

부하에 의한 출력 변화가 둔감한 6.78 MHz Class E 전력증폭기 설계

6.78-MHz Class E Power Amplifier with Low Output Power Variation against the Load Impedance Variation

임성현 · 배순철* · 최재혁* · 양영구*

Sunghun Lim · Sooncheol Bae* · Jaehyuk Choi* · Youngoo Yang*

요 약

본 논문에서는 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 이용하여 Class E 전력 증폭기 2개를 Doherty 전력 증폭기 구조처럼 연결하여 6.78 MHz에서 부하에 의한 출력 전력의 변화를 줄이는 증폭기 구조를 설계하였다. 출력 임피던스가 낮게 설계된 Class E 전력 증폭기와 이 증폭기에 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 추가하여 출력 임피던스가 높고, 90° 위상 차이가 나는 Class E 전력 증폭기를 single-ended로 부하에 연결하였다. 각 전력 증폭기는 FAIRCHILD SEMICONDUCTOR사의 FDMC86248를 동일하게 사용하여 효율이 최대인 부하 지점에서 동일한 출력을 내고 부하가 변할 때 하나의 증폭기는 출력이 증가하고, 나머지 증폭기는 출력이 감소하는 동작을 통해 부하 변화에 의한 출력 전력의 변화를 감소시켰다. 부하 변화 구간에서 각 증폭기를 balanced로 구성한 구조 대비 효율은 유지하고 출력 전력의 변화는 16.18~18.46 % 적어지는 시뮬레이션 결과를 얻었다. 부하 구간에서 두개의 전력 증폭기를 모두 사용하는 고전력 모드에서 13.54~21.53 W의 출력 전력 특성과 75.41~80.16 %의 효율특성을 얻었다. 하나의 전력 증폭기만 동작하는 저전력 모드에서 4.67~8.76 W의 출력 전력 특성과 77.89~82.48 %의 효율특성을 얻었다.

Abstract

A power amplifier structure is presented that has a low output power variation against the load impedance variation at 6.78 MHz using two Class E power amplifiers and a $\lambda/4$ transmission line. A Class E amplifier with a low output impedance and another Class E amplifier with a high output impedance are connected in parallel with a phase difference of 90° using a $\lambda/4$ transmission line. Each amplifier generates the same output power under nominal load conditions to achieve the maximum efficiency. The output power variation can be reduced during operation, which increases the output power from one amplifier and decreases the output power from another at the same time when the load impedance is changed from the nominal value. Therefore, the efficiency can be maintained better against the load impedance variation compared with the conventional balanced structure. The experiments show that the proposed structure has an output power variation of 16.18 % - 18.46 % less than that of the balanced structure. For the high-power mode using both power amplifiers, an output power of 13.54 - 21.53 W and an efficiency of 75.41 % - 80.16 % were obtained. An output power of 4.67 - 8.76 W and efficiency of 77.89 % - 82.48 % were obtained in the low-power mode, in which only one power amplifier operates.

Key words: Class E Power Amplifier, Quarter-Wave Impedance Transformer, Output Power Variation, Load Impedance Variation

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

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

· Manuscript received May 19, 2022 ; Revised June 7, 2022 ; Accepted June 21, 2022. (ID No. 20220519-047)

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

I. 서 론

최근 smart phone뿐만 아니라, smart watch 등 다양한 휴대용 전자기기가 보편화되면서 개인이 사용하는 전자 기기가 점점 많아지고 있고, 사용하는 기기의 숫자가 늘어나는 만큼 각 기기를 편리하게 충전하는 방식에 대한 필요성도 늘어나고 있다. 대부분의 기기들은 전통적인 유선 충전 방식으로 충전을 하는데 기기 별로 충전 단자가 다를 수 있어 여러 개의 충전기가 필요할 수 있고, 또 선이 많아지면서 지저분해 보인다는 단점이 있다.

