

# 고효율 Class F와 Inverse Class F 전력 증폭기의 파형 분석과 실험을 통한 효율 비교

우영윤, 양영구, 김범만

포항공과대학교 전자 전기 공학과

tel) 054-279-5584 / fax) 054-279-5584

## Efficiency Comparison Between Class F and Inverse Class F power amplifiers Based on Waveform Analysis and Experiments

Young Yun Woo, Youngoo Yang, and Bumman Kim

Department of Electronic and Electrical Engineering and Microwave Application Research center,

Pohang University of Science and Technology

E-mail: Oyun@postech.ac.kr

### Abstract

In this paper, we have presented efficiency comparison between class F and inverse class F power amplifiers. First, we have analyzed the power performances of the class F and inverse class F power amplifiers by using their waveforms. And we have calculated the efficiencies, output powers, and DC power dissipations. These analyses show that inverse class F amplifier has higher efficiency than class F due to its large voltage swing. Also, we have designed and implemented 1 GHz class F and inverse class F amps and have compared their performances experimentally.

### I. 서론

최근 무선 통신 시스템에서는 셀룰러 폰의 크기와 무게의 축소에 대한 연구가 토력이 되고 있다. 이를 위해서는 직류 전원 효율의 극대화를 위한 고효율의 RF 전력 증폭기가 요구된다. 고효율 증폭기의 대표적인 경우가 Class F 증폭기이며[1], 이 증폭기의 동작 원리는 그림1에서와 같이 짝수차 harmonic 성분을 단락시키고 홀수차 harmonic 성분을 개방시켜 전류와 전압의 파형을 강제로 변형시키는 것이다[2],[3]. 최근에는 이 기술에 상반되는 기술인 홀수차 harmonic 성분을 단락시키고 짝수차 harmonic 성분을 개방시키는 Class F<sup>-1</sup> 전력증폭기가 Class F 증폭기보다 더 높은 효율을 가진다는 발표들이 있었다[4],[5]. (단, 이상적인 경우는 두 효율 모두가 100%이다.) 그러나 Class F<sup>-1</sup>가 더 높은 효율을 가지는 원인에 대해선 아직 정확한 분석이 없다. 본 논문에서는 Class F<sup>-1</sup> 전력

증폭기가 왜 더 높은 효율을 가지는지에 대해서 같은 직류전원의 두 증폭기를 파형 분석, 비교하여 구체적으로 밝혔으며, 이를 simulation과 실험을 통해 검증하였다.

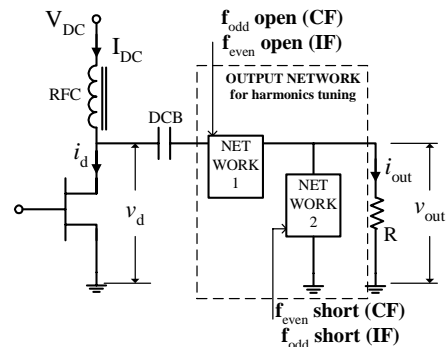


그림 1. Class F와 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 harmonics 제어를 위한 출력단 등가회로 (CF: F, IF: F<sup>-1</sup>)

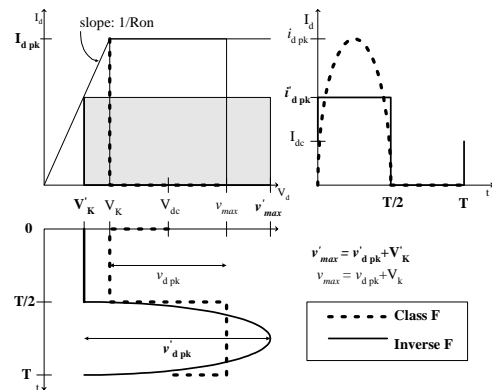


그림 2. 이상적인 Class F과 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 파형과 loadline 비교

## II. 두 증폭기의 파형분석

그림 2는 같은 직류 전원 조건에서 이상적인 Class F, Class F<sup>-1</sup> 전력증폭기의 loadline과 출력 전류(I<sub>ds</sub>), 출력 전압(V<sub>ds</sub>)의 파형을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 Class F에 비교되는 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 두드러지는 차이점은 전압의 최고 값(v<sub>max</sub>)은 더 크고, 전류의 최고값(i<sub>peak</sub>)은 더 작다는 것이다. 이로 인해 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 knee 전압이 Class F보다 작게 되고, 이것이 Class F<sup>-1</sup>의 효율을 높이게 하는 요인이 된다. 이것에 대해선 아래 분석에서 수식적인 증명을 할 것이다.

