

전기자동차 무선 충전용 스파이럴 인덕터의 해석 및 설계 기법

황인갑*

Analysis and Design Technique of a Spiral Inductor for a
Wireless Charging of Electric Vehicle

In-Gab Hwang*

요약 전기자동차를 무선으로 충전하기 위하여서는 전기에너지를 전송하기 위한 코일이 꼭 필요하다. 코일의 형태는 기본적인 원형 코일에서부터 두 코일 간의 커플링 효과를 높이기 위한 DD 형상의 코일 등 여러 종류가 있다. 하지만 코일 간 커플링이 좋은 DD 형상의 코일은 송수신 측 전력변환장치의 구조가 복잡해지는 단점이 있어 사용에 제한이 있다. 본 논문에서는 자유공간에서 2개의 코일을 이용하여 무선으로 전력을 전송할 때 제작이 편리한 스파이럴 인덕터의 인덕턴스 값을 계산하고 적절한 크기의 인덕터를 설계하는 방법을 제시하였다. 공진기에서 XL_m 값이 부하저항 값과 비슷하여질 때 bifurcation 현상이 나타나므로, 이 현상이 될 일어나도록 XL_m 값을 최소부하저항 값과 같도록 선택하여 공진기에 필요한 인덕턴스 값을 계산하였다. 계산된 인덕턴스 값을 스파이럴 인덕터로 구현하기 위하여 스파이럴 인덕터에서 인덕턴스 값과 인덕터의 크기, 턴 수, 총 코일 길이와의 관계를 알아보았다. 또한, 두 개의 코일의 수평 이격에 따른 결합계수 k 값의 변화를 알아본 후 적절한 인덕터를 선정하였다.

Abstract The coils to transmit the electric energy are necessary to charge an electric vehicle wirelessly. There are several types of coils, from basic circular coils to DD-type coils for enhancing the coupling effect between two coils. However, DD-type coils with a good coupling effect between coils have a disadvantage in use because of the structure complexity of the power conversion device of transmitting and receiving side. In this paper, we propose a method to calculate the inductance value and to design the size of the spiral inductor which is convenient to fabricate when the power is transmitted wirelessly by using two coils in free space. Since the bifurcation phenomenon occurs when the XL_m value is similar to the load resistance value in the resonator the XL_m value was selected to be equal to the minimum load resistance value to minimize this phenomenon, and the inductance value required for the resonator was calculated. In order to realize the calculated inductance value by the spiral inductor, the relationship between the inductance value and the size, the number of turns, the total coil length of a spiral inductor was investigated. In addition, the change of coupling coefficient k according to the horizontal separation of two coils was examined and an appropriate inductor was selected.

Key Words : Charge, Electric, Inductor, Resonance, Spiral, Vehicle, Wireless

1. 서론

전기자동차의 무선충전기술은 편리성으로 인하여 수년전부터 많은 관심을 갖고 연구되어 왔으며, 근래에는 자율 주행 자동차가 곧 실용화 될 것으

로 예상됨에 따라 전기자동차의 무선충전은 더욱 더 필요한 기술로 인식되고 있다. 전기자동차의 무선충전방식은 주차장바닥이나 도로에 급전시설을 매설하고 자동차하부에 수신 장치를 부착하는 자

*Department of Electric and Electronics Engineering, Jeonju University
Received March 18, 2019

Revised April 05, 2019

Accepted April 07, 2019

기유도방식이나 자기공명방식이 연구되고 있으며 [1], 자기공명방식은 자기유도방식보다 먼 거리의 무선전력전송에 유리하나 높은 공진특성이 요구된다[2]. 무선전력전송을 위하여 사용되는 인버터의 주파수도 일본은 85 kHz, 유럽은 145 kHz, 국내는 20 kHz와 60 kHz를 기반으로 연구가 이루어지고 있으며[3] 무선전력전송을 위한 코일 중 원형 또는 사각형의 코일은 수평 이격에 대한 커플링계수 k 값의 성능저하가 심하여 DD, DDQ 등 다양한 형상의 코일을 사용하나 이러한 코일들은 송수신 측 전력변환장치의 구조가 복잡해지는 단점이 있다[4]. 따라서 전기자동차의 무선충전시스템은 에너지전송방식, 사용주파수의 선정, 코일의 특성 등 여러 가지 문제로 인하여 한두 가지 방식으로 정형화 되지 못하고 다양한 방식의 시스템과 전기회로들이 제안되고 있다. 본 논문에서는 전자기유도 무선충전시스템에서 공진기를 구성하는 송수신 코일을 설계하는 방법을 제안하였다. 송수신 코일을 스파이럴 인덕터로 구성할 때 적절한 스파이럴 인덕터를 선정할 수 있는 방식을 제안하고 이에 따른 인덕터의 인덕턴스 값 및 크기를 계산하였다.

