

모바일 환경의 효율 향상을 위한 리피터 기반 3-코일 무선 전력 전송 시스템

Three-Coil Wireless Power Transfer System with a Repeater Coil for Efficient Mobile Applications

송 민 기 · 양 영 구*

Mingi Song · Youngoo Yang*

요 약

본 논문에서는 모바일 환경에서 시스템 효율을 극대화하기 위해 리피터(repeater)를 활용한 3-코일 무선 전력 전송 시스템(WPT)을 제안한다. 제안된 시스템은 무선 전력 전송 국제 표준인 Qi2 표준 규격과 모바일 단말에 주로 채택되는 switched capacitor converter의 동작 조건을 반영하여 설계 및 검증되었다. 제안된 시스템의 주요 특징은 1) 수신단 코일의 권선 수를 줄여 저항을 최소화함으로써, 고전류가 흐르는 낮은 부하 저항 조건에서 수신단 코일 도체 손실을 줄이며, 2) 리피터 코일을 통해 고부하 저항 조건에서 발생할 수 있는 전송 효율 감소분을 보상한다. 결과적으로, 수신단 저항은 줄이며 리피터가 전체 시스템의 품질 계수(Q-factor)를 보상해주기에, 저부하 저항 조건의 고출력 모바일 무선 전력 전송에서 발생하는 수신단 발열 문제를 해결하기 위한 효과적인 대안이 될 수 있다. 실험 결과 기존 2-코일의 Qi2 표준 기반의 시스템 대비 저부하 저항 5 Ω(고전력)에서 효율이 13 % 향상되었으며, 40 Ω(저전력)에서는 효율 감소분이 약 11 % 수준으로 억제됨을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a three-coil wireless power transfer (WPT) system that utilizes a repeater to enhance efficiency in mobile environments. The proposed system was designed and experimentally validated by considering the Qi2 standard and operating constraints of switched-capacitor chargers commonly used in mobile devices. The key features of the proposed system are as follows: 1) minimizing the equivalent receiver series resistance by reducing the number of turns in the receiver coil to improve efficiency under high-current conditions, and 2) employing a repeater coil to compensate for efficiency degradation under high-load resistance conditions. Thus, the repeater enhances the overall quality factor of the system while maintaining low receiver resistance. This approach provides a solution to address receiver efficiency challenges in low-load resistance and high-power mobile WPT systems. Experimental results demonstrate that compared with the conventional two-coil Qi2 system, the proposed design achieves a 13 % efficiency improvement at a 5 Ω heavy-load condition, and mitigates the efficiency drop by 11 % at a 40 Ω light-load condition.

Key words: Inductive Power Transfer, Wireless Power Transfer (Wpt), Repeater System, Relay System, Impedance Matching

「이 연구는 삼성전자의 지원을 받아 수행된 연구임.」

성균관대학교 DMC공학과(Department of Digital Media Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

*성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received April 24, 2026 ; Revised May 6, 2026 ; Accepted May 29, 2026. (ID No. 20260424-040)

· Corresponding Author: Youngoo Yang (e-mail: yang09@skku.edu)

I. 서 론

모바일 환경에서의 무선 전력 전송(WPT, wireless power transfer) 시스템^[1]은 국제 표준인 Qi 표준 규격^[2]의 도입과 함께 급격히 상용화되었으며, 생태계의 확장에 따라 스마트폰을 넘어 스마트 워치 등 다양한 기기로 적용 범위가 확대되고 있다. 특히 모바일 기기의 고성능화로 인한 배터리 용량 증가에 따라, 고출력 무선 충전 시스템에 대한 수요가 높아지고 있다. 최근 공개된 Qi2 표준은 높은 결합 계수를 유지하기 위해 송/수신 코일 간 자석 결합을 통해 정렬을 유지하고, 출력 전력을 25 W로 상향하였으며, 배터리 충전 효율 극대화를 위해 switched capacitor converter를 charger로 사용하는 수신단 시스템을 레퍼런스 모델로 포함하였다. 그러나 유선 충전 수준인 50 W급 전력 전송을 구현하기 위해서는 추가적인 효율 성능 향상이 필요하다.

무선 전력 전송 시스템의 효율 개선을 위해 그동안 최적 부하 설정 등을 활용한 연구들이^{[3]-[5]} 활발히 진행되어 왔다. 송/수신 효율은 부하 조건에 따라 크게 변동하므로, 이를 실시간으로 매칭할 수 있다면 시스템 전체 효율을 최적화할 수 있다. 하지만 그림 1과 같이 4:1의 입출력 비의 Switched capacitor converter를 사용하는 경우, 배터리 전압에 따른 입력 전압에 따라 입력 전류가 결정되므로 부하 조건이 충전 전력 및 배터리 전압에 의해 고정되는

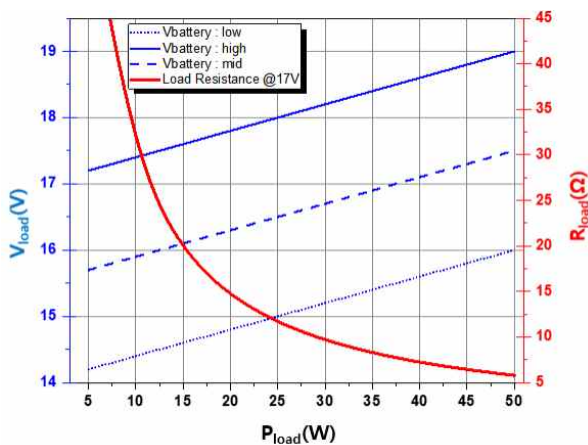


그림 1. 4:1 switched capacitor converter의 부하 특성
Fig. 1. Load resistance property of 4:1 switched capacitor charger.

한계를 갖는다. 예를 들어, 4:1 구조에서 50 W 충전 시 부하 저항은 약 5 Ω으로, 7 W 충전 시에는 약 40 Ω으로 고정된다. Buck converter를 활용하면 수신 전력에 상관없이 부하 저항을 비교적 자유롭게 설정할 수 있다는 장점이 있으나, converter 자체의 손실을 포함한 전체 시스템 관점에서는 비용 및 효율 면에서 한계가 명확하다.

또 다른 효율 향상 방법인 리피터(repeater 또는 relay) 시스템은 주로 20 cm 이상의 원거리 전송 환경을 중심으로 연구되어 왔다^{[6]-[8]}. 원거리 환경에서는 송/수신 코일 간 결합 계수가 매우 낮기 때문에, 중간에 위치한 리피터 코일을 통해 자기 결합을 증대시켜 효율을 개선한다. 반면, 이격 거리가 5 cm 이내인 근접 전송 환경에서는 리피터보다는 송/수신 코일의 품질 계수(quality factor)를 높여 직접 경로의 효율을 개선하는 것이 일반적이다. 그러나 기구적 제약이 엄격한 모바일 환경에서 코일의 크기를 유지하며 품질 계수를 획기적으로 개선하는 데에는 물리적인 한계가 존재한다.

