

2차 고조파가 저감된 Class E/F₃ 전력증폭기 기반 무선전력전송 시스템

Wireless Power Transfer System Using Class E/F₃ Power Amplifier with Second Harmonic Reduction

남선우*** · 오한식** · 배순철*** · 빈수현*** · 이윤정*** · 양영구***

Sunwoo Nam*** · Hansik Oh** · Sooncheol Bac*** · Soohyun Bin*** · Yoonjung Lee*** · Youngoo Yang***

요 약

본 논문에서는 3가지 유형의 다중 수신기를 충전할 수 있는 고효율 무선 전력 전송 시스템의 설계 및 측정 결과를 제시한다. 무선 전력 전송 시스템은 2차 고조파가 저감된 Class E/F₃ 전력증폭기를 포함하는 송신기, 공진기, 3가지 유형의 수신기로 구성된다. 제안된 송신기는 출력단에서의 고조파 성분을 충분히 저감하기 위해, 최소한의 소자를 사용한 고조파 필터로 구성되었고, 부하 임피던스에 따라 출력 전력을 생성하도록 부하 종속 전압원으로 설계되었다. 공진기는 송신기 코일과 3가지 유형의 수신기 코일 간의 회로 설계 매개변수를 이용하여 유형별 수오 전력에 비례하는 입력 임피던스를 갖도록 설계되었다. 수신기는 4개의 쇼트키 다이오드로 구성된 정류기로 설계되었다. 제안된 무선 전력 전송 시스템은 3가지 유형에서 17.5~37.1 W의 수신 전력 및 71.6~75.5 %의 높은 시스템 효율로 동작하는 것이 실험적으로 검증되었다.

Abstract

In this paper, we present a high-efficiency wireless power transfer system with design and measurements, for three different types of receivers. The transmitter for the system uses a Class E/F₃ power amplifier with second harmonic reduction to reduce distortion, a resonator, and three different types of receivers. The proposed transmitter uses a harmonic filter to reduce distortion, and is designed to be a load-dependent voltage source, which means that it generates output power according to the load impedance. The resonator is designed to match the impedance of the receivers by using design parameters between the coils of the transmitter and the receivers. The receivers are designed using a rectifier based on four Schottky diodes. Experimental results show that the proposed wireless power transfer system can operate with received power of 17.5~37.1 W and system efficiency of 71.6~75.5 % for three types of receivers.

Key words: Wireless Power Transfer, Class E/F₃, Second Harmonic Reduction, Load-Dependent Voltage Source, Resonator

「이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022-0-00938, Ku-밴드 RF 프론트엔드모듈(RF-FEM) 개발).」

*성균관대학교 반도체디스플레이공학과(Department of Semiconductor and Display Engineering, Sungkyunkwan University)

**㈜삼성전자(Samsung Electronics Co., Ltd.)

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

· Manuscript received July 6, 2023 ; Revised July 20, 2023 ; Accepted July 21, 2023. (ID No. 20230706-052)

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

I. 서 론

최근 무선 전력 전송 기술은 노트북, 태블릿, 휴대폰 등의 모바일 기기를 편리하게 충전하는 대안으로 등장했다. 무선 전력 전송은 사용자의 편의성을 크게 향상한다. 하지만 하나의 송신기로 수요 전력이 다른 다양한 장비를 충전하는 것은 어렵다. 이를 보완하기 위해 무선 전력 전송 시스템을 구성하는 송신기, 공진기, 수신기에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다^{[1]~[19]}. 시스템의 송신기에 주로 사용되는 Class E 전력증폭기는 고효율로 동작하지만 고조파를 충분히 저감할 수 없다. 이를 보완하기 위해 Class E와 Class F 전력증폭기 구조를 결합한 Class EF, Class E/F 전력증폭기가 연구되었다^{[14]~[17]}.

참고문헌 [9]에서는 배터리 전압 분포에 따른 부하 조건을 분석하여 설계되었으며, 74.7 %의 시스템 최대 효율을 달성했다. 참고문헌 [13]에서는 Buck converter의 폐회로 듀티 사이클 조절을 이용해 설계하였고, 71.7 %의 시스템 최대 효율을 달성했다. 참고문헌 [10]에서는 스위치를 이용하여 임피던스 정합이 용이하게 설계되었고, 81.4 % 시스템 최대 효율을 달성했다. 그러나, 이전 연구의 경우, 송신기는 기존의 Class E 전력증폭기로 설계되어, 출력단에서의 고조파 성분을 충분히 저감할 수 없으며, 복잡한 회로로 구성되어 있다.

그림 1은 3가지 유형의 서로 다른 수신기 충전을 위한

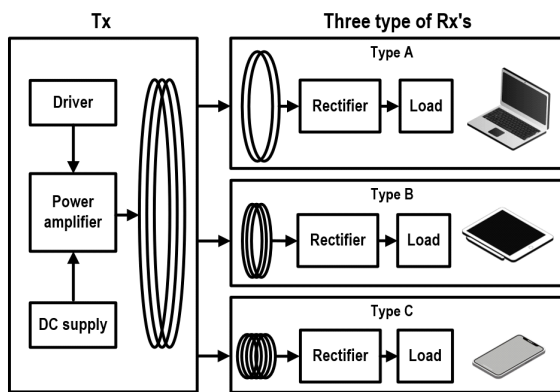


그림 1. 3가지 유형의 수신기 충전을 위한 무선 전력 전송 시스템 개념도

Fig. 1. WPT system for charging using three types of Rx's.

제안된 무선 전력 전송 시스템의 개념도를 나타낸다. 제안하는 무선 전력 전송 시스템은 노트북(Type A), 태블릿(Type B), 휴대폰(Type C) 등 다양한 종류의 모바일 기기를 하나의 송신기로 충전할 수 있다. 유형별 수신기는 실제 기기 크기를 고려하여 설계되었으며, 서로 다른 전력 수요를 갖는다. 수신기 종류에 따라 요구되는 수신 전력이 다르기에 송신기는 높은 효율로 수신기의 수요 전력에 맞게 정확하게 전력을 전달해야 한다.