무선 충전은 유선 충전의 단점에 대한 효과적인 대안이 될 수 있다. 하지만 현재 상용화된 kHz 대역의 WPC 방식의 무선 충전은 충전 Pad와 기기와의 거리가 매우 가까워야 동작하기 때문에 충전 중 기기의 사용이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근에는 MHz 대역의 자기공진(magnetic resonant coupling) 방식의 무선 충전에 대한 많은 연구가 진행되고 있고, 충전 효율을 높이기 위해 Class E 증폭기를 Tx에 적용하는 많은 연구가 진행되고 있다^{[1]~[11]}.

Class E 전력 증폭기는 Transistor를 스위치로 사용하는 전력 증폭기로 스위칭될 때의 전압과 전류의 손실을 최소화하는 방식으로 효율을 높이며, 이론적으로는 100 %의 효율을 낼 수 있어 고효율이 필요한 무선 충전에 적합한 전력 증폭기이다^{[12],[13]}. 하지만 Class E 전력 증폭기는 부하 임피던스가 최대의 효율과 출력 전력을 내는 값에서 벗어나게 되면 효율과 출력 전력이 크게 떨어진다는 단점이 있다. MHz 대역의 무선충전 중에는 Rx의 개수와 위치 등에 의해 Tx단의 부하 임피던스가 바뀔 수가 있기 때문에 Class E 전력 증폭기를 MHz 대역의 무선충전 Tx단에 적용하기 위해서는 Tx단의 부하의 값이 변하더라도 일정한 효율과 출력을 유지하는 방법이 필요하며, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다^{[1]~[9]}.

Class E 전력 증폭기의 임피던스 매칭을 통해 부하가 가변될 것으로 예상되는 범위 내에서 증폭기의 효율과 출력이 높게 유지되도록 하는 방법^{[1],[2]}, 임피던스 매칭단을 스위치가 달린 matrix 형태로 구성하고, 부하의 변화에 따라 스위치를 on/off하여 임피던스 매칭을 물리적으로 변경하는 방법^{[3]~[5]}, Rx의 충전 전력을 조절하여 Tx단에

서 바라보는 부하의 값을 적절하게 유지하는 방법^[6] 등의 연구에서 부하의 값이 변하더라도 일정한 효율을 유지할 수 있는 방안을 연구 및 제시하였다. 이러한 방법을 통해 부하의 변화에도 일정 이상의 효율을 유지할 수 있으나, Tx의 출력 전력은 부하에 비례 또는 반비례하여 크게 바뀌는 경향이 있다. Rx의 추가 또는 위치 변화로 인한 부하의 변화로 출력 전력이 크게 증가하면 의도하지 않은 물체에 전력이 유길될 수도 있다 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 부하의 변화에 의한 Tx의 출력 전력의 변화를 상대적으로 둔감하게 만드는 방법이 필요할 수 있다.

본 논문에서는 Class E 전력 증폭기 2개를 사용하여 부하의 변화에 의한 출력 변화를 상대적으로 둔감하게 하는 증폭기 구조를 제안한다. Doherty 전력 증폭기 구조를 참고하여 동일하게 임피던스 매칭된 Class E 전력 증폭기 2개 중 하나의 출력단에 $\lambda/4$ 임피던스 변환기(quarter-wave-length transmission line)를 추가하고, single-ended로 부하에 연결하여 최적의 부하 값에서 부하가 변할 때 하나의 증폭기는 출력 전력이 증가하고, 나머지 증폭기는 출력 전력이 감소하는 방법을 통해 전력 변화를 줄일 수 있다^{[14],[15]}. 제안하는 전력 증폭기를 FAIRCHILD SEMICONDUCTOR사의 FDMC86248 소자를 이용하여 제작하고 실험을 통해 검증하였다. 6.78 MHz에서 측정한 결과를 통해 제안하는 증폭기의 타당성을 증명할 것이다.

