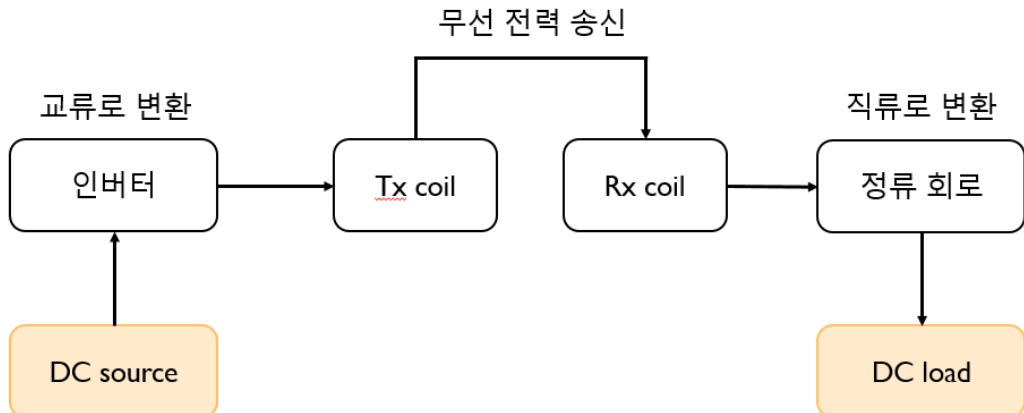
을 높이는 것을 목표로 진행하였다.

3.1 단일 무선 전력 전송 시스템 설계

다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하기 전에 단일 무선 전력 전송 시스템을 통해 전자기 유도 방식의 단일 무선 전력 전송 시스템을 설계함으로써 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 어려움을 예상하고 시행착오를 줄인다.

3.1.1 단일 무선 전력 전송 시스템 회로 구성

단일 무선 전력 전송 시스템의 회로는 아래 [그림 3.2]와 같이 인버터 회로와 Coil to Coil, 정류 회로 구성 된다. 파워 서플라이로부터 공급 받는 직류 신호를 교류 신호로 바꿔주는 인버터 회로, 무선으로 전력을 전송하는 Coil to Coil, 수신된 교류 신호를 직류 신호로 변환하는 정류 회로로 구성되며 송신부 회로의 전력을 증가시키는 Push-Pull 회로와 수신부 회로의 직류 신호를 안정 시켜주는 평활 회로를 추가한다.



[그림 3.2] 단일 무선 전력 전송 시스템 Block Diagram

3.1.2 단일 무선 전력 전송 시스템의 공진 주파수

단일 무선 전력 전송 시스템의 송신부 회로에서 인버터 회로는 펄스파를 발생시켜서 단일 무선 전력 전송 시스템의 Coil to Coil 단계에서 무선으로 전력을 전송할 수 있는 공진 주파수에 맞게 전력을 수신부 Coil로 전달할 수 있다.

이에 따라 인버터 회로에서 나오는 공진 주파수에 맞게 회로의 저항과 커패시터를 설정하기 위해 간단한 실험을 통해 단일 무선 전력 전송 시스템의 Coil to Coil 단계에서 사용할 공진 주파수를 정하였다.

전자기 유도 방식의 무선 주파수 대역은 Qi 기준 100~200kHz 대역이므로 100~200kHz 중 Coil to Coil 단계에서 사용할 커패시터와 미리 제작한 Coil을 통해 공진 주파수 계산식 $f = \frac{2\pi}{\sqrt{LC}}$ 을 이용하여 100 kHz로 맞춰 함수 발생기를 이용하여 유도되는 전압이 가장 큰 주파수를 확인하였다. 아래의 [표1]은 함수 발생기에서 발생하는 주파수를 변경하며 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되는 전압을 비교한 것이다.

주파수	95kHz	100kHz	105kHz	110kHz	115kHz
유도 전압 (Peak to Peak)	2.93V	3.74V	3.66V	3.58V	3.18V

[표1] 주파수에 따른 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되는 전압

주파수가 약 100kHz 일 때 수신 Coil에서 측정한 전압이 최대인 것을 확인 하였으며 Pspice 시뮬레이션을 설계할 때 인버터 회로에서 나오는 펄스파의 주파수를 100kHz로 정하였으며 공진 주파수를 100kHz로 정하였다.

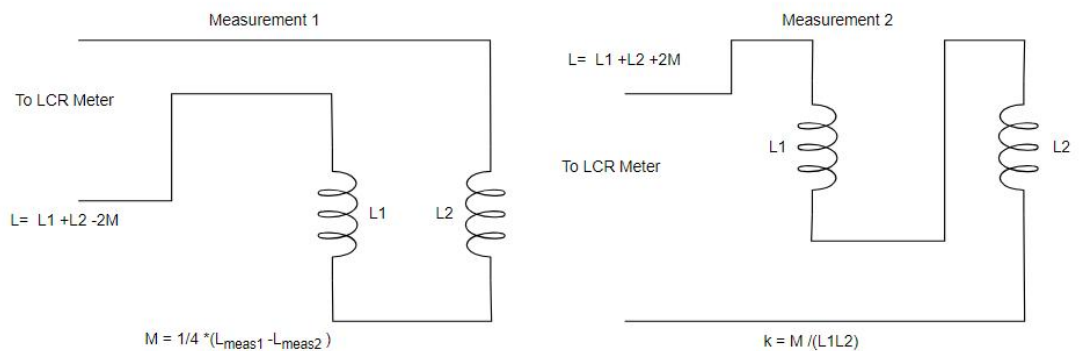
3.1.3 단일 무선 전력 전송 시스템 Pspice 시뮬레이션 수행

앞서 구성한 Coil을 통해 공진 주파수를 확인하였으며 이에 따른 Pspice

시뮬레이션 회로도를 구성하여 시뮬레이션 결과를 통해 실제 측정 결과를 예측한다. Pspice 시뮬레이션 수행을 위한 송수신 Coil의 Self 인덕턴스 및 상호 인덕턴스와 k-factor를 구한다.

송수신 Coil의 Self 인덕턴스 및 상호 인덕턴스는 LCR 미터기로 구할 수 있다. Self 인덕턴스를 LCR 미터기를 통해 송수신 Coil의 Self 인덕턴스를 측정한 결과 송신 Coil의 인덕턴스는 190.6uH, 수신 Coil의 인덕턴스는 204.6uH로 측정되었다.

송수신 Coil 간의 상호 인덕턴스는 아래의 [그림 3.3]과 같이 Measurement 1 방법을 이용하여 송신 Coil과 수신 Coil이 동일한 위상일 때의 인덕턴스 값 $L1+L2-2M$ 값을 얻은 후에 Measurement 2 방법을 이용하여 Coil의 방향을 바꿔 역 위상일 때의 인덕턴스 값 $L1+L2+2M$ 값을 얻어서 Measurement 1과 Measurement 2 방법을 이용하여 구한 값의 차이에서 4등분하여 구할 수 있다.



[그림 3.3] 상호 인덕턴스 측정 원리

송수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한 후에 Coil의 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 관계식을 통해 k-factor를 구할 수 있으며 k-factor는 $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$

을 통해 구할 수 있다. 아래의 [표2]는 위의 방법을 이용하여 구한 거리에 따른 송수신 Coil 간의 상호 인덕턴스 및 k-factor이다.

거리	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
상호 인덕턴스	58.86uH	44.29uH	40.16uH	22.05uH	17.32uH
k-factor	0.299	0.205	0.146	0.102	0.078

[표2] 단일 무선 전력 전송 시스템의 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 및 k-factor

위의 [표2]와 같이 거리가 늘어남에 따라 상호 인덕턴스가 줄어들어 k-factor도 마찬가지로 줄어들고 거리가 늘어남에 따라 수신 Coil에 전달되는 전력이 줄어들 것으로 예측 할 수 있다.

위의 방법으로 Pspice 시뮬레이션 수행에 필요한 Self 인덕턴스와 k-factor를 Pspice 시뮬레이션 회로에 적용하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션을 수행할 때 수신부에 전달되는 전력을 비교하기 위해 인버터에서 발생시키는 공진 주파수를 80kHz와 100kHz, 120kHz로 변동해가며 시뮬레이션을 수행하였다. Coil간의 전력 전송을 위한 공진 주파수를 변동할 때 인버터 회로의 커패시터와 저항의 성분을 변동하여 공진 주파수에 맞게 펄스파를 발생시킬 수 있다.

송수신 Coil간의 k-factor의 값 0.299 및 수신부 회로의 부하 저항 값 1 k Ω 으로 동일하게 하고 Pspice 시뮬레이션을 수행할 때 인버터에서 나오는 펄스파의 주파수와 Coil의 인덕턴스와 커패시터의 커패시턴스로 계산한 공진주파수를 같게 하여 시뮬레이션을 수행한 결과 공진주파수가 80kHz일 때 수신부 회로의 저항에 부하되는 전압이 3.74V, 100kHz일 때 2.34V, 120kHz일 때 1.7V가 나오는 것을 확인하였으며 100kHz일 때 공진 주파수를 100kHz

에서 80kHz로 낮췄을 때 저항에 부하되는 전압의 크기가 가장 크게 나오는 것을 확인하였다.

Pspice 시뮬레이션을 수행하여 공진 주파수가 80kHz 일 때 수신부 회로의 부하 저항에 부하되는 전압이 가장 높게 나오는 것을 확인하였지만 무선 주파수 대역은 Qi 기준 100~200kHz 대역이므로 공진 주파수를 100kHz로 정하여 시뮬레이션을 하였고 아래의 [표3.a]와 [표3.b]는 시뮬레이션 수행 결과 공진 주파수가 100kHz이며 수신부 회로의 부하 저항의 값이 100 Ω 이면서 Coil to Coil 단계에서 구성하는 Coil과 커패시터를 통해 계산된 공진 주파수가 80kHz와 100kHz 일 때의 거리가 늘어남에 따른 수신부 회로의 부하 저항에 부하되는 전압이다.

거리 80kHz	1cm	2cm	3cm	5cm	8cm
부하되는 전압	9.53V	5V	3V	1.82V	66.8mV

[표3.a] 공진 주파수가 80kHz일 때 수신부 회로에 부하되는 전압

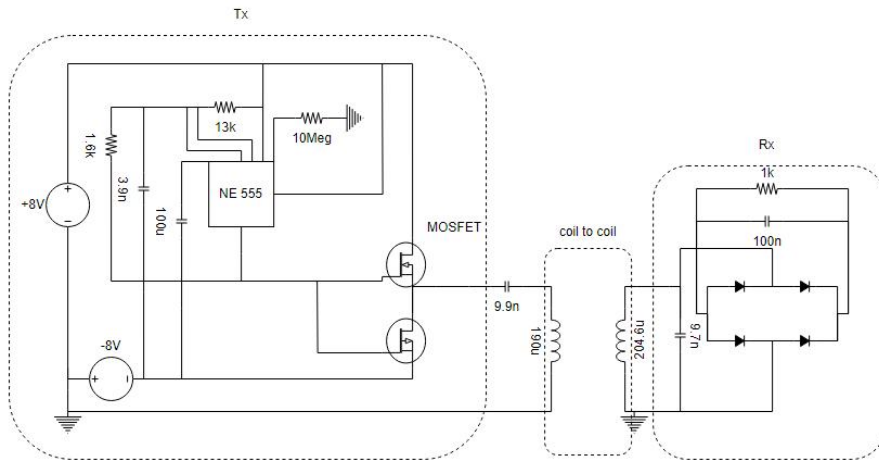
거리 100kHz	1cm	2cm	3cm	5cm	8cm
부하되는 전압	11.2V	11.04V	6.19V	4.53V	1.07mV

[표3.b] 공진 주파수가 100kHz일 때 수신부 회로에 부하되는 전압

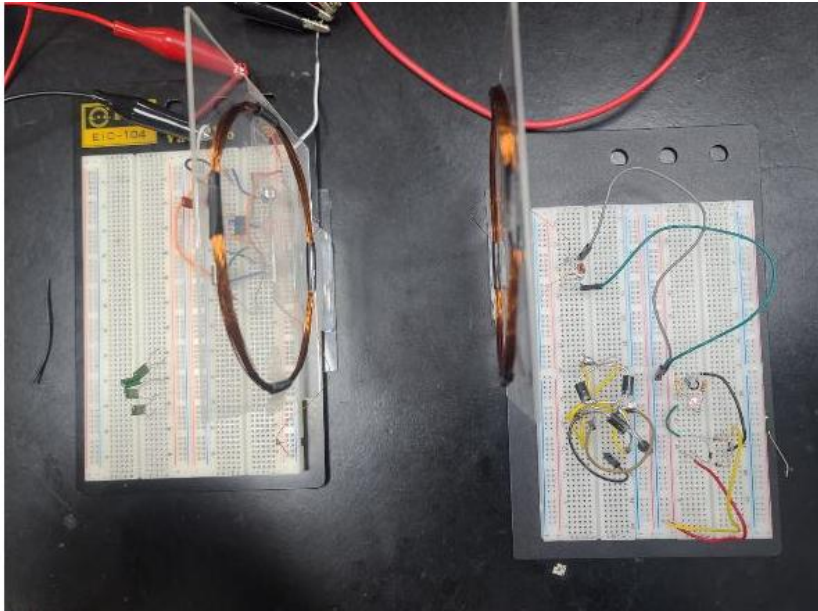
위의 [표3.a]와 [표3.b]를 보고 인버터에서 발생하는 공진 주파수와 Coil to Coil 단계에서 구성하는 Coil과 커패시터를 통해 계산된 공진 주파수가 같을 때와 다를 때 수신부 회로의 부하 저항에 부하되는 전압을 예측할 수 있으며 공진 주파수가 서로 같을 때는 부하되는 전압이 서서히 줄어들지만 다를 때 부하되는 전압이 큰 폭으로 감소되는 것을 예측해볼 수 있다.