본 논문에서는 간단한 구성으로 부하 종속 전압원 기반의 송신기를 포함하여, 3가지 유형의 수신기를 충전할 수 있는 고효율 무선 전력 전송 시스템을 제시한다. 송신기는 2차 고조파가 저감된 Class E/F₃ 전력증폭기로 구성되어 출력단에서의 고조파를 충분히 저감할 수 있다. 최소한의 소자 개수를 사용하여 작은 크기로 간결하게 설계 및 제작되었다. 또한, 부하 종속 전압원으로 동작하도록 정합 회로를 구성하여 고효율 특성을 잃지 않고 유형별 수요 전력(공진기의 입력 임피던스)에 비례하는 출력 전력을 생성한다. 공진기는 EM 시뮬레이션을 이용하여 회로 설계 변수를 도출하였고, 이를 바탕으로 송신기에서 생성된 전력은 수신기의 수요 전력에 따라 분배되도록 설계되었다. 설계된 공진기의 입력 임피던스는 수신기의 유형에 따라 12.5 Ω, 25 Ω, 50 Ω을 갖는다. 수신기는 4개의 쇼트키 다이오드를 이용하여 간단하게 설계되었다. 제안된 무선 전력 전송 시스템은 실험적으로 검증하기 위해 서로 다른 3가지 수신기 유형을 설계했다. 측정 결과는 고조파 왜곡 정도와 유형별 전체 시스템 효율, 수신 전력으로 표현하였고, 이전에 보고된 연구와 비교되었다.

II. 회로 설계

그림 2는 제안된 전력증폭기로 포함하여 부하 종속 전압원으로 설계된 송신기, 전력 비례형 공진기, 3가지 유형의 수신기로 구성된 무선 전력 전송 시스템의 회로도이다. 제안된 전력증폭기는 이상적이며, 공진기의 코일은 무손실로 가정한다. 송신기는 제안된 전력증폭기와 저역통과 정합 회로로 구성하여, 고조파를 최대한 저감할 수 있도록 설계되었다. A, B, C는 3가지 유형의 수신기를 나타내며, M은 송신기와 수신기 코일 사이의 상호 인덕

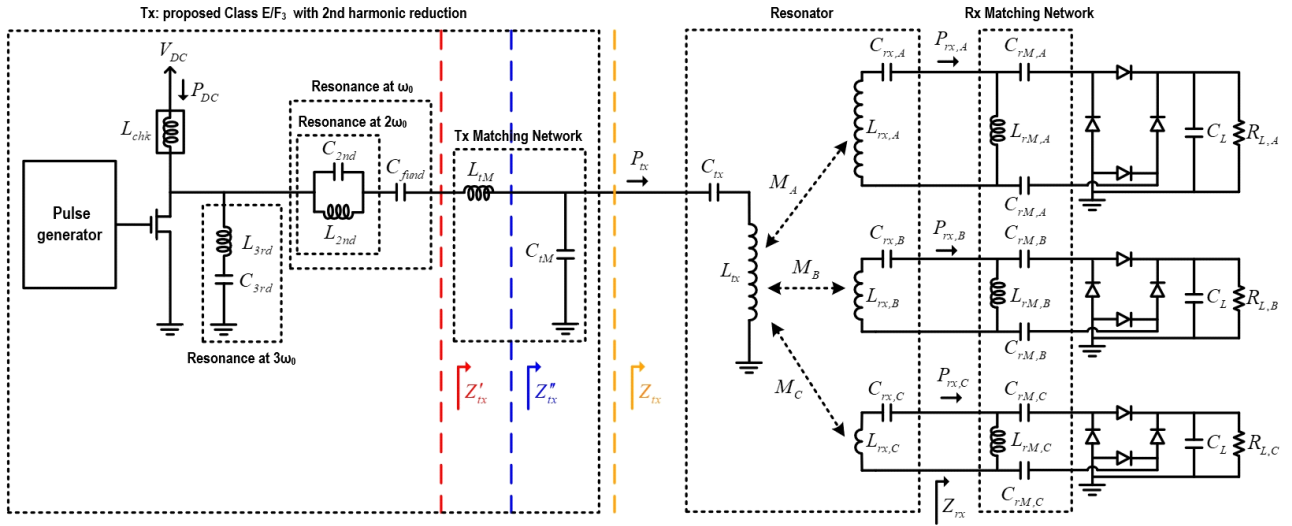


그림 2. 제안하는 무선 전력 전송 시스템 회로도
Fig. 2. Schematic of the proposed wireless power transfer system.

턴스이다. L_{tx} , L_{rx} 는 송신기와 수신기 코일의 자체 인덕턴스이다. C_{tx} , C_{rx} 는 각 L_{tx} , L_{rx} 와 공진한다. Z_{tx} , Z_{rx} 는 각각 송신기와 수신기의 부하 임피던스이다.

제안된 스위칭 전력증폭기는 Class E 스위칭 전력증폭기의 병렬 커패시터에 인덕터 1개를 추가하여, 3차 고조파 단락을 위한 공진회로를 구성했다. 또한, 동작 주파수에 대한 직렬 공진회로에 커패시터 1개를 추가하여, 2차 고조파 저감 회로를 구성했다. Class EF₂, Class E/F₃와 동일한 소자 개수로 출력단에서의 2차, 3차 고조파 성분을 동시에 저감할 수 있다.

