

부하 임피던스 변화에 따른 6.78MHz 전류모드 D급 전력증폭기 특성 해석

Performance Analysis of 6.78MHz Current Mode Class D Power Amplifier According to Load Impedance Variation

고석현 · 박대길 · 구경현*

인천대학교 전자공학과

Seok-Hyeon Go · Dae-kil Park · Kyung-Heon Koo*

Dept. of Electronics Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012, Korea

[요 약]

본 논문은 6.78 MHz 무선전력전송 송신기의 전송 효율을 높이고 송수신 코일 간격 변화에도 안정적 특성을 확보하기 위해 전류 모드 클래스 D 전력증폭기를 설계한다. 선형증폭기의 이론적인 효율을 제한하는 트랜지스터의 기생 커패시터 성분에 의한 손실을 적게 만들어 전력증폭기의 효율을 향상시킨다. 회로 설계 시뮬레이터를 이용하여 고효율 증폭기를 설계하고 부하 임피던스 변화에 따른 전력 출력, 효율 특성을 시뮬레이션하여 검증하였다. 시뮬레이션에서 DC 바이어스 30 V일 때 42.1 dBm의 출력과 95%의 효율을 갖도록 설계하였다. 전력증폭기를 제작하여 42.1 dBm (16 W)의 출력에서 91%의 효율을 보였다. 드론 무선전력전송에 적용될 송수신 코일을 제작하였으며, 송수신 코일 간격에 따른 부하변화에 따라 전력부가효율이 최대 88%이고 출력전력 42.1 dBm \pm 1.7 dB의 특성을 나타내었다.

[Abstract]

This paper has designed a current mode class D power amplifier to increase the transmission efficiency of a 6.78 MHz wireless power transfer (WPT) transmitter and to ensure stable characteristics even when the transmitting and receiving coil intervals change. By reducing the loss due to the parasitic capacitor component of the transistor, which limits the theoretical efficiency of the linear amplifier, this research has improved the efficiency of the power amplifier. The circuit design simulator was used to design the high efficiency amplifier, and the power output and efficiency characteristics according to the load impedance change have been simulated and verified. In the simulation, 42.1 dBm output and 95% efficiency was designed at DC bias 30 V. The power amplifier was fabricated and showed 91% efficiency at the output of 42.1 dBm (16 W). The transmitting and receiving coils were fabricated for wireless power transfer of the drone, and the maximum power added efficiency was 88% and the output power was 42.1 dBm \pm 1.7 dB according to the load change causing from the coil intervals.

Key word : Class D current mode power amplifier, Wireless power transfer, Load variation, Drone.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.2.166>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 21 February 2019; Revised 5 April 2019

Accepted (Publication) 23 April 2019 (30 April 2019)

*Corresponding Author; Kyung Heon Koo

Tel: +82-32-835-4766

E-mail: khkoo@inu.ac.kr

1. 서론

전력증폭기는 전송시스템에서 시스템 효율을 결정하는 중요한 구성요소이다. 송신기에서 효율이 낮은 전력 증폭기를 사용하면 동작 시 발생하는 열이 증폭기뿐만 아니라 인접 회로에 영향을 주게 되어 효율과 성능 저하에 주된 원인이 된다. 이에 전력 증폭기의 효율을 개선하는 다양한 연구들이 진행되어 왔다 [1].

스위치 모드 전력 증폭기를 이용하면 트랜지스터에 인가되는 전압과 전류 파형의 곱이 0이 되는 특성을 갖기 때문에 트랜지스터에서 소모되는 전력이 0이 되어 이론적으로 100%의 효율을 보인다. 하지만 트랜지스터에 존재하는 기생성분의 영향으로 이론적인 고효율을 얻을 수 없고 동작주파수가 증가함에 따라 기생성분에 의한 손실이 증가하여 높은 주파수 대역에서는 사용이 제한된다.