2. 공진기의 입력 임피던스와 공진주파수

자유공간에서 2개의 코일을 이용하여 전력을 전송하는 무선전력전송 인버터는 일반적으로 그림 1 (a)와 같이 구형파 발생 부분과 2개의 코일로 구성된 자기결합회로, 그리고 출력 정류회로로 구성된다. 이 중 자기결합회로는 그림 1(b)와 같은 변압기 등가회로로 표현할 수 있다. 그림 1(b)의 변압기 등가회로는 $n=1$ 인 경우의 T형 변압기 등가회로로 유도하고 입력 커패시터와 출력 커패시터를 추가하여 3 개의 인덕터와 2 개의

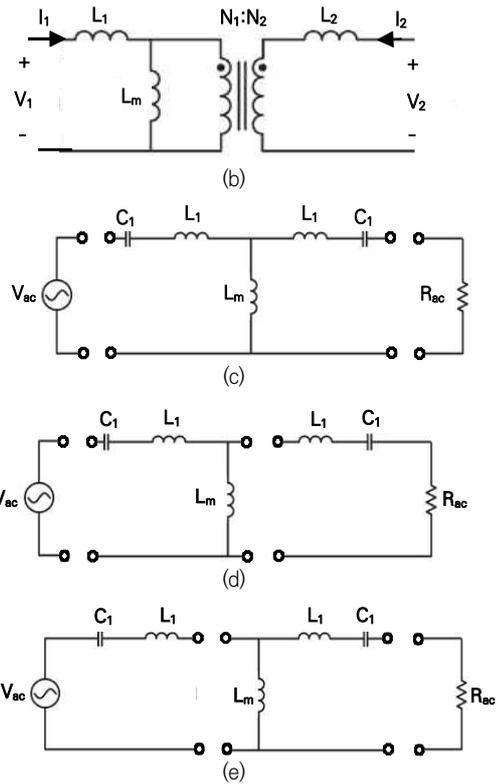
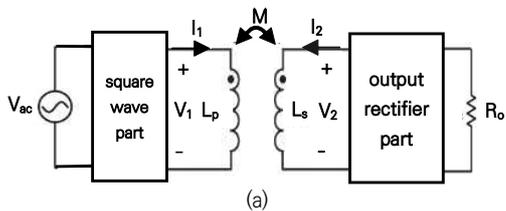


그림 1. 무선전력전송 인버터의 구성과 변압기 등가회로 및 공진기 회로; (a) 무선전력전송 인버터의 일반적인 구성도, (b) 자기결합회로의 변압기 등가회로, (c) 모든 회로 요소를 포함한 공진기 회로, (d) 3개의 부품 회로와 2개의 부품 회로의 두 부분으로 나뉜 공진기 회로, (e) 2개의 부품 회로와 3개의 부품 회로의 두 부분으로 나뉜 공진기 회로

Fig. 1. Configuration of a wireless power transmission inverter and a transformer equivalent circuit and a resonator circuit; (a) a typical configuration of a wireless power transmission inverter, (b) a transformer equivalent circuit of a magnetic coupling circuit, (c) a resonator circuit including all circuit elements, (d) resonator circuit divided into two parts, three component circuit and two component circuit, (e) a resonator circuit divided into two parts, two component circuit and three component circuit

커패시터가 직병렬로 연결된 공진기회로에 부하 저항이 있는 그림 1(c)와 같이 2-포트 회로로 만들 수 있다. 이 공진기의 전체 입력임피던스 Z_1 은 식 (1)로 주어진다. 식 (1)에는 허수부를 0으로 하는 2개의 공진주파수가 있으며 각각 f_1, f_{1-1} 으로 주어

진다. 이 공진주파수에서 공진기는 단락회로로 동작하며 이때의 전압이득은 1이 된다.

$$Z_1 = j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})(1 + \frac{\omega L_m}{\omega(L_1 + L_m) - \frac{1}{\omega C_1}}) \quad \text{식 (1)}$$