본 연구에서는 모바일 시스템의 고정된 부하 조건에서 전송 효율을 극대화하기 위해, 수신 코일의 권선 수를 줄여 도체 저항 최소화한 구조를 제안한다. 또한, 권선 수 감소로 인해 낮아진 수신단 인덕턴스와 이로 인한 전송 효율 저하는 리피터 경로를 도입하여 보상하도록 설계하였다. 대다수의 모바일 기기 사용자는 외부 보호 케이스를 상시 장착한다는 점에 착안하여, 해당 기구적 공간을 리피터 코일의 실장 위치로 활용함으로써 실제 적용 가능한 구조로 검토되었다. 리피터 시스템을 통한 효율 개선을 위해 다음과 같은 설계 원칙을 적용하였다. 1) 리피터를 통해 유도되는 전압이 송신 코일에 의한 유도 전압과 보강 간섭^[9]을 일으키도록 설계하여 수신 전력을 극대화하고, 2) 직접 전송 경로와 리피터 경유 경로 간의 에너지를 적절히 분배하여 원하는 부하 조건에서 리피터 경로가 오히려 전력 전송을 방해하는 경우가 발생하지 않도록 하였다.

제안된 시스템의 검증을 위해 Qi2 표준 기반의 송/수신 코일을 바탕으로 권선 수를 조절한 low inductance 수신 코일을 제작하였다. 리피터 시스템은 그림 2와 같이 송/수신 코일 사이에 위치하며, 외부 보호 케이스에 실장 가능한 크기로 litz 와이어 코일과 공진 커패시터를 직렬 연결하여 구성하였다. 최종적으로 Qi 표준과 동일한 fullbridge 인버

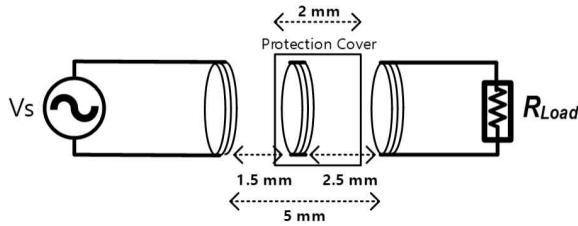


그림 2. 리피터가 포함된 WPT 시스템 구조
Fig. 2. Mobile WPT system containing repeater.

터 및 Schottky diode 기반의 full-bridge 정류기를 구축하여 제안하는 시스템의 성능 및 효율 개선 효과를 검증하였다.

II. WPT 회로 및 분석

2-1 2-코일 WPT 등가 회로

그림 3(a)는 전통적인 2-코일 무선 전력 전송 등가 회로를 나타낸다. 각 코일은 커패시터와 직렬 연결되어 공진 탱크(resonance tank)를 형성한다. 커패시터를 사용하는 이유는 결합 상태에서의 누설 인덕턴스를 보상하기 위함이다.

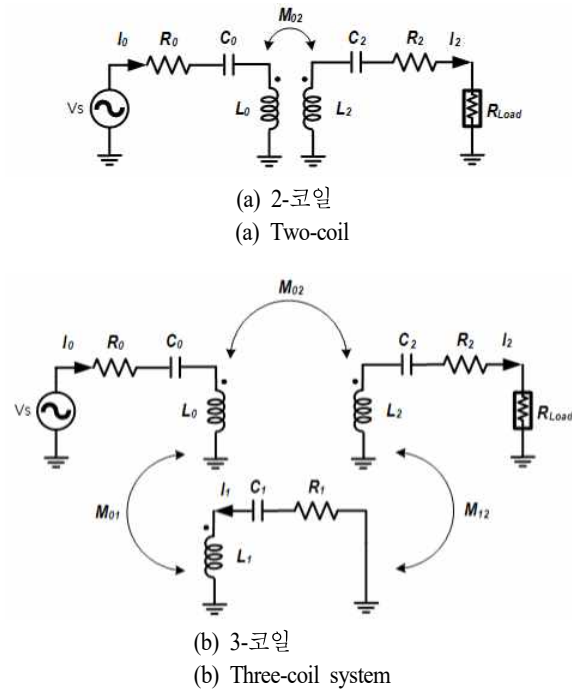


그림 3. 무선 전력 전송 등가 회로
Fig. 3. Equivalent circuits of WPT.

다. 본 논문에서는 이후 리피터(1차측) 도입을 고려하여, 편의를 위해 송신단을 0차측, 수신단을 2차측으로 정의한다. 각 회로에 키르히 호프 전압 법칙(KVL)을 적용하면 다음과 같이 전개 가능하다.

$$V_s = Z_0 I_0 - j\omega M_{02} I_2 \quad (1)$$

$$0 = (Z_2 + R_L) I_2 - j\omega M_{02} I_0 \quad (2)$$

V_s 는 전압 소스를 의미하며, I_i 는 각 공진기에 흐르는 전류를 의미한다. 각 공진기의 임피던스 $Z_i = R_i + jX_i$ 는 코일의 등가 직렬 저항과 커패시터의 직렬 저항 및 송신부 기생 저항의 합인 R_i 와 인덕턴스 L_i 와 캐패시턴스 C_i 의 리액턴스인 $jX_i = \omega L_i - 1/(\omega C_i)$ 의 합이다. 여기서 ω 는 각 주파수를 의미하며, M_{02} 는 코일 0과 2의 상호 인덕턴스를 나타낸다. R_L 은 부하 저항이고, 모바일 환경에서는 충전 전력에 따라 일정 범위 내로 고정된다. 여기서 식 (1)과 (2)를 연립하여 송신단에서 바라본 입력 임피던스 형태로 정리하면, 수신단의 회로 소자가 송신단에 투영된 반사 임피던스를 식 (3)과 같이 도출할 수 있다. 또한, 송신단 전류와 수신단 전류의 비는 식 (4)와 같다.

$$Z_{ref} = \frac{(j\omega M_{02})^2}{Z_2 + R_L} \quad (3)$$

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{j\omega M_{02}}{Z_2 + R_L} \quad (4)$$

전체 시스템 효율을 분석하기 위해, 동작 주파수에서 공진 조건을 만족한다고 가정하면 $X_i = 0$ 조건에서 수신단의 반사 임피던스는 $R_{ref} = \frac{(j\omega M)^2}{R_2 + R_L}$ 으로 표현되며, 효율은 송신 효율과 수신 효율의 곱으로 식 (5)와 같이 전개된다.

$$\eta_{2-coil} = \eta_0 \eta_2 = \left(\frac{R_{ref}}{R_0 + R_{ref}} \right) \left(\frac{R_L}{R_2 + R_L} \right) \quad (5)$$

$$R_{L,opt} = R_{Rx} \sqrt{1 + \frac{(j\omega M)^2}{R_{Tx} R_{Rx}}} \quad (6)$$

식 (5)를 통해 부하 저항의 변화에 따라 송신 및 수신

효율이 상충 관계를 가짐을 알 수 있다. 따라서 전체 시스템 효율을 최대화하기 위해서는 적절한 부하 매칭이 필수적이다. 식 (5)를 R_L 에 대하여 미분하여 최댓값을 갖는 조건을 산출하면, 식 (6)과 같은 최적 부하 저항 조건을 얻을 수 있다.

