

# 무선전력전송 시스템의 송신 코일의 전압 전류 위상차 분석을 통한 수신측 공진주파수 추출

## Resonant Frequency Extraction of the Receiving Side through Voltage and Current Phase Analysis of the Transmitting Coil of the WPT System

신 유 준 · 안 승 영

Yujun Shin · Seungyoung Ahn

### 요 약

본 논문에서는 double-sided LCC 토폴로지를 채택한 무선전력전송 시스템에서 송신 코일 측의 정보만으로 수신측의 공진 주파수를 파악하는 방법에 대해 제안하였다. 수신측의 공진 주파수는 시스템의 동작주파수, 즉 인버터의 동작 주파수와 일치해야 하는데, 송신측에 존재하는 인버터 측에서는 수신측의 공진주파수를 정확히 파악하기 힘든 경우가 많다. 본 연구에서 제안한 방법은 송신측 인버터의 동작 주파수를 변경하면서 송신 코일 측의 전압과 전류의 위상차를 관찰하여 수신측의 공진주파수를 파악할 수 있다. 따라서, 제안된 방법을 채택한 무선전력전송 시스템은 송신측과 수신측의 별도의 통신 시스템이 필요하지 않은 장점을 가진다. 제안된 방법을 수식을 통해 분석하였고, 시뮬레이션과 실험을 통해 증명하였다. 실험을 통한 증명에서 제안된 방법은 수신측의 공진주파수를 0.4 % 미만의 오차로 정확히 추출할 수 있다는 것이 증명되었다.

### Abstract

This study proposes a method of identifying the resonant frequency of the receiving side in a wireless power transfer (WPT) system, adopting a double-sided LCC topology. The resonant frequency of the receiving side must match the system's operating frequency. However, in many cases, determining the resonant frequency of the receiving side from the inverter at the transmitting side is challenging. The method proposed in this study changes the operating frequency of the inverter at the transmitting side, and by observing the phase difference between the voltage and current at the transmitting coil side, the resonant frequency of the receiving side can be identified. Therefore, the WPT system adopting the proposed method does not require additional communication systems at the transmitting and receiving sides. The proposed method was analyzed using equations and validated through simulations and experiments. The proposed method can accurately extract the resonant frequency of the receiving side with an error of less than 0.4 %.

Key words: Wireless Power Transfer, Resonant Frequency, Coils, Maximum Power Transfer Efficiency, Double-Sided LCC Topology

한국과학기술원 초전식모빌리티대학원(Cho Chun Shik Graduate School of Mobility, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

· Manuscript received September 7, 2022 ; Revised September 26, 2022 ; Accepted September 29, 2022. (ID No. 20220907-070)

· Corresponding Author: Seungyoung Ahn (e-mail: sahn@kaist.ac.kr)

## I. 서 론

최근, 생활 가전, 드론 등의 어플리케이션에서, 대전력의 전기자동차까지 많은 곳에서 무선전력전송(wireless power transfer, WPT) 시스템이 적용되고 있다<sup>[1],[2]</sup>. WPT 시스템은 유선 커넥터 연결이 필요 없기 때문에 편리하다. 또한, WPT 시스템은 커넥터의 접촉 불량, 우천으로 인한 수분 등으로 인한 감전의 위험이 전혀 없기 때문에, 유선충전보다 전기적으로 안전하다. 따라서, WPT 시스템은 최근 가장 주목받고 있는 어플리케이션인 전기자동차(electric vehicles, EVs)를 필두로 매우 많은 곳에 적용되기 위해 활발히 연구되고 있다<sup>[1]</sup>.

WPT 시스템은 그림 1<sup>[3]</sup>과 같이 도선의 물리적 연결 없이 자기장의 형태로 송신측에서 수신측으로 에너지를 전달한다. WPT 시스템은 은 자기장으로 에너지를 전달한다는 점에서 기존의 변압기(transformer)와 비교가 많이 되는데, WPT 시스템과 변압기는 여러 가지 점에서 차이가 있지만, 송신(transmitting side, TX) 코일과 수신(receiving side, RX) 코일 간의 결합계수(coupling coefficient)에 결정적인 차이를 가진다<sup>[3]</sup>. 변압기는 자로(magnetic path)가 대부분 자성체로 구성되기 때문에 결합계수가 1에 달하는 반면, WPT 시스템은 자로가 대부분 공기로 구성된다. 따라서, 결합계수가 0.5 미만이며, 대부분의 경우 결합계수가 0.1에 근접한다.

이렇게 결합계수가 작은 WPT 시스템의 단점을 보완하기 위해, 공진 회로(resonant circuit), 혹은 보상 회로(compensation circuit)가 필요하다<sup>[3]</sup>. WPT 시스템에서 보상회로는 다양한 기능을 수행하지만, 가장 중요한 역할 중 하나는 바로 코일의 리액턴스(reactance)를 최소화하여

무효전력(reactive power)을 최소화하는 것이다. 리액턴스 최소화를 위해서, 코일의 인덕턴스의 리액턴스값을 상쇄시켜야 하므로, 무선전력전송 시스템의 공진회로는 보통 커패시턴스를 추가해준다. 인덕턴스와 커패시턴스의 공진주파수는 WPT 시스템의 인버터 동작주파수( $\omega_0$ )와 일치시키며, 보통 이 주파수를 공진주파수라고도 한다.

한편, 그림 1에서 알 수 있듯이, WPT 시스템의 공진 주파수는 TX 측과 RX 측에 각각 존재하게 된다. 송신측의 공진주파수와 시스템 동작주파수의 일치는 인버터의 효율 및 역률에 관여하여 인버터의 효율에 영향을 주는 반면, RX 측의 공진주파수는 WPT 시스템의 핵심 효율인 TX 코일에서 RX 코일로 전달되는 전력 효율(coil to coil 전력 효율)에 결정적인 영향을 끼친다는 것이 연구되었다<sup>[4],[5]</sup>. 즉, 많은 연구들에서 알 수 있듯이, WPT 시스템의 효율을 증가시키기 위해서는 RX 측의 공진주파수와 시스템의 동작주파수를 반드시 일치시켜야 한다.

하지만, 실제 WPT 시스템에서는 코일 인덕턴스의 공정 오차, 코일 주변 금속과 자성체에 의한 인덕턴스 변화 등으로 실제 공진주파수는 설계한 공진주파수와 다르다<sup>[6],[7]</sup>. 특히, RX 측의 공진주파수와 TX 측의 인버터의 동작주파수와 일치하는 coil to coil 전력에 결정적인 역할을 한다는 점을 비춰 보았을 때, RX 공진주파수를 TX 측에서 파악하는 것이 매우 중요하다. 하지만, TX 측과 RX 측은 전기적으로 절연되어 있으므로 그 정보를 유추하기가 매우 힘들다. 따라서, TX 측의 정보만으로 RX 측의 공진주파수를 파악하기 위한 방법이 반드시 연구되어야 한다.

기존에 TX 측에서 RX 측의 공진주파수를 파악하기 위한 다양한 연구들이 있었다. 참고문헌 [6] 및 참고문헌 [7]에서는, TX의 정보만으로 RX 측의 정보를 알 수 있었다. 하지만, 참고문헌 [6]은 LCC-series topology를, 참고문헌 [7]에서는 series-series 토폴로지를 채택한 WPT 시스템을 연구 대상으로 하였다. 따라서, 기존 연구들<sup>[6],[7]</sup>은 최근 많이 연구되고 있는 double-sided LCC 토폴로지<sup>[6]</sup>에 적용하기 어려운 단점이 있었다.

본 논문에서는, 최근 가장 많이 사용되는 double-sided LCC 토폴로지에서 TX 코일의 전압과 전류의 위상차를 분석하여 RX 측의 공진주파수를 파악하는 방법에 대해 제안한다. 본 논문에서 제안하는 RX 측 공진주파수 파악

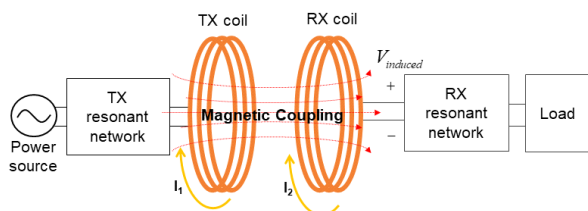


그림 1. 자기장으로 전력이 전달되는 WPT 시스템<sup>[3]</sup>  
Fig. 1. WPT system in which power is transferred by magnetic field<sup>[3]</sup>.