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$f_{1-1} = \frac{1}{\sqrt{C_1(2L_m + L_1)}}$$

그림 1(c)의 공진기회로는 그림 1(d)의 L_1 , C_1 , L_m 이 직렬회로를 이룬 공진회로와 그림 1(e)의 L_m 이 L_1 , C_1 의 직렬회로와 병렬로 이루어진 공진회로를 포함하고 있다. 그림 1(d)의 L_1 , C_1 , L_m 직렬회로의 임피던스와 공진주파수는 식 (2)로 주어지며, 그림 1(e)의 L_m 이 L_1 , C_1 의 직렬회로와 병렬로 이루어진 공진회로의 임피던스는 식(3)으로 주어진다. 이때 공진주파수는 식 (1)의 f_1 과 식 (2)의 f_2 와 같다. 따라서 그림 1(c) 공진기의 공진주파수는 총 3개이다.

$$Z_2 = j(\omega(L_1 + L_m) - \frac{1}{\omega C_1}) \quad \text{식 (2)}$$

$$f_2 = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 + L_m)}}$$

$$Z_3 = j \frac{\omega L_m (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})}{\omega(L_1 + L_m) - \frac{1}{\omega C_1}} \quad \text{식 (3)}$$

그림 2는 그림 1(c)와 같이 부하를 포함한 공진기회로의 부하에 따른 주파수 특성을 p-spice 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 이때 $L_1=337.2 \mu\text{H}$, $C_1=9.37 \text{ nF}$, $L_2=337.2 \mu\text{H}$, $C_2=9.37 \text{ nF}$, $L_m=37.5 \mu\text{H}$ 이며 $R_{ac}=10 \Omega$, 30Ω , 50Ω 이다. 표 1은 공진기의 계산된 공진주파수와 p-spice시뮬레이션 된 결과에서 공진기의 이득이 1인 주파수를 보여준다. 계산된 공진주파수와 시뮬레이션 결과에서 이득이 1인 주파수가 같음을 알 수 있다. 또한 공진기의 특성으로 인하여 R_{ac} 와

X_{L_m} 의 값이 비슷해지면 공진주파수 f_1 과 f_{1-1} 의 영향이 커지면서 bifurcation 현상이 보이기 시작한다. 따라서 부하에 따른 bifurcation 현상을 줄이기 위해서는 R_{ac} 값이 적은 값에도 bifurcation이 나타나지 않도록 시스템을 설계하는 것이 좋다.

무선전력전송 시스템에서 사용되는 인덕터의 인덕턴스 값은 그림 1(c) 공진기의 L_1 , L_m 의 수식과 스파이럴 인덕터의 수식을 연립방정식으로 풀어 코일의 턴 수 N과 인덕턴스 값을 계산하거나[5], 자유공간 내 코일의 수직성분 자속을 계산하여 상호인덕턴스 값을 구한 후 코일의 인덕턴스 값을 계산하여 구하였다[6]. 본 논문에서는 공진기에서 R_{ac} 값이 X_{L_m} 값과 비슷하여질 때 bifurcation 현상이 일어나므로 L_m 의 리액턴스 값인 X_{L_m} 이 R_{ac} 의 최솟값과 같은 값을 갖도록 결정하고 이 값으로부터 변압기의 등가회로 수식을 이용하여 자기결합회로 1차 측 인덕터의 인덕턴스 값 L_p 를 구하였다.

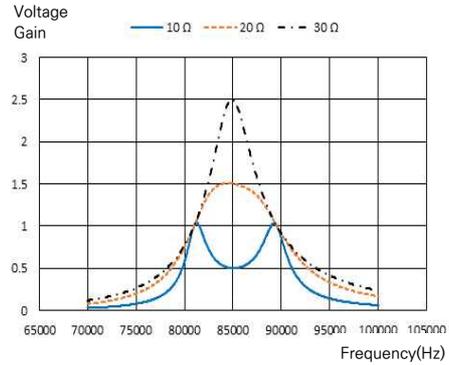


그림 2. 공진기의 부하 저항 값에 따른 주파수 특성
Fig. 2. Frequency characteristics of a resonator according to the load resistance values.