그림 3은 3차 고조파 단락을 위한 공진회로의 주파수에 따른 등가 회로도를 나타낸다. 3차 고조파 단락을 위

한 공진회로는 인덕터와 커패시터가 직렬로 연결되어, 동작 주파수에서는 Class E의 병렬 연결된 커패시터와 동일하게 동작하고, 3차 고조파 주파수에서는 단락된다. 3차 고조파 주파수에서 단락을 위한 공진회로의 조건은 식 (1)과 같다.

$$3 \cdot \omega_0 \cdot L_{3rd} - \frac{1}{3 \cdot \omega_0 \cdot C_{3rd}} = 0 \quad (1)$$

ω_0 는 $2\pi f_o$ 로 표현되며, 여기서 f_o 는 동작 주파수인 6.78 MHz이다. L_{3rd} 와 C_{3rd} 는 3차 고조파 단락을 위한 공진회로의 인덕터와 커패시터이다.

$$L_{3rd} = \frac{1}{(3 \cdot \omega_0)^2 \cdot C_{3rd}} \quad (2)$$

식 (1)로부터 식 (2)를 유도하여 3차 고조파 단락을 위한 공진회로의 L_{3rd} 를 구할 수 있다. 그림 3으로부터 3차 고조파 단락을 위한 공진회로는 동작 주파수 ω_0 에서 C_{sh} 로 등가되어 다음 조건을 만족한다.

$$j \cdot \omega_0 \cdot L_{3rd} + \frac{1}{j \cdot \omega_0 \cdot C_{3rd}} = \frac{1}{j \cdot \omega_0 \cdot C_{sh}} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터 3차 고조파 단락을 위한 공진회로의 등가 커패시터인 C_{sh} 와 C_{3rd} 의 관계를 식 (4)와

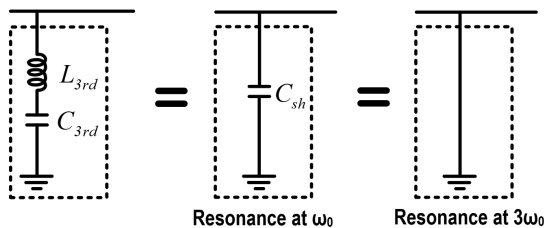


그림 3. 3차 고조파 단락을 위한 공진회로의 주파수에 따른 등가 회로도

Fig. 3. Equivalent circuit diagram of the resonant circuit for the third harmonics according to the frequency.

같이 유도할 수 있다.

$$C_{sh} = \frac{9}{8} \cdot C_{3rd} \quad (4)$$

식 (4)를 고려하여 3차 고조파 단락을 위한 공진회로를 구성하면, 3차 고조파 주파수에서는 단락 회로로, 동작 주파수에서 병렬로 연결된 커패시터로 보이기 때문에 Class E의 병렬 커패시터와 같이 동작한다.

그림 4는 2차 고조파 개방을 위한 공진회로의 주파수에 따른 등가 회로도를 나타낸다. 2차 고조파 개방을 위한 공진회로는 인덕터와 커패시터가 병렬로 연결되어, 동작 주파수에서는 Class E의 직렬 연결된 인덕터인 L_{fund} 와 동일하게 동작하여 단락되고, 2차 고조파 주파수에서는 개방되어 출력단으로 흐르는 2차 고조파를 저장한다. 2차 고조파 주파수에서 개방을 위한 공진회로의 조건은 식 (5)와 같다.

$$2 \cdot \omega_0 \cdot L_{2nd} - \frac{1}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_{2nd}} = 0 \quad (5)$$

ω_0 는 $2\pi f_o$ 로 표현되며, 여기서 f_o 는 동작 주파수인 6.78 MHz이다. L_{2nd} 와 C_{2nd} 는 2차 고조파 개방을 위한 공진회로의 인덕터와 커패시터이다.

$$C_{2nd} = \frac{1}{(2 \cdot \omega_0)^2 \cdot L_{2nd}} \quad (6)$$

식 (5)로부터 식 (6)을 유도하여 2차 고조파 개방을 위한 공진회로의 C_{2nd} 를 구할 수 있다. 그림 4로부터 2차 고조파 개방을 위한 공진회로는 동작 주파수 ω_o 에서 L_{fund} 로 등가되어 식 (7)을 만족한다.

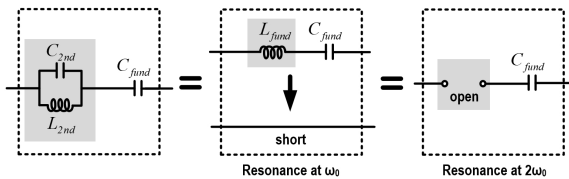


그림 4. 2차 고조파 개방을 위한 공진회로의 주파수에 따른 등가 회로도

Fig. 4. Equivalent circuit diagram of the resonant circuits for the second harmonics according to the frequency.

$$j \cdot \omega_0 \cdot C_{2nd} + \frac{1}{j \cdot \omega_0 \cdot L_{2nd}} = \frac{1}{j \cdot \omega_0 \cdot L_{fund}} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)로부터 2차 고조파 개방을 위한 공진회로의 등가 인덕터인 L_{fund} 와 L_{2nd} 의 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$L_{fund} = \frac{4}{3} \cdot L_{2nd} \quad (8)$$

식 (8)을 고려하여 2차 고조파 개방을 위한 공진 회로를 구성하면, 2차 고조파 주파수에서는 개방 회로로, 동작 주파수에서 공진회로의 인덕터로 보이기 때문에 Class E 공진회로의 직렬 인덕터와 같이 동작한다.

부하 종속 전압원으로 설계된 송신기는 출력단의 전류 I_{tx} 가 일정하면 전압 V_{tx} 는 부하 임피던스 Z_{tx} 에 비례해야 하며, V_{tx} 와 P_{tx} 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_{tx} = \alpha Z_{tx} \quad (9)$$

$$P_{tx} = \alpha^2 Z_{tx} \quad (10)$$

식 (9)과 식 (10)에서 α 는 부하 임피던스와 출력 전압 사이의 비례상수이다.