방법은 TX 측과 RX 측 간의 별도의 통신 시스템 없이, TX 측의 인버터의 동작주파수를 스위프(sweep)하여 TX 코일의 전압과 전류의 위상차변화를 통해 RX 공진주파수를 파악할 수 있다. 제안된 방법을 수식적으로 분석하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 증명되었다.

본 논문의 전개는 다음과 같다. II장에서 TX 코일의 전압, 전류 위상차와 RX 공진주파수와 관계에 대해 분석하며, III장에서 제안된 방법을 시뮬레이션과 실험을 통해 증명한 뒤, VI장에서 몇 가지 사항에 대해 논의한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. TX 코일의 전압과 전류의 위상차 분석을 통한 RX 측 공진주파수 추출

### 2-1 Double-Sided LCC 토폴로지에서의 RX 공진주파수 정의

그림 2는 본 논문에서 분석의 대상으로 삼고자 하는 double-sided LCC 토폴로지를 채택한 WPT 시스템을 보여준다<sup>[8]</sup>. Double-sided LCC 토폴로지는 전기자동차 무선충전 표준 등에 채택되는 등 많은 어플리케이션에 적용되기 위해 많은 연구가 진행 중이다<sup>[8]</sup>. 본 연구에서 모든 공진 회로들은 기존에 연구되었던 double-sided LCC 토폴로지의 공진 방법을 채택한다<sup>[8]</sup>.

본 연구에서는, 그림 2와 같이 부하의 영향을 배제하기 위하여, 부하와 연결되는 스위치인  $S_1$ 을 추가하였다. RX 공진주파수를 추출하는 과정에서 부하의 영향을 제거하기 위하여  $S_1$ 은 끈 상태(off, 또는 open)로 수행한다. 또한, WPT 시스템의 RX 측에서  $C_{S2}$ ,  $C_{P2}$ ,  $L_{S2}$ 는 모두 오차가 매

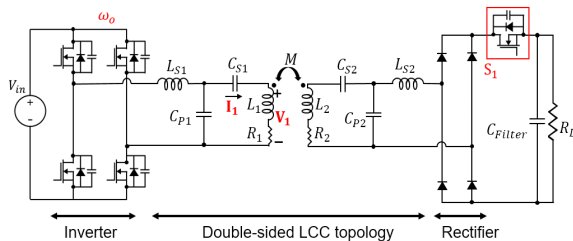


그림 2. Double-sided LCC 토폴로지를 채택한 WPT 시스템  
Fig. 2. WPT system with double-sided LCC topology.

우 적은 값이므로 일정한 값이라 가정한다. 반면, RX 코일의 인덕턴스를 나타내는  $L_2$ 는 기존 연구들에서 연구된 바와 같이 공극과 주변 금속에 의해 값이 변화할 수 있다<sup>[7]</sup>. 본 연구에서는  $L_2$ 가 변화함에도 TX 측에서 RX 측의 공진주파수를 정확히 추출하는 방법에 대해 제안하였다.

그림 2의 부하와 연결된 스위치  $S_1$ 을 켜는 등의 등가회로는 그림 3과 같다. 본 연구에서 찾고자하는 RX 측의 공진주파수의 정의는 그림 3의 RX coil loop의 공진주파수이며, 이는 식(1)과 같다.

$$\omega_{n2} = \frac{1}{\sqrt{L_2^* \frac{C_{S2}^* C_{P2}}{C_{S2} + C_{P2}}}} \quad (1)$$

식 (1)에서,  $\omega_{n2}$ 는 그림 3의 RX coil loop의 자체의 공진주파수이다. 이 주파수는 송신 코일이 존재하지 않을 때의 RX loop 본연의 공진주파수를 의미한다. 이를 RX 측의 공진주파수라고 정의하며, 본 연구에서는 TX 측 코일의 전압, 전류의 위상차를 분석하여 식 (1)의 RX loop의 공진주파수를 추출할 수 있다. 이 주파수는 주파수 분할 현상이 발생할 경우의 공진주파수<sup>[9]</sup>와는 다르다.

### 2-2 TX 코일의 전압과 전류의 위상차의 수식 분석

그림 4는 그림 3의 등가회로를 가지는 WPT 시스템에서 RX 측의 임피던스의 TX 측으로의 변환을 보여준다. 그림 4에서  $Z_{eq}$ 는 RX 측에서 TX 측으로 변환된 등가 임피던스를 나타내며, 이는 식 (2)와 같다.

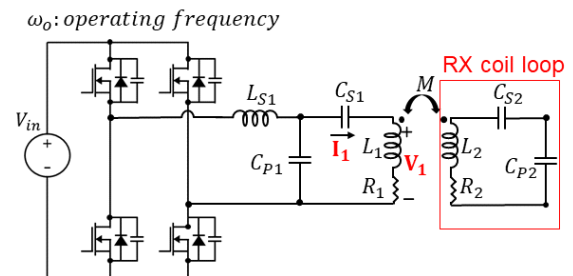


그림 3. 부하의 영향을 배제하기 위해 추가된 스위치  $S_1$ 을 켜는 등의 등가회로의 WPT 시스템  
Fig. 3. Equivalent circuit of WPT system when switch  $S_1$  added to exclude the effect of load is turned off.

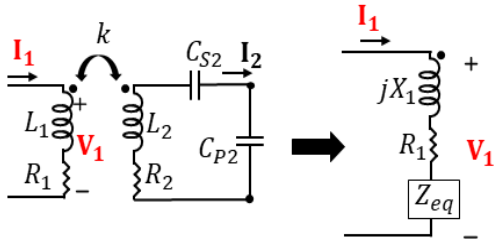


그림 4. WPT 시스템에서 RX측 임피던스의 TX측으로의 변환

Fig. 4. Conversion of RX side impedance to TX side in WPT system.

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2)$$

식 (2)에서,  $R_{eq}$ 와  $X_{eq}$ 는 각각 TX측으로 변환된 저항 성분과 리액턴스 성분을 나타내며, 이는 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

$$R_{eq} = \frac{\omega_o^2 k^2 L_1 L_2 R_{RX}}{R_{RX}^2 + X_{RX}^2} \quad (3)$$

$$X_{eq} = -\frac{\omega_o^2 k^2 L_1 L_2 X_{RX}}{R_{RX}^2 + X_{RX}^2} \quad (4)$$

식 (3) 및 식 (4)에서,  $k$ 는 TX측과 RX 사이의 결합계수이다. 또한,  $R_{RX}$ 와  $X_{RX}$ 는 RX측의 저항 성분과 리액턴스 성분이며, 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$R_{RX} = R_2 + R_{C2} + R_{CP2} \quad (5)$$

$$X_{RX} = \omega_o L_2 - \frac{1}{\omega_o C_{S2}} - \frac{1}{\omega_o C_{P2}} \quad (6)$$

한편, TX 코일의 전압, 전류의 위상차를 통해서 RX측의 공진주파수를 분석하기 위해, TX 코일의 전압과 전류의 위상차를 나타내면 식 (7)과 같다.

$$\theta_{TX} = \angle Z_{TX} \simeq \arctan\left(\frac{X_1 + X_{eq}}{R_{eq}}\right) \quad (7)$$

식 (7)에서,  $X_1$ 은 TX 코일의 리액턴스 값이다. 식 (7)의 TX 코일의 전압, 전류 위상차가 0이 되게 하는 주파수 해 중에서, 의미 있는 양의 실수값은 식 (8)과 같다.

$$\omega_a, \omega_b = \sqrt{\frac{\pm f(k) + L_2(2 - k^2) - C_2 R_2^2}{2L_2^2 C_2(1 - k^2)}}, (\omega_a < \omega_b) \quad (8)$$

식 (8)에서  $f(k)$ 는 결합계수  $k$ 의 함수이며, 이는 식 (9)와 같다.