그림을 다시 분석하면 Class F 증폭기의 I<sub>ds</sub>와 V<sub>ds</sub>는 각각 halfsine파와 사각파이며, 이는 짝수차 harmonic을 단락시키고, 홀수차 harmonic을 개방시키는 것에 의한 결과이다. 이 I<sub>ds</sub>와 V<sub>ds</sub>는 파형의 Fourier series 변환에 의해 아래와 같아지며, 각각 DC, RF 성분을 추출할 수 있다.

$$I_{ds} = i_{d\_peak} \left( \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin w_0 t - \frac{2}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2-1} \cos n w_0 t \right) \quad (1)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{\pi} i_{d\_peak} \quad (2)$$

$$I_{RF} = i_{d\_peak} \left( \frac{1}{2} \sin w_0 t \right) \quad (3)$$

$$V_{ds} = V_K + v_{d\_peak} \left( \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sin w_0 t - \frac{2}{\pi} \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n w_0 t \right) \quad (4)$$

$$V_{dc} = V_K + \frac{1}{2} v_{d\_peak} \quad (5)$$

$$V_{RF} = v_{d\_peak} \left( \frac{2}{\pi} \sin w_0 t \right) \quad (6)$$

또한 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 I<sub>ds</sub>와 V<sub>ds</sub>는 Class F와는 반대로 각각 사각파와 halfsine파이며, 이는 홀수차 harmonic을 단락시키고 짝수차 harmonic을 개방시키는 것에 의한 결과이다. 이 I<sub>ds</sub>와 V<sub>ds</sub>의 분석은 아래와 같다.

$$I'_{ds} = i'_{d\_peak} \left( \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin w_0 t + \frac{2}{\pi} \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n w_0 t \right) \quad (7)$$

$$I'_{dc} = \frac{1}{2} i'_{d\_peak} \quad (8)$$

$$I'_{RF} = i'_{d\_peak} \left( \frac{2}{\pi} \sin w_0 t \right) \quad (9)$$

$$V'_{ds} = V'_K + v'_{d\_peak} \left( \frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \sin w_0 t + \frac{2}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2-1} \cos n w_0 t \right) \quad (10)$$

$$V'_{dc} = V'_K + \frac{1}{\pi} v'_{d\_peak} \quad (11)$$

$$V'_{RF} = v'_{d\_peak} \left( -\frac{1}{2} \sin w_0 t \right) \quad (12)$$

위의 분석한 식 (1)~ 식(12)에 의해 Class F와 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 DC 소모 전력(P<sub>DC</sub>), RF 전력(P<sub>RF</sub>), 효율(PAE (power added efficiency) )을 다음과 같이 표현할 수 있다.

Class F 증폭기에서

$$P_{dc} = I_{dc} \cdot V_{dc} = \frac{i_{d\_peak}}{\pi} \left( V_K + \frac{v_{d\_peak}}{2} \right) \quad (13)$$

$$P_{RF} = \frac{1}{2} I_{RF} \cdot V_{RF} = \frac{i_{d\_peak} \cdot v_{d\_peak}}{2\pi} \quad (14)$$

$$\eta_{PAE} = \left( 1 - \frac{1}{G} \right) \frac{P_{RF}}{P_{dc}} = \left( 1 - \frac{1}{G} \right) \frac{\frac{v_{d\_peak}}{2}}{V_K + \frac{v_{d\_peak}}{2}} \quad (15)$$

이다.

Class F<sup>-1</sup> 증폭기에서는

$$P'_{dc} = \frac{i'_{d\_peak}}{2} \left( V'_K + \frac{v'_{d\_peak}}{\pi} \right) \quad (16)$$

$$P'_{RF} = \frac{i'_{d\_peak} \cdot v'_{d\_peak}}{2\pi} \quad (17)$$

$$\eta'_{PAE} = \frac{\frac{v'_{d\_peak}}{\pi}}{V'_K + \frac{v'_{d\_peak}}{\pi}} \quad (18)$$

이다.