그림 5는 부하 종속 전압원으로 설계된 송신기의 시뮬레이션 결과이다. V_{tx} 는 비례상수 α 가 0.91인 일정한 기울기로 증가하며, 전력 비례형 공진기 설계에 필요한 회로 설계 매개변수로 사용된다. 송신기를 Z_{tx} 에 대한 부하

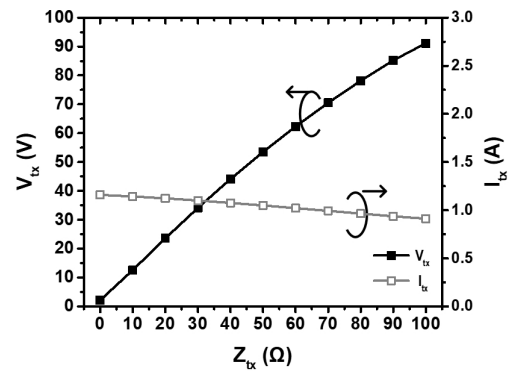
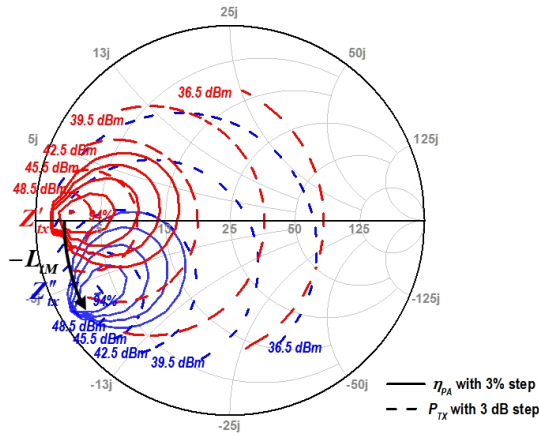


그림 5. 부하 종속 전압원으로 설계된 송신기의 시뮬레이션 결과

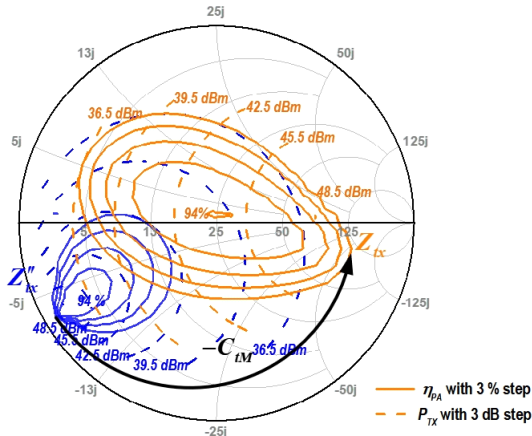
Fig. 5. Simulation results of the transmitter designed as a load-dependent voltage source.

중속 전압원으로 설계하기 위해, 적절한 정합 회로를 이용하여 전력 및 효율 컨투어를 변환하였다.

그림 6은 부하 정합 회로에 따른 전력 및 효율 컨투어의 변화를 보여준다. 그림 6(a)에서 직렬 인덕터 L_{tM} 을 통해 Z'_{tx} 의 전력 및 효율 컨투어는 레지스턴스 원을 따라 Z_{tx} 의 전력 및 효율 컨투어로 이동한다. 그림 6(b)에서 직렬 인덕터로 이동된 Z'_{tx} 의 전력 및 효율 컨투어는 병렬 커패시터 C_{tM} 을 통해 어드미턴스 원을 따라 Z_{tx} 의 전



(a) Z'_{tx} 에서 Z''_{tx} 로의 임피던스 변환
(a) Impedance transformation from Z'_{tx} to Z''_{tx}



(b) Z''_{tx} 에서 Z_{tx} 로의 임피던스 변환
(b) Impedance transformation from Z''_{tx} to Z_{tx}

그림 6. 부하 정합 회로에 따른 전력 및 효율 컨투어
Fig. 6. Power and efficiency contours through the load matching network.

력 및 효율 컨투어로 다시 이동한다. 간단한 정합 회로를 통해 고효율 영역의 컨투어가 25 Ω 을 중심으로 위치하며, 실수 축에서 Z_{tx} 가 증가함에 따라 출력 전력 P_{tx} 도 증가 되도록 부하 중속 전압원으로 송신기를 설계하였다.

그림 7은 3가지 유형 중 한 가지인 A 유형(노트북) 수신기의 회로도이다. 수신기는 충전을 위해 DC-DC 변환기가 필요하며, 4개의 쇼트키 다이오드로 정류기를 설계하였다. $C_{rM,A}$, $L_{rM,A}$ 는 정류기 정합 회로를 구성하며, 입력 임피던스 Z_{rx} 가 50 Ω 이 되도록 한다. $R_{L,A}$ 는 수신부 정류기의 부하 저항이며, C_L 은 DC 출력 안정을 위한 큰 용량의 커패시터이다. 그림 8은 스미스 차트에서 유형별 임피던스 정합 궤적을 나타낸다.

표 1은 유형별 수신기 설계를 위한 수요 전력, 부하 저항, 임피던스를 나타낸다. 수신기의 전력 수요에 따라 충분한 전력을 공급하도록 전력 비례형 공진기를 분석하였

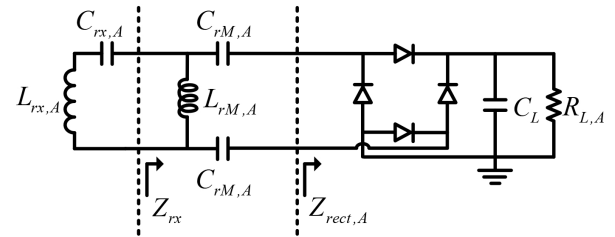


그림 7. 유형 A의 수신기 회로도
Fig. 7. Schematic of the type A receiver.