$$f(k) = L_2^2 k^4 + 2C_2 L_2 R_2^2 k^2 + C_2^2 R_2^4 - 4C_2 L_2 R_2^2 \quad (9)$$

식 (8) 및 식 (9)에서 알 수 있는 점은, 만약,  $f(k)$ 가 양수이면 식 (8)의 서로 다른 두 개의 해를 가지며,  $f(k)$ 가 0이면, 식 (8)은 오직 하나의 해를,  $f(k)$ 가 음수이면 복소수 (complex number) 해를 가진다는 것이다. 복소수 주파수는 물리적으로 의미가 없기 때문에,  $f(k)$ 가 음수이면 해가 없다고 가정한다. 이때, 식 (9)의  $f(k)$ 가 0이 되게 하는 결합계수를 임계 결합계수( $k_{critical}$ )라고 정의하고 나타내면, 식 (10)과 같다.

$$k_{critical} = \sqrt{\frac{2R_2 \sqrt{C_2 L_2} - C_2 R_2^2}{L_2}} \quad (10)$$

한편, 식 (9)의 도함수를 나타내면, 식 (11)과 같으며, 식 (11)은 항상 양수이다.

$$\frac{df(k)}{dk} = 4L_2^2 k^3 + 4C_2 L_2 R_2^2 k > 0 \quad (11)$$

따라서,  $f(k)$ 는 증가함수이며,  $f(k)$ 의 실수해는 식 (10)의 임계 결합계수가 유일하다는 것을 알 수 있다. 즉, 결합계수  $k$ 가  $k_{critical}$ 보다 크면  $f(k)$ 는 양수 값을, 같으면  $f(k)$ 가 0이 되고, 마지막으로 결합계수  $k$ 가  $k_{critical}$ 보다 작으면  $f(k)$ 는 음수값을 갖게 된다. 식 (7)~식 (11)의 내용을 정리하면, 표 1과 같다. 다음으로는 표 1의 각 경우에 어떻게 RX 측의 공진 주파수를 찾을 수 있는지에 대한 분석을 수행한다.

### 2.3 주파수 스위칭에 따른 TX 코일의 전압 전류 위상차 분석을 통한 RX 공진주파수 추출 방법

그림 5는 표 1에서 결합계수가 임계 결합계수보다 큰 경우에 동작주파수의 스위칭을 수행하였을 때, TX 코일의 전압과 전류의 위상차의 변화를 보여준다. 표 1에서 예상되었듯이, 시스템 동작주파수가 변화함에 따라, TX 코일의 전압과 전류의 위상이 0이 되는 주파수는 두 개( $\omega_a$ ,  $\omega_b$ ) 존재한다. 결론적으로 말하면, 이 두 주파수 중 작은 주파수( $\omega_a$ )가 찾고자 하는 RX 측 루프의 공진주파수이다. 이를 보다 자세히 분석하기 위해서, 그림 5의 다섯 가지

표 1. 결합계수에 따른 TX 코일 전압과 전류의 위상차가 0이 되는 주파수 케이스 분류

Table 1. Frequency at which the phase difference between TX coil voltage and current according to the coupling coefficient becomes 0.

Relative coupling coefficient	Frequency where the TX coil voltage and current phase difference becomes zero
$k > k_{critical}$	$\omega_a, \omega_b$ (two positive frequencies)
$k = k_{critical}$	$\omega_a = \omega_b$ (only one positive frequency)
$k < k_{critical}$	- (two complex frequencies)

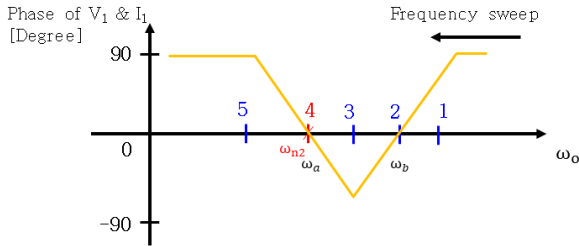
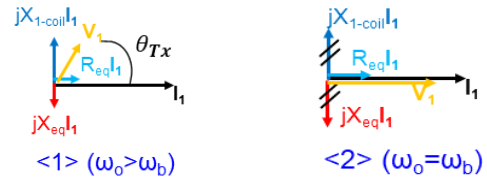


그림 5. 결합계수가 임계 결합계수보다 큰 경우에 동작 주파수 변화에 따른 TX 코일의 전압과 전류의 위상차 변화

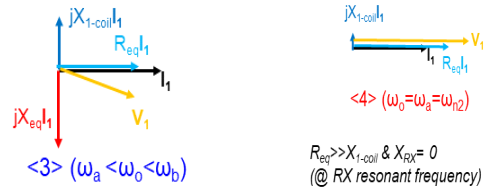
Fig. 5. The phase difference between the voltage and the current of the TX coil according to the operating frequency change, where  $k$  is larger than  $k_{critical}$ .

주파수 케이스에 대해 전압, 전류에 대한 페이저도(phaser diagram)를 그려서 분석한다.

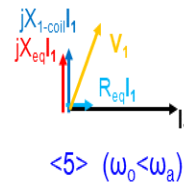
그림 6은 결합계수가 임계 결합계수보다 큰 경우의 그림 5에서의 다섯 가지 대표적인 주파수 케이스들에 대한 TX 코일의 전압, 전류의 페이저도를 나타낸다. 모든 페이저도들은 TX 코일의 전류  $I_1$ 을 기준(실수 축의 양의 방향)으로 나타내었다. 모든 케이스들에서, TX 코일의 인덕턴스( $X_{1-coil}$ )에 의한 전압 성분은 전류보다 항상 90도 앞선다. 그림 6(a)의 경우 동작주파수가 RX 공진주파수보다 충분히 높기 때문에, 식 (4)에 의해  $X_{eq}$ 는 음수값을 가지게 되고 이 성분에 의한 전압은 TX 전류  $I_1$ 보다 90도 뒤진다. 또한,  $R_{eq}$ 에 의한 전압은  $I_1$ 과 동상이다. 따라서, 모든 전압 성분을 더하면, TX 코일 양단의 전압  $V_1$ 은 전류



- (a) 동작주파수( $\omega_o$ )가 위상이 첫 번째로 0이 되는 주파수( $\omega_b$ )보다 클 때  
(b)  $\omega_o$ 가 위상이 첫 번째로 0이 되는 주파수  $\omega_b$ 와 같을 때  
(a) When the operating frequency ( $\omega_o$ ) is greater than the frequency ( $\omega_b$ ) at which the phase first becomes zero  
(b) When  $\omega_o$  is equal to the frequency  $\omega_b$



- (c)  $\omega_o$ 가 위상이 0이 되는 주파수들( $\omega_a, \omega_b$ ) 사이에 존재할 때  
(d)  $\omega_o$ 가 위상이 두 번째로 0이 되는 주파수  $\omega_a$ 와 같을 때  
(c) When  $\omega_o$  is between frequencies ( $\omega_a, \omega_b$ ) where the phase is zero  
(d) When  $\omega_o$  is equal to the frequency  $\omega_a$  at which the phase becomes zero for the second time



- (e)  $\omega_o$ 가 위상이 두 번째로 0이 되는 주파수  $\omega_a$ 보다 작을 때  
(e) When  $\omega_o$  is less than the frequency  $\omega_a$

그림 6. 결합계수가 임계 결합계수보다 클 때, 그림 5의 다섯 가지 주파수 케이스에 대한 전압, 전류 페이저도

Fig. 6. When the coupling coefficient is larger than the  $k_{critical}$ , the voltage and current phasor diagrams of TX coil for the five frequency cases in Fig. 5.