3.1.3 단일 무선 전력 전송 시스템 확인 및 검증

Pspice 시뮬레이션 회로 구성은 아래의 [그림 3.4.a]와 같이 전자기 유도 방식의 무선 전력 전송 회로를 바탕으로 송신부의 전력을 증폭시키는 회로 및 직류 신호를 교류 신호로 바꿔주는 인버터, 자기유도를 이용한 Coil to Coil, 수신부의 교류 신호를 직류 신호로 바꿔주는 정류 회로 및 리플을 방지하는 평활 회로로 구성되며 Pspice 시뮬레이션 회로도들 통해 실제 단일 무선 전력 전송 시스템의 회로를 제작한다. 아래의 [그림 3.4.b]는 단일 무선 전력 전송 시스템의 실제 회로이다.



[그림 3.4.a] 단일 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 회로도



[그림 3.4.b] 단일 무선 전력 전송 시스템의 시뮬레이션 기반 실제 회로

Pspice 시뮬레이션 수행을 통해 단일 무선 전력 전송 시스템 회로를 실제 제작하였으며 시뮬레이션 수행 결과를 통해 예측한 것을 실제 측정을 통해 확인하여 검증한다. 아래의 [표4.a]와 [표4.b]은 시뮬레이션 예측 결과와 실제 측정값을 비교한 표이다.

거리 80kHz	1cm	2cm	3cm	5cm	8cm
부하되는 전압 (예상 값)	9.53V	5V	3V	1.82V	66.8mV
부하되는 전압 (측정 값)	9.1V	2.13V	1.2V	0.03V	0.01V

[표4.a] 공진주파수가 80kHz일 때 거리에 따른 시뮬레이션 예측 결과와 실제 측정 값

거리 100kHz	1cm	2cm	3cm	5cm	8cm
부하되는 전압 (예상 값)	11.2V	11.04V	6.19V	4.53V	1.07mV
부하되는 전압 (측정 값)	6.91V	6.89V	6.55V	4.59V	2.11V

[표4.b] 공진주파수가 100kHz일 때 거리에 따른 시뮬레이션 예측 결과와 실제 측정 값

시뮬레이션에서 예상한대로 위의 [표4.a]와 [표4.b]과 같이 공진 주파수가 같을 때는 거리가 늘어남에 따라 부하되는 전압이 안정적으로 줄어들지만 공진 주파수가 차이가 날 때에는 급속도로 감소하는 것을 확인하였다.

이 현상은 Coil to Coil 단계의 공진 주파수와 인버터의 회로에서 발생하는 펄스파의 주파수가 맞지 않아서 Q-factor Passband의 폭이 좁아 거리가 늘어날 때마다 전력 손실이 급격하게 낮아지는 것으로 확인할 수 있다.

시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값을 비교하여 확인하였으며 단일 무선 전력 전송 시스템을 설계하고 확인해보는 과정에서 여러가지 불편한 점과 어려운 점이 발생하였다. Coil to Coil 단계에서 Pspice 시뮬레이션을 수행하기 위해 Coil을 제작하여 Coil의 Self 인덕턴스 및 상호 인덕턴스를 확인할 때 마다 LCR미터기를 사용하기 위해 연구실을 방문 해야 하는 점과 단일 무선 전력 전송 시스템의 성능이 설계하기 전에 예상했던 만큼 나오지 않은 점과 단일 무선 전력 전송 시스템의 결과가 불충분하다는 점이다. 이에 따라 단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 Coil의 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 기존 문헌을 통해 도출하여 LCR 미터기를 사용하지 않고 Pspice 시뮬레이션을 수행할 수 있게 하며 Coil to Coil 단계에서 Coil의 구성을 달리하여 전자기 유도 방식의 무선 전력 전송 시스템의 성능을 최대한 낼 수 있도록 설계하고 수신부 회로의 부하 저항에 부하 되

는 전압 뿐만 아니라 여러가지 확인 지표를 시뮬레이션 결과를 통해 예측하고 실제 측정을 통해 확인 및 검증 하고자 한다.

3.2 수신부 회로에 부하 되는 전력 증가

다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하기 전에 앞서 단일 무선 전력 전송 시스템의 전력의 효율이 낮게 나오는 문제를 해결한다. 단일 무선 전력 전송 시스템의 Coil간의 전력 전송 부분에서 전력이 급격하게 낮아지는 것을 확인하였으며 이에 따라 Coil간의 전력 전달을 높인다. Coil간의 전력 전송을 높이는 방법은 인버터에서 발생시키는 주파수와 Coil의 인덕턴스와 커패시터의 커패시터로 이루어진 공진주파수를 정확히 일치시키는 것과 Coil의 인덕턴스를 낮게 설정하는 것, Coil의 반경을 크게 하는 것이다.

인버터 회로에서 발생하는 주파수와 Coil의 인덕턴스와 커패시터의 커패시턴스로 이루어진 공진주파수를 정확히 일치하게 되면 허수부의 임피던스가 낮아지게 되어 최적의 전력을 송신할 수 있다. 이 방법은 LCR 미터기를 통해 송신 Coil과 수신 Coil의 인덕턴스를 정확히 구하여 인덕턴스와 커패시턴스로 이루어진 공진주파수를 인버터에서 발생시키는 주파수와 일치시킬 수 있다.

다음은 Coil의 인덕턴스를 낮추는 것이다. 인덕턴스를 작게 설정하는 이유는 수동소자 인덕터가 전기회로에서 전류가 흐를 때 렌츠의 법칙으로 인해 전류를 억제하게 된다. 인덕턴스가 커질수록 전류가 억제되어 전력이 낮게 전달되므로 인덕턴스를 작게 설정한다. 이에 따라 단일 무선 전력 전송 시스템의 송신 Coil과 수신 Coil의 Self 인덕턴스인 190.6uH, 204.6uH에서 다중 무선 전력 전송 시스템의 송신 Coil과 수신 Coil의 Self 인덕턴스를 15uH로 조절한다.

다음은 Coil의 반경을 크게 하는 것이다. Coil의 직경과 권선을 조절해야 하는데 권선의 양도 중요하지만 반경이 중요하다. 여기서 Q-factor의 식 $Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f * u_r * u_0 * N^2 * \pi * r^2}{L * R}$ 을 이용하여 반경이 커질수록 Coil의 품질이 높아져 더 높은 전력을 전달시킨다. 이에 따라 Coil의 반경을 10cm에서 20cm로 늘려 진행한다. Q-factor가 늘어날수록 높은 전력을 전달하지만 민감도가 높아져 약간의 흔들림으로도 전력 전달이 불안정해질 수 있기 때문에 아크릴 판으로 고정하였다.

마지막으로 Coil의 규격을 변경한다. 아래의 [그림 3.5.a]와 [그림 3.5.b]는 AWG규격과 SQ 규격의 전선을 직경에 따라 저항과 허용 전류에 맞춰 정리한 표이다.

AWG	스퀘어(SQ) (mm ²)	직경 (in) (mm)		저항 (Ω/km)	허용전류 (A)
0000(4/0)	107	0.46	11.684	0.1608	280~298
000(3/0)	85	0.4096	10.405	0.2028	240~257
00(2/0)	67.4	0.3548	9.266	0.2557	223
0(1/0)	53.5	0.3249	8.251	0.3224	175~190
1	42.4	0.2893	7.348	0.4066	165
2	33.6	0.2576	6.544	0.5127	130~139
3	26.7	0.2294	5.827	0.6465	125
4	21.2	0.2043	5.189	0.8152	96~107
5	16.8	0.1819	4.621	1.028	94
6	13.3	0.162	4.115	1.296	72~81
7	10.5	0.1443	3.665	1.634	70
8	8.37	0.1285	3.264	2.061	55~62
9	6.63	0.1144	2.906	2.599	55
10	5.26	0.1019	2.588	3.277	40~48
11	4.17	0.0907	2.305	4.132	38
12	3.31	0.0808	2.053	5.211	28~35
13	2.62	0.072	1.828	6.571	28
14	2.08	0.0641	1.628	8.286	18~27
15	1.65	0.0571	1.45	10.45	19
16	1.31	0.0508	1.291	13.17	12~19
17	1.04	0.0453	1.15	16.61	16
18	0.823	0.0403	1.024	20.95	7~16

[그림 3.5.a] AWG규격과 SQ 규격의 전선을 직경에 따라 저항과 허용 전류에 맞춰 정리한 표

AWG	스퀘어(SQ) (mm ²)	직경		저항 (Ω /km)	허용전류 (A)
		(in)	(mm)		
19	0.653	0.0359	0.912	26.42	5.5
20	0.518	0.032	0.812	33.31	4.5
21	0.41	0.0285	0.723	42	3.8
22	0.326	0.0253	0.644	52.96	3
23	0.258	0.0226	0.573	66.79	2.2
24	0.205	0.0201	0.511	84.22	0.588
25	0.162	0.0179	0.455	106.2	0.477
26	0.129	0.0159	0.405	133.9	0.347
27	0.102	0.0142	0.361	168.9	0.288
28	0.081	0.0126	0.321	212.9	0.25
29	0.0642	0.0113	0.286	268.5	0.212
30	0.0509	0.01	0.255	338.6	0.147
31	0.0404	0.00893	0.227	426.9	0.12
32	0.032	0.00708	0.202	538.3	0.093
33	0.0254	0.0063	0.18	678.8	0.075
34	0.0201	0.0063	0.16	856	0.06
35	0.016	0.00561	0.143	1079	0.045
36	0.0127	0.005	0.127	1361	0.04
37	0.01	0.00445	0.113	1716	0.028
38	0.0797	0.00397	0.101	2164	0.024
39	0.00632	0.00353	0.0897	2729	0.019
40	0.00314	0.00314	0.0799	3441	0.015

[그림 3.5.b] AWG규격과 SQ 규격의 전선을 직경에 따라 저항과 허용 전류에 맞춰 정리한 표

다중 무선 전력 전송 시스템의 Coil to Coil 단계에서 Coil의 직경이 더 커질수록 저항이 작아지고 허용 전류가 커지므로 직경이 큰 Coil을 사용한다. 이에 따라 단일 무선 전력 전송 시스템에서 직경이 0.3mm이며 km당 저항이 212 Ω 이고 허용 전류가 0.25A에서 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 직경이 1mm이며 km당 저항이 20.95 Ω 이고 허용 전류가 7~16A인 Coil을 사용하였다. Coil to Coil 단계에서 Coil의 인덕턴스와 크기, 규격을 변경하여 Coil간의 전력을 높게 전달할 수 있다.

3.3 다중 무선 전력 전송 시스템의 예상 Topology

단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 하여 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계한다. 다중 무선 전력 전송 시스템은 단일 무선 전력 전송 시스템에서 Coil to Coil의 Coil을 여러 개 사용한다는 차이 점이 있다.

이에 따라 Coil이 여러 개 있을 때 나올 수 있는 경우를 크게 3가지로 나눌 수 있다. 송신부의 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 할 때와 송신부와 수신부의 회로에 연결되는 Coil을 다중으로 할 때, 수신부의 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 할 때로 나뉜다. 또한 각각의 경우에서 Coil을 다중으로 사용할 때 연결하는 송신부 or 수신부의 회로를 Coil의 개수에 맞게 다중으로 연결할 것인지 아니면 다중 Coil을 하나의 회로에 연결할 것 인지로 나뉘게 된다. 이러한 각각의 경우에 대해서 어떤 식으로 분석할 것인 것 다중 무선 전력 전송 시스템 결과에 대해서 예상한다.

위의 경우에 대해 송신부 회로에 공급되는 전력 분배나 Coil을 송신부나 수신부 회로에 연결하는 방법, 다중 Coil로 구성했을 때의 자기장 영향, Coil의 크기를 줄였을 때의 영향 등을 고려할 수 있다. 다중 Coil의 개수에 맞게 연결되는 송신부나 수신부의 회로를 늘릴 경우에 이때 분배되는 전력을 확인해야 하며, 다중 Coil을 하나의 송신부나 수신부의 회로에 연결할 경우 연결한 Coil의 임피던스의 변화에 따른 전력을 확인해야 한다.

또한 다중 Coil로 구성했을 때 Coil간의 자기장 영향으로 인해 무선 전력 전송에 영향을 주기 때문에 이에 따른 상호 인덕턴스와 k-factor를 계산하여 Pspice 시뮬레이션 수행 결과를 통해 확인할 수 있고, 다중 Coil 사용으로 인한 Coil의 크기가 줄었을 때 권수나 외경, 내경에 대한 Self 인덕턴스와 Q-factor를 고려해야 한다.