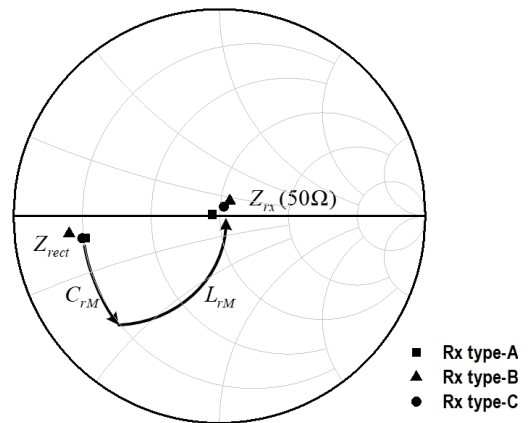


그림 8. 유형별 임피던스 정합 궤적
Fig. 8. Trajectory for impedance matching.

표 1. 유형별 수신기의 수요 전력, 부하 저항, 임피던스
Table 1. Demand power, load resistance and impedance of receivers for type-A, -B, and -C.

Rx type	Power (W)	R_L (Ω)	Z_{rx} (Ω)
A (Laptop)	40	15.6	50
B (Tablet PC)	20	11.3	50
C (Mobile phone)	10	14.5	50

다. 이상적인 전력증폭기와 공진기를 가정하였으므로 식 (11)과 같이 유도할 수 있다.

$$P_{DC}=P_{tx}=P_{rx} \quad (11)$$

식 (11)의 P_{DC} , P_{tx} , P_{rx} 는 전력증폭기의 입력 DC 전력, 송신기의 출력 RF 전력, 수신기의 수신 전력이다. 식 (12)는 무선 전력 전송 시스템에서 Z_{tx} 와 Z_{rx} 의 관계를 나타내며, 이전 연구^{[5],[6]}에서 도출되었다.

$$Z_{tx} = \frac{\omega_0^2}{Z_{rx}} M^2 \quad (12)$$

식 (12)에서 송신기의 부하 임피던스는 코일 사이의 상호 인덕턴스에 비례하며, 상호 인덕턴스는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = k\sqrt{L_{tx}L_{rx}} \quad (13)$$

식 (13)에서 k 는 코일 간 결합 계수이며, 식 (12)와 식(13)으로부터 식 (14)와 같이 부하 임피던스를 도출할 수 있다.

$$Z_{tx} = \frac{\omega_0^2}{Z_{rx}} L_{tx} k^2 L_{rx} \quad (14)$$

식 (10), 식 (14)으로부터 송신기의 출력 전력을 구할 수 있다.

$$P_{tx} = \alpha^2 \frac{\omega_0^2}{Z_{rx}} L_{tx} k^2 L_{rx} \quad (15)$$

식 (11), 식 (15)로부터 수신기의 입력 전력을 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{rx} = \alpha^2 \frac{\omega_0^2}{Z_{rx}} L_{tx} k^2 L_{rx} \quad (16)$$

식 (15) 및 식 (16)과 같이 송신기와 수신기의 전력은 공진기 회로 설계 매개변수인 k , L_{tx} , L_{rx} 에 의해 결정된다. 기울기 α 는 0.91, 동작 주파수 ω_0 , Z_{tx} 는 50 Ω 이므로, 이를 이용하여 식 (15) 및 식 (16)을 정리하면 식 (17)과 같다.

$$P_{tx} = P_{rx} = \alpha^2 \frac{\omega_0^2}{Z_{rx}} L_{tx} k^2 L_{rx} = (3 \times 10^{13}) \cdot L_{tx} k^2 L_{rx,i} \quad (17)$$

L_{tx} 는 공통이므로 P_{tx} , P_{rx} 는 $k \cdot L_{rx}$ 에 비례한다. 따라서, 표 1을 참고하여 유형별 수요 전력에 맞게 비례식으로 표현하면 식 (18)과 같다.

$$P_{rx,A} : P_{rx,B} : P_{rx,C} = k_A^2 L_{rx,A} : k_B^2 L_{rx,B} : k_C^2 L_{rx,C} = 4 : 2 : 1 \quad (18)$$

식 (18)을 만족하여 전력을 분배하기 위해, ADS(advanced design system)의 EM 시뮬레이션으로 반복 수행하였다.

그림 9는 설계된 공진기 코일의 치수를 나타낸다. 수신기의 입력 전력을 결정하는 회로 설계 매개변수 k 는 코일의 치수와 송, 수신 코일 간의 거리에 따라 달라지며, L_{tx} 는 코일의 권선 수로 결정된다. 코일 간 거리는 30 mm이며, 유형 A, B, C에 대한 수신 코일의 크기는 실제 장비의 크기를 고려하여 12×26, 12×12, 12×6 cm²로, 송신 코일의 크기는 12×26 cm²로 설정하였다. 수신 코일의 권선 수는 각 2, 4, 8회이며, 송신 코일은 4회로 설정하였다. 코일은 유전율 3.5, 손실 탄젠트가 0.0031인 Roger의 RO4350B로 구현되었다. EM 시뮬레이션을 이용하여 얻은 A, B, C

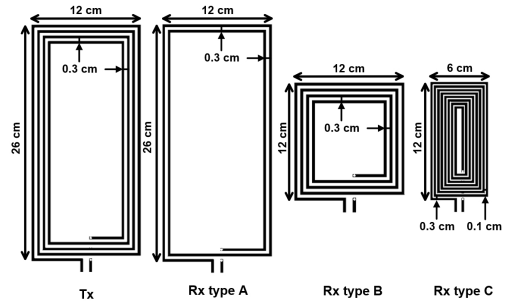


그림 9. Tx 및 Rx 유형 A, B, C 코일의 치수
Fig. 9. Dimensions of the designed coils for the Tx and Rx's of type-A, -B, and -C.