Class E 전력 증폭기는 사용의 편의성, 발열 방지, 간단한 구조 등으로 무선전력전송 시스템용 증폭기로 많은 관심을 받았지만 다른 전력 증폭기들에 비해 높은 출력 전력을 구현하기 어렵고 높은 드레인 소스 피크 전압을 갖게 되어 높은 항복 전압을 갖는 스위치 소자가 필요한 단점이 있다 [2]. Class E 전력 증폭기와 달리 class D는 부하 임피던스가 증가할 때 출력 전류가 감소하여 트랜지스터의 손실이 상대적으로 감소하는 특성이 있어 부하 임피던스 변화에 따른 효율변화가 적다. 전류모드 class D 전력증폭기는 고효율 특성을 갖고 기생성분 손실도 매우 작아 RF대역에 적용할 수 있다. 본 논문에서는 전류모드 D급 (CMCD; current mode class D) 전력 증폭기를 설계하여 고효율의 특성을 갖고 부하 변화에도 안정적으로 동작하며 드론용 무선전력전송시스템에 적용 하고자 한다 [3].

II. 스위치 모드 전력 증폭기

2-1 전압모드 class D 전력증폭기

전압모드 D급 (VMCD; voltage mode class D)는 두 개의 트랜지스터를 각각 동작시키기 위해 180°의 위상차를 갖고 트랜지스터를 온-오프 한다. 이를 통해 드레인 전압파형이 구형파가 되도록 설계하고 로드와 연결되는 직렬공진회로를 통하여 원하는 주파수 성분만 부하에 전달한다. 트랜지스터가 이상적인 스위치로 동작하는 경우 이론적으로 100%의 효율을 나타내나 실제로는 기생 커패시터(C_{DS})에 의해 효율이 저하된다. 기생 커패시터 C_{DS} 의 영향으로 주파수에 비례하여 사용 대역이 증가할수록 큰 출력 손실이 발생한다.

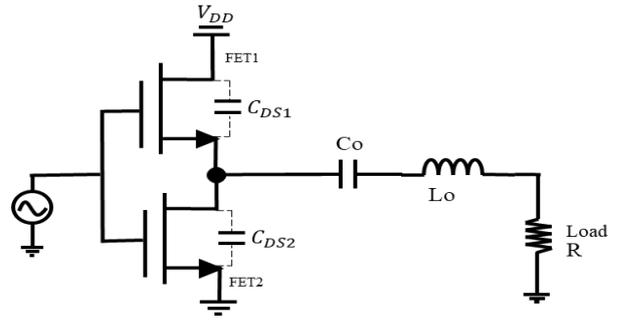


그림 1. Voltage mode class D 전력증폭기 회로
Fig. 1. Voltage mode class D power amplifier circuit.

다음 식(1)은 각 트랜지스터에 존재하는 기생 커패시터 C_{DS1}, C_{DS2} 를 스위치 동작 주기 당 전압 V_{DD} 에 의해 하나의 트랜지스터에 발생하는 충, 방전에 의한 에너지 손실 E_L 을 나타낸다 [4].

$$E_{L1} = 2 \left[\frac{1}{2} C_{DS1} \cdot (2V_{DD})^2 \right] \quad (1-a)$$

$$E_{L2} = 2 \left[\frac{1}{2} C_{DS2} \cdot (2V_{DD})^2 \right] \quad (1-b)$$

각 소자의 출력단에 존재하는 커패시터 성분이 같다고 가정했을 때 스위치 On 일 때 발생하는 전력 손실 P_{Loss} 는 다음과 같다.

$$P_{Loss} = (E_{L1} + E_{L2}) \cdot f \quad (2)$$

$$= 8 \cdot (C_{DS1} + C_{DS2}) \cdot (V_{DD})^2 \cdot f$$

식 (2)에서 알 수 있듯이 출력단 기생 커패시터 성분은 RF대역에서 D급 전력증폭기의 고효율 특성을 악화하는 주된 요소이다. 이 성분들에 의한 출력 전력의 손실을 개선하는 방안으로 전류모드 D급 전력증폭기를 제안하여 설계하였다.