2-2 3-코일 WPT 등가 회로

그림 3(b)는 리피터가 포함된 3-코일 무선 전력 전송 시스템의 등가 회로를 나타낸다. 본 모델에서는 송신단을 0차측, 리피터단을 1차측, 수신단을 2차측으로 정의한다. 리피터 단의 코일 역시 캐패시터와 직렬 연결되어 공진 탱크를 구성한다. R_1 은 리피터 코일 및 캐패시터의 직렬 등가 저항의 합을 의미한다. M_{01} 은 송신측과 리피터측 코일의 상호 인덕턴스를 의미하며, M_{12} 는 리피터측과 수신측 코일의 상호 인덕턴스를 의미한다. 마찬가지로 각 회로에 키르히호프 전압 법칙(KVL)을 적용하면 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$V_s = Z_0 I_0 + j\omega M_{01} I_1 - j\omega M_{02} I_2 \quad (7)$$

$$0 = j\omega M_{01} I_0 + Z_1 I_1 - j\omega M_{12} I_2 \quad (8)$$

$$0 = (Z_2 + R_L) I_2 - j\omega M_{02} I_0 - j\omega M_{12} I_1 \quad (9)$$

상기 식들을 연립하여 전개하면, 입력 전류와 출력 전류 사이의 상관관계인 전류 이득을 식 (10)과 같이 도출할 수 있다.

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{j\omega M_{02} + \frac{w^2 M_{01} M_{12}}{Z_1}}{(Z_2 + R_L) + \frac{(w M_{12})^2}{Z_1}} \quad (10)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{\frac{j\omega M_{02}}{Z_2} + \frac{w^2 M_{01} M_{12}}{Z_1 Z_2}}{\frac{w^2 M_{02} M_{12}}{Z_2 Z_1} + \frac{j\omega M_{01}}{Z_1}} \quad (11)$$

식 (10)의 분자를 살펴보면, 기존 송/수신 코일 간의 직

접 경로의 상호 인덕턴스 M_{02} 와 리피터를 경유하는 경로의 상호 인덕턴스 $M_{01} M_{12}$ 를 통해 유도되는 전압이 결합되어 있음을 알 수 있다. 기존 연구에서는 주로 송/수신 코일 간 결합이 매우 약한 원거리 ($M_{02} \ll M_{01}$ or M_{12}) 환경을 가정하였다. 따라서, 전류 이득을 최대화하기 위해 리피터의 임피던스를 0에 가깝게 설정($Z_1 \approx 0$)함으로써 식 (12)와 같이 부하와 무관한 일정한 전류 이득을 얻는 방식을 취해 왔다.^[10]

$$\frac{I_2}{I_0} \approx \frac{M_{01}}{M_{12}}, (\text{if } Z_1 \approx 0) \quad (12)$$

다음으로 식 (10)의 분모를 살펴보면, 1차측의 반사 임피던스 $\frac{(w M_{12})^2}{Z_1}$ 가 2차측 임피던스에 포함되는 것을 알 수 있다. 리피터 코일은 단순히 에너지 전송 경로만을 제공하는 것이 아니라 임피던스 변화기의 역할을 한다는 것을 의미한다. 다시 말해, 송/수신 코일 간 직접 경로를 무시하지 못하는 환경에서는 1차측의 반사 임피던스로 인해 전류 이득이 오히려 2-코일 시스템보다 낮아질 수 있다. 따라서 모바일 근접 환경에서는 고정된 부하 조건에 맞는 리피터 리액턴스 최적화가 필수적이다. 전류 이득을 향상시키기 위한 원칙은 다음과 같다.

용량성 리액턴스 튜닝: 유도 전압을 극대화하기 위해 리피터의 리액턴스는 용량성($X_1 < 0$)이 되도록 캐패시턴스를 설정해야 한다. 이를 통해 송신 코일과 리피터 코일의 전류 위상을 정합시킴으로써 유도 전압 간의 보강 간섭을 유도한다.

반사 임피던스의 크기 최적화: 리피터 경로를 통한 전압 유도는 유지하면서, 반사 임피던스를 줄이기 위해서는 송신측과의 상호 인덕턴스가 수신측과의 상호 인덕턴스보다 크도록 설계($M_{01} > M_{12}$)해야 한다. 또한, 리피터의 리액턴스 크기를 일정 수준 이상으로 설계하여 수신단으로 반사되는 임피던스의 크기를 적절히 제한해야 한다. 이는 리피터가 직접 경로의 전력 전송을 저해하지 않으면서 보조적인 에너지 전달 경로를 형성하도록 하기 위함이다. 특히 직접 결합(M_{02})이 강하고 부하 저항이 낮은 조건에서는 2차측에 투영되는 1차측 반사 임피던스의 영향력이 지배적이게 되므로 이를 고려한 정밀한 캐패시턴스 튜닝

이 필요하다.

3-코일 시스템에서는 리피터 자체의 열 손실이 발생하므로, 기존의 송/수신 효율 분리 방식으로는 전체 성능을 평가하기 어렵다. 따라서 모든 공진기가 동작 주파수에서 공진 조건을 만족한다고 가정하면($X_0 = X_1 = X_2 = 0$), 식 (13)와 같이 출력 전력 대비 각 단의 손실을 포함한 전체 입력 전력의 비로 시스템 효율을 정의할 수 있다.

$$\eta_{3-coil} = \frac{R_L}{R_0 \left| \frac{I_0}{I_2} \right|^2 + R_1 \left| \frac{I_1}{I_2} \right|^2 + R_2 + R_L} \quad (13)$$

3-코일 시스템이 2-코일 시스템 대비 우수한 효율을 확보하기 위해서는, 리피터 도입으로 인한 전류 이득의 상승 효과가 리피터 코일 자체의 저항 손실보다 커야 한다. 즉, 손실의 관점으로 해석했을 때, 식 (14)와 같은 관계를 만족해야 한다.

$$R_0 \left| \frac{I_{0,two}}{I_{2,two}} \right|^2 > R_0 \left| \frac{I_{0,three}}{I_{2,three}} \right|^2 + R_1 \left| \frac{I_1}{I_{2,three}} \right|^2 \quad (14)$$

정리하자면, 기구적 한계로 인해 각 코일의 품질 계수 및 코일 간 상호 인덕턴스의 설계 자유도에 한계가 있는 모바일 환경에서의 리피터 시스템 설계의 핵심은 입/출력 전류 이득 비를 최대화하는 동시에, 리피터의 전류 세기와 내부 저항 성분을 적절히 제어하여 전력 손실을 최소화하는 최적의 임피던스 지점을 찾는 것이다.