II. 설계 및 시뮬레이션

그림 1은 임피던스 매칭이 포함된 Class E 증폭기의 회로도이다. Class E 증폭기는 스위칭 손실을 최소화하여 높은 효율을 얻을 수 있고, 회로의 소자 값은 아래의 공식을 통해서 계산할 수 있다^{[12],[13]}.

$$R_{load} = \frac{8}{\pi^2 + 4} \frac{V_{DD}^2}{P_{out}} \cong 0.5768 \frac{V_{DD}^2}{P_{out}}, \quad (1)$$

$$C_{ds} = \frac{8}{\omega\pi(\pi^2 + 4)R_{load}} \cong \frac{0.1836}{\omega R_{load}}, \quad (2)$$

$$L_s = \frac{\pi(\pi^2 - 4)}{16} R_{load} \cong \frac{1.1525 R_{load}}{\omega}. \quad (3)$$

여기서 ω 는 $2\pi f$ 이고 f 는 동작 주파수이다. 식 (2) 및

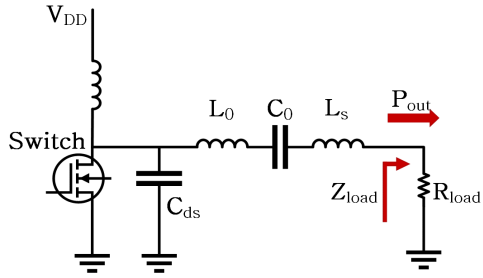


그림 1. 임피던스 매칭이 적용된 Class E 증폭기 회로
Fig. 1. A schematic diagram of the Class E PA with impedance matching network.

식 (3)의 계산에 부하가 사용되기 때문에 Class E 증폭기는 좁은 부하 범위에서 효율과 출력이 높다는 단점이 있고 임피던스 매칭을 추가하여 R_{load} 가 변하더라도 Class E 전력 증폭기가 바라보는 부하인 Z_{load} 를 적절하게 유지하는 방법을 통해 넓은 부하 범위에서 효율을 유지하게 만들 수 있다. 그리고 임피던스 매칭으로 부하와 출력 전력이 비례하도록 조절할 수 있다^{[1][2]}.

그림 2는 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 나타낸다. $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 중심으로 입력 임피던스와 출력 임피던스는 아래와 같은 수식을 만족한다.

$$Z_{in} * Z_{load} = Z_0^2. \quad (4)$$

즉, $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 통해 입력과 출력의 임피던스가 반전될 수 있고, 부하와 출력 전력이 비례하게 임피던스 매칭된 Class E 증폭기에 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 추가하면 출력 임피던스가 반전되고, 부하와 출력 전력이 반비례하며 기존 증폭기와 90° 위상차가 생기게 만들 수

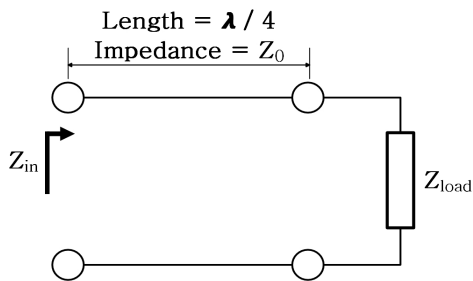
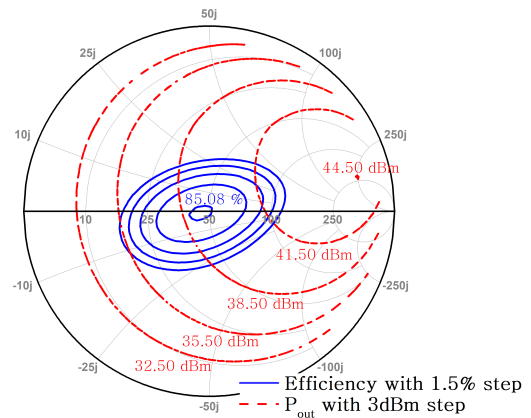


그림 2. $\lambda/4$ 임피던스 변환기
Fig. 2. Quarter-wavelength transmission line.