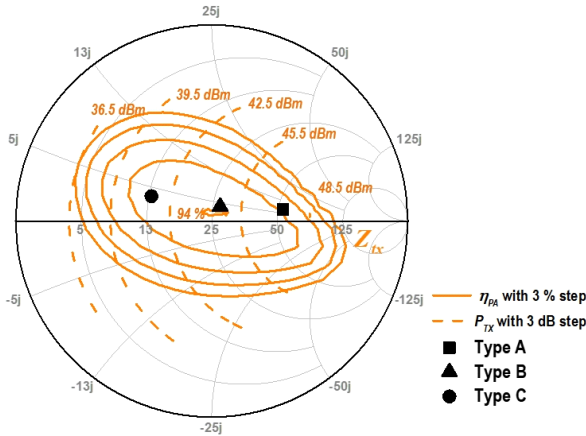


그림 10. 전력 및 효율 컨투어에 대한 유형에 따른 Z_{tx} 시뮬레이션 결과

Fig. 10. Simulation results of Z_{tx} on the power and efficiency contours.

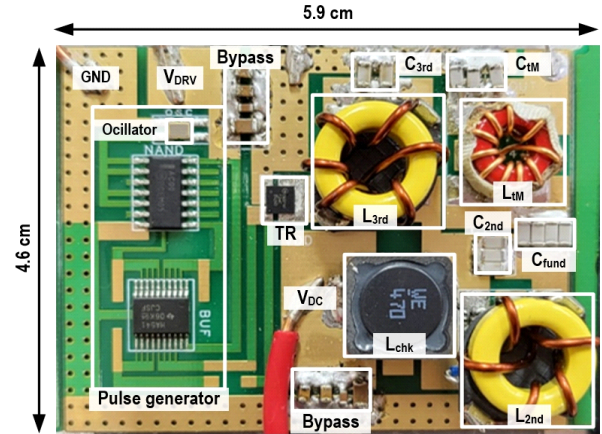
유형의 송, 수신 코일 간 결합 계수는 각 0.34, 0.21, 0.12이며, 수신 코일의 자체 인덕턴스는 각 1.98, 2.67, 4.25 μH 이다. 송신 코일의 자체 인덕턴스는 5.77 μH 이다.

그림 10은 송신기의 전력 및 효율 컨투어 위에 표시된 Z_{tx} 시뮬레이션 결과이다. A 유형의 전력 수요는 40 W이며, $Z_{tx,A}$ 는 46.2 dBm(41.7 W)인 50 Ω 부근에서 형성된다. B 유형의 전력 수요는 20 W이며, $Z_{tx,B}$ 는 43.5 dBm(22.4 W)인 25 Ω 부근에서 형성된다. C 유형의 전력 수요는 10 W이며, $Z_{tx,C}$ 는 40.8 dBm(12.0 W)인 12.5 Ω 부근에서 형성된다. 시뮬레이션 결과와 같이 각 유형별 전력 수요에 따라 전력이 적절하게 분배되도록 설계되었다.

III. 제작 및 측정 결과

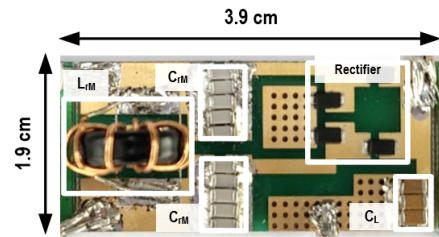
구현된 무선 전력 전송 시스템은 제안하는 2차 고조파 저감된 Class E/F₃ 전력증폭기로 구성되어 부하 중속 전압원으로 동작하는 송신기, 장비의 전력 수요에 비례하여 전력을 분배하는 전력 비례형 공진기, 정류기를 포함하는 3가지 유형의 수신기로 구현되었다.

그림 11은 제안하는 무선 전력 전송 시스템에 대한 송신기와 수신기 제작 사진이다. 송신기와 수신기의 크기는 각 5.9×4.6 cm², 3.9×1.9 cm²로 매우 간결하게 제작되었다. 표 2는 설계된 무선 전력 전송 시스템에 사용한 부품



(a) 제안하는 2차 고조파 저감된 Class E/F₃ 전력증폭기로 구성된 송신기

(a) Transmitter composed of the proposed Class E/F₃ SPA with second harmonic reduction



(b) 4개의 쇼트키 다이오드로 구성된 수신기

(b) Receiver composed of four Schottky diodes

그림 11. 제안하는 무선 전력 전송 시스템의 송신기 및 수신기 제작 사진

Fig. 11. Photographs of the fabricated transmitter and receiver.

및 소자값을 나타낸다.

그림 12는 무선 전력 전송 시스템의 측정 구성 사진이다. 전력증폭기와 파형 발생기에는 각각 18 V와 5 V의 DC 전압이 인가된다. 전기 부하는 유형별 수신기에 서로 다른 부하 저항을 제공하며, 수신된 DC 전력을 측정한다. 오실로스코프는 파형을 측정에 사용되었다.

그림 13(a)는 유형별 수신기에 수신된 DC 전력과 효율의 측정 결과이다. 시스템 효율은 수신기에서 측정된 DC 전력과 송신기에 인가된 DC 전력의 비로 계산하였다. A, B, C 유형의 시스템 측정 효율은 각 71.6 %, 74.1 %, 75.1 %이며, 출력 전력은 각 45.7 dBm(37.1 W), 44.4 dBm(27.5

표 2. 무선 전력 전송 시스템 설계에 사용된 부품 및 소자
Table 2. Component values and part numbers used for the designed WPT system.