Ⅲ. 회로 설계 및 기본파 분석

3-1 Low Inductance 수신 코일

그림 4는 시뮬레이션에 사용한 코일 구조를 나타낸다. 그림 4(a)의 Qi2 송신기 코일의 경우, 80 μm 의 구리선을 65 가닥으로 구성한 1 mm 두께의 Type-1 litz wire로 약 12 turn의 권선 수로 설계되었다. 외경은 약 20 mm에 내경은 10 mm로 설계되었다. 해당 코일 아래에는 1 mm 두께의 페라이트로 차폐제를 배치하였다. 그림 4(b)의 Qi2 수신기 코일의 경우, 1가닥으로 구성된 131 μm 두께의 구리선으로 13 turn의 권선 수로 설계되었다. 외경은

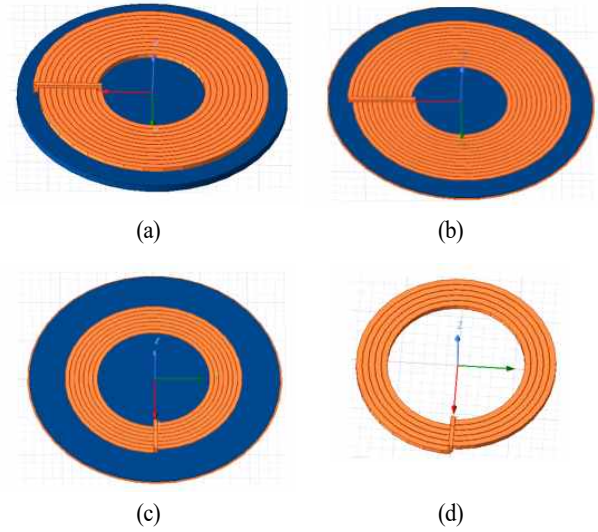


그림 4. Qi2 송신 코일(a), Qi2 수신 코일(b), low inductance 수신 코일(c), 리피터 코일(d)

Fig. 4. Qi2 transmitter coil (a), Qi2 receiver coil (b), low inductance receiver coil (c), repeater coil (d).

약 22 mm에 내경은 약 9 mm로 설계되었다. 마찬가지로 코일 아래에는 0.2 mm 두께의 페라이트로 차폐제를 배치하였다. 이격 거리는 5 mm로 코일이 실장되는 기구물의 두께 및 외부 보호 케이스를 고려하여 설계되었다.

그림 5는 360 kHz 기본파 동작 조건에서 부하 저항 변화에 따른 송/수신 효율 및 전체 전송 효율의 시뮬레이션 결

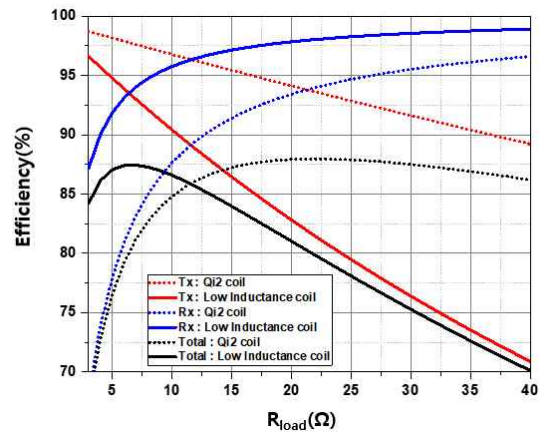


그림 5. Qi2 코일 및 low inductance 코일의 부하 저항에 따른 효율 변화

Fig. 5. Efficiency versus load resistance with Qi2 coil and low inductance coil.

과를 나타낸다. 본 시뮬레이션은 전송 효율의 상관 관계를 보기 위해 공진기 외의 다른 회로의 손실은 포함하지 않았다. 기존 Qi2 송/수신 코일을 활용한 무선 전력 전송의 경우, 20 Ω 부근에서 약 88 %의 최대 효율을 달성하였다. 이는 4:1 switched capacitor converter를 적용할 경우, 일반적인 스마트폰 고속 충전 범위인 약 15 W 전력 구간에 최적화된 설계이다. 그러나 고출력 50 W 구간인 5 Ω 조건에서는 효율이 78 %까지 크게 저하됨을 확인하였다.

고출력 환경에서의 효율 개선을 위해 식 (6)의 최적 부하 조건을 5 Ω 부근으로 이동시키고자, 그림 4(c)와 같이 기존 Qi2 수신 코일에서 권선 수를 7 turn으로 줄인, low inductance 수신 코일을 설계하였다. 외경은 19 mm에 내경은 13 mm로 설계하였다. 해당 수신 코일을 적용한 결과, 부하 저항 5 Ω에서 약 87 %의 효율을 기록하여 기존 Qi2 표준 시스템 대비 9 %의 유의미한 효율 향상을 달성하였다.

기존 Qi2 시스템에서의 최적 효율 부하 조건인 20 Ω 부하 저항에서 50 W 전력을 수신하려면 약 30 V 이상의 높은 수신 전압이 요구된다. 이 전압을 buck converter만을 사용하여 배터리 전압(약 3.5~4.5 V)으로 강압하는 것은 도통 손실 및 소자 내압 문제로 인해 비효율적이다. 반면, low inductance 코일 설계를 통해 최적 부하 저항을 5 Ω 부근으로 낮추면, 50 W 전력 수신 기준 수신 전압을 17 V로 크게 줄일 수 있다. 이는 4:1 switched capacitor converter를 활용하여 전력 변환 효율을 극대화할 수 있는 최적의 전압이다.

그러나 low inductance 코일은 높은 부하 저항 조건에서 명확한 한계를 보인다. 20 Ω 구간에서는 효율이 81 %로 하락하며, 30 Ω 을 초과할 경우 75 % 이하로 효율이 급격히 저하된다. 이는 2-코일 회로 모델 분석에서 도출된 바와 같이, 권선 수 감소에 따른 상호 인덕턴스의 축소가 유도 기전력 감소로 이어져 전력 전송 능력이 약화되었기 때문이다.