표 1. 공진주파수의 계산 값과 p-spice 시뮬레이션 값의 비교
Table 1. Comparison of the calculated values and the p-spice simulation values of resonant frequencies

frequency	calculation values	p-spice simulation Results
f_1 (kHz)	89.5	89.5
f_{1-1} (kHz)	81.0	81.0

3. 스파이럴 인덕터의 인덕턴스와 크기와의 관계

무선전력전송의 표준화를 위하여 미국의 경우 SAE(Society of Automotive Engineers)에서 표준화 작업을 하고 있으며 SAE J2954에서는 WPT1은 3.7 kW, WPT2는 7.7 kW, WPT3는 11 kW, WPT4는 22 kW와 같이 무선전력전송이 가능한 용량을 계속 늘려가면서 표준을 정하고 있다. 이와 같이 용량이 늘어나면 무선전력전송을 위한 공진기의 크기도 커질 수밖에 없으나 수신 코일의 경우 차량 안에 부착되어야 하므로 그 크기에 제한이 있다. 이와 같이 코일의 인덕턴스는 상호인덕턴스나 결합계수 등에만 관계하는 것이 아니라 자동차의 내부에 코일을 설치해야하므로 물리적인 크기에 의하여서도 제한을 받는다.

일반적으로 전기자동차의 배터리 시스템은 가정용 전원을 사용할 때 3.3 kW의 충전기를 사용하므로 무선충전 시스템의 입력전압은 220 V, 출력전압은 배터리 전압인 410 V로 정할 수 있다[7]. 동작주파수는 light duty vehicles(LDV)에 대한 SAE J2954 규격에 준하여 81.38 kHz - 90 kHz 사이의 85 kHz로 정하였다. 입력전압과 출력전압을 각각 220 V, 410 V로 정하였으므로 입력 전류 값은 15 A이고 출력 전류 값은 8.05 A 의 값을 갖는다.

송수신 코일에 85 kHz의 정현파 전류가 흐르므로 표피효과가 있으며, 표피효과에 대한 수식은 원형 전선 도체의 경우 식 (4)로 주어진다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \tag{4}$$

여기서 ρ 는 resistivity, μ 는 permeability, $\omega = 2\pi f$ 이다.

사용주파수 85 kHz에서 구리에 대한 표피효과는 약 0.23 mm이다. 표피효과를 최소화하기 위하여 일반적으로 리츠전선(litz wire)을 이용하여 코일을 구성하며 따라서 리츠전선의 직경을 0.2 mm

로 하여 표피효과가 없도록 한다. 0.2 mm 직경의 리츠전선의 허용전류는 0.093 A이다. 무선충전 시스템에서 흘릴 수 있는 최대 전류를 정격전류의 1.5배로 가정하면 송신측 코일의 전류는 약 22.5 A이고 수신 코일 쪽은 16.1 A이다. 따라서 시스템의 최대 전류를 22.5 A로 정하고 이 전류를 흘릴 수 있는 코일의 직경을 계산하였다. 22.5 A를 흘릴 수 있는 리츠전선의 가닥수는 242이며, 따라서 총 리츠전선의 단면적은 7.6 mm² 이고 직경은 3.1 mm이다. 도선의 피복 등을 생각하면 도선의 총 직경은 4 mm로 생각할 수 있다.

스파이럴 인덕터의 인덕턴스는 식 (5)로 주어진다[8].

$$L(\mu H) = \frac{(0.3937) \cdot (aN)^2}{(8 \cdot a + 118b)} \tag{5}$$

$$a = (r_i + r_o) / 2$$

$$b = r_o - r_i$$

여기서, r_i 는 스파이럴 인덕터의 내경 반지름, r_o 는 스파이럴 인덕터의 외경 반지름, N은 턴 수이며 단위는 cm이다.

그림 3은 스파이럴 인덕터의 외경 반지름이 $r_o=30$ cm일 때 스파이럴 인덕터의 인덕턴스 값과 도선길이, 턴 수, 인덕터의 전체면적에 대한 인덕터 코일이 차지하는 면적 비율(%)의 그래프이다. $r_o=30$ cm일 때 얻을 수 있는 인덕턴스 값은 1.4 μH 에서 1139.1 μH 이다. 이때 턴 수는 1 턴에서 65 턴까지이며, 도선의 길이는 187.1 cm에서 6939.4 cm까지 증가한다. 그림 3을 보면 인덕턴스 값은 도선 길이에 따라 선형적으로 증가하지 않고 도선길이가 2984 cm 이상이 되어야 최댓값을 가질 때 까지의 선형적으로 증가한다. 이때의 턴 수는 18 턴이며 코일이 차지하는 면적은 전체 면적의 42.2 % 정도이다. 인덕터의 인덕턴스 값과 코일이 차지하는 면적과의 관계는 면적이 50%에서 90% 구간에서 인덕턴스 값은 면적에 비례하여 증가한다. 인덕턴스 값과 턴 수와의 관계는 턴 수가 15 턴에서 38 턴 사이에서는 턴 수와 인덕턴스 값이 비례하나 그 외의 턴 수에서는 턴 수가 증가한 만큼 인덕턴스 값이 증