System block	Compoenet	Part number or value
Tx	Transistor	FDMC86260
	L_{chk}	4.7 μ H
	L_{2nd}	0.160 μ H
	C_{2nd}	860 pF
	L_{3rd}	0.24 μ H
	C_{3rd}	256 pF
	C_{fund}	2,590 pF
	L_{tM}	0.45 μ H
	C_{tM}	1,300 pF
Type A (Laptop)	L_{rMA}	0.582 μ H
	C_{rMA}	3,000 pF
	$C_{rx,A}$	280 pF
Type B (Tablet PC)	L_{rMB}	0.5 μ H
	C_{rMB}	2,800 pF
	$C_{rx,B}$	200 pF
Type C (Mobile phone)	L_{rMC}	0.568 μ H
	C_{rMC}	2,800 pF
	$C_{rx,C}$	129 pF

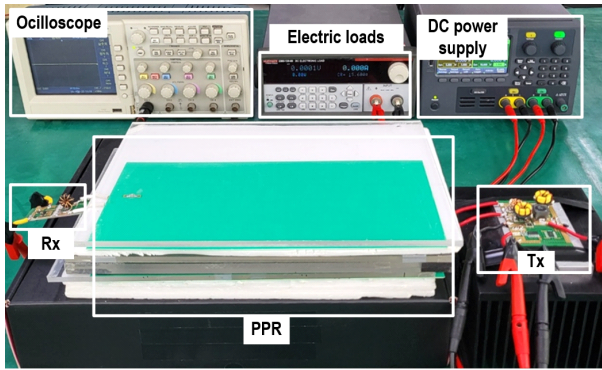
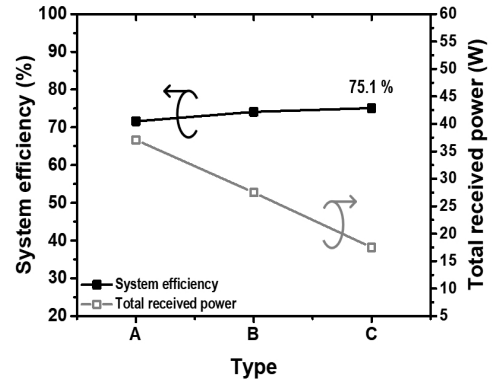
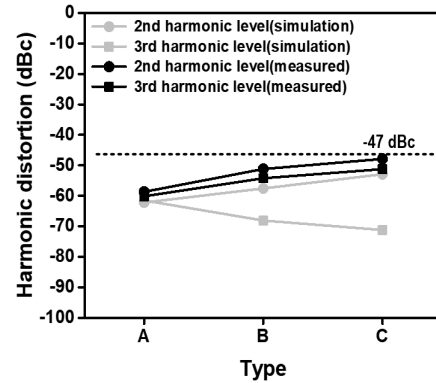


그림 12. 제안하는 무선 전력 전송 시스템 측정 구성 사진
Fig. 12. Photograph of the measurement setup for the proposed WPT system.

W), 42.4 dBm(17.5 W)이다. 따라서, 제안된 무선 전력 전송 시스템에서 A, B, C 유형의 전력 수요에 따라 전력이



(a) 유형별 수신기에 수신된 DC 전력과 효율 측정 결과
(a) Measured system efficiency and total received DC power for each type of receiver



(b) 유형별 송신기에서 측정된 고조파 전력 측정 및 시뮬레이션 결과
(b) Measured and simulated harmonic distortion for the transmitter

그림 13. 제안된 무선 전력 전송 시스템 성능 측정 결과
Fig. 13. Measured performances of the proposed WPT system.

분배되며, 높은 효율로 동작하는 것을 입증하였다. A 유형의 경우 의도된 전력 수요보다 약간 낮다.

그림 13(b)는 유형별 송신기에서 측정된 고조파 왜곡 정도를 측정값과 시뮬레이션을 비교한 결과이다. 모든 유형에서 고조파 왜곡 정도 측정 결과는 동작 주파수에서의 출력 전력 대비 2, 3차 고조파 모두 -47 dBc 이하이다. 따라서, 제안된 전력증폭기는 고조파를 저감함과 동시에 높은 효율 특성을 가진다. 표 3에서 제안하는 무선 전력 전송 시스템과 이전 연구와의 성능을 비교하였다.

표 3. 이전에 보고된 연구와의 성능 비교

Table 3. Performance comparison to the previous works.

Ref.	Topology	Freq. (MHz)	Charging distance (cm)	Rx's configuration	$\eta_{sys, max}$ (%)	$P_{rx, max}$ (W)
[9]	Class E	6.78	3	Homogeneous	74.7	27.8
[10]	Class E	6.78	3~5	Heterogeneous, Homogeneous	81.4	39.7
[11]	Class E	6.78	3	Heterogeneous, Homogeneous	85.5	45.7
[12]	Class E	6.78	2~6	Single	81	27
[13]	Class E	6.78	2	Homogeneous	71.7	20
This work	Proposed Class E/F ₃	6.78	3	Heterogeneous	75.1	37.1

IV. 결 론

본 논문에서는 다중 수신기를 충전하는 무선 전력 시스템을 설계했다. 송신기는 제안하는 부하 중속 전압원으로 동작하며, 2차 고조파가 저감된 Class E/F₃로 설계되었다. 송신기는 수신기 유형에 따라, 공진기의 입력 임피던스가 각 12.5 Ω, 25 Ω, 50 Ω으로 설계되어, 유형별 수신기의 수요 전력에 맞게 충분한 전력을 생산할 수 있다. 또한, 2, 3차 고조파 왜곡 정도를 낮춰 주변 장비에 영향을 최소화했다. 단일 전력증폭기로 설계되어 최소한의 소자 개수를 가지며, 간결한 크기로 제작되었다. 공진기는 회로 설계 매개변수를 분석하여, 유형별 수신기의 수요 전력 배분 비율을 결정하였고, 배분 비율에 따라 송신기의 부하 임피던스와 출력 전력이 비례하도록 설계하였다. 수신기는 3가지 유형으로 4개의 쇼트키 다이오드를 이용해 설계되었다. 구현된 시스템은 3가지 유형의 수신기에 대해 실험적으로 검증되었다. 시스템은 17.5~37.1 W의 전력 범위에서 71.6~75.1 %의 높은 효율로 동작한다.