$I_1$ 보다 앞선다. 그림 6(b)에서는, TX 코일 양단의 전압과 전류가 최초로 동상이 되는데, 이는 TX 코일 인덕턴스에 의한 리액턴스  $X_{1-coil}$ 과 RX 측에서 환산된 리액턴스  $X_{eq}$ 가 크기는 같고 부호는 반대가 되어, 리액턴스가 상쇄되고

저항 성분만 남기 때문이다. 하지만, RX 측의 리액턴스가 여전히 존재하므로, 그림 6(b)의 주파수는 RX 공진주파수가 아니다. 그림 6(c)에서는 공진주파수에 점점 다가감으로 인해서, RX 측에서 환산된 리액턴스  $X_{eq}$  크기가 점점 증가하여 TX 코일의 전류가 전압보다 앞서는 커패시티브 영역으로 진입하게 된다. 그림 6(d)의 주파수가 바로 RX 공진주파수인 경우인데,  $X_{eq}$ 는 0이 되고,  $R_{eq}$ 는 상대적으로 매우 크게 된다. 따라서,  $R_{eq}$ 가  $X_{1-coil}$ 에 비해 매우 크게 되어 TX 코일의 전압, 전류의 위상은 0이 된다. 마지막으로, 그림 6(e)에서처럼, RX 측의 공진주파수를 지나서 주파수가 더 감소하게 되면  $X_{eq}$ 가 나타나고, 이때는  $X_{eq}$ 의 양의 부호로 바뀌어,  $X_{1-coil}$ 과 동상이 되어 TX 코일의 전압은 전류보다 항상 앞서게 된다. 정리하면, 표 1의 첫번째 경우인 결합계수가 임계 결합계수보다 큰 경우에는, 높은 주파수에서부터 주파수 스윙을 하면 두 번째로 0이 되는 주파수가 RX 공진주파수이다.

그림 7은 표 1의 두 번째 케이스인 결합계수와 임계 결합계수가 같은 경우에 동작주파수 변화에 따른 TX 코일의 전압과 전류의 위상차 변화를 보여준다. 표 1에서 예상되었듯이, 결합계수가 임계 결합계수와 같은 경우에는, TX 코일의 전압과 전류의 위상차가 한번 0이 된다. 결론적으로 말하면, 이 주파수가 바로 RX 측의 공진주파수이다.

그림 7의 대표적인 세 가지 주파수에 대해 페이지도를 그리면 그림 8과 같다. 먼저, 그림 8(a)에서 시스템 동작주파수가 RX 공진주파수보다 높은 경우에는 그림 6(a)와

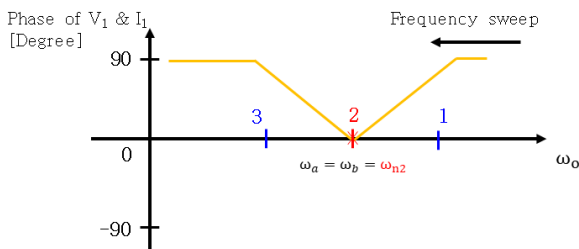


그림 7. 결합계수가 임계결합계수와 같은 경우에 동작주파수 변화에 따른 TX 코일의 전압과 전류의 위상차 변화

Fig. 7. The phase difference between the voltage and the current of the TX coil according to the operating frequency change, where  $k$  is equal to  $k_{critical}$ .

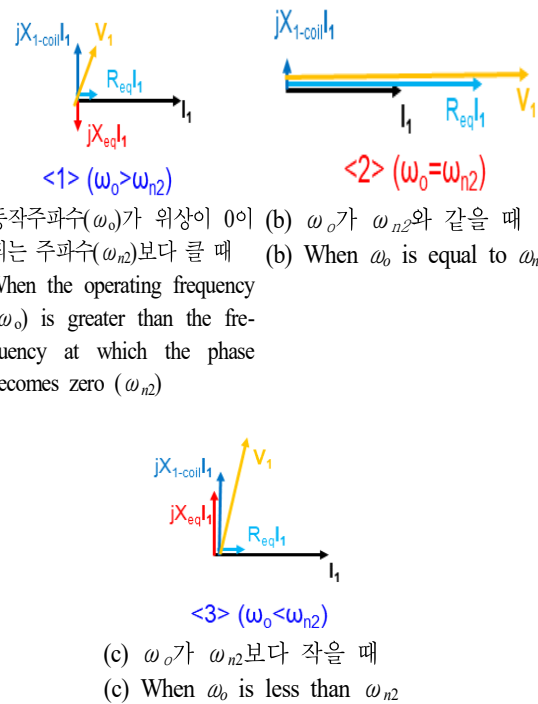


그림 8. 결합계수가 임계결합계수와 같을 때, 그림 7의 다섯 가지 주파수 케이스에 대한 전압, 전류 페이저도

Fig. 8. When the coupling coefficient is equal to the  $k_{critical}$ , the voltage and current phasor diagrams of TX coil for the five frequency cases in Fig. 7.

같이 TX 코일의 전류( $I_1$ )가 전압( $V_1$ )보다 뒤진다. 동작주파수가 RX 공진주파수와 같은 경우인 그림 8(b)에서는, 그림 6(d)와 같이 전류( $I_1$ )와 전압( $V_1$ )이 동상이 된다. 또한, 시스템 동작주파수가 RX 공진주파수보다 낮은 그림 8(c) 역시, 그림 6(e)와 마찬가지로 전압( $V_1$ )이 전류( $I_1$ )보다 앞서게 된다. 정리하면, 결합계수와 임계 결합계수가 같은 경우에는, TX 코일의 위상이 최저점이 되는 주파수가 RX 공진주파수인데, 이 위상의 최저점은 0이 된다.

그림 8은, 표 1의 마지막 케이스인, 결합계수가 임계 결합계수보다 작은 경우에 동작주파수 변화에 따른 TX 코일의 전압과 전류의 위상차 변화를 나타낸다. 표 1에서 예상되었듯이, 결합계수가 임계 결합계수보다 작은 경우에는, TX 코일의 전압과 전류의 위상이 0이 되는 주파수는 존재하지 않는다. 결론적으로 말하면, 그림 9에서와 같이 위상의 최저점을 가지는 주파수가 RX 공진 주파수



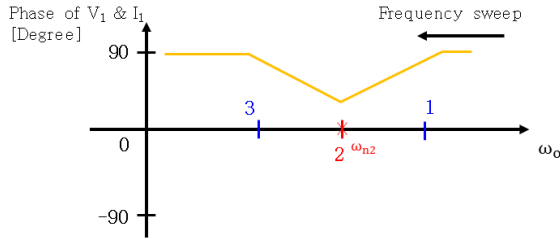
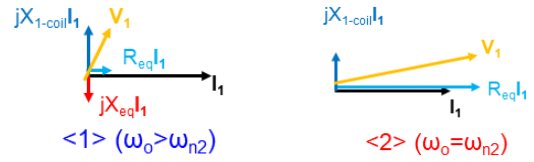


그림 9. 결합계수가 임계결합계수보다 작은 경우에 동작 주파수 변화에 따른 TX 코일의 전압과 전류의 위상차 변화

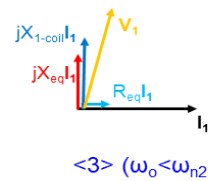
Fig. 9. The phase difference between the voltage and the current of the TX coil according to the operating frequency change, when  $k$  is smaller than  $k_{critical}$ .

이다.

그림 9의 대표적인 세가지 주파수에 대해 페이지도를 그리면 그림 10과 같다. 먼저, 그림 10(a)에서 시스템 동작 주파수가 RX 공진주파수보다 높은 경우에는 그림 6(a)와 같이 TX 코일의 전류( $I_1$ )가 전압( $V_1$ )보다 뒤진다. 그림 10(b)의 경우가 공진주파수인 경우인데, TX 코일의 전압, 전류 위상차가 최저값을 가진다. 하지만, 앞선 경우들과 달리 공진주파수에서 TX 코일의 전압, 전류의 위상이 0이 되지 않는데, 그 이유는 결합계수  $k$ 가 충분히 크지 않아서 식 (3)의  $R_{eq}$ 가 TX 코일 자체의 리액턴스( $X_{1-coil}$ )보다 충분히 커지지 않기 때문이다. 또한, 시스템 동작주파수가 RX 공진주파수보다 낮은 그림 10(c) 역시, 그림 6(e)와 마찬가지로 전압( $V_1$ )이 전류( $I_1$ )보다 앞서게 된다. 정리하면, 결합계수가 임계 결합계수보다 작은 경우에는, TX 코



- (a) 동작주파수( $\omega_o$ )가 RX 측 공진주파수( $\omega_{n2}$ )보다 클 때  
(b)  $\omega_o$ 가  $\omega_{n2}$ 와 같을 때  
(a) When the operating frequency ( $\omega_o$ ) is greater than the RX side resonance frequency ( $\omega_{n2}$ )  
(b) When  $\omega_o$  is equal to  $\omega_{n2}$



- (c)  $\omega_o$ 가  $\omega_{n2}$ 보다 작을 때  
(c) When  $\omega_o$  is less than  $\omega_{n2}$

그림 10. 결합계수가 임계 결합계수보다 작을 때, 그림 9의 다섯 가지 주파수 케이스에 대한 전압, 전류 페이지도

Fig. 10. When the coupling coefficient is smaller than the  $k_{critical}$ , the voltage and current phasor diagrams of TX coil for the five frequency cases in Fig. 9.