결론적으로, 고출력 구간을 위해 설계된 low inductance 코일이 전 부하 영역에서 높은 효율을 유지하기 위해서는, 낮아진 상호 인덕턴스를 보상할 수 있는 추가적인 기법이 필수적이다. 본 연구에서 제안하는 리피터 시스템은 이러한 상호 인덕턴스 저하를 자기적으로 보상함으로써, 특히 낮은 부하 저항에서 효율을 증대시키는 핵심적인 역할을 수행한다.

3-2 Repeater 시스템

리피터 시스템은 LC 직렬 공진 회로로 구성된다. 리피터 코일의 경우, 송신기 코일과 동일한 litz wire를 사용하였으며, 기구적 한계와 코일 직렬 저항을 고려하여, 5 turn의 권선 수로 외경 18 mm, 내경 10 mm로 차폐제 없이 구성하였다. 송신 코일과의 상호 인덕턴스를 수신 코일과의 상호 인덕턴스 대비 추가적으로 크게 설계하기 위해 기구적 제약을 고려하여, 송신 코일에서 1.5 mm 떨어진 위치로 리피터 코일을 고정하였다.

앞서 분석한 low inductance 수신 코일의 경우 효율 저하 문제를 해결하기 위해서는 송·수신 공진기 간의 전류 이득을 증가시켜야 한다. 즉, 사용하고자 하는 부하 저항의 조건에서 리피터가 포함된 시스템의 전류 이득인 식 (10)이 기존 2-코일 시스템의 식 (4)보다 커지도록 설계해야 하며, 이는 식 (15)와 같은 설계 조건을 요구한다.

$$\left| \frac{j\omega M_{02} + \frac{w^2 M_{01} M_{12}}{Z_1}}{(Z_2 + R_L) + \frac{(w M_{12})^2}{Z_1}} \right| > \left| \frac{j\omega M_{02}}{Z_2 + R_L} \right| \quad (15)$$

전류 이득을 극대화하기 위해서는 3-코일 WPT 등가 회로에서 확인한 바와 같이 리피터 시스템의 직렬 캐패시터의 캐패시턴스 조절을 통해 리액턴스 튜닝이 필요하다. 그림 6은 리피터의 리액턴스 조건에 따른 부하 저항 별 전류 이득의 변화를 나타낸다. 동작 주파수에서 공진을 형성할 경우 리피터에 가장 높은 전류가 흐르며 전력 전송 경로에 적극적으로 개입한다. 이는 부하 저항이 높은 조건에서 전류 이득을 높게 유지하는 데 유리하지만, 부하 저항이 낮은 조건에서는 리피터의 과도한 전류가 수신 코일에 반사 임피던스로 작용하여 오히려 2-코일 시스템보다 이득이 낮아지는 현상이 발생한다. 동작 주파수 대비 낮은 공진 주파수를 가지도록 캐패시턴스를 설정하여, 유도성 리액턴스를 뺄 경우, 리피터를 통한 유도 전압이 기존 경로의 전압과 위상이 상쇄되어 전체적인 전류 이득이 하락한다. 마지막으로 용량성 리액턴스를 뺄 경우, 송·수신 코일 간의 직접 경로와 리피터 경로의 에너지가 보강 간섭을 일으켜 모든 부하 조건에서 전류 이득이 상승한다^[11].

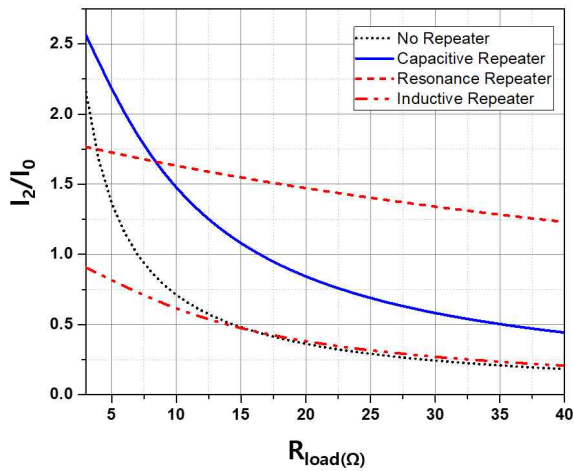


그림 6. 리피터 리액턴스 조건에 따른 부하별 I_2/I_0 전류 이득 변화

Fig. 6. I_2/I_0 current gain versus load resistance with conditions of repeater reactance.

추가적으로, 모바일 환경의 기구적 제약으로 인해 리피터 코일의 두께를 충분히 확보하기 어려우므로, 리피터 코일 저항에 의한 열 손실을 반드시 고려해야 한다. 전류 이득이 높더라도 리피터 코일 저항에 의한 열 손실이 과도하면 시스템 전체 성능은 오히려 열화된다. 그림 7은 리피터의 시스템 품질 계수 값에 따른 리피터 코일 전류 크기와 시스템 효율의 관계를 보여준다. 낮은 시스템 품질 계수 조건에서는 리피터 코일의 전류 크기가 낮아 전력 전송에 대한 기여가 줄어들어 효율 상승 폭이 제한적이다. 높은 품질 계수 조건에서는 리피터 코일의 전류 크기가 높아지며 전력 전송에 대한 기여가 증가하고, 높은 부하 저항 구간에서의 효율이 증가한다. 하지만 낮은 부하 저항 구간에서는 불필요한 리피터 코일 전류로 인한 열 손실로 2-코일 시스템보다 효율이 낮아지게 된다. 최적 시스템 품질 계수 조건에서는 설계 목표 부하 전 영역에서 적절한 효율 향상을 달성할 수 있음을 확인하였다.