위의 식에서 G는 증폭기의 이득이며, V<sub>K</sub>는 knee 전압이다. 만약 G가 무한대가 되고 V<sub>K</sub>가 0로 된다면, 즉 두 증폭기가 이상적이라면, 효율(PAE)은 둘 다 100%이다.

위에서 가정했듯이 두 증폭기의 직류 전원 I<sub>dc</sub>, V<sub>dc</sub>를 같게 놓으면 ((2)=(8), (5)=(11)), 아래와 같은 식 (19), 식 (20)이 유도된다.

$$I_{dc} = \frac{1}{\pi} i_{d\_peak} = \frac{1}{2} i'_{d\_peak} \quad (19)$$

$$\rightarrow i'_{d\_peak} = \frac{2}{\pi} i_{d\_peak}$$

$$V_{dc} = V_K + \frac{1}{2} v_{d\_peak} = V'_K + \frac{1}{\pi} v'_{d\_peak} \quad (20)$$

$$\rightarrow v'_{d\_peak} = \pi(V_K - V'_K + \frac{1}{2} v_{d\_peak})$$

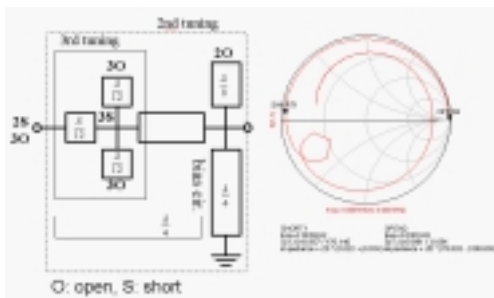
이 식 (19), (20)을 이용하여, Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 P<sub>RF</sub>, PAE를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P'_{RF} &= \frac{I'_{d\_peak} \cdot V'_{d\_peak}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{2}{\pi} i_{d\_peak} \right) \left( \pi(V_K - V'_K + \frac{1}{2} v_{d\_peak}) \right) \\ &= \frac{1}{2\pi} i_{d\_peak} (2(V_K - V'_K) + v_{d\_peak}) \end{aligned} \quad (21)$$

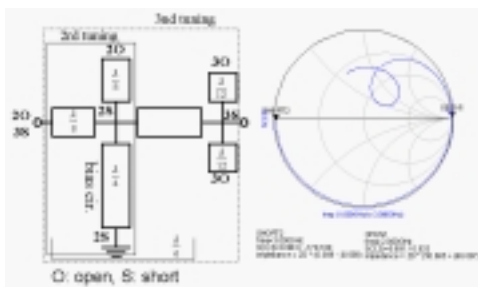
$$\eta_{PAE} = \left(1 - \frac{1}{G}\right) \frac{\frac{V'_{d\_peak}}{\pi}}{V'_K + \frac{V'_{d\_peak}}{\pi}} = \left(1 - \frac{1}{G}\right) \frac{(V_K - V'_K + \frac{1}{2}v_{d\_peak})}{V'_K + V_K - V'_K + \frac{1}{2}v_{d\_peak}}$$

$$= \left(1 - \frac{1}{G}\right) \frac{(V_K - V'_K + \frac{1}{2}v_{d\_peak})}{V_K + \frac{1}{2}v_{d\_peak}} \quad (22)$$

두 증폭기의 전력 이득 G가 유사하다고 가정했을 때, 식(21)과 식(22)를 식(14), 식(15)와 비교하면, Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 RF fundamental 전력(P<sub>RF</sub>)과 효율(PAE) 모두가 knee 전압차(V<sub>K</sub>-V'<sub>K</sub>)에 의해 Class F 증폭기보다 우수해 진다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 2에서 알 수 있듯이 Ron(on resistance)의 값이 커지면 커질수록 loadline의 기울기는 작아져, knee 전압의 차(V<sub>K</sub>-V'<sub>K</sub>)가 더욱 커지고, 이로 인해 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 성능은 상대적으로 더욱 우수해진다. 이는 논문[4]에서 말한 내용과는 상반된다.