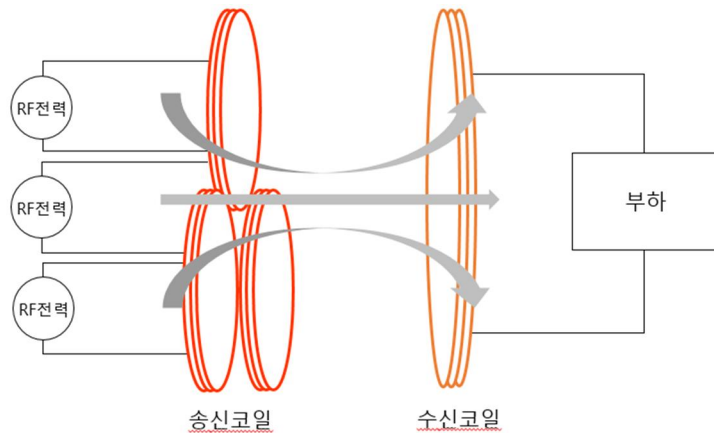
3.3.1 송신부의 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 연결한 경우

다중 무선 전력 전송 시스템의 송신부의 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 할 경우 2가지로 나눌 수 있다. 다중 Coil이 송신부 회로와 각각 연결된 경우

와 다중 Coil이 하나의 송신부 회로와 연결된 경우로 구분되며 각각의 경우에 대한 다중 무선 전력 전송 시스템 설계 결과를 예상한다.

다중 Coil이 각각의 송신부 회로와 연결된 경우는 아래의 [그림 3.6]과 같이 여러 개의 송신부 회로로부터 RF 전력 신호가 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되기 때문에 부하되는 전력이 많아진다. 이때 송신 Coil을 다중 Coil로 구성하면서 Coil의 크기를 작게 하기 때문에 Coil의 반경이 줄어들어 이에 따른 외경과 내경에 대한 Q-factor와 Self 인덕턴스를 고려해야 한다. 또한 송신 Coil이 다중 Coil로 구성되어 있어 각각의 송신 Coil과 수신 Coil간의 자기장 영향과 서로 다른 송신 Coil간의 자기장 영향을 고려해야 한다.

이에 대하여 마주보고 있는 형태의 송신 Coil과 수신 Coil의 k-factor와 평면상에서 송신 Coil간의 k-factor와 평면상에서 송신 Coil간의 k-factor를 계산하여 Pspice 시뮬레이션 수행 결과를 확인한다.

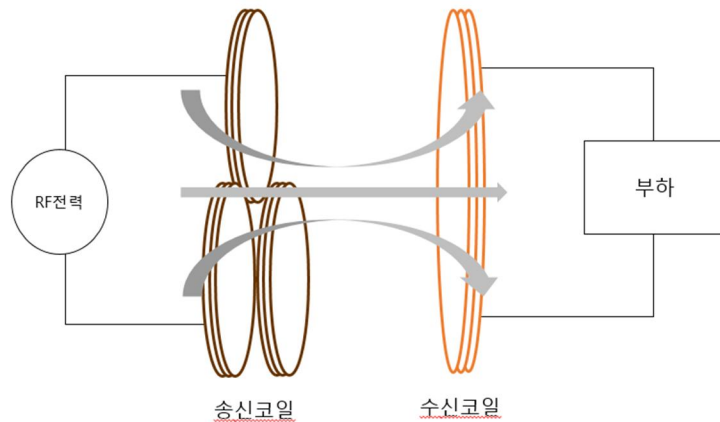


[그림 3.6] 송신부 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 할 경우

송신부 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 할 경우 중 하나의 송신부 회로와 다중 Coil이 연결된 경우에 대해서 살펴본다. 하나의 송신부 회로와 다중 Coil

이 연결된 경우는 아래의 [그림 3.7]을 보았을 때 다중 Coil이 각각의 송신부 회로와 연결된 경우보다 공급되는 RF전력이 낮아지기 때문에 위의 [그림 3.6]의 송신부 회로와 Coil이 각각 연결된 경우보다 부하되는 전력이 낮아지지만 송신 Coil이 하나의 송신부 회로와 병렬로 연결되면서 송신부 회로에 연결되는 Coil의 임피던스가 낮아지기 때문에 옴의 법칙으로 인해 전류의 흐름이 증가하여 송신 Coil이 1개로 구성 되었을 때보다 전력 손실이 낮아질 것으로 볼 수 있다.

하나의 송신부 회로와 다중 Coil이 연결된 경우도 앞의 경우와 마찬가지로 Coil의 크기 변화에 따른 Q-factor와 Self 인덕턴스를 고려하며 Coil간의 k-factor를 계산하여 Pspice 시뮬레이션 수행 결과를 확인한다.



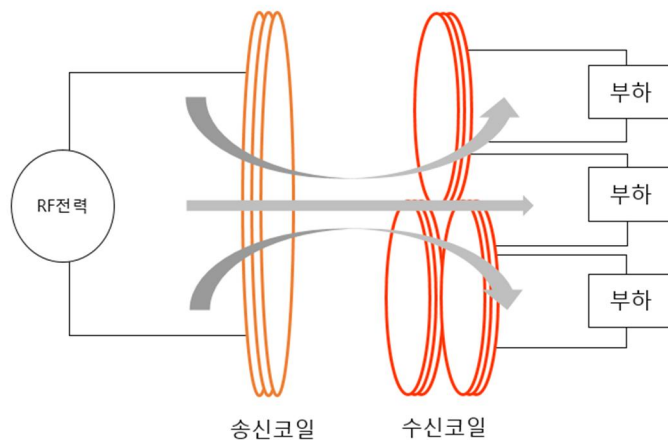
[그림 3.7] 하나의 송신부 회로와 다중 Coil이 연결된 경우

3.3.2 수신부의 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 연결한 경우

앞에서 송신부의 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 한 경우와 같이 수신부의 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 한 경우를 살펴본다. 수신부의 회로에

연결되는 Coil만 다중으로 연결한 경우도 마찬가지로 다중 Coil이 수신부 회로와 각각 연결된 경우와 다중 Coil이 하나의 수신부 회로와 연결된 경우로 나뉜다.

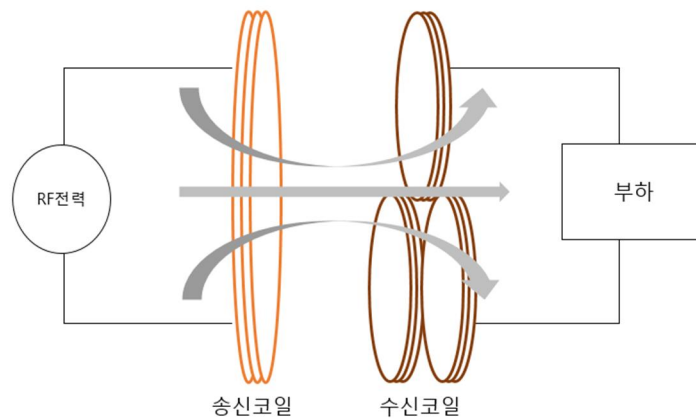
다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 경우는 아래의 [그림 3.8]과 같이 부하되는 전력이 많아지기 때문에 전력 손실이 발생하게 되지만 여러 개의 부하로 에너지를 전달 할 수 있다는 장점이 있다. 수신부의 회로에 연결되는 Coil이 다중 Coil로 구성되어 있어 이때의 Q-factor와 Self 인덕턴스를 고려하며 Coil간의 k-factor를 계산하여 Pspice 시뮬레이션 수행 결과를 통해 예측하여 확인한다.



[그림 3.8] 다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 경우

다중 Coil이 하나의 수신부 회로와 연결된 회로는 아래의 [그림 3.9]를 보았을 때 앞의 다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 경우와 달리 전력 여러 개의 부하가 아닌 하나의 부하로 에너지를 전달하기 때문에 손실이 없어지며 수신부 회로와 병렬로 연결되기 때문에 수신부 회로에 연결되는 Coil의 임

피턴스가 줄어들어 전류의 흐름이 증가하여 전력이 증가한다. 수신부 회로에 연결되는 Coil이 다중 Coil로 구성되어 있어 이 때의 Q-factor와 Self 인덕턴스를 고려하며 Coil간의 k-factor를 계산하여 Pspice 시뮬레이션 수행결과를 확인하여 예측할 수 있다.



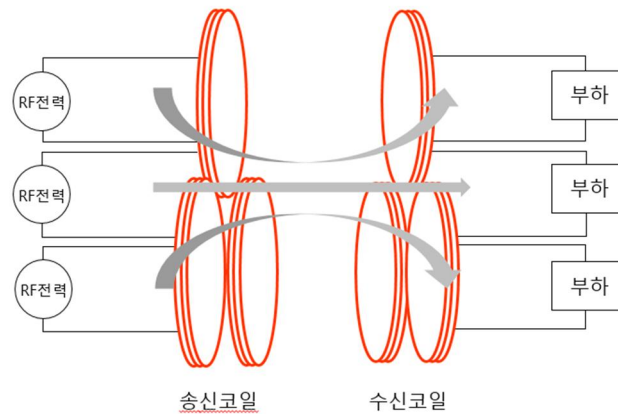
[그림 3.9] 다중 Coil이 하나의 수신부 회로와 연결된 경우

3.3.3 송신부와 수신부 회로에 연결되는 Coil을 다중으로 한 경우

마지막으로 송신부와 수신부 회로에 연결되는 Coil을 다중으로 한 경우 Coil이 송신부나 수신부 회로와 각각 연결된 경우와 하나의 회로와 연결된 경우로 총 4가지로 나뉜다. 이 4가지의 경우는 앞의 경우에서 나온 송신부 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 한 경우와 수신부 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 한 경우를 병합한 것으로 볼 수 있다. 이에 따라 각 경우에 대해 살펴보면서 다중 Coil로 구성하였을 때 줄어드는 반경과 권수에 대한 Q-factor와 Self 인덕턴스를 고려하며 마주보고 있는 형태의 송신 Coil과 수신 Coil의 k-factor와 평면상에서의 Coil 간의 k-factor를 계산하여 Pspice 시뮬레이션을

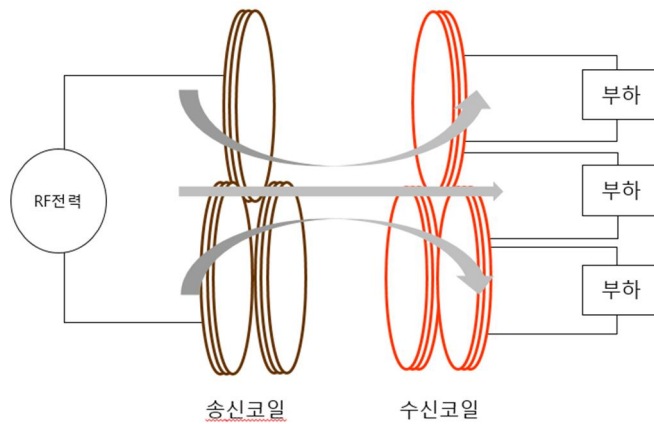
수행하여 결과를 예측하여 확인한다.

먼저 다중 Coil이 송신부와 수신부의 회로와 각각 연결된 경우를 살펴본다. 앞서서와 마찬가지로 [그림 3.10]을 보았을 때 여러 개의 송신부 회로로부터 RF전력 신호가 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되기 때문에 부하되는 전력이 많아지고, 다중 Coil이 수신부 회로와 각각 연결되기 때문에 부하되는 전력이 많아지므로 전력 손실이 발생하게 되지만 여러 개의 부하로 전달 할 수 있다는 장점이 있다.



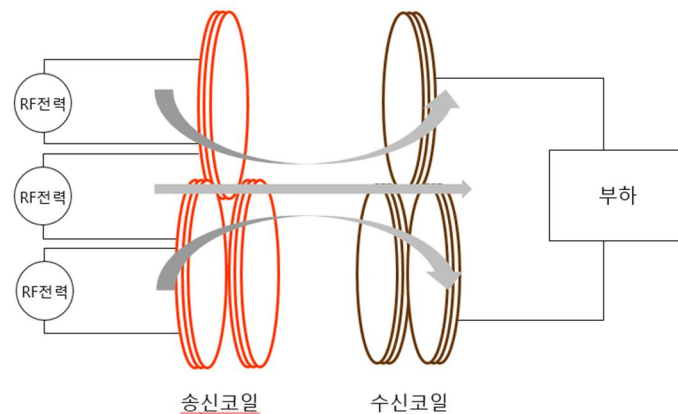
[그림 3.10] 다중 Coil이 송신부와 수신부의 회로와 각각 연결된 경우

다중 Coil이 하나의 송신부 회로와 각각의 수신부 회로와 연결된 경우 아래의 [그림 3.11]과 같이 여러 개의 송신 회로와 연결되었을 때보다 전력 공급이 낮아지지만 송신 Coil 여러 개가 하나의 송신부 회로와 병렬로 연결되면서 송신부 회로에 연결되는 Coil의 임피던스가 낮아지기 때문에 옴의 법칙으로 인해 전류의 흐름이 증가하여 송신 Coil이 1개로 구성 되었을 때보다 전력 손실이 낮아지고, 다중 Coil이 수신부 회로와 각각 연결되기 때문에 부하되는 전력이 많아져서 전력 손실이 발생하게 되지만 여러 개의 부하로 전달할 수 있다는 장점이 있다.