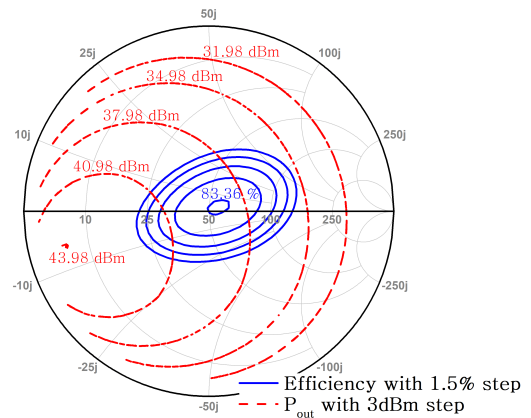
있다. 본 논문에서는 편의상 임피던스 매칭만 적용된 증폭기를 Class E A, 50Ω $\lambda/4$ 임피던스 변환기가 추가된 증폭기를 Class E QWTL이라 표현한다. 그리고 Class E A는 load pull 시뮬레이션을 통해 출력 전력이 부하에 비례하면서 매우 낮은 출력 임피던스를 가지도록 임피던스 매칭을 하였다.

그림 3에서 50Ω , $\lambda/4$ 임피던스 변환기의 효과로 Class E A와 Class E QWTL의 효율 및 출력 전력 contour가 50Ω 을 중심으로 180° 회전된 것을 확인할 수 있다. 제한하



(a) Class E A 전력 증폭기

(a) Class E A power amp



(b) Class E QWTL 전력 증폭기

(b) Class E QWTL power amp

그림 3. 각 전력 증폭기의 효율 및 출력 전력 contour
Fig. 3. Efficiency and output power contours of Class E PA and Class E QWTL PA.

는 구조는 이렇게 설계된 두 증폭기를 Doherty 증폭기 구조처럼 single-ended로 부하에 연결한다.

그림 4는 제안하는 구조의 diagram이다. 두 증폭기는 single-ended 구조로 부하에 연결되어 있기 때문에 각 증폭기의 부하는 전체 부하의 2배로 보이게 되어 $Z_A = Z_A' = Z_{QWTL} = 2Z_{load}$ 가 된다. 그리고 각 증폭기는 $R_{opt} = 50 \Omega$ 에서 최대 효율을 내도록 설계되었기 때문에 제안하는 구조에서는 전체 시스템의 부하 R_{load} 가 $25 \Omega (R_{opt}/2)$ 을 중심으로 $12.5 \Omega (R_{opt}/4)$ 에서 $50 \Omega (R_{opt})$ 까지 변할 때의 특성을 확인한다.

$\lambda/4$ 임피던스 변환기에 의한 임피던스 반전으로 $Z_{QWTL} = R_{opt}^2 / Z_{QWTL} = R_{opt}^2 / (2Z_{load})$ 의 관계가 성립하고, 여기서 R_{opt}^2 은 상수이므로 Z_A 와 Z_{QWTL} 은 각각 부하 Z_{load} 에 비례 및 반비례한다. 각 증폭기는 Z_A , Z_{QWTL} 과 출력 전력이 비례하기 때문에 부하의 변화로 하나의 증폭기의 출력 전력이 증가할 때 다른 증폭기의 출력은 감소하는 동작을 하게 되어 출력 전력의 변화를 줄이는 동작을 하게 된다.

Class E A의 출력 임피던스가 낮기 때문에 $\lambda/4$ 임피던스 변환기가 추가된 Class E QWTL은 높은 출력 임피던스를 가지게 되어 Class E QWTL을 off시키면 거의 open으로 보이게 되고, 이때 Class E A는 전체 시스템의 부하를 그대로 바라보게 되어 $Z_A = Z_{load}$ 의 관계가 성립한다. Class E A는 출력 전력이 부하에 비례하게 설계되어 있는데, Class E QWTL이 off되면 Z_A 의 범위가 $2Z_{load} \rightarrow Z_{load}$ 로 절반이 되기 때문에 부하 Z_{load} 범위에서 Class E A의