가하지 않는다. 38 턴 이상에서 인덕턴스 값이 턴 수에 비례하여 증가하지 않는 이유는 턴 수가 증가 하더라도 턴 수 증가에 따른 코일 길이의 증가가 크 지 않기 때문으로 생각된다. 따라서 이 그래프를 참 고하여 인덕터를 구현한다면 (1) 인덕턴스 값의 크 기가 도선 길이에 선형적으로 변화하는 441.4 μH 에서 1107.4 μH 구간과 (2) 인덕턴스 값과 코일의 사용 면적이 선형적으로 변화하는 386.8 μH 에서 1099.7 μH 구간, 그리고 (3) 인덕턴스 값이 턴 수 에 선형적으로 변하는 180.7 μH 에서 801.2 μH 구간에서 인덕턴스 값을 결정하는 것이 경제적인 면 이나 인덕턴스 값의 조절 면에서 유리하다. 그러므 로 $r_o=30\text{ cm}$ 인 인덕터의 경우 약 440 μH - 800 μH 의 인덕터를 구현하는 데 적합하다. 하지만 인덕 터가 440 μH 로 결정되었다고 가정하면 $r_o=30\text{ cm}$ 를 이용하여 구현하는 것 보다는 r_o 값을 30 cm 보다 적은 값을 선택하고 턴 수를 늘림으로서 전체 사용되는 코일의 길이를 줄이면서도 같은 인덕턴스 값을 얻을 수 있다.

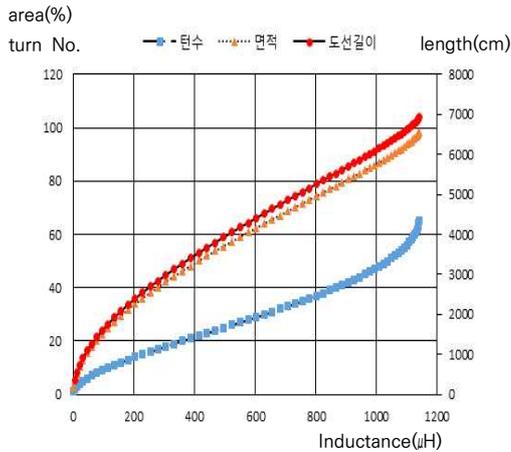


그림 3. $r_o=30\text{ cm}$ 인 인덕터의 인덕턴스 값과 턴 수, 코일의 사용면적, 도선 길이와의 관계
Fig. 3. Relationship between a inductance value and a number of turns, a coil area, a coil length of $r_o=30\text{ cm}$ inductor

표 2는 r_o 의 크기를 달리하여 같은 인덕턴스 값을 갖는 인덕터를 만드는데 필요한 도선의 길이를 보여

준다. 2장에서 공진기 시뮬레이션에 사용된 337 μH 의 인덕터를 만들기 위하여서는 $r_o=37\text{ cm}$ 를 사용하는 것보다는 $r_o=20.2\text{ cm}$ 를 사용하는 것이 도선 길이를 435.8 cm 줄일 수 있음을 보여준다.

표 2. 인덕터의 인덕턴스 계산 값과 Maxwell 시뮬레이션 값의 비교
Table 2. Comparison of inductance calculation and Maxwell simulation values of the inductors

$r_o(\text{cm})$	turn No.	length (cm)	area (%)
37	16	3396.2	31.6
30.3	19	3134.3	43.9
24.6	24	2984.3	62.8
20.2	38	2960.4	93.9

$r_o(\text{cm})$	calculation value(A) L(μH)	Maxwell simulation result(B) L(μH)	$\frac{ A-B }{A} \times 100$ (%)
37	337.9	346.4	2.52
30.3	337.6	334.3	0.98
24.6	336.8	325.6	3.33
20.2	336.8	330.6	1.84

4. 스파이럴 인덕터의 수평 이격에 따른 k 값의 변화

표 2는 스파이럴 인덕터의 인덕턴스 값을 식 (5)을 이용하여 계산한 값과 Maxwell 시뮬레이터를 이용하여 계산한 값과의 차이를 보여준다. 두 값의 차이가 최대 3.4 % 이내로 인덕턴스 값 계산에 있어 두 방법의 오차가 크지 않아 두 방법 모두 인덕턴스 값 계산에 사용할 수 있음을 알 수 있다.