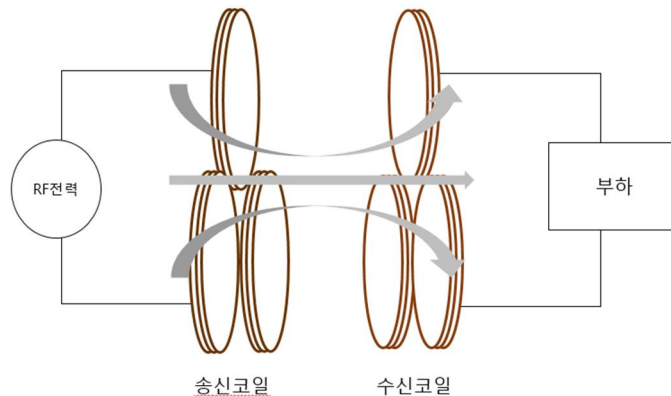
[그림 3.11] 다중 Coil이 하나의 송신부 회로와 각각의 수신부 회로와 연결된 경우

다중 Coil이 각각의 송신부 회로와 하나의 수신부 회로와 연결된 경우 아래의 [그림 3.12]과 같이 여러 개의 송신부 회로로부터 RF전력 신호가 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되기 때문에 부하되는 전력이 많아지고, 다중 Coil이 수신부 회로와 병렬로 연결되기 때문에 수신부 회로의 임피던스가 줄어들어 전류의 흐름이 증가하여 전력이 증가한다.



[그림 3.12] 다중 Coil이 각각의 송신부 회로와 하나의 수신부 회로와 연결된 경우

다중 Coil이 하나의 송신부와 하나의 수신부 회로와 연결된 경우 아래의 [그림 3.13]을 보았을 때 여러 개의 송신 회로와 연결된 경우보다 전력 공급이 낮아지지만 송신 Coil 여러 개가 하나의 송신부 회로와 병렬로 연결되면서 송신부 회로의 임피던스가 낮아지기 때문에 옴의 법칙으로 인해 전류의 흐름이 증가하여 송신 Coil이 1개로 구성 되었을 때보다 전력 손실이 낮아지고, 다중 Coil이 수신부 회로와 병렬로 연결되기 때문에 수신부 회로의 임피던스가 줄어들어 전류의 흐름이 증가하여 전력이 증가한다.



[그림 3.13] 다중 Coil이 하나의 송신부 회로와 하나의 수신부의 회로와 연결된 경우

다중 무선 전력 전송 시스템의 경우의 Coil to Coil 단계에서 송신부 회로와 수신부 회로에서 연결되는 Coil간의 관계를 통해 예상되는 topology를 확인할 수 있었고 이번 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계 할 때 Coil to Coil 단계에서 수신부의 회로에 연결되는 Coil만 다중으로 한 경우에서 다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 회로를 선정하였다.

다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 경우는 수신부 회로의 여러 개의 부하 저항에 에너지를 전달하기 때문에 부하되는 전력이 많아져서 전력 손실이 발생하지만 여러 개의 부하로 에너지를 공급할 수 있다는 장점이 있으며 다중 무선 전력 전송 시스템의 예상되는 Topology중 기본적인 형태의 전자기 유도 방식의 무선 전력 전송 시스템이기 때문에 Coil to Coil 단계에서 송신부 회로와 수신부 회로에 연결되는 다중 Coil의 형태를 다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 경우로 선정하였으며 이에 따라 마주 보고 있는 형태의 송신 Coil과 수신 Coil간의 자기장 영향과 서로 다른 수신 Coil간의 자기장 영향을 고려한다. 이에 대하여 송신 Coil과 수신 Coil 간의 k-factor와 수신 Coil간의 k-factor를 계산하여 Pspice 시뮬레이션 수행을 통해 예측하고 확인한다.

3.4 Analytic Model 분석 및 다중 Coil 인덕턴스 특성 추출

3.3 장에서 다중 무선 전력 전송 시스템의 다중 무선 전력 전송 시스템에서 송신부 회로 및 수신부 회로에 연결되는 Tx Coil과 Rx Coil에 대한 예상 Topology를 예상해보았다. 3.4장에서는 예상한 Topology중에서 선정한 다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 경우에 대해서 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하기 위한 Analytic Model을 분석하는 과정을 소개한다.

Analytic Model 분석은 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하는데 있어서 Pspice 시뮬레이션 수행 예상 값과 실제 측정값을 비교하기 위해 Pspice 시뮬레이션을 수행하기 위한 Self 인덕턴스, 상호 인덕턴스, k-factor 값을 도출할 수 있으며 앞서 단일 무선 전력 전송 시스템을 설계하면서 발생했던 Pspice 시뮬레이션을 수행하기 위해 LCR 미터기를 사용하는 것을 최소화 시

켜준다.

3.4.1 Self 인덕턴스 Analytic Model 분석 및 Self 인덕턴스 추출

Coil의 Self 인덕턴스를 계산하기 위해서 아래의 [그림 3.14]와 같이 많은 매개변수를 고려해야 한다. Self 인덕턴스를 계산하기 위해서 Coil의 진공중의 투자율과 권수, 내경과 외경으로 이루어진 식으로 구할 수 있다. [1]

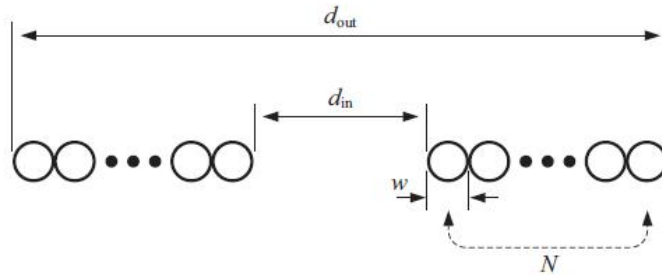


Fig. 4. Single circular flat spiral coil (d_{out} , d_{in} – outer/inner diameter, w – outer diameter of wire, N – number of turns)

[그림 3.14] 기존 문헌에서의 Self 인덕턴스 Analytic Model

Coil의 Self 인덕턴스를 구하는 식은 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{1}{2} * \mu_0 * N^2 * d_{avg} \left[\ln \frac{2.46}{\rho} + 0.2 * \rho^2 \right]$$

(μ_0 : 진공 중의 투자율, N : 권수)

Coil의 Self 인덕턴스를 구하기 위한 d_{avg} 와 ρ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_{avg} = (d_{out} + d_{in})/2, \rho = (d_{out} - d_{in})/(d_{out} + d_{in})$$

(d_{in} : 내경, d_{out} : 외경)

송신 Coil과 수신 Coil의 Self 인덕턴스를 15uH 정하였고 송신 Coil의 Q-factor를 높이기 위해 단일 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때의 Coil의 반

경인 10cm에서 20cm로 늘려 진행하였으며 수신 Coil은 수신부 회로에 연결되는 Coil의 개수가 늘어나서 Coil의 반경이 줄어들기 때문에 기존의 10cm로 유지하였다. Self 인덕턴스 Analytic Model을 참고하여 계산한 결과 송신 Coil의 Self 인덕턴스는 24.15uH, 수신 Coil의 Self 인덕턴스는 18.32uH가 나오는 것을 확인하였다. 송신 Coil과 수신 Coil의 Self 인덕턴스가 15uH보다 높게 나와서 권수를 낮춰서 Self 인덕턴스를 맞춘다.

이에 따라 송신 Coil과 수신 Coil을 처음 정한 규격대로 LCR 미터기를 통해 송신 Coil과 수신 Coil의 Self 인덕턴스를 측정하였다. LCR 미터기를 통해 송신 Coil과 수신 Coil의 Self 인덕턴스를 측정한 결과 송신 Coil과 수신 Coil이 20uH로 나오게 되는 것을 확인하였으며 권수를 낮춰 아래의 [그림 3.15.a], [그림 3.15.b]과 같이 송신 Coil의 Self 인덕턴스를 15.68uH, 수신 Coil의 Self 인덕턴스를 15.64uH로 조절하였다.



[그림 3.15.a] 송신 Coil의 Self 인덕턴스 측정



[그림 3.15.b] 수신 Coil의 Self 인덕턴스 측정

3.4.2 상호 인덕턴스 Analytic Model 분석 및 상호 인덕턴스 추출

상호 인덕턴스는 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계함에 따라 Coil의 개수가 늘어남에 따라 Coil이 오정렬이 되며 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 수신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한다. 상호 인덕턴스를 구할 때 기존 문헌을 참고해서 Analytic Model을 이용하여 Shifted된 Coil간의 상호 인дук턴스를 구할 수 있다.

상호 인덕턴스 Analytic Model을 분석하는 것은 Self 인덕턴스 Analytic Model을 분석한 것과 마찬가지로 기존 문헌을 참고하여 분석하였다. 이에 따라 상호 인덕턴스를 구하는 것은 기존 문헌의 테일러 전개를 응용한 Neumann-Neumann Analytic Model과 축의 거리와 평면상의 거리를 고려한 Neumann-Neumann Analytic Model, 벡터 자기장 포텐셜 관점에서 타원 적분을 활용한 상호 인덕턴스 계산 Analytic Model을 참고하였으며 참고한 Analytic Model을 통해 계산하고 LCR 미터기로 상호 인덕턴스를 측정하여

상호 인덕턴스가 가장 근접한 것을 본 논문에서 사용할 다중 무선 전력 전송 시스템의 상호 인덕턴스 Analytic Model로 선정하였다.

먼저 오정렬의 상호 인덕턴스를 구하는 아래의 [그림 3.16]의 테일러 전개를 응용한 Neumann-Neumann Analytic model 방법에서는 Grover의 공식 및 필라멘트 방법을 사용하여 연구되었다. 앞에서 self 인덕턴스를 구할 때 사용한 Coil의 규격을 이용하여 오정렬된 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한다. [2]

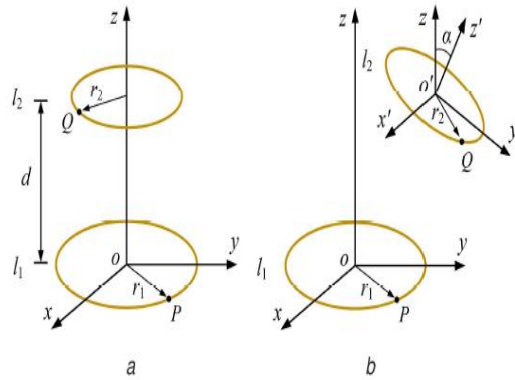


Fig. 1 Relative position of two filamentary circular coils
(a) Two coaxial filamentary circular coils, (b) Two filamentary circular coils with lateral and angular misalignments

[그림 3.16] 테일러 전개를 응용한 Neumann-Neumann Analytic model 방법에서의 상호 인덕턴스 Analytic Model

Primary Coil와 Secondary Coil의 좌표가 $O = (0, 0, 0)$, $O' = (0, c, d)$ 이며 오정렬된 Coil간의 상호 인덕턴스를 구하는 식은 다음과 같다.

$$M = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_1 r_2 (\sin \theta \sin \varphi + \cos a \cos \theta \cos \varphi)}{\sqrt{(r_1 \cos \theta - r_2 \cos \varphi)^2 + (r_1 \sin \theta - r_2 \sin \varphi \cos a - c)^2 + (r_2 \sin \varphi \sin a - d)^2}} d\theta d\varphi$$

(μ_0 : 진공 중의 투자율, N_1/N_2 : Turn No of Two filamentary circular Coil)

(r_1/r_2 : Two filamentary circular Coil radius, d: distance between Two filamentary circular)

(α : Angular misalignment)

위의 방법을 통해 다중 무선 전력 전송 시스템의 오정렬된 Coil간의 상호 인덕턴스를 구할 수 있으며 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하는데 있어서 필요한 상호 인덕턴스는 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스가 있으므로 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한다. 앞서 구한 송신 Coil과 수신 Coil Self 인덕턴스의 규격을 토대로 송신 Coil과 수신 Coil간의 거리에 따른 상호 인덕턴스를 살펴본 후에 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한다.

위의 방법으로 오정렬 되어있을 때의 송신 Coil과 수신 Coil의 상호 인덕턴스를 계산한 결과 1cm부터 5cm까지 3.82uH, 2.74uH, 2.13uH, 1.71uH, 1.41uH가 나온다. 다음으로 수신 Coil의 상호 인덕턴스를 계산한 결과 1.118uH가 나오게 된다.