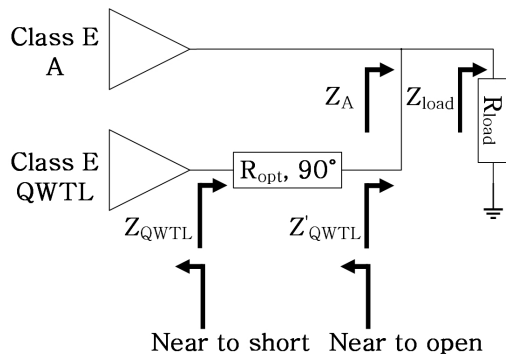
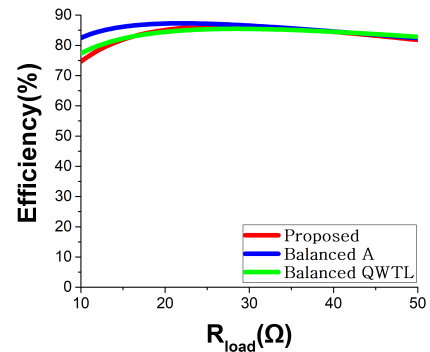


그림 4. 제안하는 구조의 diagram
Fig. 4. Diagram of the proposed structure.

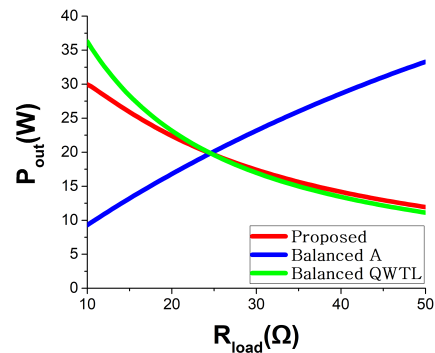
출력 전력을 제한할 수 있다. Class E QWTL의 동작 여부에 따라 높은 출력 전력을 내는 고전력 모드와 낮은 출력 전력을 내는 저전력 모드로 동작할 수 있으며, 출력 전력의 필요량에 따라 동작 모드를 적절히 조절할 수 있다.

제안하는 구조는 Class E 전력 증폭기 2개를 사용한 구조이기 때문에 동일한 조건에서의 비교를 위해 각 증폭기를 balanced로 연결한 구조와 성능을 비교하였다. 본 논문에서는 편의상 Class E A와 Class E QWTL의 balanced 구조를 각각 balanced A, balanced QWTL로 명칭한다.

그림 5는 제안하는 구조와 balanced 구조와의 효율 및 출력 전력의 시뮬레이션 결과이다. 그림 5(a)에서 제안하는 구조는 79.00~86.33 %, balanced A는 82.40~87.27 %, balanced QWTL은 82.40~87.27 %, balanced A와 balanced QWTL은 82.40~87.27 %의 효율을 나타낸다.



(a) 효율
(a) Efficiency



(b) 출력 전력
(b) Output power

그림 5. 제안하는 구조와 balanced 구조의 효율 및 출력 전력 시뮬레이션 비교

Fig. 5. Comparison of efficiency and output power between the proposed and balanced structures.

balanced QWTL은 80.30~85.46 %로 전반적인 효율이 비슷하게 유지가 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)에서 부하 구간에서 출력 전력의 변화를 확인할 수 있는데, 부하가 12.5 Ω 에서 50 Ω 으로 변할 때 출력 전력 차이가 balanced A와 balanced QWTL은 각각 22.00 W, 20.72 W로 출력 전력의 변화가 98.70 %, 96.42 %인 반면, 제안하는 구조의 출력 전력 차이는 16.00 W이고, 출력 전력의 변화는 80.24 %로 balanced 구조 대비 출력 전력의 변화가 16.18~18.46 % 줄어든 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 제안하는 구조의 전체 회로도를 보여준다. 입력 신호는 Wilkinson divider를 통해 동일하게 분배되며, Class E QWTL의 90° 위상 차이를 보상하기 위해 Class E A의 입력에 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 추가하였다. 6.78 MHz에서는 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 전송선로로 구현하기 어렵기 때문에 inductor와 capacitor를 이용한 Π 네트워크로 대체하였다.