두 개의 코일의 중심이 서로 수평으로 일치하지 않을 때 코일의 크기와 턴 수에 따른 결합계수 k의 변화량을 알아보기 위하여 그림 4에서와 같이 두 개의 코일의 중심이 x축 방향으로만 어긋날 때 Maxwell 시뮬레이터를 이용하여 k 값을 계산하였다. 두 코일의 k 값은 중심이 완전히 정렬되었을 때($e/r_o=0$)부터 최대로 코일의 반지름만큼 정렬이 어긋났을 때($e/r_o=1$)의 Maxwell 시뮬레이션 값이다. 이 때 두 개의 코일간의 간격은 $d=20\text{ cm}$ 이

다. 표 3에 보이듯이 k 값은 같은 인덕턴스 값을 갖는 코일이라 하더라도 $r_o=37$ cm일 때 0.22로 가장 크며, $r_o=20.2$ cm일 때 0.12로 가장 작다. 즉, 인덕터의 전체면적 대비 코일의 면적이 적을수록 k 값은 큰 값을 보여주며, 코일 면적이 증가함에 따라 k 값도 감소한다.

표 4는 작은 코일의 중심이 큰 코일의 중심과 정확히 정렬되었을 때부터($e/r_o=0$) 작은 코일의 중심이 큰 코일의 중심에서 큰 코일의 반지름만큼 움직였을 때($e/r_o=1$)의 k 값의 변화를 보여준다. $r_o=37$ cm의 코일을 1차 측 코일로 $r_o=20.2$ cm의 코일을 2차 측 코일로 사용했을 경우 두 코일간의 k 값은 $r_o=20.2$ cm의 두 개의 코일을 사용한 것과 비슷한 값을 갖는다. 마찬가지로 $r_o=37$ cm의 코일을 1차 측 코일로 $r_o=30.3$ cm의 코일을 2차 측 코일로 사용했을 경우 두 코일간의 k 값은 $r_o=30.3$ cm의 두 개의 코일을 사용한 것과 비슷한 값을 갖는다. 즉 크기가 서로 다른 코일을 1차 측과 2차 측으로 사용했을 경우는 크기가 작은 쪽 코일의 k 값이 나타남을 알 수 있다.

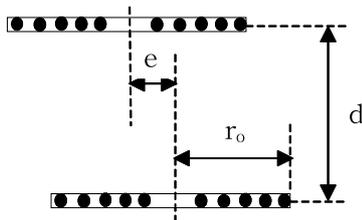


그림 4. 두 코일의 결합계수 계산을 위한 코일의 위치
Fig. 4. Coil position for calculating the coupling coefficient of two coils

표 3. 크기가 같은 두 개의 인덕터의 수평 이격에 따른 k 값
Table 3. The k values of two inductors of the same size according to the horizontal separation

r_o (cm)	turn No.	area(%)	calculation value $L(\mu\text{H})$	k values		
				e/r_o =0	e/r_o =0.5	e/r_o =1
37	16	31.6	337.9	0.22	0.18	0.08
30.3	19	43.9	337.6	0.19	0.16	0.07
24.6	24	62.8	336.8	0.16	0.13	0.06
20.2	38	93.9	336.8	0.12	0.09	0.04

표 4. 크기가 다른 두 개의 인덕터의 수평 이격에 따른 k 값
Table 4. The k values of two inductors of the different sizes according to the horizontal separation

No.	inductor	r_o (cm)	calculation value $L(\mu\text{H})$	k values		
				e/r_o =0	e/r_o =0.5	e/r_o =1
1	Lp	37	337.9	0.11	0.10	0.03
	Ls	20.2	336.8			
2	Lp	37	337.9	0.2	0.15	0.06
	Ls	30.3	337.6			