2-2 전류모드 class D 전력증폭기

전류모드 D급 전력 증폭기는 전압 모드 D급 전력증폭기의 기생 커패시터로 인한 손실 저하를 해결하는 방안으로 트랜지스터를 전압원 대신 전류원으로 사용하여 전류가 스위칭을 제어한다. 출력부를 병렬공진회로로 구성하고 공진회로 설계 시 기생 커패시터 C_{DS} 를 뺀 값으로 설계하면 공진회로에 흡수되어 트랜지스터 스위칭 시간에 전압 강하가 발생하지 않게 되어 손실을 최소화하고 고효율 설계가 가능하다.

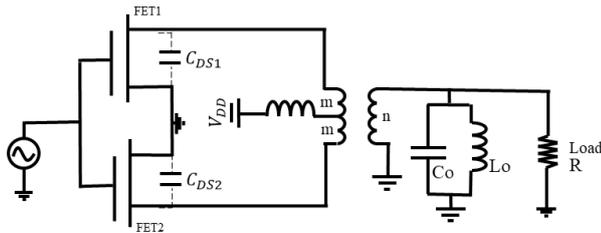


그림 2. Current mode class D 전력증폭기의 회로
 Fig. 2. Current mode class D power amplifier circuit

이상적인 경우 트랜지스터의 드레인-소스 전압 V_{DS} 에 대한 정현 반파의 진폭 V_p 를 수식(3),(4)에 나타낸다. 이 때 로드 저항 R에 전달되는 전력 P_L 은 식(5)와 같이 나타낸다.

$$\int_0^T V_{DS}(t)dt = \int_0^{\frac{T}{2}} V_p \sin(\omega t) dt = T \cdot V_{DD} \quad (3)$$

$$V_p = \pi V_{DD} \quad (4)$$

$$P_L = \frac{(\pi V_{DD})^2}{2R} \quad (5)$$

위 식들을 통해 V_{DD} 와 P_L 값을 통해 로드 저항 R을 정의한다. 출력부의 병렬공진회로의 Q 값은 식(7)과 같고 식(6)와 식(7)을 통해 공진회로의 식(8)의 커패시터 C_o 값과 식(9)의 공진 주파수 ω_o , 식(10)의 공진회로의 인덕터 L_o 값을 얻을 수 있다.

$$R = \frac{(\pi V_{DD})^2}{2P_L} \quad (6)$$

$$Q = \omega_o RC_o \quad (7)$$

$$C_o = \frac{Q}{\omega_o R} \quad (8)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_o C_o}} \quad (9)$$

$$L_o = \frac{1}{\omega_o^2 C_o} \quad (10)$$

스위칭 소자의 경우 기생 커패시터 C_{DS} 를 갖기 때문에 전류모드 D급 전력증폭기에서는 C_{DS} 가 출력단 병렬공진회로에 흡수되도록 설계하며, 이를 통해 RF대역에서도 높은 효율을 구현하고 트랜지스터의 출력단에 존재하는 인덕터 성분에 의한 손실은 피할 수 없지만 출력단 커패시터에 의한 소모량에 비해 상대적으로 최소화 할 수 있다. 전류모드 D급 전력 증폭기는 트랜스포머를 사용하여 푸시풀 구조로 RF대역에서도 활용이 가능하다는 장점을 가진다 [5].

III. 전력증폭기 설계 및 시뮬레이션

3-1 CMCD 전력증폭기 설계

6.78 MHz 주파수에서 전류모드 class D 전력증폭기를 Freescale 반도체의 LDMOS소자 2 개를 이용하여 설계하였다. 이 소자는 동작주파수 6.78 MHz에서 최대 출력 25 W를 갖고 있다. WPT대역에서 LDMOS는 GaN이나 HEMT보다 저렴한 비용으로 대량생산에 적합하다 [6]. DC공급선에 이용되는 RF choke는 fair-rite products의 ferrite core를 이용하여 제작하였고 입력단 트랜스포머는 macom의 1:1트랜스포머를 사용하였다. 출력단의 트랜스포머는 fair-rite products의 ferrite core를 사용하였다.

3-2 CMCD 전력증폭기 시뮬레이션

전류모드 전력 증폭기 설계를 위해 advanced design system 회로 설계 시뮬레이터를 이용하였으며 설계된 전력증폭기 회로도를 그림 4에 나타내었다. 병렬공진회로의 커패시터 C_o 와 인덕터 L_o 값은 식(6)-(10)을 이용하여 결정하였다. L1과 L2는 choke 인덕터로 AC전류를 차단한다. C2, C3는 bypass 커패시터로 DC는 차단하고 AC만 통과시켜 DC의 역류를 제어한다.