(a) Class F 증폭기의 경우



(b) Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 경우

그림 3. 두 증폭기의 harmonic 제어를 위한 회로와 simulation 결과

### III. 설계와 simulations

설계 simulator는 HP사의 ADS이며, 설계와 실험에 사용한 소자는 OKI사의 0.1 Watt급 MESFET KGF1284로 P<sub>1dB</sub>는 21.5 dBm 정도 된다. 그리고 이 소자에 대한 simulation은 POSTECH 자체 모델을 사용하여 이루어 졌다[6]. 중심 주파수는 1GHz이며, 제

어할 harmonic은 홀수차로 2차(2GHz)만, 짝수차로 3차(3GHz)만을 사용했다.

먼저 harmonic을 제어할 수 있는 출력단의 제어 회로를 그림 3에 나타내었다. 그림 3을 보면 알 수 있듯이 출력단에 사용되는 이 회로는 거의 완벽한 개방과 단락을 이룬다. 출력단은 이 회로와 출력 전력을 위해 추가된 matching 회로로 이루어져 있다.

그림 4는 입력 전력이 10dBm 일 때, 주파수 영역의 simulation에서 I<sub>ds</sub>와 V<sub>ds</sub>이며, 원하는 harmonic tuning을 할 수 있었다. 그리고 같은 입력 전력에서 시간 영역 simulation의 I<sub>ds</sub>와 V<sub>ds</sub>, loadline은 그림 5와 같다. 이는 우리가 예측한 파형과 같으며, loadline에서 Class F<sup>-1</sup> 증폭기가 상대적으로 큰 V<sub>ds</sub>와 작은 I<sub>ds</sub>, 이로 인한 작은 knee 전압을 가진다는 것을 확인하였다.

Simulation에서의 전력과 효율은 그림 7의 line과 같으며, Class F<sup>-1</sup>의 효율이 약 10%정도 더 높다. 이는 앞 절의 파형분석에 의하면 타당한 결과이다.

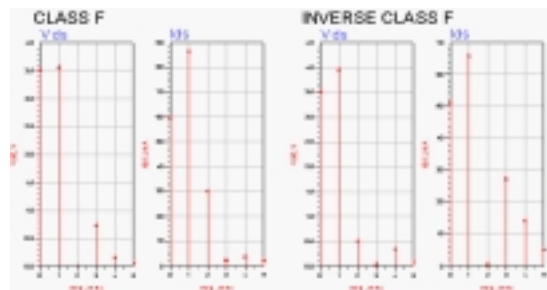
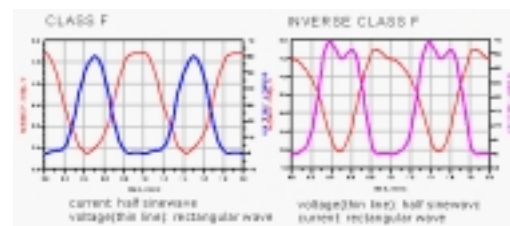
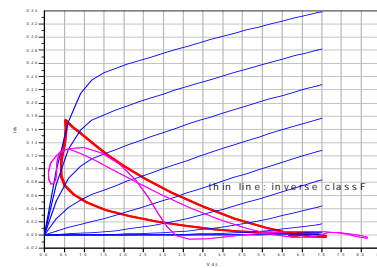


그림 4. 주파수 영역에서 두 증폭기의 I<sub>ds</sub>와 V<sub>ds</sub>



(a) I<sub>ds</sub>, V<sub>ds</sub>

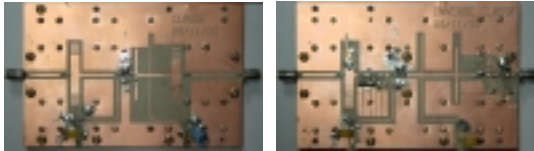


(b) loadline과 I<sub>ds</sub>-V<sub>ds</sub>곡선(가는 선: F<sup>-1</sup>)

그림 5. 시간 영역에서의 I<sub>ds</sub>와 V<sub>ds</sub>

#### IV. 제작과 측정 결과

우리는 위의 설계와 simulation을 바탕으로 두 증폭기를 제작하고 이 둘의 출력 전력과 효율을 측정하였다. 제작된 두 증폭기는 입력단 matching 회로와 직류 전원이 같다. 이는 비교 기준을 위한 조건이 된다. 그리고 그림 6은 실제로 제작된 두 증폭기의 회로이다.