다음으로 아래의 [그림 3.17]과 같이 오정렬된 Coil쌍의 상호 인덕턴스를 구하는 축의 거리와 평면상의 거리를 고려한 Neumann-Neumann Analytic model 방법은 “M. Soma, D. C. Galbraith, and R. L. White, “Radio-frequency Coils in implantable devices: Misalignment analysis and design procedure,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vols. BME-34, no. 4, pp. 276-282, Apr. 1987. 를 참고하여 연구되었다. [3]

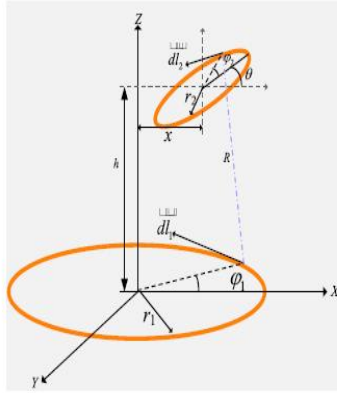


Fig. 1. Configuration of two filamentary circular coils with lateral and angular misalignments.

[그림 3.17] 축의 거리와 평면상의 거리를 고려한 Neumann-Neumann Analytic model 방법에서의 상호 인덕턴스 Analytic Model

참고한 문헌의 Modeling of Mutual Inductance Between Two Misalignment Planar Coils in Wireless Power Transfer Neumann's equation 에 근거한 상호 인덕턴스 M의 식은 다음과 같다.

$$M = 4\pi\mu_0 \iint \frac{r_1 r_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{R} d\varphi_1 d\varphi_2$$

(μ_0 : 진공 중의 투자율, r_1/r_2 : Two filamentary circular Coil radius)

R은 Coil간의 거리이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \sqrt{(r_1 \cos \varphi_1 - x - r_2 \cos \theta \cos \varphi_2)^2 + (r_1 \sin \varphi_1 - r_2 \sin \varphi_2)^2 + (h + r_2 \sin \theta \cos \varphi_2)^2}$$

이에 따라 위의 두 식의 차를 통해 다음과 같은 변수들을 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{2r_1 x}{\tau}, \quad \beta = \frac{2hr_2 \sin \theta - 2xr_2 \cos \theta}{\tau}, \quad \gamma = \frac{2r_1 r_2 \cos \theta}{\tau}, \quad \chi = \frac{2r_1 r_2}{\tau}$$

(τ : 6.28, θ : Angular misalignment)

(x : Angular misalignment, h : distance between Two filamentary circular)

이를 통해 M의 수식을 정리하여 다음과 같이 나타낸다.

M

$$= \frac{\mu_0 r_1 r_2}{4\pi \sqrt{\tau}} \iint [\sin \phi_1 \sin \phi_2 \cos \theta + \cos \phi_1 \cos \phi_2] \\ \times \left[1 - \left(\alpha \cos \phi_1 + \beta \cos \phi_2 + \gamma \cos \phi_1 \cos \phi_2 + \chi \sin \phi_1 \sin \phi_2 \right) \right]^{-\frac{1}{2}} d\phi_1 d\phi_2$$

M의 수식은 WPT시스템에서 $\alpha, \beta, \gamma, \chi$ 의 값이 1보다 낮기에 테일러 전개에 의해 고차함수는 무시되어 다음과 같이 식을 단순화시킬 수 있다.

M

$$= \frac{(\mu_0 \pi r_1^2 r_2^2 \cos \theta)}{2(\tau)^{\frac{3}{2}}} \left[1 + \frac{3\alpha\beta}{4\gamma} + \frac{15}{64}(\gamma^2 + \chi^2 + 4\alpha^2 + 4\beta^2 + \frac{105\alpha\beta}{512\gamma}(11\gamma^2 + 4\alpha^2 \right. \\ \left. + 4\beta^2 + \chi^2 + m_5) \right]$$

이 때 m_5 는 다음과 같이 나타낸다.

$$m_5 = \frac{315}{8192} [3\gamma^4 + 3\chi^4 + 24\alpha^4 + 24\beta^4 + 2\gamma 2\chi^2 + 36\gamma 2\alpha^2 + 36\gamma 2\beta^2 + 12\chi 2\alpha^2 + 12\chi^2 \beta^2 + 120\alpha^2 \beta^2]$$

원형 Coil의 턴수를 고려하였을 때 총 상호 인덕턴스(M_{total})는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{total} = K \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} M_{ij}, (K=1 \text{ for circular coil})$$

(n_1/n_2 : Turn No of Two filamentary circular Coil)

테일러 전개를 응용한 Neumann-Neumann Analytic model으로 상호 인덕턴스를 구했던 방식대로 먼저 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한 후에 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한다.

위의 방법을 통해 상호 인덕턴스를 구한 결과 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스는 1cm부터 5cm까지 5.4uH, 5.6uH, 5.8uH, 6uH, 6.2uH가 나오는 것을 확인하였으며 수신 Coil간의 상호 인덕턴스는 1.142uH가 나오는

것을 확인하였다.

송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구하는 과정에서 거리가 늘어남에 따라 k-factor가 줄어들어 상호 인덕턴스도 마찬가지로 줄어야 하지만 거리가 늘어남에 따라 계산을 통해 상호 인덕턴스도 늘어나는 것으로 확인되었다. 상호 인덕턴스의 크기가 거리가 증가함에 따라 증가하는 이유는 β 를 구하는 과정에서 $2\ell r_2 \sin \theta$ 가 $2x r_2 \cos \theta$ 보다 작기 때문에 음수가 나왔기 때문이다. 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구할 때 축의 거리와 평면상의 거리를 고려한 Neumann-Neumann Analytic model 방법은 1cm 일때만 유효하고 거리를 늘려가는 것은 적절하지 않다고 판단하였다.

마지막으로 아래의 [그림 3.18]과 같이 오정렬된 Coil쌍의 상호 인덕턴스를 구하는 벡터 자기장 포텐셜 관점에서 타원 적분을 활용한 상호 인덕턴스 계산 Analytic model 방법은 Coil을 z축으로 내려보았을 때 교차점과 겹쳐지는 부분의 삼각형의 면적을 이용하여 구하였다 [4]

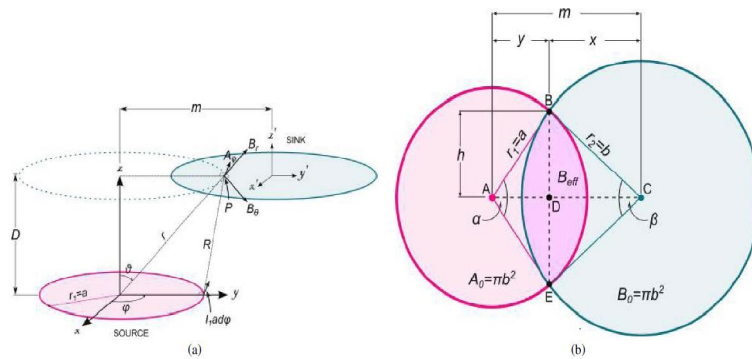


Figure 3. Axially misaligned coils: (a) Vector Potential for Misaligned Coil Pair, (b) Top View of Misaligned Coil Pair

[그림 3.18] 벡터 자기장 포텐셜 관점에서 타원 적분을 활용한 방법에서의

상호 인덕턴스 Analytic Model

벡터 자기장 포텐셜 관점에서 타원 적분을 활용한 상호 인덕턴스 계산 Analytic model 방법은 다음과 같이 상호 인덕턴스를 구할 수 있다.

$$M = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (\pi a_i^2) (B_{eff,j}) \frac{\mu_0}{\pi \left(\sqrt{b_j^2 + z^2} \right)}$$

(μ_0 : 진공 중의 투자율, N_1/N_2 : Turn No of Two filamentary circular Coil)

(a/b: Two filamentary circular Coil radius, z: distance between Two filamentary circular)

위의 식에서 B_{eff} 는 교차점이며 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$B_{eff} = \frac{1}{180^\circ} \cos^{-1} \left(\frac{am}{a^2 + b^2} \right) \pi a^2 + \frac{1}{180^\circ} \cos^{-1} \left(\frac{bm}{a^2 + b^2} \right) \pi b^2 - \left(\frac{m}{a^2 + b^2} \right) \left[\sqrt{\frac{m^2}{(a^2 + b^2)^2 + 1}} \right] (a^3 + b^3)$$

위의 두 식을 통해 먼저 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한다. 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스는 거리에 따라 1cm 에서 5cm 까지의 상호 인덕턴스는 0.26uH, 0.26uH, 0.25uH, 0.24uH, 0.23uH 계산되었다. 다음으로 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구한다. 수신 Coil간의 상호 인덕턴스는 $8.79 * 10^{-8}$ uH로 계산되었다.

벡터 자기장 관점에서 타원 적분을 활용한 상호 인덕턴스 계산 방법은 Coil과 Coil간의 교차되는 부분의 면적을 이용하여 구하는 방법이며 다중 무선 전력 전송 시스템의 예상 Topology중 다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 회로는 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구할 때와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구할 때 교차되는 면적이 없어서 위의 방법을 통해 상호 인덕턴스를 구하는 것은 적절하지 않다고 판단하였다.

아래의 [표5]는 위의 기존 문헌을 참고한 상호 인덕턴스 Analytic Model을

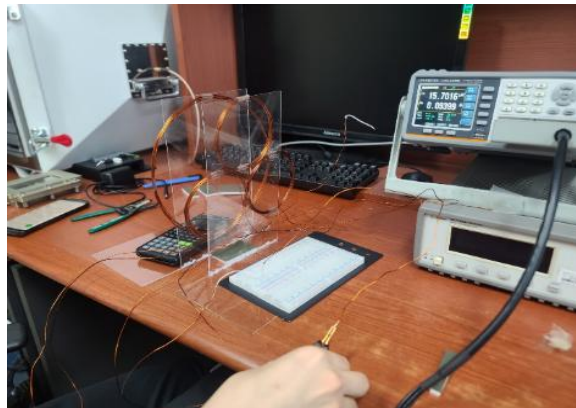
이용하여 계산한 값이다.

$\begin{matrix} \text{d} \\ \text{M} \end{matrix}$	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	Rx Coil to Rx Coil
Analytic Model 1	3.82uH	2.74uH	2.13uH	1.71uH	1.41uH	1.118uH
Analytic Model 2	5.4uH	5.6uH	5.8uH	6uH	6.2uH	1.142uH
Analytic Model 3	0.26uH	0.26uH	0.25uH	0.24uH	0.23uH	0.087uH

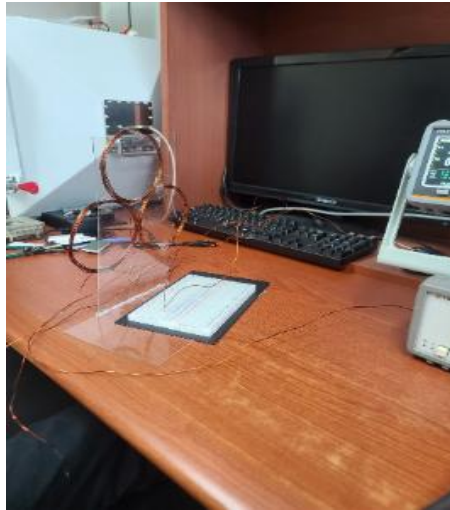
[표5] 기존 문헌을 참고한 상호 인덕턴스 Analytic Model을 이용하여 상호 인덕턴스를 계산한 값

이에 따라 앞서 단일 무선 전력 전송 시스템의 상호 인덕턴스를 측정한 방법을 이용하여 다중 무선 전력 전송 시스템의 거리에 따른 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정한다.

아래의 [그림 3.19.a]와 [그림 3.19.b]은 LCR 미터기를 통해 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정한 것이다.



[그림 3.19.a] 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정



[그림 3.19.b] 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정

아래의 [표6.a]과 [표6.b]는 기존 문헌에서 Analytic Model을 참고하여 계산할 때의 Coil의 규격대로 거리에 따른 송신 Coil과 수신 Coil의 상호 인덕턴스와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 LCR 미터기를 통해 측정한 값이다.

$\begin{matrix} \text{M} \\ \text{d} \end{matrix}$	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
상호 인덕턴스	3.15uH	2.8uH	2.09uH	1.71uH	1.28uH

[표6.a] 송신 Coil과 수신 Coil의 상호 인덕턴스 측정

$\begin{matrix} \text{d} \\ \text{M} \end{matrix}$	1) Rx Coil to Rx Coil	2) Rx Coil to Rx Coil	3) Rx Coil to Rx Coil
M	0.59uH	0.6uH	0.57uH

[표6.b] 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정

이에 따라 아래의 [표7.a]와 [표7.b]는 상호 인덕턴스를 기존 문헌을 참고하여 Analytic Model을 통해 계산한 값과 LCR 미터기를 통해 측정한 값의 오차율을 나타낸 것이다.

d	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
Analytic Model 1과 오차율	21.27%	2.143%	1.914%	0%	10.156%
Analytic Model 2과 오차율	71.42%	100%	177.512%	250.87%	384.37%
Analytic Model 3과 오차율	91.74%	90.714%	88.038%	85.965%	82.031%

[표7.a] 송신 Coil과 수신 Coil간의 계산 값과 측정 값의 오차율

d	1) Rx Coil to Rx Coil	2) Rx Coil to Rx Coil	3) Rx Coil to Rx Coil
Analytic Model 1과 의 오차율	89.49%	86.33%	96.14%
Analytic Model 2과 의 오차율	93.55%	90.33%	100.351%
Analytic Model 3과 의 오차율	98.525%	98.55%	98.525%

[표7.b] 수신 Coil간의 계산 값과 측정 값의 오차율

오차율을 확인한 결과 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정한 값과 Analytic Model 1 방법을 이용하여 계산한 값 즉, 테일러 전개를 응용한 Neumann-Neumann Analytic model로 계산한 값이 가장 유사하였다.