결과적으로, 고품질 계수 리피터 코일을 기반으로, 직렬 공진 커패시터의 튜닝을 통해 리피터 시스템의 리액턴스를 용량성으로 설정하고, 그 크기를 최적화하는 것이 가장 이상적인 설계 방법이다. 일반적인 모바일 환경에서는 정렬 상태에 따라 코일 간 상호 인덕턴스가 크게 바뀌

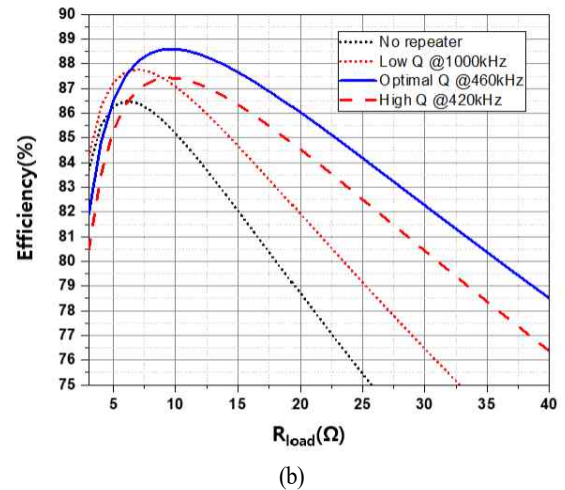
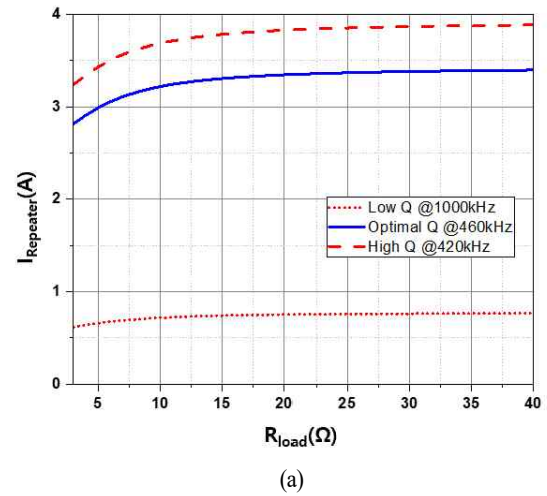


그림 7. (a) 리피터 품질 계수 값에 따른 부하별 리피터 전류 (b) 리피터 품질 계수 값에 따른 부하별 시스템 효율

Fig. 7. (a) Magnitude of repeater current versus load resistance with conditions of repeater Q-factor (b) Total system efficiency versus load resistance with conditions of repeater Q-factor.

어 이와 같은 설계가 힘들지만, Q_{i2} 표준은 자석 결합을 통해 정렬 상태가 고정되므로, 외부 보호 케이스에 실장되는 리피터 시스템을 통해 Z축 높이 또한 일정하게 유지될 수 있다면, 가능한 설계 조건이라고 볼 수 있다.

그림 8(a)는 최종적으로 설계된 시스템별 부하 저항 변화에 따른 시스템 효율을 나타낸다. 시뮬레이션에 최종적

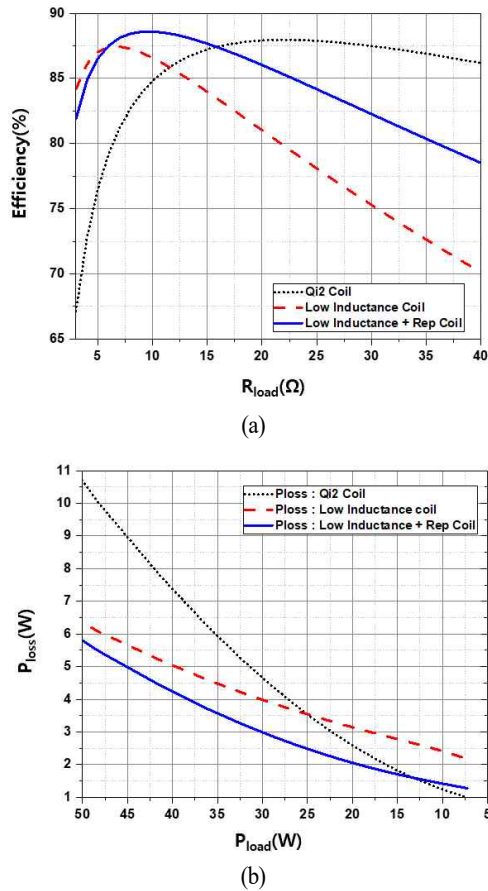


그림 8. (a) 부하 저항에 따른 시스템 효율 비교 (b) 부하 저항의 전력 환산에 따른 시스템 손실 비교

Fig. 8. (a) System efficiency versus load resistance, (b) System loss versus load power.

표 1. 코일 성능, 결합 계수 및 공진 주파수 파라미터

Table 1. Parameters of coils, coupling and resonance frequency.

Parameter	Qi2 Tx	Qi2 Rx	Low inductance Rx	Repeater
<i>Mated L</i>	8.7 μ H	10.48 μ H	3.59 μ H	2.32 μ H
<i>Mated R</i>	0.52 Ω	1.14 Ω	0.354 Ω	0.167 Ω
<i>Series C</i>	40 nF	19 nF	55 nF	51 nF
<i>F_{resonance}</i>	270 kHz	358 kHz	358 kHz	460 kHz
<i>F_{operating}</i>	360 kHz			
<i>M₀₂ (Default Qi2)</i>	5.57 μ H			
<i>M₀₂</i>	2.88 μ H			
<i>M₀₁</i>	3.3 μ H			
<i>M₁₂</i>	1.8 μ H			

으로 사용된 코일 특성 및 결합 특성은 표 1을 통해 확인할 수 있다. 전송 효율 관점에서는 15 Ω 의 저전력 구간부터 Qi2 코일 대비 효율이 열화되는 경향을 보이지만, 이를 실제 충전 시나리오상의 전력 레벨로 환산하면 본 설계의 진가가 드러난다. 그림 8(b)는 앞서 설명한 그림 1과 같이 부하 저항을 4:1 switched capacitor converter의 입력 전력 기준으로 환산한 수신 전력에 따른 손실 전력 비교 그래프이다. 스마트폰과 같은 소형 기기는 전력 손실에 의한 발열 제어에 의해 전체 시스템의 지속 성능이 결정된다. 모바일 기기의 실질적인 고속 충전 구간인 15 W 이상의 고출력 조건에서는 리피터 시스템을 적용한 모델의 전체 손실이 기존 Qi2 방식보다 낮게 유지되기에 고출력 무선 충전 환경에 최적화된 설계임을 입증할 수 있다.

IV. 회로 성능 검증

제안된 시스템의 성능을 검증하기 위해 그림 9(a)와 같이 실험 세트를 구성하였다. 송신부는 full-bridge inverter와 MCU를 포함하는 송신 모듈로 구성하였으며, 수신부는 Schottky diode 기반의 full-bridge rectifier와 가변 전자 부하(E-loader)를 연결하였다. 그림 9(b)와 같이 리피터 시스템의 경우 코일과 외부 PCB를 통해 직렬 캐패시터가 연결된 형태로 제작되었다. 송신기 코일과 수신기 코일의 이격거리는 5 mm이며, 리피터 코일의 경우 송신 코일로 부터 1.5 mm 이격된 거리에 배치되었다. 코일 유닛의 배

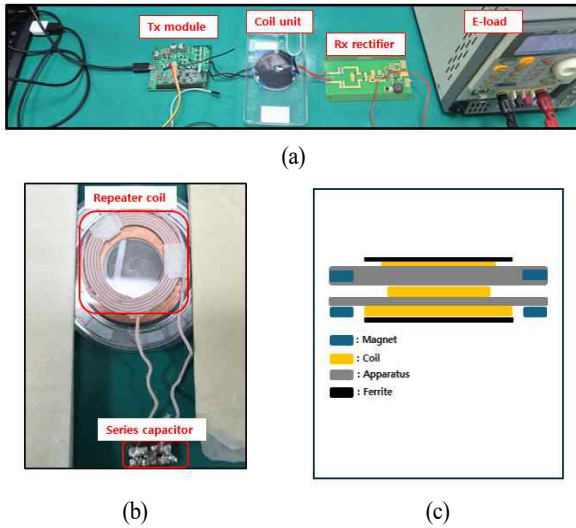


그림 9. 실험 측정 셋업(a), 리피터 시스템 구조(b) 및 코일 유닛 배치 형상(c)

Fig. 9. Measurement setup (a), repeater system (b) and coil unit arrangement (c).