일의 위상이 최저점이 되는 주파수가 RX 공진주파수인데, 이 위상의 최저점은 0보다 큰 값을 갖는다.

앞서 분석한 내용을 정리하면 표 2와 같다. 만약 결합계수  $k$ 가 임계 결합계수보다 크다면, 동작주파수의 변화

표 2. 결합계수의 상대적인 크기에 따른 TX 코일 전압과 전류의 위상차의 변화와 및 그에 따른 RX 공진주파수 찾는 방법

Table 2. Changes in the phase difference of TX coil voltage and current according to the relative magnitude of the coupling coefficient and how to find the RX resonant frequency accordingly.

Relative coupling coefficient	Frequency where the TX coil voltage and current phase difference becomes zero	How to find the RX resonant frequency by observing the phase difference of the TX coil
$k > k_{critical}$	$\omega_a, \omega_b$ (two different positive frequencies)	The lower frequency where the phase difference becomes zero.
$k = k_{critical}$	$\omega_a = \omega_b$ (only one positive frequency)	The point where the phase difference is the lowest.
$k < k_{critical}$	- (two different complex frequencies)	

에 따라 TX 코일의 전압과 전류의 위상차가 0이 되는 주파수가 두 점을 가지며, 두 주파수 중에서 더 낮은 주파수가 RX 공진주파수이다. 결합계수  $k$ 가 임계 결합계수와 같은 경우에는, TX 코일의 전압과 전류의 위상이 0이 되는 주파수는 오직 하나만 존재하며 이때의 위상이 위상의 최저점인 동시에 이 주파수가 RX 공진주파수이다. 또한, 결합계수가 임계 결합계수보다 작다면 TX 코일의 전압과 전류의 위상차가 0되는 주파수는 존재하지 않으며, 위상이 최저점인 주파수가 RX 공진주파수이다. 본 연구에서 제안한 표 2의 내용에서, TX 측에서는 결합계수를 알지 못하여도 관계없는데, 그 이유는 동작 주파수 스위칭을 수행하면, 반드시 그림 5~그림 10과 같이 세 경우와 같이 위상이 변화하며, 위상의 최저점 혹은, 위상이 0이 되는 지점이 바로 RX 공진주파수이기 때문이다.

### III. 제안된 RX 공진주파수 추출 방법의 증명

#### 3-1 시뮬레이션을 통한 증명

그림 11은 본 논문에서 제안한 방법을 증명을 위해 설계된 코일을 보여준다. 코일의 설계는 유한요소법 자기장 시뮬레이션 프로그램인 Ansys사의 Maxwell을 통해 설계되었다. 실제 WPT 시스템을 모사하기 위해서, 코일 외에도 자성체와 금속 케이스를 추가하였다. 금속 케이스는 알루미늄이라고 가정하였다. 그림 11의 코일의 자세한 설계 변수들은 표 3에서 자세히 나타내었으며, 공극에 따른 코일의 전기적 파라미터값과 그림 2의 double-sided LCC 토폴로지의 공진값들은 표 4에서 나타내었다. 각 소자들의 예상 직렬 등가 저항(equivalent series resistance, ESR)도 함께 나타내었다. 또한, 표 4에서는 식 (10)에 의해 계산된 임계 결합계수도 나타내었다. 표 4에서 알 수 있듯이, 코일간의 공극(air-gap)이 40 mm일 때는 결합계수  $k$ 가 임계 결합계수보다 크지만, 공극이 80 mm인 경우에는 결합계수  $k$ 가 임계결합계수보다 작다. 따라서, 공극이 40 mm인 경우에는 주파수가 변화함에 따라 TX 코일 양단 전압, 전류의 위상차가 0 이하로 되는 주파수가 두 개 존재할 것이라 예상할 수 있으며, 공극이 80 mm인 경우에는 주파수가 변화함에 따라 TX 코일 양단 전압, 전류의 위상차가 0이 되는 주파수가 존재하지 않을 것이다. RX 측의

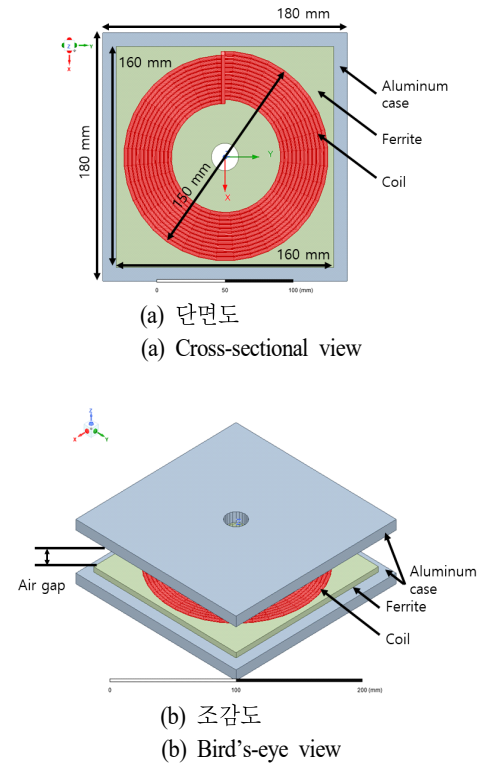


그림 11. 유한요소법 자기장 시뮬레이션 프로그램으로 디자인된 WPT 코일들

Fig. 11. WPT coils designed with finite element method magnetic field simulation program.

표 3. 코일 시뮬레이션의 자세한 설계 사양들

Table 3. Design specifications of WPT coil simulation.

Parameters	Value
Turns of coils	13 turns / 1 layer
Type of wire	Litz wire (0.05 mm, 1,300 strands)
Relative permeability of ferrite	3,200
Frequency	85 kHz
Air gap	40 mm and 80 mm

공진주파수( $f_{r2}$ )는 83.3 kHz이며, 표 4에 함께 나타내었다. 표 4의 모든 공진값들은 double-sided LCC 토폴로지 기존 연구들의 공진값들을 선정하는 방법과 같게 선정하였다 [8].

그림 12는 시스템 동작주파수 변화에 따른, TX 코일 양단의 전압, 전류 위상차를 나타낸다. 앞서 표 3 및 표 4



표 4. 그림 2의 double-sided LCC 토폴로지의 공진 회로 값들과 공진 주파수

Table 4. Resonant circuit values of the double-sided LCC topology in Fig. 2.