이에 따라 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 구할 때와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 계산할 때 Analytic model은 테일러 전개를 응용한 Neumann-Neumann Analytic model로 정하였으며 이후에 Pspice 시뮬레이션을 수행하여 상호 인덕턴스를 적용할 때 LCR 미터기를 사용하는 것이 아닌 Analytic Model을 통해 상호 인덕턴스를 계산한다.

3.4.3 LCR 미터기 통해 Analytic Model 신뢰성 확보

Analytic Model을 통해 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 계산한 것에 대한 신뢰성을 확보하는 것을 진행한다. 다중 무선 전력 전송 시스템은 단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 확장하여 설계하였으며 단일 무선 전력 전송 시스템은 Coil to Coil 단계에서 Coil이 정렬이 되어있으며 다중 무선 전력 전송 시스템은 Coil의 개수가 늘어남에 따라 Coil to Coil 단계에서 Coil이 오정렬 되어있다.

이에 따라 LCR 미터기를 통해 상호 인덕턴스를 측정할 때도 마찬가지로 Shifted된 Coil의 개수를 늘려가며 상호 인덕턴스를 측정한다. 또한 Analytic Model을 통해 계산된 값은 Shifted된 Coil 1개와의 상호 인덕턴스 계산 값으로 이에 따른 1개의 Coil이 Shifted되었을 때와 여러 개의 Coil이 Shifted되었을 때 상호 인덕턴스 측정 값의 비교가 필요하였다. 먼저 송신 Coil과 Shifted된 수신 Coil 1개의 상호 인덕턴스를 측정한 후 수신 Coil 2개를 이어 붙여서 상호 인덕턴스를 측정한다. 수신 Coil간의 상호 인덕턴스도 마찬가지로 Shifted된 Coil 간의 상호 인덕턴스를 측정하고 이후에 shifted된 Coil을 이어 붙여 나가며 상호 인덕턴스를 측정한다. 아래의 [그림 3.20.a]은 송신 Coil과 첫번째 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정한 것이다.



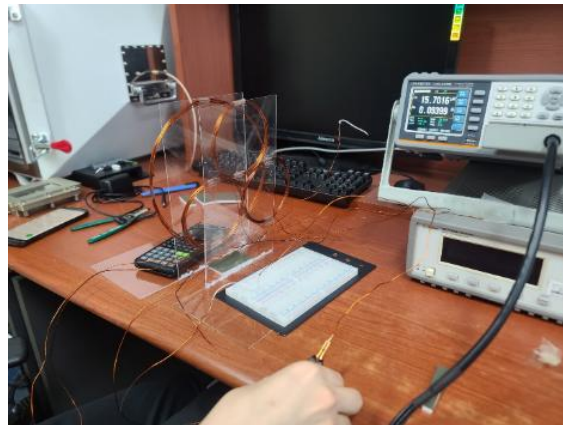
[그림 3.20.a] 송신 Coil과 첫번째 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정

이에 따라 송신 Coil과 두번째 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 세번째 수신 Coil간의 상호 인덕턴스도 같이 측정하였으며 아래의 [표8.a]는 송신 Coil과 첫번째 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 두번째 수신 Coil간의 상호 인덕턴스, 세번째 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정한 것이다.

d(cm)	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
첫번째 수신 Coil	3.1033uH	2.6959uH	2.2401uH	1.9123uH	1.6459uH
두번째 수신 Coil	3.1409uH	2.6958uH	2.2649uH	2.0431uH	1.79uH
세번째 수신 Coil	3.2545uH	3.1202uH	2.3424uH	2.0822uH	1.7718uH

[표8.a] 송신 Coil과 각각의 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정한 값

이후에 shifted된 Coil을 수신 Coil에 이어 붙여서 상호 인덕턴스를 측정한다. 아래의 [그림 3.20.b]은 shifted된 Coil을 수신 Coil에 이어 붙인 것이다.



[그림 3.20.b] shifted된 Coil을 수신 Coil에 이어 붙여서 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정

이에 따라 앞서 측정한 것과 마찬가지로 상호 인덕턴스를 측정하며 아래의 [표8.b]는 shifted된 Coil을 수신 Coil에 이어 붙여서 상호 인덕턴스를 측정한

것이다.

d(cm)	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
첫번째 수신 Coil	2.77uH	2.28uH	2.13uH	1.59uH	1.34uH
두번째 수신 Coil	3.06uH	2.57uH	2.09uH	1.71uH	1.28uH
세번째 수신 Coil	3.15uH	2.8uH	2.09uH	1.71uH	1.28uH

[표8.b] shifted된 Coil을 수신 Coil에 이어 붙여서 상호 인덕턴스를 측정한다

다음으로 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정할 때도 마찬가지로 수신 Coil과 shifted된 수신 Coil 1개와의 상호 인덕턴스를 먼저 측정한 후에 shifted된 수신 Coil을 이어 붙여서 상호 인덕턴스를 측정한다.

아래의 [그림 3.21.a], [그림 3.21.b]은 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정한 것과 Shifted된 수신 Coil을 추가한 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정한다.



[그림 3.21.a] 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정



[그림 3.21.b] Shifted된 수신 Coil을 추가한 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정

이에 따라 다음의 [표9.a], [표9.b]는 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정한 것과 Shifted된 수신 Coil을 추가한 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정한 것이다.

	수신 Coil to 수신 Coil
M(uH)	0.54

[표9.a] 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정한 값

	1)수신 Coil to Rx Coil	2)수신 Coil to Rx Coil	3)수신 Coil to Rx Coil
M(uH)	0.59	0.6	0.57

[표9.b] Shifted된 수신 Coil을 추가한 수신 Coil간의 상호 인덕턴스 측정한 값

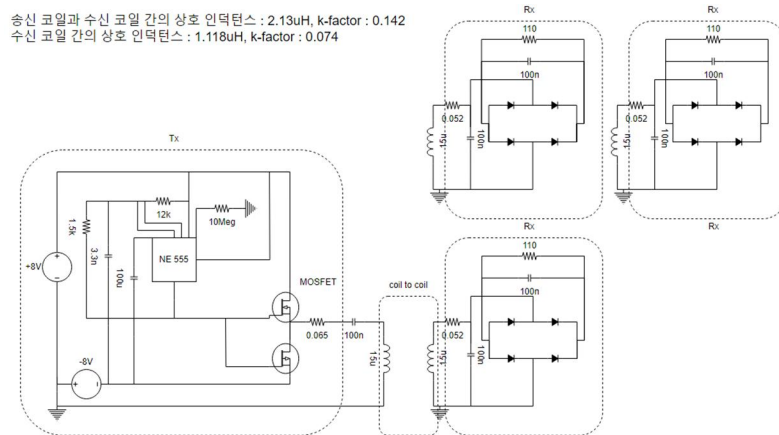
단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 Coil to Coil 단계에서 Coil의 개수를 늘려 다중 무선 전력 전송 시스템 시스템을 설계한 것처럼 LCR 미터기를

사용하여 Shifted된 수신 Coil을 추가하여 Coil간의 상호 인덕턴스를 측정 한 결과 이어붙이기전의 Shifted된 Coil간의 상호 인덕턴스와 유사하다는 것을 확인하였고 Analytic Model을 통해 상호 인덕턴스를 계산한 값과 LCR 미터기를 통해 측정한 값의 신뢰도를 확보할 수 있었다.

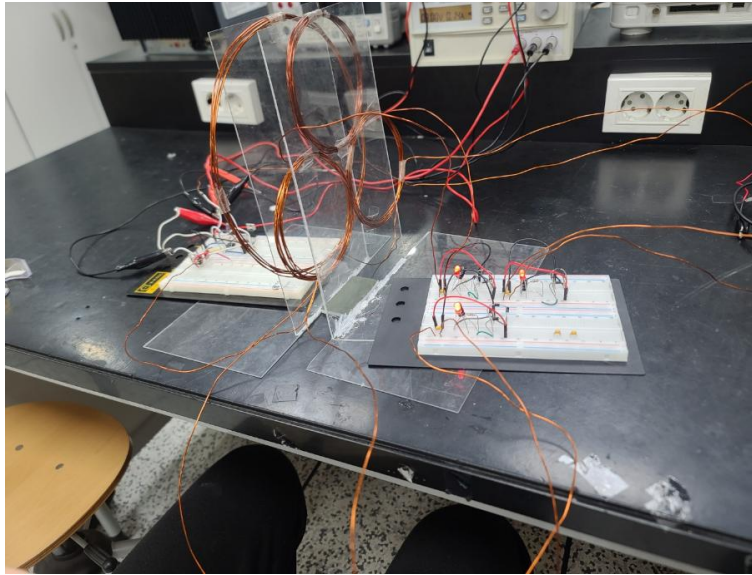
3.5 회로 제작 및 측정 검증

이번 장에서는 Pspice 시뮬레이션 수행을 통해 설계한 Pspice 시뮬레이션 기반 실제 회로를 제작하며 Pspice 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값을 비교하여 Pspice 시뮬레이션과 실제 측정과의 정합성을 확보한다.

아래의 [그림 3.22.a]와 [그림 3.22.b]은 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 회로도도 다중 무선 전력 전송 시스템의 실제 회로이다.

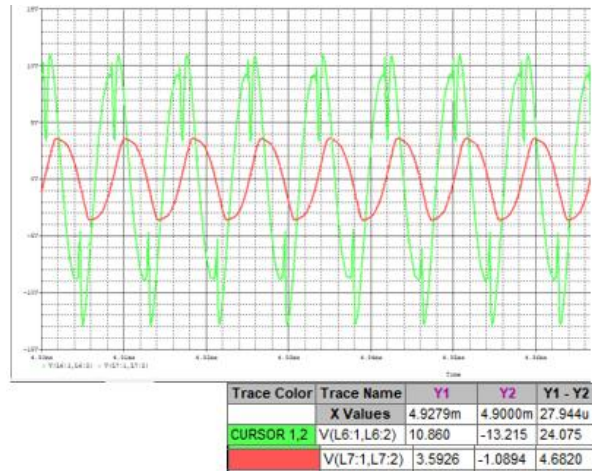


[그림 3.22.a] 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 회로도

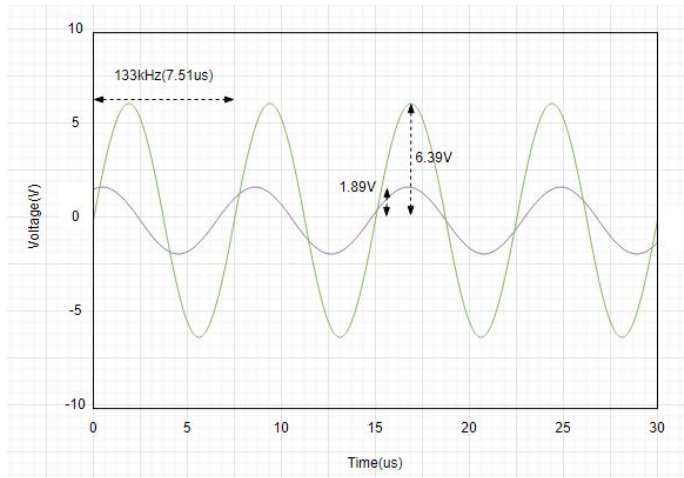


[그림 3.22.b] 다중 무선 전력 전송 시스템의 시뮬레이션 기반 실제 회로
다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션을 수행한 결과를 토대로
예측한 전력 파형이 실제 회로를 통해 나오는지 확인한다.

아래의 [그림 3.23.a]와 [그림 3.23.b]은 공진 주파수가 130kHz이며 거리
가 3cm 일 때 송신 Coil과 수신 Coil의 부하되는 전압을 Pspice 시뮬레이션
을 통해 확인한 것과 디지털 멀티미터기와 오실로스코프로 확인한 것이다.



[그림 3.23.a] 다중 무선 전력 전송 시스템 Pspice 시뮬레이션 수행 결과



[그림 3.23.b] 다중 무선 전력 전송 시스템의 측정 결과

Pspice 시뮬레이션은 한 주기당 시간이 8us이며, 주파수가 130kHz이고 송신 Coil과 수신 Coil의 부하되는 전압은 V_{peak} (Tx): 10.86V, V_{peak} (Rx): 3.59V로 확인 되었으며 실제 측정한 결과 한 주기당 시간이 7.51us이며, 주파수가 133kHz이고 송신 Coil과 수신 Coil의 부하되는 전압은 V_{peak} (Tx): 6.39V, V_{peak} (Rx): 1.89V로 확인 되었다.