전력증폭기에 V_{dd} 는 30 V, V_{gg} 는 2.35 V로 인가하였으며, 입력전력을 0 dBm에서 20 dBm까지 변화시켰을 때의 출력 전력과 전력부가효율 (PAE; power added efficiency) 시뮬레이션 결과를 그림 5에 나타내었다. 입력 17 dBm 일 때 출력 42.1 dBm에 포화되며 이때의 PAE는 95%이다.

입력 전력 20 dBm을 인가했을 때 드레인 전압 및 전류의 파형을 구하였으며, 전류모드 class D 전력증폭기의 이상적인 특징인 정현 반파의 전압 파형과 구형파의 전류 파형을 그림 6에서 확인할 수 있다.

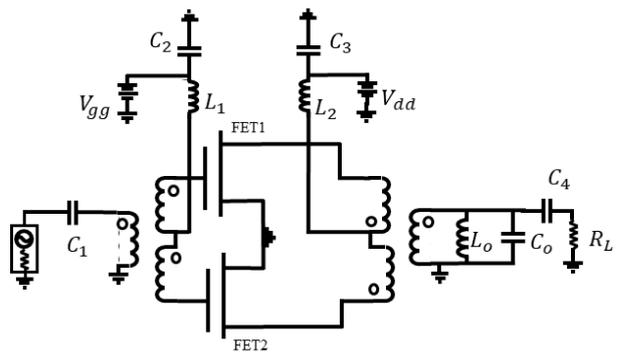


그림 3. 설계된 16 W급 전류모드 D급 전력증폭기 회로도
 Fig. 3. A schematic diagram of the 16 watt CMCD power amplifier.

부하 임피던스가 50 Ohm일 경우 PAE 95%, 출력전력 42.1 dBm인 설계 회로를 기준으로 부하 임피던스를 0~100 Ohm으로 변화시킬 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 7에 제시하였다. 30 Ohm부터 90%이상의 높은 효율을 유지하고 출력전력의 변화가 ± 1.5 dB 이내 인 것을 알 수 있었다.

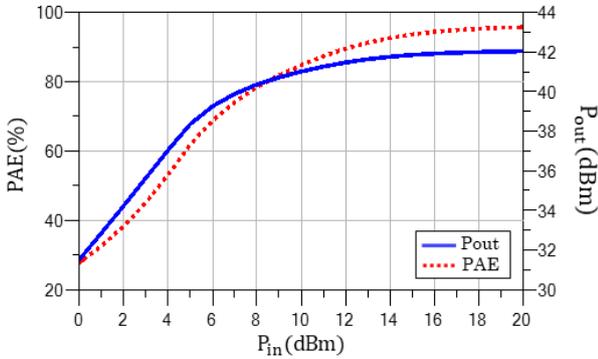


그림 4. 입력전력에 따른 PAE, Pout 시뮬레이션
Fig. 4. PAE and Pout simulation according to input power

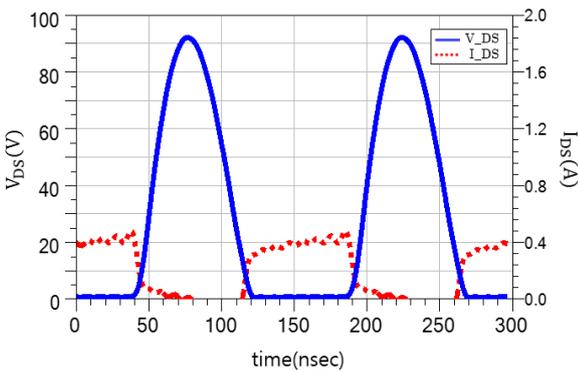


그림 5. FET1 드레인 전압과 전류의 파형 시뮬레이션
Fig. 5. Simulated waveform of FET1 drain voltage and current.