Parameters	Value
$L_1, L_2$ [ $\mu$ H]	41.5
$R_1, R_2$ [ $\Omega$ ]	0.08
Coupling coefficient $k$	0.356 (Air gap=40 mm) 0.110 (Air gap=80 mm)
Critical coupling coefficient ( $k_{critical}$ )	0.136
$L_{S1}$ [ $\mu$ H] (ESR [ $\Omega$ ])	19.4 (0.1)
$C_{S1}$ [nF] (ESR [ $\Omega$ ])	180 (0.01)
$C_{P1}$ [nF] (ESR [ $\Omega$ ])	180 (0.01)
$L_{S2}$ [ $\mu$ H] (ESR [ $\Omega$ ])	11.4 (0.1)
$C_{S2}$ [nF] (ESR [ $\Omega$ ])	120 (0.01)
$C_{P2}$ [nF] (ESR [ $\Omega$ ])	330 (0.01)
RX side frequency ( $f_{n2}$ ) [kHz]	83.3

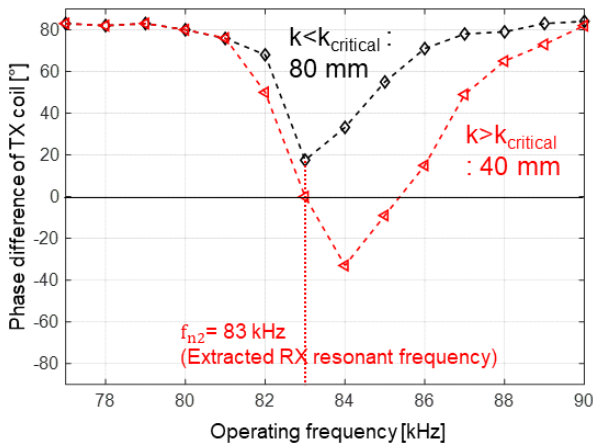


그림 12. 주파수 스위프에 따른 TX 코일 양단 전압, 전류의 위상차 변화

Fig. 12. Change of phase difference of voltage and current across TX coil according to frequency sweep.

와 마찬가지로 40 mm와 80 mm 두 개의 경우에서 주파수 스위프를 수행하였다. 주파수 스위프는 90 kHz에서부터 77 kHz까지 1 kHz 스텝으로 수행하였으며, 그림 3의 회로에서 입력 전압은 5 V로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 12에서 코일 간의 공극이 80 mm인 경우에는 결

합계수  $k$ 가 임계 결합계수보다 작으므로, TX 코일의 전압과 전류의 위상차가 0 이하가 되는 주파수는 존재하지 않으며, 단지 최소값만 가질 뿐이다. 이때, 위상의 최소값을 가지는 주파수가 바로 RX 공진주파수( $f_{n2}$ )이며, 이는 83 kHz로 추출되었다. 이는 실제 RX 측의 공진 주파수인 83.3 kHz와 매우 흡사한 값을 알 수 있다. 또한, 공극이 40 mm인 경우에는 결합계수가 임계 결합계수보다 크므로, TX 코일의 전압과 전류의 위상차가 0이 되는 주파수가 두 번 존재한다. 이때, 두 주파수 중에서 더 낮은 주파수가 RX 공진주파수이며, 마찬가지로 83 kHz로 확인할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 알 수 있는 중요한 점은, 실제 코일들의 결합계수를 알지 못하더라도 표 2에서 정리한 방법으로 TX 코일 양단 전압과 전류의 위상차만으로도 RX 측의 공진주파수를 알 수 있다는 점이다.

### 3-2 실험을 통한 증명

제안된 방법은 실험으로도 증명하였다. 그림 13(a)는 그림 11과 표 3에서 디자인한 코일을 실제로 제작한 코일들을 보여준다. WPT 코일들의 모든 설계 변수들은 그림 11과 표 3과 일치하도록 설계하였다. 또한, 그림 13(b)는 실제 제작된 WPT 시스템의 공진회로 보드를 보여준다. 그림 13의 코일들과 공진회로들의 측정값은 표 5에서 보여준다. 실험을 통한 증명에서는, 결합계수가 0.149인 경우, 즉, 공극이 80 mm인 경우만 수행하였다. 계산된 임계 결합계수는 0.149이기 때문에, TX 코일 양단의 전압과 전류의 위상차가 0 이하로 감소하지 않을 것이라고 예상할 수 있다.

그림 14는 동작주파수 변화에 따른 TX 코일의 전압 전류의 위상차를 관찰하기 위한 실험 셋업을 보여준다. 전압, 전류의 위상차는 오실로스코프(KEYSIGHT사의 MXR 시리즈)로 측정하였다. 시뮬레이션과 마찬가지로, 주파수 스위프는 90 kHz에서부터 77 kHz까지 1 kHz 스텝으로 수행하였으며, 그림 14의 DC power supply의 입력 전압은 5 V로 설정하여 실험하였다.

표 5에서 알 수 있듯이, 코일 간의 공극이 40 mm일 때는 결합계수  $k$ 가 임계 결합계수보다 크지만, 공극이 80 mm인 경우에는 결합계수  $k$ 가 임계 결합계수보다 작다.

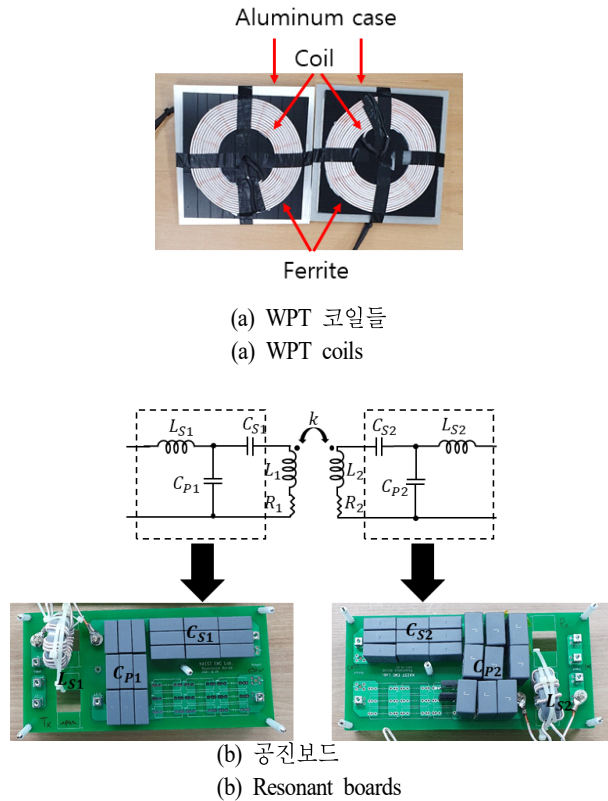


그림 13. 실험을 위해 실제 제작된 WPT 코일과 공진 회로 보드

Fig. 13. WPT coils and resonant circuits board actually fabricated for the experiments.

따라서, 공극이 40 mm인 경우에는 주파수가 변화함에 따라 TX 코일 양단 전압, 전류의 위상차가 0 이하로 되는 주파수가 두 개 존재할 것이라 예상할 수 있으며, 공극이 80 mm인 경우에는 위상차가 0 이하가 되지 않을 것이라는 것을 예상할 수 있다. 이는 그림 15는 동작주파수 변화에 따른 TX 코일의 전압과 전류의 위상차의 실제 측정치를 통해 확인할 수 있다.

그림 16은 그림 15에서 결합계수가 임계 결합계수보다 작은 경우, 각각 82 kHz, 80 kHz, 79 kHz에서의 TX와 RX 측의 전압, 전류 파형, 그리고 인버터의 게이트 파형의 측정치를 보여준다. 각 파형의 전압, 전류의 표기법은 그림 4의 등가회로의 표기법을 그대로 따랐다. 그림 15에서 알 수 있듯이, 그림 16(b)의 동작주파수가 80 kHz인 경우에 최저 위상을 가짐을 알 수 있다. 그림 15에서와 같이, 주

표 5. 실제 제작된 WPT 코일들과 공진회로 보드의 소자값들

Table 5. Values of actually fabricated WPT coils and resonant circuit board.