치의 경우, 그림 9(c)와 같이 Qi2 규격에 따라 자석을 활용하여 X-Y축 정렬은 가운데로 고정되었다. LCR미터(HIOKI IM3536)를 통해 측정한 코일 성능 및 결합 계수, 각 공진기의 공진 주파수는 표 1과 같이 측정되었다. 인버터의 ZVS(zero voltage switching) 동작을 확보하기 위해 송신단 공진 주파수는 동작 주파수 대비 의도적으로 유도성으로 설정하였다. 소자 내압의 한계로 인해 수신 전압은 9 V로 고정된 상태에서 인버터 입력 전압을 조절하며 부하 저항에 따른 효율을 측정하였다. 따라서, 부하 저항 5 Ω의 경우 약 16 W의 수신 전력으로 측정하였으며, 부하 저항 40 Ω의 경우, 약 2 W의 수신 전력으로 효율을 계산하였다. 송신 모듈의 Inverter 입력 전압과 전류를 MCU ADC 값으로 계산하였으며, 수신 전력의 경우, 전자 부하에 측정되는 전압, 전류 값으로 계산하였다.

외부 회로 구성을 포함하여 시간 영역 시뮬레이션을 추가로 진행하였으며, 마찬가지로 인버터 입력 전력과 부하 저항 수신 전력을 기준으로 효율을 계산하였다. 그림 10과 같이 시간 영역 시뮬레이션과 벤치 결과 모두 리피터 시스템을 통한 성능 개선이 입증되었다. 벤치 결과 기준, 부하 저항 5 Ω에서는 기존 Qi2 시스템 효율은 56 %에 머

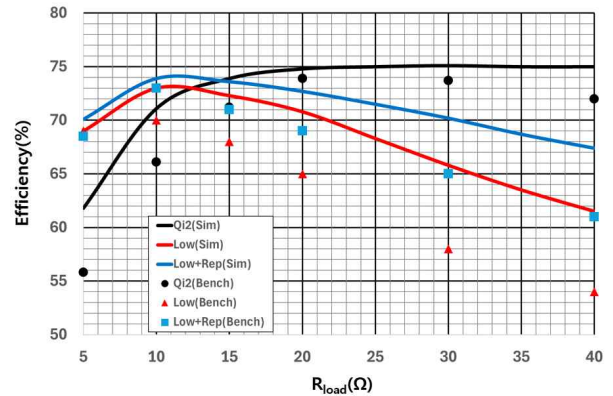


그림 10. 부하 저항에 따른 시스템별 효율(time-domain simulation & bench test)

Fig. 10. Total system efficiency versus load resistance depending on different system (time-domain simulation & bench test).

문 반면, low inductance 코일 시스템은 69 %로 약 13 %의 효율 개선을 보였다. 리피터 시스템 또한 동일 수준인 69 %를 기록하였으며, 부하 저항 10 Ω 구간에서는 73 %의 최대 효율을 달성하여 low inductance 단독 시스템(70 %) 대비 성능이 더욱 우수함을 확인하였다. 부하 저항 40 Ω에서 low inductance 코일 시스템은 상호 인덕턴스 감소로 인해 효율이 54 %까지 급격히 하락(Qi2 대비 -18 %)했으나, 리피터 시스템을 적용한 경우 61 %의 효율을 보여 성능 저하를 효과적으로 억제하였다.

본 연구에서 도출된 실제 측정값이 시뮬레이션 대비 낮게 나타난 주요 원인은 다음과 같이 분석된다. 전압 이득 변동 및 스위칭 손실의 영향: 시뮬레이션 단계에서는 주파수 분할 현상(frequency splitting phenomena)^{[12],[13]}을 배제하고 코일 구조에 따른 효율 관계에 집중하였으나, 실제 무선 전력 전송 환경에서는 결합 조건에 따른 전압 이득 변화 또한 효율에 영향을 미친다. Qi2 시스템은 5 Ω 부하 저항 조건에서 인버터 입력 전압이 약 30 V로 요구되었으며, 이는 low inductance 시스템 대비 약 15 V 높은 수치이다. 이러한 고전압 구동은 송신단 인버터의 스위칭 손실을 증가시킨 주요 원인으로 판단된다. 반면, 40 Ω 조건에서 Qi2 시스템의 경우, 입력 전압이 7 V로 상대적으로 낮아 스위칭 손실의 영향이 적었으나, low inductance

시스템의 경우 약 13 W가 요구되었다. 특히 출력 전력이 2 W로 매우 낮음을 고려할 때, 상대적으로 스위칭 손실 비중이 더욱 크게 작용했을 것으로 추정된다.

부하 조건에 따른 코일 기생 저항 손실: 각 시스템의 주요 손실 인자는 부하 조건에 따라 상이하게 나타났다. Qi2 시스템의 경우, 저부하 저항 조건에서 수신단 코일에 흐르는 높은 전류로 인해 수신 코일의 기생 저항에서 발생하는 열 손실이 주요 손실 인자이며, 이로 인해 저부하 저항 조건에서의 오차 또한 크게 나타났다. 이와 대조적으로 low inductance 및 리피터 시스템에서는 송신단 코일 저항이 주요 효율 저하 인자로 작용하였으며, 높은 부하 저항 조건에서 요구되는 송신 전류가 상대적으로 높다는 것을 고려할 때, 실측 오차 또한 높은 부하 저항에서 증가된 것으로 추정된다.