5. 스파이럴 인덕터의 설계

본 논문에서 제시한 전기자동차 충전기의 사양은 출력전압이 410 V, 출력전류가 8.05 A 이므로 부하는 약 50옴이 된다. 이 경우 부하는 일반적으로 배터리이며 배터리의 입력저항은 일정하지 않고 배터리의 충전된 양이 적을 때는 작으며 충전된 양이 증가할수록 커지는 특성이 있다. 따라서 본 논문에서는 bifurcation이 $R_{ac}=5 \Omega$ 일 때 시작되도록 $X_{Lm}=5 \Omega$ 이 되도록 결정하였다. 주파수가 85 kHz 이므로 $X_{Lm}=5 \Omega$ 이 되는 L_m 값은 $9.37 \mu\text{H}$ 가 된다. 커플링 계수 k는 SAE J2954에서 제시하는 규격인 $k=0.08\sim 0.2$ 과 일반적으로 커플링의 최솟값으로 생각하는 $k=0.1$ 을 고려하여 $k=0.1$ 로 결정하였다. $n=1$ 로 가정하면 변압기 등가회로에서의 식 (6)에 의해 $L_p=93.7 \mu\text{H}$ 가 된다[9].

$$L_p = (1 - k)L_p + L_m \tag{6}$$

$L_p=93.7 \mu\text{H}$ 가 되는 스파이럴 인덕터를 설계하기 위하여 $r_o=10$ cm부터 $r_o=30$ cm까지 턴 수에 따른 인덕터의 인덕턴스 값을 계산하였다. $r_o=10$ cm일 때 얻을 수 있는 최대 인덕턴스 값은 약 $42 \mu\text{H}$ 로 원하는 인덕턴스 값을 얻을 수 없다. r_o 를 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm로 변화시킬 때 원하는 인덕턴스 값인 $93.7 \mu\text{H}$ 에 가까운 인덕턴스 값은 각각 $97.3 \mu\text{H}$, $90.7 \mu\text{H}$, $91.3 \mu\text{H}$, $95.6 \mu\text{H}$ 이다. 이 경우 턴 수는 각각 18 턴, 12 턴, 10 턴, 9 턴이며 총 도선 길이는 1288.7 cm,

1326.3 cm, 1444.4 cm, 1539.9 cm로 $r_o=15$ cm 일 때 총 도선길이가 제일 짧다. 표 5에 $r_o=30$ cm와 $r_o=15$ cm 일 때 인덕터의 인덕턴스 계산 값과 도선길이, 턴 수, 코일의 사용면적을 정리해 놓았다. $r_o=15$ cm일 때 사용도선의 길이가 짧더라도 인덕터의 코일 면적이 커 $r_o=15$ cm의 두 개의 인덕터를 사용 했을 때 표 6에 보이듯이 두 코일의 수평 이격 정도에 따라 결합계수 k 값은 0.04~0.07로 매우 작다. 이 값은 규격에서 제시하는 $k=0.1$ 을 만족하지 못한다. 1차 측 코일의 반경을 $r_o=30$ cm로 하고 2차 측 코일의 반경을 $r_o=15$ cm로 사용하여도 k 값은 0.03~0.08으로 규격을 만족하지 못한다. 따라서 두 개의 코일은 반경이 $r_o=30$ cm인 코일 두 개를 사용하는 것이 타당하다. 이 경우 k 값은 0.07~0.17로 변화하는데 k 값의 최솟값은 사용하는 코일 중 크기가 큰 코일의 반경만큼 정렬이 어긋나는 경우로 코일의 크기에 관계없이 k 값이 0.1이 안 된다. 이 결과는 스파이럴 코일을 사용할 때 수평 이격의 크기는 두 개의 코일 중 크기가 큰 코일의 반경보다는 이격이 적어야 됨을 의미한다.

위의 결과를 이용하여 계산된 $L_p=95.6 \mu\text{H}$ 인 스파이럴 인덕터의 물리적 크기는 $r_o=30$ cm, 턴 수 =9, 사용면적은 22.6 %, 도선 길이는 1593.9 cm이다.