Pspice 시뮬레이션 수행 결과가 실제 측정 결과보다 높게 나오는 것을 확인하였으며 수신 Coil의 개수가 바뀔 때의 시뮬레이션 각 구간별 전압/전류, 전력의 예상 값과 실제 측정 값을 비교한다. 아래의 [표10]는 Pspice 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값을 비교한 것이다.

수신 Coil /	공급 전력	송신 Coil		수신 Coil		부하 저항	
		전압/전류	전력	전압/전류	전력	전압/ 전류	전력
2개	2.08W	4.3V /391mA	1.68W	1.55V /138.4mA	0.21W	1.98V /13.8mA	27.3mW
3개	2.08W	4.52V /400.1mA	1.8W	1.34V /134.7mA	0.18W	1.89V /10.86mA	20.5mW
4개	2.08W	4.37V /393mA	1.71W	1.28V /130.4mA	0.166W	1.91V /6.3mA	12mW
2개 (시뮬레이션)	6.13W	7.63V /770mA	5.93W	2.82V /250mA	0.7W	2.82V /25.6mA	72.2mW
3개 (시뮬레이션)	5.45W	6.41V /690mA	4.47W	2.52V /216mA	0.54W	2.47V /22.4mA	55.32mW
4개 (시뮬레이션)	4.4W	4.7V /560mA	2.67W	1.73V /144mA	0.249W	1.5V /13.6mA	20.4mW

[표10] 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값

다중 무선 전력 전송 시스템의 전력이 공급되어 부하 저항으로 부하되는 전력이 시뮬레이션 예상 값이 측정 값보다 더 높게 나오는 것을 확인하였으며 아래의 [표11]와 [표12]는 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되는 전력 효율과 수신 Coil의 개수가 바뀔 때 각 구간 별 전력의 오차율을 확인한 것이다.

	2개 (시뮬레이션)	3개 (시뮬레이션)	4개 (시뮬레이션)	2개 (실제 측정)	3개 (실제 측정)	4개 (실제 측정)
전력 효율	11.8%	12.08%	9.32%	12.5%	10%	9.7%

[표11] 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되는 Pspice 시뮬레이션 예상 전력 효율과 실제 측정 전력 효율

수신 Coil \	공급 전력	송신 Coil	수신 Coil	부하 저항
2개일 때 오차율	194.712%	252.976%	233.333%	164.469%
3개일 때 오차율	162.019%	148.333%	200%	169.854%
4개일 때 오차율	111.538%	56.14%	50%	70%

[표12] 수신 Coil의 개수가 바뀔 때 Pspice 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값의 각 구간별 부하되는 전력 오차율

송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되는 전력 효율이 비슷한 것을 확인할 수 있었으며 수신 Coil의 개수가 바뀔 때 각 구간별 전력 오차율이 발생하는 이유는 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션을 수행할 때 공급 전력 값이 다중 무선 전력 전송 시스템을 실제 측정할 때보다 높기 때문이라고 판단하였으며 각 구간 별 오차율이 유사하게 나오는 것을 볼 수 있다.

3.6 최종 결과물

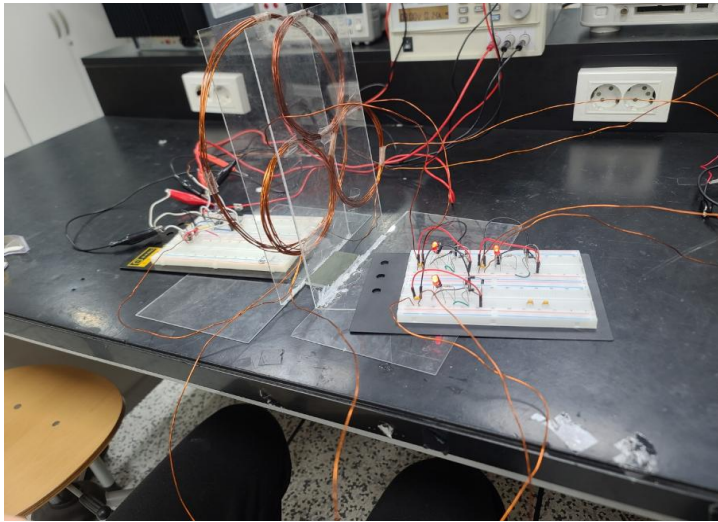
이번 장은 제작이 완료된 다중 무선 전력 전송 시스템을 거리가 늘어남에 따른 수신 Coil에 부하되는 전력과 스마트폰 USB 충전 모듈을 이용하여 스마트폰을 충전하는 것을 소개할 것이다.

3.6.1 거리가 늘어남에 따른 LED 밝기 변화

앞서 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 수행 결과를 통해 예측한 값과 실제 측정한 값의 비교를 통해 Pspice 시뮬레이션 예상 값 및 실제 측정과의 정합성을 확보하였다. 이에 따라 다중 무선 전력 전송 시스템의 대표 Model을 수신 Coil이 2개일 때와 비교하여 수신부 회로의 하나의 부

하 저항에 부하되는 전력은 줄어들지만 수신부 회로의 부하 저항에 부하되는 전력의 개수가 늘어난 수신 Coil이 3개인 것을 선정하였다.

아래의 [그림 3.24]은 수신 Coil이 3개일 때의 다중 Coil이 수신부 회로에 각각 연결된 회로이다.



[그림 3.24] 다중 무선 전력 전송 시스템의 시뮬레이션 기반 실제 회로

이에 따라 수신 Coil이 3개일 때 다중 무선 전력 전송 시스템의 거리가 늘어남에 따른 전력을 측정하였으며 LED의 밝기 변화를 확인하였다. LED는 기본적으로 1.8~3.4V에 20~30mA에서 동작하며 10mA에도 충분히 정상 작동한다. 이에 따라 LED의 동작 전력은 36mW~102mW이며 수신 Coil이 3개이며 다중 무선 전력 전송 시스템의 거리가 3cm일 때의 전력은 20.5mW로 측정되었고, 4cm일 때 13.7mW, 5cm일 때 전력이 7.51mW로 측정되었다. 이에 따라 거리가 3cm일 때는 LED의 밝기가 눈으로 충분히 식별 가능한 밝기였으며 거리가 늘어남에 따라 5cm일 때부터 점점 희미해지는 것을 확인하였다. 아래의 [표13]는 수신 Coil이 3개일 때 거리가 증가함에 따른 각 구간 별 전

력을 측정할 수 있다.

거리	공급 전력	송신 Coil		수신 Coil		부하 저항	
		전압/전류	전력	전압/전류	전력	전압/ 전류	전력
3cm	2.08W	4.52V /400.1mA	1.8W	1.34V /134.7mA	0.18W	1.89V /10.86mA	20.5mW
4cm	2.08W	4.57V /392.2mA	1.79W	1.25V /116.1mA	0.145W	1.82V /7.5mA	13.7mW
5cm	2.08W	4.45V /393.3mA	1.75W	1.19V /105.99mA	0.126W	1.76V /4.27mA	7.51mW

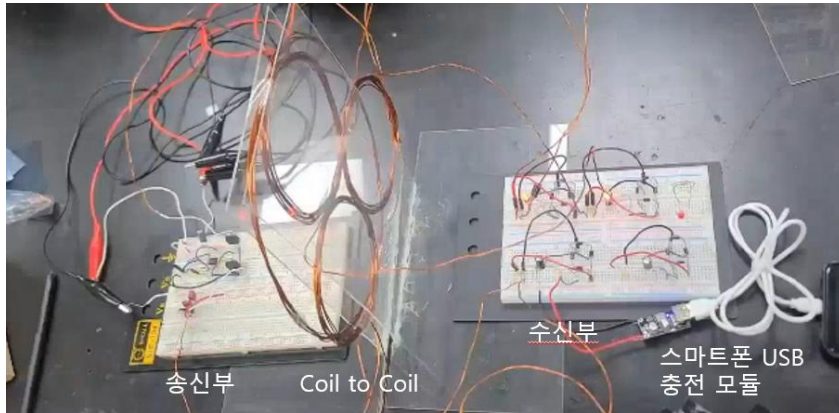
[표13] 다중 무선 전력 전송 시스템의 거리가 늘어남에 따른 각 구간별 부하 되는 전력 측정 값

다중 무선 전력 전송 시스템 회로의 거리가 늘어남에 따라 k-factor가 줄어들어서 Coil to Coil 단계의 Coil 사이에서 전달되는 전력이 줄어들어 부하 저항에 부하되는 전력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3.6.2 스마트폰 USB 충전 모듈을 이용하여 스마트폰 충전

2023 캡스톤 주제를 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하면서 동료 Feedback을 통해 다중 무선 전력 전송 시스템의 수신부 회로에 부하되는 전력으로 전자 기기를 작동하는 의견을 받았다. 이에 따라 시중에서 판매하고 있는 스마트폰 USB 충전 모듈을 구매하여 스마트폰을 충전하는 추가적인 결과를 얻을 수 있었다.

스마트폰 USB 충전 모듈의 사양은 입력 전압이 6~32VDC이며 출력 전압이 기본 5V, 고속 충전 중 3~12V, 출력 전력은 최대 24W, 변환 효율은 90~97%이다. 아래의 [그림 3.25]과 [그림 3.26]은 스마트폰 USB 충전 모듈을 수신부 회로에 연결하여 스마트폰을 충전하는 모습이다.



[그림 3.25] 다중 무선 전력 전송 시스템 최종 결과물



[그림 3.26] 스마트폰 USB 충전 모듈을 수신부 회로에 연결하여 스마트폰을 충전하는 모습

스마트폰에 부하되는 전력을 측정한 결과 전압은 7V이며 전류는 10mA, 전력은 70mW로 확인되었다. 스마트폰 충전 모듈을 통해 스마트폰을 충전하기 위해 거리를 최대한으로 좁혔을 때 스마트폰이 충전되는 것을 볼 수 있었지만 스마트폰의 배터리가 충분히 충전되지 않는 것을 보았다. 앞의 pspice시뮬레이션 결과 및 실제 측정 결과를 통해 수신부 회로에 부하되는 전력이 부족하여 스마트폰을 충전하기 위한 전력이 부족한 것으로 판단하였고 이에 따

라 인버터로 공급되는 전력을 늘려 스마트폰을 충전 시킬 수 있지만 10V 이상으로 충전 시킬 때 MOSFET이 너무 뜨거워지며 위험하기 때문에 더 이상 공급 전력을 늘리지 못했다.

제 4 장 Pspice 시뮬레이션 수행

본 연구에서 Pspice 시뮬레이션 수행을 통한 다중 무선 전력 전송 시스템 설계 및 성능 예측을 맡아 진행하였다. Pspice 시뮬레이션 기반 설계 및 성능 예측은 기존 문헌의 Analytic Model을 이용하여 계산한 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 Pspice 시뮬레이션에 적용하여 시뮬레이션을 수행하여 결과를 예상할 수 있다.

이에 따라 Pspice 시뮬레이션을 통한 예측 값과 실제 측정 값을 비교해보았으며 Pspice 시뮬레이션 수행을 통해 예측한 값과 실제 측정 값의 차이가 발생하는 문제가 발생하여 2가지의 상황을 전제하여 Pspice 시뮬레이션의 예상 값과 실제 측정 값의 정합성을 확보하는 과정을 진행하였다.

4.1 Pspice 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값의 정합성 확보

이번 장에서는 Pspice 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값의 정합성을 확보하는 과정에서 오차율이 높게 나와서 Pspice 시뮬레이션의 예상 값의 전력은 높게 나오는 반면에 실제 측정 값은 너무 적게 나와서 오차율을 줄이는 방법을 2가지 상황을 전제하여 진행하였다.

첫번째 전제는 실제 측정이 제대로 안되었음을 가정하였으며, 즉 Pspice 시뮬레이션을 제대로 수행하였다는 가정이다. Pspice 시뮬레이션을 수행할 때 수신부 회로에 부하되는 전력이 높게 확인되었기 때문에 다중 무선 전력 전송 시스템의 수신부 회로에 스마트폰 USB 충전 모듈을 연결하였을 때 스마트폰이 충전이 된다면 실제 측정이 제대로 안되었다는 가정이 맞다는 것을 인지하고 실제 측정을 다른 방법을 통해 다시 하고 스마트폰을 충전하는 최적의 거

리를 찾는 것이 첫번째 전제이다.

두번째 전제는 실제 측정이 제대로 되었음을 가정하였으며, 즉 Pspice 시뮬레이션이 제대로 수행되지 않았다는 가정이다. 다중 무선 전력 전송 시스템의 실제 측정 값은 스마트폰을 충전하기에 적게 나온 값이기 때문에 스마트폰 USB 충전 모듈을 연결하였을 때 충전이 안된다면 실제 측정이 제대로 되었다는 가정이 맞다는 것을 인지하고 이에 따라 Pspice 시뮬레이션 수행 결과와 실제 측정 결과가 유사한 값이 나오도록 Pspice 시뮬레이션을 다시 수행하여 예측 정확도를 증가시키는 것이 두번째 전제이다.