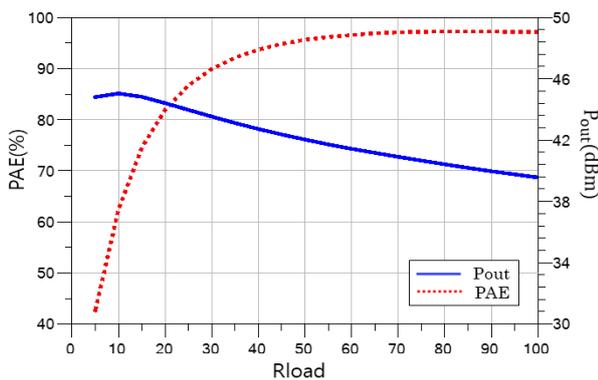


그림 6. 로드 임피던스 변화에 따른 전력부가효율 및 출력전력
Fig. 6. Power added efficiency and output power due to load impedance change.

IV. 전력증폭기 제작 및 측정

4-1 전력증폭기 제작 및 측정

제작된 6.78 MHz 16 W급 전류모드 Class D 전력 증폭기의 사진을 그림 8 에 제시하였다. 기판은 FR4로 제작하였으며, PCB 뒷면에 방열구조 금속판을 부착하여 고출력으로 인한 발열 특성을 줄였다. 입, 출력 단의 choke 인덕터는 출력 시 발열을 고려하여 페라이트 코어로 제작하였고 각각 투자율은 640, 2300이다. 입력단 트랜스포머는 0.1-200 MHz에서 50 Ohm의 특성 임피던스를 갖고 최대 RF power 250 mW, DC current 30 mA를 갖는 1:1 트랜스포머를 사용하였다. 출력단의 트랜스포머에 사용되는 페라이트 코어는 투자율 125, inductor factor $A_L = 75$ nH (L/turn²)를 가진다. 0.4 mm의 에나멜 동선으로 입력에 8 턴, 출력에 6.5 턴으로 권선비는 약 1:0.8 비율로 제작하였다 [7]. 병렬공진회로의 병렬 인덕터는 0.6 mm의 에나멜 동선으로 5 mm의 지름에 14 턴으로 에어코일을 제작하였다.

제작된 전류모드 Class D 전력 증폭기의 입력 전력에 따른 PAE와 출력 전력 측정값을 그림 9에 제시하였다. 입력 전력 16 dBm 이상에서는 90%이상의 PAE를 보이며 25.8 dB의 전력 이득과 41.8 dBm (15 W) 의 출력 전력을 나타낸다.

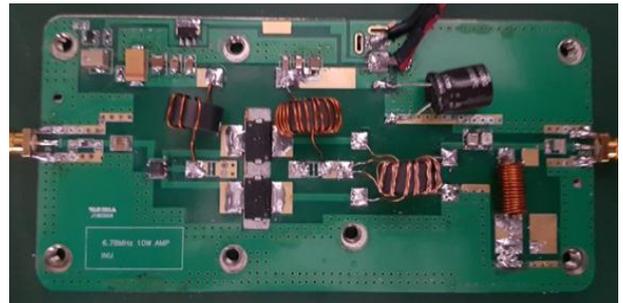


그림 7. 제작된 16 W 전류 모드 D급 전력증폭기
Fig. 7. Implemented 16 watt CMCD power amplifier.

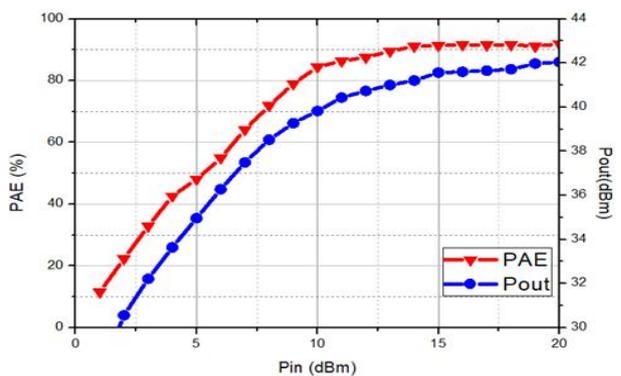


그림 8. 입력전력에 따른 PAE, Pout 측정값
Fig. 8. PAE and Pout measurement according to input power.