References

- [1] F. H. Raab, "Idealized operation of the class E tuned power amplifier," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 24, no. 12, pp. 725-735, Dec. 1977.
- [2] J. Y. Hasani, M. Kamarei, "Analysis and optimum design of a class E RF power amplifier," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 55, no. 6, pp. 1759-1768, Jul. 2008.
- [3] M. Acar, A. J. Annema, and B. Nauta, "Analytical design equations for class-E power amplifiers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 54, no. 12, pp. 2706-2717, Dec. 2007.
- [4] M. Fu, T. Zhang, X. Zhu, P. C. K. Luk, and C. Ma, "Compensation of cross coupling in multiple-receiver wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 474-482, Apr. 2016.
- [5] M. Fu, T. Zhang, C. Ma, and X. Zhu, "Efficiency and optimal loads analysis for multiple-receiver wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 3, pp. 801-812, Mar. 2015.
- [6] K. E. Koh, T. C. Beh, T. Imura, and Y. Hori, "Impedance matching and power division using impedance inverter for wireless power transfer via magnetic resonant coupling," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 2061-2070, May-Jun. 2014.
- [7] M. Liu, M. Fu, and C. Ma, "Parameter design for a 6.78-MHz wireless power transfer system based on analytical derivation of class E current-driven rectifier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 6, pp. 4280-4291, Jun. 2016.
- [8] S. Liu, M. Liu, S. Han, X. Zhu, and C. Ma, "Tunable class E² DC-DC converter with high efficiency and stable output power for 6.78-MHz wireless power transfer,"

- IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 8, pp. 6877-6886, Aug. 2018.
- [9] M. Liu, M. Fu, Y. Wang, and C. Ma, "Battery cell equalization via megahertz multiple-receiver wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 5, pp. 4135-4144, May 2018.
- [10] H. Oh, W. Lee, H. Koo, J. Bae, K. Hwang, and K. Y. Lee, et al., "6.78 MHz wireless power transmitter based on a reconfigurable class-E power amplifier for multiple device charging," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 6, pp. 5907-5917, Jun. 2020.
- [11] H. Oh, S. Oh, H. Koo, W. Choi, J. Shin, and K. C. Hwang, et al., "Mid-range wireless power transfer system for various types of multiple receivers using power customized resonator," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 45230-45241, Mar. 2021.
- [12] S. Liu, M. Liu, S. Yang, C. Ma, and X. Zhu, "A novel design methodology for high-efficiency current-mode and voltage-mode class-E power amplifiers in wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 6, pp. 4514-4523, Jun. 2017.
- [13] M. Fu, H. Yin, and C. Ma, "Megahertz multiple-receiver wireless power transfer systems with power flow management and maximum efficiency point tracking," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 11, pp. 4285-4293, Nov. 2017.
- [14] Z. Kaczmarczyk, "High-efficiency class E, hboxEF₂, and hboxE/F₃ inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1584-1593, Oct. 2006.
- [15] S. Aldhaher, D. C. Yates, and P. D. Mitcheson, "Modelling and analysis of class EF and class E/F inverters with series-tuned resonant networks," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3415-3430, May 2016.
- [16] R. H. Ashique, M. M. Khan, A. S. M. Shihavuddin, M. H. Maruf, A. A. Mansur, and M. A. U. Haq, "A novel family of class EF_{nm} and E/F_{nm} inverter for improved efficiency," in *2020 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0(STI)*, Dhaka, Dec. 2020, pp. 1-6.
- [17] J. Ma, Asiya, X. Wei, K. Nguyen, and H. Sekiya, "Analysis and design of generalized class-E/F₂ and class-E/F₃ inverters," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 61277-61288, Mar. 2020.
- [18] J. W. Kim, H. H. Ji, Y. G. Choi, Y. H. Yun, K. H. Kim, and Y. J. Park, "Study on arrangement of self-resonant coils in wireless power transfer system based on magnetic resonance," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 6, pp. 564-572, Jun. 2010.
- [19] Y. Jang, J. Kwon, J. Park, and J. Choi, "Design of a high efficiency resonator for wireless power transfer," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 9, pp. 820-826, Sep. 2011.

남 선 우 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0006-2381-9408>



2014년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)

2017년 1월~현재: 삼성전자

2022년 3월~현재: 성균관대학교 반도체 디스플레이공학과 석사과정

[주 관심분야] RF Power Amplifier, Broadband and Efficiency Enhancement Tech-

niques, Wireless Power Transfer

오 한 식 [삼성전자/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1815-6666>



2016년 2월: 성균관대학교 전자전기공학과 (공학사)

2022년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학박사)

2022년 3월~현재: 삼성전자 책임연구원

[주 관심분야] RF/mm-Wave Power Amplifier, Linearization and Efficiency En-

hancement Techniques

배 순 철 [성균관대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7905-3196>



2019년 8월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)

2021년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)

2022년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정

[주 관심분야] RF/mm-Wave Power Amplifier, Broadband and Efficiency Enhancement Techniques, Wireless Power Transfer

이 윤 정 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0009-0001-7373-6065>



2023년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)

2023년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] RF Power Amplifier, Rectifier, MMIC, Wireless Power Transfer System

빈 수 현 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0009-0007-8821-5442>



2022년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)

2022년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] RF/mm-Wave Power Amplifier, Linearization and Efficiency Enhancement Techniques

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