다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 수행 예상 값과 실제 측정 값과의 오차를 줄이는 방법을 2가지 상황을 전제하여 진행하였으며 스마트폰 USB충전 모듈을 통해 스마트폰을 충전한 결과 스마트폰 USB충전 모듈을 통해 충전이 되지만 송신 Coil과 수신 Coil이 맞닿아 있을 때만 충전이 되며 충전이 원활하지 않다는 점에서 두번째 전제인 실제 측정은 제대로 되었지만 Pspice 시뮬레이션 수행이 제대로 되지 않았다는 가정이 맞다는 결론을 내렸다.

이에 따라 Pspice 시뮬레이션의 구성을 몇가지 추가 및 변동하였다. Coil의 k-factor와 인덕턴스, 소자들의 값이 맞는지 확인하여 다시 수행해보았으며 Coil의 내부 저항 값을 계산하여 추가하며 LED의 내부 저항 값도 계산하여 추가하여 시뮬레이션을 수행한다.

송신 Coil과 수신 Coil의 내부 저항은 Coil의 규격을 참고하여 구하였으며 1km당 저항이 20.95Ω 인 직경이 1mm인 Coil을 사용하기 때문에 송신 Coil의 내부 저항을 먼저 계산하기 전에 송신 Coil의 길이는 $Coil_{Tx}$ 의 길이 $= 2 * \pi * r * N = 2 * 3.14 * 10 * 5 = 3.14m$ 이므로 송신 Coil의 내부 저항은 $Coil_{Tx}$ 의

내부저항 = $\frac{20.95}{1000} * 3.14 = 0.065\Omega$ 이며 수신 Coil의 길이는 $Coil_{Rx}$ 의 길이 = $2 * \pi * r * N = 2 * 3.14 * 5 * 8 = 2.51m$ 이기 때문에 수신 Coil의 내부 저항은 $Coil_{Rx}$ 의 내부저항 = $\frac{20.95}{1000} * 2.51 = 0.052\Omega$ 이 나온다. LED의 내부 저항은 아래의 [그림 4.1]을 참고하여 계산하였으며 LED의 내부저항 = $\frac{\text{부하되는 전압}}{\text{흐르는 전류}} = \frac{2.2}{20m} = 110\Omega$ 이 나오게 되며 위의 요소를 고려하여 Pspice 시뮬레이션을 다시 수행한다.

색상	구분	최소전압	최대전압	전류(일반)	전류(최대)
적 ●	Red	1.8V	2.3V	20mA	50mA
등 ●	Orange	2.0V	2.3V	30mA	50mA
황 ●	Real Yellow	2.0V	2.8V	20mA	50mA
초 ●	emerald Green	1.8V	2.3V	20mA	50mA
초 ●	Real Green	3.0V	3.6V	20mA	50mA
청 ●	sky Blue	3.4V	3.8V	20mA	50mA
청 ●	Real Blue	3.4V	3.8V	20mA	50mA
자 ●	Pink	3.4V	3.8V	20mA	50mA
백 ○	White	3.4V	4.0V	20mA	50mA

[그림 4.1] LED 색상에 따른 허용 전압과 허용 전류

4.2 Pspice 시뮬레이션 기반 설계 및 성능 예측

앞서 구한 Coil의 내부 저항 값과 LED의 내부 저항 값, 상호 인덕턴스를 추출한 것을 적용하여 Pspice 시뮬레이션을 기반으로 설계하며 시뮬레이션을 수행하여 성능을 예측한다. Pspice 시뮬레이션을 기반으로 설계할 때 송신부 회로와 Coil to Coil, 수신부 회로는 동일하게 설계하며 예상 Topology에서 선정한 다중 Coil이 각각의 수신부 회로와 연결된 경우에 맞게 수신부 회로를 늘려서 Pspice 시뮬레이션 회로를 설계한다.

이에 따라 Pspice 시뮬레이션 회로 설계 및 Pspice 시뮬레이션을 수행하여

다중 무선 전력 전송 시스템의 성능을 예측한다. 이전에 다중 무선 전력 전송 시스템의 송신 Coil과 수신 Coil의 상호 인덕턴스 값을 기존 문헌의 Analytic Model을 이용하여 계산한 값과 LCR미터기를 이용하여 측정한 값을 비교하여 Coil간의 거리와 범위에 따라서 어떤 Analytic Model을 써야 하는지 확인하였다.

이에 따른 수신 Coil의 개수를 늘려서 앞서 확인한 Analytic Model을 이용하여 상호 인덕턴스를 계산하고 Pspice 시뮬레이션을 수행한다. 수신 Coil의 개수가 3개 일 때 상호 인덕턴스는 이전에 확인하였으니 송신 Coil과 수신 Coil의 규격을 유지하며 수신Coil이 3개 일 때보다 더 적은 2개와 수신 Coil이 3개일 때보다 더 많은 4개 일 때의 상호 인덕턴스를 Analytic Model을 통해 계산한 후에 상호 인덕턴스와 self 인덕턴스의 관계식을 통해 k-factor를 계산하여 Pspice 시뮬레이션을 수행한다. Pspice 시뮬레이션을 수행할 때 다양한 지표를 확인하여 다중 무선 전력 전송 시스템의 성능을 예측한다.

4.2.1 상호 인덕턴스 및 k-factor 도출

Analytic Model을 통해 수신 Coil이 3개 일 때의 상호 인덕턴스를 계산하였으며 이에 따른 선정된 Analytic Model을 통해 수신 Coil이 2개일 때와 4개 일 때의 상호 인덕턴스를 계산한 후에 Coil 의 개수가 늘어남에 따른 k-factor를 도출한다.

수신 Coil이 2개일 때와 4개 일 때 Coil의 규격은 수신 Coil이 3개일 때와 동일하게 하였으며 아래의 [표14]는 Analytic Model을 통해 송신 Coil과 수신 Coil간의 상호 인덕턴스와 수신 Coil간의 상호 인덕턴스를 계산한 것이다.

M \ d	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	Rx Coil to Rx Coil
수신Coil 2개	3.82uH	2.74uH	2.13uH	1.71uH	1.41uH	1.118uH
수신Coil 4개	2.47uH	2.15uH	1.82uH	1.54uH	1.31uH	1.118uH

[표14] 수신 Coil이 2개, 4개일 때 Analytic Model을 통해 상호인덕턴스를 계산한 값

이에 따라 Coil의 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 관계에 따른 k-factor를 $k = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 계산식을 통해 계산한다. 아래의 [표15]는 수신 Coil이 2개일 때와 3개, 4개일 때의 송신 Coil과 수신 Coil간의 k-factor와 수신 Coil간의 k-factor이다.

k \ d	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	Rx Coil to Rx Coil
수신Coil 2개	0.25	0.182	0.142	0.114	0.094	0.049
수신Coil 3개	0.25	0.182	0.142	0.114	0.094	0.049
수신Coil 4개	0.164	0.143	0.121	0.102	0.087	0.049

[표15] 수신 Coil의 2개, 3개, 4개일 때 k-factor

4.2.2 Pspice 시뮬레이션 수행을 통한 성능 예측

Pspice 시뮬레이션 수행에 필요한 수신 Coil의 개수에 따른 Self 인덕턴스 및 k-factor를 구하였으며 Pspice 시뮬레이션에 적용하여 시뮬레이션을 수행해서 다중 무선 전력 전송 시스템의 성능을 예측한다.

다중 무선 전력 전송 시스템의 성능을 예측하는 시뮬레이션을 수행할 때 단일 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션 회로에서 수신부의 회로를 수신부 회로에 연결되는 Coil의 개수만큼 늘려 설계하고 Analytic Model의

계산 값과 LCR 미터기 측정 값의 오차율이 적은 송신 Coil과 수신 Coil의 거리가 3cm 일 때로 시뮬레이션을 수행하였으며 무선 주파수 대역은 Qi 기준 100~200kHz 대역이므로 공진 주파수를 130kHz로 정하였고 부하 저항의 저항 값은 110Ω으로 정해서 동일하게 시뮬레이션을 수행하였다.

단일 무선 전력 전송 시스템에서의 Pspice 시뮬레이션 수행에서 성능 예측 지표가 부족했던 것을 되살려서 다중 무선 전력 전송 시스템의 성능을 예측할 때는 Pspice 시뮬레이션을 수행할 때 Pspice 시뮬레이션 회로 각 구간의 전압/전류, 전력을 확인하며 이에 따른 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되는 전력의 효율을 확인한다.

아래의 [표16]과 [표17]는 다중 무선 전력 전송 시스템의 수신 Coil의 개수가 바뀔 때 시뮬레이션 예상 값과 수신 Coil의 개수가 바뀔 때의 송신 Coil에서 수신 Coil로 전달되는 전력의 효율을 비교한 것이다.

수신 Coil	공급 전력	송신 Coil		수신 Coil		부하 저항	
		전압/전류	전력	전압/전류	전력	전압/ 전류	전력
2개	6.13W	7.63V /770mA	5.93W	2.82V /250mA	0.7W	2.82V /25.6mA	72.2mW
3개	5.45W	6.41V /690mA	4.47W	2.52V /216mA	0.54W	2.47V /22.4mA	55.32mW
4개	4.4W	4.7V /560mA	2.67W	1.73V /144mA	0.249W	1.5V /13.6mA	20.4mW

[표16] 수신 Coil의 개수가 바뀔 때 Pspice 시뮬레이션 예상 값

	2개 (시뮬레이션)	3개 (시뮬레이션)	4개 (시뮬레이션)
전력 효율	11.8%	12.08%	9.32%

[표17] 수신 Coil의 개수가 바뀔 때 송신 Coil과 수신 Coil간의 예상 전력 효율

앞서 다중 무선 전력 전송 시스템에서 예상 Topology의 다중 Coil이 각각

의 수신부 회로와 연결된 경우에서 예상한 것처럼 Coil을 적게 했을 때보다 분배되는 전력이 많아져서 하나의 저항에 부하되는 전력이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하는데 있어서 정합성을 확보하는 과정을 Pspice 시뮬레이션 수행 기반의 성능 예측으로 진행하였으며 이러한 정합성을 확보하는 과정은 여러가지 방법이 있고 정확한 성능을 예측하기 위한 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하기 위해서 정합성을 확보하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

제 5 장 결론

본 논문에서는 단일 무선 전력 전송 시스템을 기반으로 하여 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계하는 방법을 제시했다. 단일 무선 전력 전송 시스템에서 다중 무선 전력 전송 시스템으로 확장할 때 Coil to Coil 단계에서 다중 Coil을 사용하기 때문에 Coil의 Self 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 추출하는 과정이 중요하였으며 기존 문헌에서의 Analytic Model을 사용하여 인덕턴스 성분을 추출할 수 있었고 이에 따라 인덕턴스 성분을 적용해서 Pspice 시뮬레이션을 수행하여 결과를 예상하고 Pspice 시뮬레이션 기반 실제 회로를 구성하고 측정하여 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값과의 정합성을 확보하였다.

Pspice 시뮬레이션 값과 실제 측정 값과의 정합성을 확보하는 과정에서 오차율이 발생하였으며 오차율이 발생하는 이유는 다중 무선 전력 전송 시스템의 Pspice 시뮬레이션을 수행할 때 공급 전력 값이 실제 측정하였을 때보다 높기 때문이라고 생각하였으며 이에 따른 각 구간 별 오차율이 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 송신 Coil과 수신 Coil 간의 거리가 늘어남에 따라 Coil간의 k-factor가 감소하여 LED에 부하되는 전력은 천천히 감소되는 것으로 확인되었으며 Pspice 시뮬레이션 예상 값과 실제 측정 값의 정합성을 통해 이후 추가적으로 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계 할 때 Pspice 시뮬레이션을 통해 예상 값을 도출하여 필요한 전력이 수신부 회로에 부하되는 회로를 구성할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

최종적으로 설계된 다중 무선 전력 전송 시스템은 다중 무선 전력 전송 시스템의 예상 Topology중 다중 Coil이 수신부 회로에 각각 연결된 것이며 향

후 추가적 연구를 진행할 때 3.2장에서의 다중 무선 전력 전송 시스템의 예상 Topology를 연구의 목적에 맞게 다중 무선 전력 전송 시스템을 설계할 수 있으며 3.2장에서의 예상 Topology 말고도 송신 Coil과 수신 Coil 사이에 방해물이 있거나 송신 Coil과 수신 Coil 사이의 거리가 멀어질 때 등 여러가지 제한 사항으로 인해 발생하는 문제를 해결하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] Frania, Krystian, Zbigniew Kaczmarczyk, and Krzysztof Bodzek. "Design Method for Multi-Coil Wireless Power Transfer Systems." *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE, 2020.
- [2] Zhang, Xian, et al. "Mutual inductance calculation for Coils with misalignment in wireless power transfer." *The Journal of Engineering* 2019.16 (2019): 1041-1044.
- [3] Qian, Libo, et al. "Modeling of mutual inductance between two misalignment planar Coils in wireless power transfer." *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 30.8 (2020): 814-817.
- [4] Esteban, Bryan, et al. "Development of mutual inductance formula for misaligned planar circular spiral Coils." *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, 2015.