Parameters	Value
$L_1, L_2$ [ $\mu$ H]	44.2
$R_1, R_2$ [ $\Omega$ ]	0.09
Coupling coefficient $k$	0.31 (Air gap=40 mm) 0.12 (Air gap=80 mm)
Critical coupling coefficient ( $k_{critical}$ )	0.149
$L_{S1}$ [ $\mu$ H] (ESR [ $\Omega$ ])	19.9 (0.13)
$C_{S1}$ [nF] (ESR [ $\Omega$ ])	180 (0.015)
$C_{P1}$ [nF] (ESR [ $\Omega$ ])	182 (0.012)
$L_{S2}$ [ $\mu$ H] (ESR [ $\Omega$ ])	10.3 (0.12)
$C_{S2}$ [nF] (ESR [ $\Omega$ ])	121 (0.011)
$C_{P2}$ [nF] (ESR [ $\Omega$ ])	330 (0.013)
RX side frequency ( $f_{n2}$ ) [kHz]	80.4

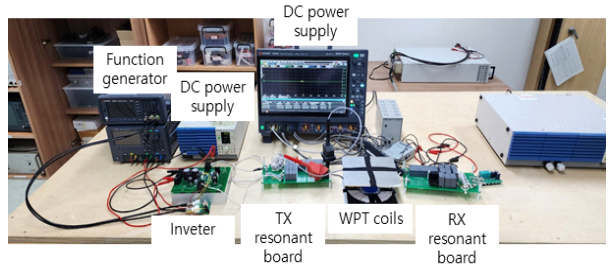


그림 14. 위상 변화 측정을 위한 실험 셋업

Fig. 14. Experimental setup for phase change measurements.

파수 스위칭을 1 kHz 단위로 수행하였을 시, TX 코일이 최저위상을 갖는 80 kHz가 RX 측의 공진주파수라는 것을 예측할 수 있다. 이는 표 5에서 실제 RX 측의 공진주파수인 80.3 kHz와 매우 근사한 결과를 얻었으며, 실제 값과 약 0.4 %의 차이를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

한편, 그림 17은 그림 15에서 결합계수가 임계 결합계수보다 큰 경우, 각각 81 kHz, 80 kHz, 79 kHz에서의 TX와 RX 측의 전압, 전류 파형, 그리고 인버터의 게이트 파형의 측정치를 보여준다. 그림 16에서 알 수 있듯이, 그림 17(b)의 동작주파수가 80 kHz인 경우에 높은 주파수에서

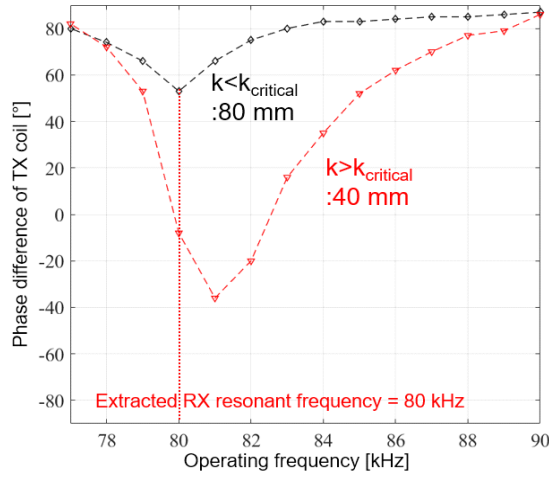


그림 15. 동작주파수 변화에 따른 TX 코일 전압, 전류의 위상차 실험 결과

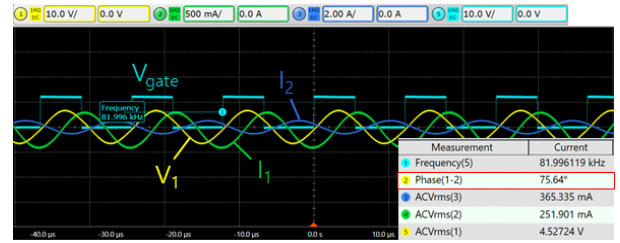
Fig. 15. Experiment result of phase difference of TX coil voltage and current according to operating frequency change.

부터 스위치를 했을 때, 위상이 두 번째로 0이 됨을 알 수 있다. 따라서, 앞선 분석과 같이, 주파수 해당 주파수인 80 kHz가 RX 측의 공진주파수라는 것을 예측할 수 있다. 이 측정치 역시, 표 5에서 실제 RX 측의 공진주파수인 80.3 kHz와 매우 근사한 결과를 얻었다.

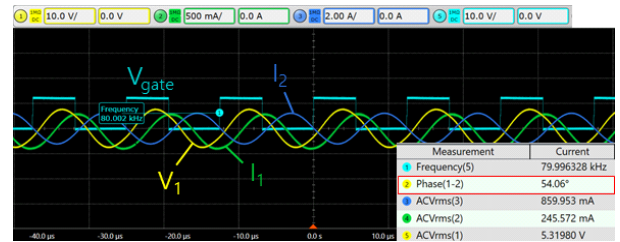
#### IV. 추가 논의 사항들

##### 4.1 추가 스위치 $S_1$ 을 통한 RX 회로 및 부하의 배제 원리와 실제 전원 공급 시의 스위치 $S_1$ 을 켜는 방법

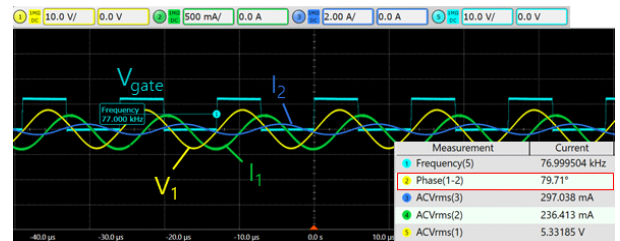
본 논문에서는 모든 분석은, 그림 3과 같이 RX 후단의 모든 회로(정류기, DC to DC 컨버터, 부하 등)들을 배제하고 분석하였다. 이는, 그림 2와 같이 부하와 WPT 시스템 간의 연결을 제어하기 위해 추가해준 스위치( $S_1$ )가 RX 공진주파수 추출을 위한 주파수 스위치에는 개방(open)되어, 스위치 후단의 모든 회로들을 무시할 수 있기 때문이다. 실제 전력 공급 시에는 스위치  $S_1$ 이 연결되어 전력이 공급되어야 한다. 하지만, 본 논문의 가정인 TX 측과 RX 측의 통신이 없는 상황에서 어떻게 RX 측에서 TX 측에서 전원 공급이 되었는지 판단하여 스위치를 켜야 한다.



(a) 동작주파수가 82 kHz인 경우  
(a) When the operating frequency is 82 kHz



(b) 동작주파수가 80 kHz인 경우  
(b) When the operating frequency is 80 kHz



(c) 동작주파수가 77 kHz인 경우  
(c) When the operating frequency is 77 kHz

그림 16. 결합계수가 임계결합계수보다 작을 때( $k < k_{critical}$ ), 동작주파수 변화에 따른 TX 코일 전압, 전류의 위상차 실험결과 실제 측정 파형

Fig. 16. When the coupling coefficient is less than the critical coupling coefficient ( $k < k_{critical}$ ), actual measurement waveform of TX coil voltage and current phase difference according to operating frequency change.

제안된 시스템에서 통신 시스템이 없어도, RX 측에서 전원 공급 여부를 판단하여 부하로 연결되는 스위치  $S_1$ 을 켤 수 있는 제어 시스템을 그림 18과 같이 제안하였다. 앞서 설명한 대로, RX 측의 공진주파수 추출을 위해서는 그림 3의 입력 전원( $V_{in}$ )을 5 V로 고정하였다. 이때, 그림 18과 같이, RX 측의 정류기 출력의 양단의 전압( $V_{out}$ )은



(a) 동작주파수가 81 kHz인 경우  
(a) When the operating frequency is 81 kHz



(b) 동작주파수가 80 kHz인 경우  
(b) When the operating frequency is 80 kHz



(c) 동작주파수가 77 kHz인 경우  
(c) When the operating frequency is 77 kHz

그림 17. 결합계수가 임계결합계수보다 클 때( $k > k_{critical}$ ), 동작주파수 변화에 따른 TX 코일 전압, 전류의 위상차 실험결과 실제 측정 파형

Fig. 17. When the coupling coefficient is greater than the critical coupling coefficient ( $k > k_{critical}$ ), actual measurement waveform of TX coil voltage and current phase difference according to operating frequency change.