III. 제작 및 측정 결과

그림 7은 제안하는 Class E 전력 증폭기의 제작 사진이다. FR4 재질의 PCB를 사용하였으며, 두께는 1.5 mm 이고, PCB의 전체 size는 232.5×93.2 mm²이다. 입력 신호는 Agilent E4438C vector signal generator에서 발생된 신호를 driver amplifier를 통해 증폭하여 사용하였다. Power supply

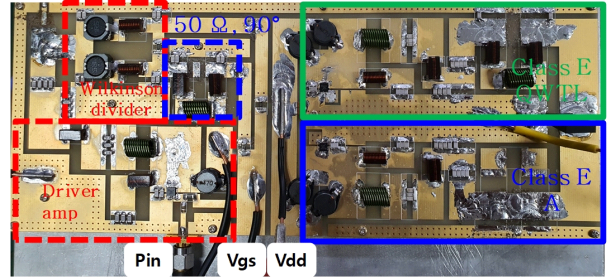


그림 7. 제안하는 Class E 전력 증폭기의 제작 사진
Fig. 7. Photograph of the proposed Class E PA.

장비를 이용하여 gate bias 전압은 2.5 V, V_{dd} 전압은 10 V로 공급하였다. 그리고 부하는 BOURNS사의 50 Ω 저항을 병렬 연결하여 12.5 Ω , 25 Ω , 50 Ω 을 구현하고, Tektronix사의 TDS2024B 오실로스코프를 이용하여 부하에서의 전압 및 출력 전력을 측정하였다.

그림 8은 제안하는 Class E 전력 증폭기의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸다. 그림 8(a)는 Class E A와 Class E QWTL 모두 동작하여 부하 범위에서 높은 전력을 출력하는 고전력 모드로 동작하는 결과이다. 고전력 모드에서는 출력 전력이 부하에 반비례하는 전압 모드의 특징을 가진다. 부하가 12.5 Ω 에서 50 Ω 으로 변하는 범위에서 출력 전력은 13.54~21.53 W로 측정되었으며, 이때 측정된 효율은 75.41~80.16 % 이다. 그림 8(b)는 Class E A만 동작하여 부하 범위에서 낮은 전력을 출력하는 저전력 모

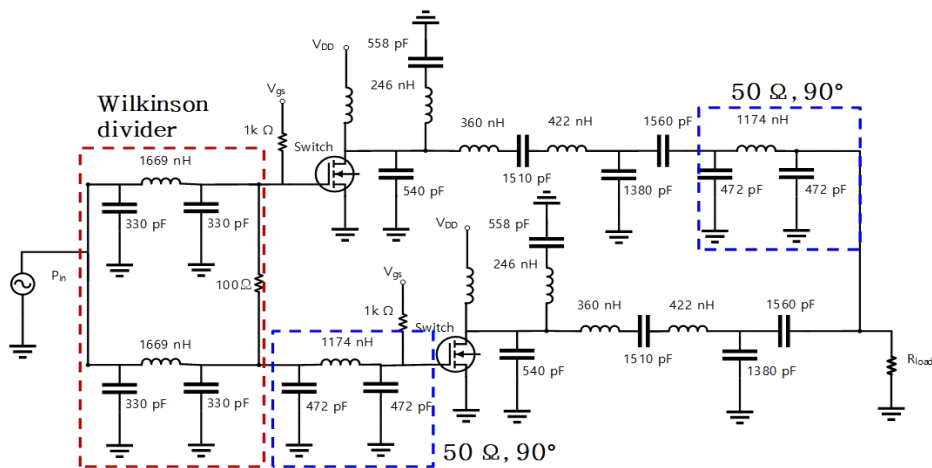
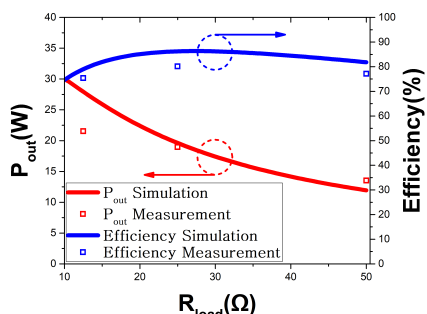
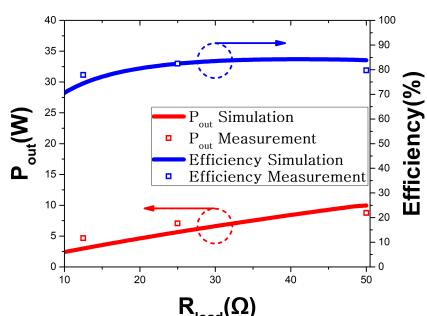