4-2 송수신 코일 간격 변화에 따른 임피던스 측정

설계된 전력증폭기를 무선전력전송에 적용시키기 위하여 동일한 모양의 송수신 코일을 60x80 mm²의 면적에 구리선을 사용하여 그림 10과 같이 제작하였다. 도선 간의 폭은 5 mm으로 총 8턴으로 제작하였다.

표 1,2은 무선전력전송에 적용할 코일 간 20 mm 간격에서 입력반사계수 S11을 네트워크 분석기를 이용하여 측정하였다. 송수신 코일의 중심이 어긋나 x축으로 25 mm, y축으로 30 mm 범위에서 변화할 때 -10 dB 보다 작은 값을 갖는 것을 확인하였다. 측정된 송수신 코일의 간격 변화에 의한 부하 임피던스 변화량은 약 25~60 Ohm 이다.

위와 같이 부하 임피던스 변화를 갖도록 전력증폭기와 송신 코일을 연결하고 수신 코일을 송신 코일과 20 mm 떨어진 높이에서 x, y축으로 이동할 때 출력전력과 전력부가효율을 측정하였다. 42.1 dBm을 기준으로 ±1.7 dB 이내의 출력전력을 보이고 PAE는 최대 88%를 유지하였다.

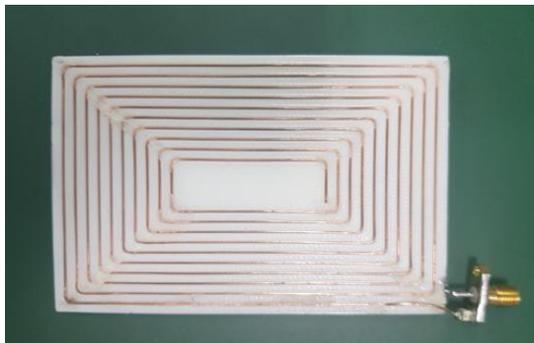


그림 9. 제작된 60x80 mm² 송신 및 수신 코일
 Fig. 9. Manufactured 60x80 mm² transmit and receive coils.

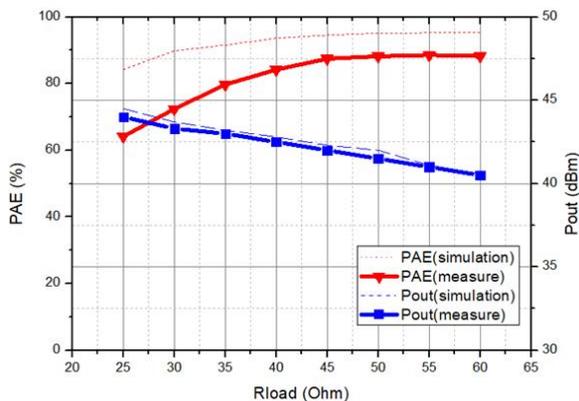


그림 10. Rload 변화에 따른 PAE, 출력 전력
 Fig. 10. PAE, load variation with output power.

표 1. 송수신 코일 20 mm간격에서의 x축 변화량에 따른 S11
 Table 1. S11 according to x-axis variation with 20mm separation of Tx and Rx coils.

x(mm)	0	4	8	12	16	20	24	28
S11(dB)	-14	-16.5	-17.8	-19	-16.8	-15	-11.8	-7.2

표 2. 송수신 코일 20 mm간격에서의 y축 변화량에 따른 S11
 Table 2. S11 according to y-axis variation with 20mm separation of Tx and Rx coils.