인버터 출력 고조파에 의한 교류 저항 손실: 제안된 리피터 시스템은 공간 제약으로 인한 낮은 인덕턴스 설계와 용량성 공진기 리액턴스 튜닝으로 인해 고조파 성분에 취약한 구조적 특성을 갖는다. 특히 송신 코일과 리피터 간의 강한 결합으로 인해 동작 주파수의 3차 고조파 대역인 1 Mhz 부근에서 입력 임피던스가 급격히 감소함을 확인하였다. 이로 인해 유입된 3차 및 5차 고조파는 송신 및 리피터 코일의 표피 효과(skin effect)와 근접 효과(proximity effect)를 가중시켰으며, 이는 결과적으로 코일의 실효 교류 저항을 증가시켜 추가적인 전력 손실을 야기한 것으로 판단된다. 실제 LCR미터를 통한 측정 시, 리피터 코일의 1 Mhz 교류 저항은 약 700 mΩ으로 급격하게 증가함을 확인하였다.

마지막으로, 본 설계의 인덕턴스 파라미터는 코일 자체의 성능만을 기준으로 최적화되었다. 그러나 실제 구동 환경에서는 송신단 인버터의 기생 저항 및 수신단 정류기의 비선형 임피던스가 시스템 전체의 유효 품질 계수를 변화시킨다. 식 (5)의 분석 결과와 같이, 수신단 자체의 기생 저항 손실에 따라, 상호 인덕턴스 감소에 따른 부정적 영향이 코일 저항 저감에 의한 이득을 상쇄할 수 있다. 따라서 실측 조건의 회로 임피던스를 고려한다면, low inductance 코일의 인덕턴스를 설계치보다 일부 상향 조정하는 것이 전체 시스템 효율 향상 측면에서 더욱 유리했을 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 충전 전력에 따라 부하 저항이 동적으로 변화하는 모바일 시스템 환경을 분석하고, 고출력(저부하 저항) 조건에서 효율을 극대화하기 위한 low inductance 수신 코일 기반의 리피터 시스템을 제안하였다. 수신 코일의 권선 수를 감소시켜 수신단 측의 자체 저항을 최소화하였으며, 이로 인해 발생하는 상호 인덕턴스의 저하는 보호 케이스 내 실장이 용이한 리피터 코일을 통해 보상하였다. 이는 엄격한 공간 제약으로 인해 코일 구조 변경이 어려운 모바일 기기 환경에서 차세대 고속 무선 충전 성능을 개선할 수 있는 매우 실효적인 접근 방식이다.

실험적 검증 결과, 제안된 시스템은 기존 Qi2 시스템 대비 5 Ω 부하 조건에서 약 13 %의 유의미한 효율 향상을 달성하였다. 또한, 40 Ω의 고부하 구간에서는 low inductance 단독 시스템 대비 7 %의 효율을 회복함으로써 전 부하 영역에서 안정적인 성능을 확보하였다. 이를 전력 손실 관점에서 환산할 경우, 16 W 출력 구간에서 약 2 W의 손실 저감을 달성하였으며, 8 W 구간에서도 약 0.6 W의 손실을 줄였다. 반면 2 W 저출력 구간의 손실 증가는 0.2 W 수준으로 억제되었다.

본 연구에서는 별도로 손실에 따른 코일의 온도 상승 영향을 분석하지는 못했으나 향후 연구에서는 발열 측면에서 개선되는 수준 또한 측정하여 제시하고자 한다. 또한, 시뮬레이션과 실측 결과 간의 오차를 개선하고 시스템 완성도를 높이기 위한 후속 연구가 필요하다. 먼저, 주파수 분할 현상(frequency splitting)을 고려하여 송/수신단 공진 리액턴스를 정밀하게 디튜닝(de-tuning)함으로써 전압 이득에 따른 스위칭 손실을 최적화하는 연구가 수행되어야 한다. 또한, 실제 구동 전류를 반영한 코일 기생 손실 분석과 차폐재를 포함한 코일 구조 최적화를 통해 시스템 전체의 기생 저항 성분을 정밀하게 제어할 필요가 있다. 마지막으로, 리피터 시스템 도입으로 인해 발생하는 고조파 성분을 억제하기 위한 리피터 인덕턴스 및 리액턴스 최적화에 관한 연구를 향후 과제로 진행할 예정이다.

References

- [1] S. Y. Hui, "Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1290-1301, Jun. 2013.
- [2] Wireless Power Consortium (WPC), *System Description Wireless Power Transfer, Volume. 1: Low Power, Part 1: Interface Definition Ver. 1.1.2*, Jun. 2013.
- [3] W. X. Zhong, S. Y. R. Hui, "Maximum energy efficiency tracking for wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 7, pp. 4025-4034, Jul. 2015.
- [4] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [5] M. Fu, H. Yin, X. Zhu, and C. Ma, "Analysis and tracking of optimal load in wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 7, pp. 3952-3963, Jul. 2015.
- [6] S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4500-4511, Sep. 2014.
- [7] W. X. Zhong, C. Zhang, X. Liu, and S. Y. R. Hui, "A methodology for making a three-coil wireless power transfer system more energy efficient than a two-coil counterpart for extended transfer distance," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 933-942, Feb. 2015.
- [8] D. Ahn, S. Hong, "A study on magnetic field repeater in wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 360-371, Jan. 2013.
- [9] C. Lee, S. Woo, Y. Shin, J. Rhee, and S. Ahn, "Reactive shielding method for wireless power transfer systems with high power transfer efficiency using frequency split phenomena," in *Proceedings of the 2023 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMC+SIPI)*, Grand Rapids, MI, 2023, pp. 560-565.
- [10] J. Zhang, X. Yuan, C. Wang, and Y. He, "Comparative analysis of two-coil and three-coil structures for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 1, pp. 341-352, Jan. 2017.
- [11] J. Kim, S. Ahn, "Dual loop reactive shield application of wireless power transfer system for leakage magnetic field reduction and efficiency enhancement," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 118307-118323, Aug. 2021.
- [12] R. Huang, B. Zhang, D. Qiu, and Y. Zhang, "Frequency splitting phenomena of magnetic resonant coupling wireless power transfer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, p. 8600204, Nov. 2014.
- [13] W. Q. Niu, J. X. Chu, W. Gu, and A. D. Shen, "Exact analysis of frequency splitting phenomena of contactless power transfer systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 60, no. 6, pp. 1670-1677, Jun. 2013.

송 민 기 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0001-4689-720X>



2016년 8월: 연세대학교 의용생체공학과 (공학사)

2018년 1월~현재: 삼성전자 책임연구원

2025년 3월~현재: 성균관대학교 DMC공학과 석사과정

[주 관심분야] 무선 전력 전송 시스템

양 영 구 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3463-0687>



1997년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월~2002년 7월: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사후 연구원

2002년 8월~2005년 2월: Skyworks Solutions Inc., Senior Electronic Engineer

2005년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 무선통신 송/수신기 시스템 설계, 비선형 회로 분석 및 시뮬레이션 기법 연구