표 5. r_o 에 따른 인덕터의 인덕턴스 계산 값
Table 5. Calculated inductance values of the inductors according to r_o

r_o (cm)	turn No.	length (cm)	area (%)	calculation value $L(\mu\text{H})$
30	9	1593.9	22.6	95.6
15	18	1288.7	74	97.3

표 6. 두 개의 인덕터의 결합계수 k 값, $d=20$ cm
Table 6. The coupling coefficient k value of two inductors, $d=20$ cm

No.	inductor	r_o (cm)	k values		
			e/r_o =0	e/r_o =0.5	e/r_o =1
1	Lp	30	0.17	0.13	0.07
	Ls	30			
2	Lp	15	0.07	0.06	0.04
	Ls	15			
3	Lp	30	0.08	0.07	0.03
	Ls	15			

6. 결론

자유공간에서 2개의 코일을 이용하여 전력을 무선으로 전송할 때 필요한 코일의 인덕턴스 값을 결정하기 위하여, 2개의 코일로 구성된 자기결합회로를 변압기 등가회로로 변환하고 변환된 회로를 공진기로 구성하여 그 특성을 분석하였다. 공진기의 주파수 특성에서 자화인덕턴스 L_m 의 리액턴스 값이 등가부하저항 R_{ac} 값과 비슷하여지면 bifurcation 현상이 일어남을 확인하였다. 공진기에서 bifurcation 현상이 나타나는 것을 최소화하기 위하여 X_{Lm} 값이 부하저항의 최솟값과 같도록 하여, 이때의 X_{Lm} 값으로부터 스파이럴 인덕터의 인덕턴스 값을 계산하였다. 또한, 스파이럴 인덕터의 인덕턴스 값과 인덕터의 크기, 턴 수, 총 코일 길이와의 관계를 알아보았다. 그리고 두 개 코일의 수평 이격에 따른 결합계수 k 값의 변화를 알아보고 사양에 맞는 인덕터를 설계하였다. 설계된 인덕터는 외경의 반지름이 30 cm 이고 인덕턴스 값은 $95.6 \mu\text{H}$, 총 도선 길이는 1593.9 cm이다. 본 연구에서 설계된 스파이럴 인덕터 크기의 적절성에 대한 연구는 향후 인버터를 제작하여 무선전력전송 실험을 함으로써 수행될 예정이다.

REFERENCES

[1] Y. W. Son, G. S. Huh "Technology Development Trend of Domestic and Foreign Electric Vehicle and Technology Development Strategy of Domestic Electric

Vehicle Core Parts,” Trans. KIPE, Vol. 22, No. 5, pp. 373-381, 2017. 10.

[2] S. M. Han, “Multi-Mode Wireless Power Transfer System with Dual Loop Structure,” JKIIECT Vol. 9, No. 6, pp. 578-583, 2016. 12.

[3] J. J. Soo, W. K. Han, “Analysis of Domestic and International Standard and Technology Trend of Wireless Charging Electric Vehicle,” Proc. of KIEE Vol. 64. No. 4, pp. 18-23, 2015. 4.

[4] G. D. Woo, “Optimized Design of Wireless Charge System for Electric Vehicle,” KIPE Mag., Vol. 23, No. 5, pp. 68-74, 2018. 10.

[5] J. Liu, K. W. Chan, c. Y. Chung, N. H. L. Chan, M. Liu, W. Xu, “Single-Stage Wireless-Power-Transfer Resonant Converter With Boost Bridgeless Power-Factor-Correction Rectifier,” IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 65, No. 3, pp. 2145-2155, Mar. 2018.

[6] J. Heo, H. H. Shin, S. J. Jeon, “Characteristics of WPT 4 Coil of Wireless Charging System for Electric Vehicle,” The 49th KIEE Summer Conference 2018, pp. 11-13, 2018. 7.

[7] J. S. Kim, G. Y. Choe, H. M. Jung, B. K. Lee, and Y. J. Cho, “Design and Implementation of 3.3 kW On-Board Battery Charger for Electric Vehicles,” Trans. KIPE, Vol. 15, No. 5, pp. 373-381, 2017. 10.

[8] Microchip Technology Inc, “Antenna Circuit Design for RFID Application,” Microchip Technology Inc., Chandler, AZ, USA, Appl. Note AN710, 2003.

[9] S. C. Moon, B. C. Kim, S. Y. Cho, C. H. Ahn, G. U. Moon, “Analysis and Design of a Wireless Power Transfer System With an Intermediate Coil for High Efficiency,” IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 61, No. 11, pp. 5861-5870, Nov. 2014.

저자약력

황 인 갑(In-Gab Hwang)

[정회원]



- 1981년 연세대학교 전기공학과졸업 (공학사)
- 1983년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
- 1992년 아리조나주립대학교 대학원 전기공학과 졸업(Ph. D)
- 1995~현재 전주대학교 전기전자공학과 교수

〈관심분야〉 반도체소자, RF회로, 무선전력전송