y(mm)	0	5	10	15	20	25	30	35
S11(dB)	-14	-16.5	-19	-17	-14	-11	-9.7	-6.2

V. 결 론

본 논문에서는 6.78 MHz 무선전력전송용 고효율 전류모드 D급 전력증폭기를 설계하였다. 시뮬레이션 결과, 6.78 MHz 주파수에서 입력 전력 17.0 dBm에서 25.1 dB의 전력 이득을 가지며, 42.1 dBm의 출력 전력, PAE 95%의 특성을 나타내었다. 실험을 통해 포화 전력에서는 소자가 스위칭 동작으로 고효율을 보이고 D급 전력 증폭기의 특성을 갖는 것을 확인하였다. 전력전송용 송수신 코일의 중심축이 어긋날 수 있는 드론의 무선전력전송에 적용하기 위하여 크기 60x80 mm²의 송수신 코일을 제작하여 송수신 코일 간격 20 mm에서 송신 및 수신 코일이 가로, 세로축으로 각각 25 mm, 30 mm의 범위에서 벗어나는 경우 입력반사계수 크기는 -10.0 dB 보다 작으며 이때의 출력 임피던스는 25~60 Ohm 범위에 있음을 측정으로 확인하였다. 전력증폭기를 이러한 송수신 코일의 변화를 갖는 경우에 측정하였을 때 88%의 효율과 42.1 dBm ± 1.7 dB 특성을 나타내어 향후 드론용 무선전력전송에 적용될 수 있다고 사료된다.

Acknowledgements

본 연구는 인천대학교 자체과제(2018-0366)에 의하여 수행된 결과의 논문입니다.

References

- [1] J. Walker, *Handbook of RF and microwave power amplifiers*, 1-st ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.
- [2] P. Srimuang, N. Puangngernmak, and S. Chalermwisutkul, "13.56 MHz class E power amplifier with 94.6% efficiency and 31 watts output power for RF heating applications," in *2014 11th International Conference on Electrical*

Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Nakhon Ratchasima: Thailand, pp. 1-5, 2014.

[3] T. P. Hung, "Design of high-efficiency current-mode class-D amplifiers for wireless handsets," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 53, No. 1, pp. 144-151, Jan. 2005.

[4] H. Kobayahshi, J. M. Hinrichis, and P. M. Asbeck, "Current-mode class D RF power amplifier for high efficiency RF application," *IEEE Transaction Microwave Theory and Techniques*, Vol. 49, No. 2, pp. 2480-2485, Dec. 2001.

[5] E. I. Hamamsy, "Design of high-efficiency RF class-D power amplifier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 9, No. 3, pp. 297-308, May. 1994.

[6] J. U. Mohammed and Z. R. Syed, "Performance analysis of high frequency BJT and LDMOS current mode class-D power amplifier," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, No 6, Jun. 2013.

[7] P. J. Gómez, "Analysis and design procedure of transmission-line transformers," *IEEE Transaction Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56, No. 1, pp. 163-171, Jan. 2008.

[8] M. C. Seo, J. B. Jeon, I. H. Jung, and Y. G. Yang, "Design of high-efficiency current mode class-D power amplifier using a transmission-line transformer and harmonic filter at 13.56 MHz," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 23, No. 5, pp. 624-631, May. 2012.

[9] D. Rooij and A. Michael, "The ZVS voltage-mode class-D amplifier, an eGaN® FET-enabled topology for highly resonant wireless energy transfer," in *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Charlotte: NC, pp. 1608-1613, 2015.

[10] C. Wang and Z. Ma, "Design of wireless power transfer device for UAV," in *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin: China, pp. 2449-2454, 2016.



고 석 현 (Seok Hyeon Go)

2018년 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)
 2018년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 대학원 석사 과정
 ※관심분야 : RF 회로 및 모듈설계, 무선통신 시스템 등



박 대 길 (Dae Kil Park)

2014년 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)
 2016년 : 인천대학교 전자공학과 (공학석사)
 2016년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 대학원 박사 과정
 ※관심분야 : RF 회로 및 모듈설계, 무선전력전송, 무선통신시스템 등



구 경 현 (Kyung Heon Koo)

1981년 : 서울대학교 전자공학과 (공학사),
 1991년 : 서울대학교 전자공학과 (공학박사),
 1987년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
 1998년 ~ 현재 : 한국항행학회 이사, 연구회 위원장, 회장, 명예회장
 ※관심분야 : RF 회로 및 모듈설계, 무선통신 시스템, 차세대 항행시스템 등

1983년 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 ~ 2000년 : UC San Diego 방문학자