(a) Class F 증폭기 (b) Class F<sup>-1</sup> 증폭기

그림 6. 제작된 두 증폭기의 실제 회로

이 회로의 측정 결과는 그림 7의 symbol과 같으며 Class F 증폭기의 최고 효율(PAE)은 64%인 반면 Class F<sup>-1</sup> 증폭기는 74%로 약 10% 정도 더 좋다. 그리고 그림을 통해서 알 수 있듯이 측정된 실험 결과는 simulation 결과와 매우 유사하다. 이는 올바른 소자 모델을 사용하였고, 실험과 측정이 올바르게 진행되었음을 의미한다.

우리는 이러한 실험 결과를 통해 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 효율면에서의 성능이 더 우수함을 검증하였다.

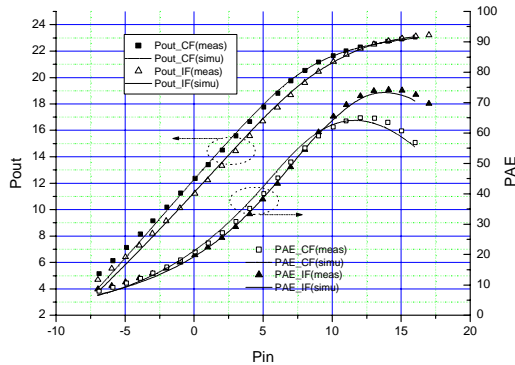


그림 7. 두 증폭기의 simulation과 측정 결과 PAE와 P<sub>out</sub> (점선: 측정 결과)

#### V. 결론

전력 증폭기의 효율을 높이기 위해서 Class F와 Class F<sup>-1</sup> 증폭기를 사용한다. 이 둘 중 Class F<sup>-1</sup> 증폭기가 효율면에서 더욱 우수하다. 우리는 이를 증명하기 위해 파형 분석을 하였으며, 그 결과 knee 전압은 낮고 동작 전압이 커서 그 차이 만큼 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 효율이 높아짐을 알았다. 이러한 증명을 바탕으로 0.1 Watt급 MESFET 소자를 이용해 두 증폭기의 설계와 제작을 하였다. 이 둘의 측정결과 Class F<sup>-1</sup> 증폭기의 효율이 74%로 Class F 증폭기보다 10% 정도 우수함을 알 수 있었다. 이 측정 결과가 simulation 결과와 매우 유사함을 알 수 있으며, 이는 올바른 제작과 실험을 하였음을 의미한다.

#### 참고 문헌

- [1] B. Ingruber, W. Pritzl, D. Smely, M. Wachutka, G.Magerl, "High - Efficiency Harmonic - Control Amplifier," *IEEE Tras. MTT*, vol. 46, no. 6, pp. 857-862, June 1998.
- [2] F. H. Raab, "Class-F Power Amplifiers with Maximally Flat Waveforms," *IEEE Tras. MTT*, vol. 45, no. 11, pp. 2007-2012, June 1997.
- [3] A. V. Grebennikov, "Circuit Design Technique for High Efficiency Class F Amplifier," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 771-774, June 2000.
- [4] A. Inoue, T. Heima, A. Ohta, R. Hattori, and Y. Mitsui, "Analysis of Class-F and Inverse Class-F Amplifiers," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 775-778, June 2000.
- [5] C. J. Wei, P. DiCarlo, Y. A. Tkachenko, R. McMorro, and D. Bartle, "Analysis and Experimental Waveform Study on Inverse Class-F Mode of Microwave Power FETs," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 1, pp. 525-528, June 2000.
- [6] T.M. Roh, Y.Kim, Y. Suh, W.S. Park and B. Kim, "A Simple and Accurate MESFET Channel-Current Model Including Bias-Dependent Dispersion and Thermal Phenomena," *IEEE Trans. on MTT*, Vol.45, No.8, Aug. 1997