그림 6. 제안하는 구조의 전체 회로도
Fig. 6. Schematic of the overall proposed structure.



(a) 출력 전력과 효율 (고전력 모드)

(a) Output power and efficiency (high power mode)



(b) 출력 전력과 효율 (저전력 모드)

(b) Output power and efficiency (low power mode)

그림 8. 제안하는 구조의 효율 및 출력 전력 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 8. Simulation and measurement result of the proposed Class E PA.

드로 동작하는 결과이다. 저전력 모드에서는 출력 전력이 부하에 비례하는 전류 모드의 특징을 가진다. 부하 범위

에서 출력 전력은 4.67~8.76 W로 측정되었으며, 이때 효율은 77.89~82.48 %로 측정되었다. 표 1과 표 2에서 제안하는 구조의 시뮬레이션과 측정 결과를 비교한 결과를 확인할 수 있다. 그리고 표 3에 이전 연구 결과들과의 성능을 비교 및 정리하였다.

표 1. 출력 전력 변화 비교

Table 1. Comparison of output power variation.

		Efficiency (%)	P_{out} (W)	P_{out} Variation (%)
Balanced A	Simulation	82.40~87.27	11.29~33.29	98.70
Balanced QWTL	Simulation	80.30~85.46	11.00~30.66	96.42
Proposed	Simulation	79.00~86.33	11.94~27.94	80.24
	Measurement	75.41~80.16	13.54~21.53	45.57

표 2. 고전력 모드와 저전력 모드의 시뮬레이션 및 측정 결과 비교

Table 2. Comparison of the high-power mode and low-power mode simulation and measurement results.

		Efficiency (%)	P_{out} (W)
High power mode	Simulation	79.00~86.33	11.94~27.94
	Measurement	75.41~80.16	13.54~21.53
Low power mode	Simulation	74.46~83.83	2.99~9.96
	Measurement	77.89~82.48	4.67~8.76

표 3. 이전 연구 결과들과의 비교

Table 3. Performance comparison to the previous works.

Ref.	Freq. (MHz)	Type of the PA	Supply voltage (V)	Load impedance (Ω)	Efficiency (%)	P_{out} (W)	Transistor device
[1]	6.78	Class E	20	10~100	*80.0~*87.5	*3.0~*22.0	SUD06N10
[2]	6.78	Current mode Class E Voltage mode Class E	25	10~100	*87.0~*95.0 *83.0~*93.0	*3.0~*30.0 *2.0~*16.5	SUD06N10
[9]	**N/A	Class E	5	1~50	61.9~83.3	0.513~1.74	LDMOS
This work	6.78	Class E with Quarter-wave impedance transformer	10	12.5~50	75.41~80.16	13.54~21.53	FDMC86248

* Graphically estimated, ** N/A: not available.

IV. 결 론

본 논문에서는 넓은 부하 범위에서 효율을 유지하는 Class E 전력 증폭기와 해당 증폭기의 출력단에 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 추가한 2개의 Class E 전력 증폭기를 single ended로 부하에 연결하는 구조를 제시하였다. 제안하는 구조는 부하 값이 변화할 때 $\lambda/4$ 임피던스 변환기의 효과로 각 증폭기의 출력 전력이 반대로 동작하게 함으로써 각 증폭기가 balanced로 연결된 구조 대비 효율은 유지하고, 출력 전력의 변화는 감소시킬 수 있다.