매우 작은 값을 가질 것이다. 한편, 전원이 공급되어 입력 전( $V_{in}$ )이 5 V보다 훨씬 큰 값을 가진다면, RX 측의 정류기 출력의 양단의 전압( $V_{out}$ )도 5 V가 입력일 때의 값보다 훨씬 큰 값을 가진다. 이 원리를 이용해서  $V_{out}$ 의 값과 일정한 레퍼런스값을 비교해서, 전원이 공급되어 큰 값을 가지면  $S_1$ 을 켜주고, RX 공진주파수 추출을 위해 작은 전

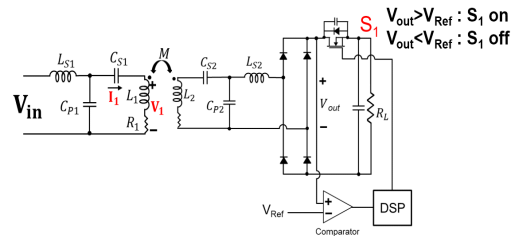


그림 18. 전원공급 여부를 구분하여 스위치를 켤 수 있는 RX 측의 제어 시스템 원리

Fig. 18. Principle of the control system on the RX side that can turn on the switch depending on whether the power is supplied or not.

압값이 출력되면  $S_1$ 을 꺼주는 식으로 동작하면 된다.

부하 측으로 연결되는 스위치를 켜고 끄는 동작은 전력전송과 동시에 이루어질 수 없다. 따라서, 해당 동작은 전기자동차, 혹은 무선전력전송 시스템이 적용된 어플리케이션의 RX 측이 스테이션에 접근하여 본격적으로 전력전송을 시작하기 전에, 먼저 스위치를 개방(open)시키고 최초에 RX 측의 주파수를 파악한다. 그 후, 스위치를 단락(on)시킨 뒤 TX 측에서 RX 측의 주파수를 이용하여 정상적으로 전력을 전송하는 형식으로 동작할 수 있다.

#### 4.2 RX 측의 정보를 구하기 위한 기존 방법들과의 비교

RX 공진주파수 추출을 위한 다양한 연구들이 있었다 [6][7][10][11]. 먼저, 참고문헌 [10]의 경우에는 통신을 이용해서 RX 측의 정보를 알 수 있는 대표적인 연구이다. 하지만, TX 측과 RX 측 사이의 통신 시스템이 별도로 존재하지 않는 시스템에서는 적용하기 어려운 단점을 가진다.

한편, 앞서 서론에서 설명한대로 통신 시스템 없이도 TX 측에서 RX 측의 정보를 알 수 있는 연구들이 있었다 [6][7]. 참고문헌 [6]은 LCC-series 토폴로지를 채택한 WPT 시스템에서, 참고문헌 [7]은 series-series 토폴로지의 WPT 시스템에서 TX 측에서 획득 가능한 정보만으로 RX 측의 정보를 각각 파악할 수 있었다. 하지만, 참고문헌 [6]과 참고문헌 [7]은 모두 최근 가장 많이 사용되고 있는 double-sided LCC 토폴로지에서 적용하기 어려운 단점이 있었다.

마지막으로, 참고문헌 [11]의 경우에는 RX 측 자체에

서 주파수를 센싱하여, PWM을 통해 RX 측의 공진주파수를 조정하는 시스템이 제안되었다. 하지만, 이 연구의 경우에는 TX 측에서는 결국 RX 측의 공진주파수의 절대값을 알 수 없다는 한계점을 가지며, 연구의 대상이 되는 토폴로지가 LCC-series 토폴로지이기 때문에, 앞서 설명한대로 double-sided LCC 토폴로지에 사용되기 어려운 단점을 가진다.

따라서, 본 논문에서 제안한 방법은, TX의 정보만으로 별도의 통신 시스템 없이 RX 측의 공진주파수를 알 수 있는 장점을 가진다. 또한, 최근 가장 주목받고 있는 double-sided LCC 토폴로지에 적용하였다는 장점을 가진다.

## V. 결 론

본 논문에서는 TX 정보만을 이용하여 RX 측의 공진주파수를 추출하는 방법에 대해 제안하였다. 제안된 방법은 TX 측과 RX 측이 별도의 통신 시스템 없이 TX 코일의 전압과 전류의 위상만으로 RX 측의 공진주파수를 추출할 수 있다. TX 코일의 전압과 전류의 위상에 대한 자세한 수식 분석을 수행하여, 임계 결합계수라는 위상 결정에 대한 상대적인 결합계수값을 정의하였으며, WPT 시스템의 결합계수와 임계 결합계수와의 크기 관계에 따라서 동작주파수 변화에 의해 변화하는 TX 코일의 전압, 전류 위상이 0이 되는 주파수의 개수가 달라지는 것을 분석하였다. 더 나아가, 페이지도를 통해서, 각 케이스에 대해 어떻게 RX 공진주파수를 찾을 수 있는지 분석하였다. 제안된 방법은 시뮬레이션과 실험을 통해 증명되었으며, 특히 실험에서 약 0.4 %의 차이로 RX 측 공진주파수를 추출할 수 있다는 것이 증명되었다.

## References

[1] Y. Shin, K. Hwang, J. Park, D. Kim, and S. Ahn, "Precise vehicle location detection method using a wireless power transfer (WPT) system," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1167-1177, Feb. 2019.

[2] C. Park, J. Park, Y. Shin, J. Kim, S. Huh, and D. Kim,

et al., "Separated circular capacitive coupler for reducing cross-coupling capacitance in drone wireless power transfer system," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 9, pp. 3978-3985, Sep. 2020.

[3] Y. Shin, S. Ahn, "Principle of power transfer between coils and the method of selecting resonant topologies in a wireless power transfer system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 7, pp. 509-524, Jul. 2022.

[4] S. Huh, D. Ahn, "Two-transmitter wireless power transfer with optimal activation and current selection of transmitters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 6, pp. 4957-4967, Jun. 2018.

[5] Y. Shin, J. Park, H. Kim, S. Woo, B. Park, and S. Huh, et al., "Design considerations for adding series inductors to reduce electromagnetic field interference in an over-coupled WPT system," *Energies*, vol. 14, no. 10, p. 2791, May 2021.

[6] Y. Shin, S. Woo, J. Rhee, C. Lee, H. Kim, and S. Huh, et al., "Accurate method for extracting the coupling coefficient of an LCC-series wireless power transfer system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 9, pp. 11406-11422, Sep. 2022.

[7] J. P. W. Chow, H. S. H. Chung, and C. S. Cheng, "Use of transmitter-side electrical information to estimate mutual inductance and regulate receiver-side power in wireless inductive link," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 9, pp. 6079-6091, Sep. 2016.

[8] S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen, and C. C. Mi, "A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 6, pp. 2261-2273, Jun. 2015.

[9] S. Park, S. Ahn, "Novel resonance-based wireless power transfer using mixed coupling," *Sensors*, vol. 20, no. 24, p. 7277, Dec. 2020.

[10] X. Dai, X. Li, Y. Li, and A. P. Hu, "Maximum



efficiency tracking for wireless power transfer systems with dynamic coupling coefficient estimation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 6, pp. 5005-5015, Jun. 2018.

[11] K. Matsuura, D. Kobuchi, Y. Narusue, and H. Morikawa,

"Communication-less receiver-side resonant frequency tuning method for magnetically coupled wireless power transfer systems," in *2021 IEEE Radio and Wireless Symposium(RWS)*, San Diego, CA, Jan. 2021, pp. 108-111.

신 유 준 [한국과학기술원 조천식모빌리티대학원  
녹색시스템연구센터/연구교수]

<https://orcid.org/0000-0002-1678-137X>



2016년 8월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)  
2018년 8월: 한국과학기술원 조천식녹색  
교통대학원 (공학석사)  
2022년 8월: 한국과학기술원 조천식모빌  
리티대학원 (공학박사)  
2022년 9월~현재: 한국과학기술원 조천  
식모빌리티대학원 녹색시스템연구센터 연구교수

[주 관심분야] WPT, EMF, EMI 등

안 승 영 [한국과학기술원 조천식모빌리티대학원/  
교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0771-7050>



1998년 2월: 한국과학기술원 전자공학과  
(공학사)  
2000년 2월: 한국과학기술원 전자공학과  
(공학석사)  
2005년 2월: 한국과학기술원 전자공학과  
(공학박사)  
2012년~현재: 한국과학기술원 조천식모  
빌리티대학원 교수

[주 관심분야] WPT, SI, PI, EMI/EMC/EMF, 전기자동차 등