시뮬레이션 결과, 6.78 MHz 12.5~50 Ω 의 부하 범위에서 79 % 이상의 효율을 유지하는 특성을 얻었고 부하 범위에서 balanced로 연결된 구조 대비 출력 전력의 변화가 16.18~18.46 % 줄어드는 특성을 얻었다.

그리고 두 가지 증폭기가 모두 동작하는 고전력 모드에서 13.54~21.53 W의 출력 전력과 75.41~80.16 %의 효율을 가지는 특성을 얻었다. 그리고 하나의 증폭기만 동작하는 저전력 모드에서 4.67~8.76 W의 출력 전력에서 77.89~82.48 %의 효율을 가지는 특성을 얻었다.

References

- [1] S. Liu, M. Liu, M. Fu, C. Ma, and X. Zhu, "A high-efficiency class-E power amplifier with wide-range load in WPT systems," in *2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference(WPTC)*, Boulder, CO, May 2015, pp. 1-3.
- [2] 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.
- [3] Y. Lim, H. Tang, S. Lim, and J. Park, "An adaptive impedance-matching network based on a novel capacitor matrix for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4403-4413, Aug. 2014.
- [4] J. Kim, D. H. Kim, and Y. J. Park, "Free-positioning wireless power transfer to multiple devices using a planar transmitting coil and switchable impedance matching networks," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 11, pp. 3714-3722, Nov. 2016.
- [5] H. Oh, W. Lee, H. Koo, J. Bae, K. C. 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.
- [6] M. Fu, H. Yin, M. Liu, Y. Wang, and C. Ma, "A 6.78 MHz multiple-receiver wireless power transfer system with constant output voltage and optimum efficiency," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 6, pp. 5330-5340, Jun. 2018.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] H. G. Park, Y. G. Pu, J. S. Park, S. O. Lim, Y. K. Moon, and S. H. Kim, et al., "A design of class-E power amplifier for wireless power transfer system with automatic power control loop and load compensation circuit," in *International SoC Design Conference(ISOCC 2011)*, Jeju, Nov. 2011, pp. 88-90.
- [10] H. Nawada, Y. Takahashi, K. Hata, T. Imura, H. Fujimoto, and Y. Hori, et al., "Coupling coefficient estimation for wireless power transfer system at constant input power operation," in *2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, London, Jun. 2019, pp. 288-291.
- [11] S. Liu, Y. Feng, H. Chen, J. Wu, and X. He, "Multi-coil constant voltage output analysis based on state deconstruction for wireless power transfer system," in *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*

(ECCE), Vancouver, BC, Oct. 2021, pp. 5704-5708.

- [12] N. O. Sokal, A. D. Sokal, "Class E-A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 10, no. 3, pp. 168-176, Jun. 1975.
- [13] A. Grebennikov, N. O. Sokal, and M. J. Franco, *Switch-mode RF and Microwave Power Amplifiers*, 2nd ed. Oxford, Elsevier, pp. 245-256, 2012.

[14] B. Kim, *Doherty Power Amplifiers: From Fundamentals to Advanced Design Methods*, London, Academic Press, pp. 22-23, 2018.

- [15] G. W. Choi, H. J. Kim, W. J. Hwang, S. W. Shin, J. J. Choi, and S. J. Ha, "High efficiency class-E tuned Doherty amplifier using GaN HEMT," in *2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, Jun. 2009.

임 성 헌 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6415-8830>



2013년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)
2013년 1월~현재: 삼성전자
2021년 3월~현재: 성균관대학교 DMC공학과 석사과정
[주 관심분야] RF Power Amplifier, Efficiency Enhancement Techniques

최 재 혁 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4835-0400>



2022년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)
2022년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] RF/mm-Wave Power Amplifier, Linearization and Efficiency Enhancement Techniques

배 순 철 [성균관대학교/박사과정]

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



2019년 8월: 성균관대학교 전자공학부 (공학사)
2019년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
[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 정보통신공학부 교수
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 무선통신 송/수신기시스템 설계, 비선형회로 분석 및 시뮬레이션 기법