

S-대역 고효율 Pallet 전력증폭기 모듈 설계

Design of an High Efficiency Pallet Power Amplifier Module

최길웅* 김형종* 최진주* 최준호**
 Gil-Wong Choi Hyoung-Jong Kim Jin-Joo Choi Jun-Ho Choi

Abstract

This paper describes the design and fabrication of a high-efficiency GaN HEMT(Gallium Nitride High-electron Mobility Transistor) Pallet power amplifier module for S-band phased array radar applications. Pallet amplifier module has a series 2-cascaded power amplifier and the final amplification-stage consists of balanced GaN HEMT transistor. In order to achieve high efficiency characteristic of pallet power amplifier module, all amplifiers are designed to the switching-mode amplifier. We performed with various PRF(Pulse Repetition Frequency) of 1, 10, 100 and 1000Hz at a fixed pulse width of 100 μ s. In the experimental results, the output power, gain, and drain efficiency(η_{total}) of the Pallet power amplifier module are 300W, 33dB, and 51% at saturated output power of 2.9GHz, respectively.

Keywords : GaN HEMT(질화갈륨 고전자이동도 트랜지스터), High Efficiency(고효율), Class-E Power Amplifier(Class-E 전력증폭기), Class-F Power Amplifier(Class-F 전력증폭기)

1. 서론

과거의 레이더 시스템은 주로 진공관 튜브를 사용한 기계적인 탐지/추적 레이더를 이용하였다. 하지만 진공관 증폭기는 고출력 특성을 갖고 있는 반면 좋지 않은 잡음 특성 및 긴 예열시간에 따른 빠른 대응이 어려운 단점이 있다. 최근 반도체 소자의 기술 발전으로 고체 전력증폭기(SSPA : Solid-State Power Amplifier)를 이용한 레이더가 개발되어 사용되고 있으며, SSPA를 이용

한 전력증폭기는 예열시간 단축, 소형 경량화, 저 전압 동작, 평균동작시간 증가 등의 장점이 있다. 특히 다수의 MMIC 기반의 낮은 출력의 TRM(Transmitter/Receiver Module)을 이용한 능동형 위상배열 레이더(Active Phased Array Radar)가 활발히 연구되고 있다^[1-3].

최근 레이더 시스템은 송신기의 전력증폭기 효율을 개선하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 전력증폭기는 레이더 시스템 전체 효율에 가장 많은 영향을 미치는 부품으로 전력증폭기의 효율이 개선되면 소형화, 경량화에 따른 비용 절감이 가능하고 배터리 수명을 증가시킬 수 있게 된다. 따라서 효율 특성은 레이더 송신기의 전력증폭기를 설계 할 때 고려해서 설계되어야 한다.

전력증폭기의 효율을 높이는 기술로 고효율 스위칭

† 2010년 7월 9일 접수~2010년 10월 1일 게재승인

* 광운대학교(Kwangwoon University)

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 최길웅(roadbear@kw.ac.kr)

모드 전력증폭기가 연구되고 있다. 스위칭 전력증폭기는 Class-D, E, F, F-1 등으로 구분되며 하모닉 임피던스 정합을 통해 트랜지스터의 드레인에 인가되는 전압과 전류가 중복이 될 때 발생하는 전력 손실을 하모닉 임피던스를 조절하여 효율을 높이는 동작 원리이다^{4,5}. 스위칭 모드 전력증폭기는 트랜지스터가 스위치로 동작한다는 전제로 하기 때문에 주로 오디오 주파수 대역 증폭기나 전력 컨버터로 사용되었으나 최근 RF(Radio Frequency)와 Microwave Frequency 대역에서 사용되는 전력증폭기의 효율 특성이 중요시 되면서 높은 주파수 대역에서도 많은 연구가 이루어지고 있다.

전력증폭기의 효율은 사용되는 소자의 효율 특성에도 영향을 받는다. 주로 L, S-대역의 레이더 송신기의 전력증폭기에 사용되는 소자로는 Silicon-Bipolar Junction Transistor(Si-BJT)와 Lateral Diffused Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(LDMOSFET)를 사용하였다. Si-BJT와 LDMOSFET는 높은 출력 특성을 갖지만 효율 특성이 좋지 않아 최근에 전자포화속도(Saturated Velocity)와 높은 전류밀도 및 우수한 열전도 특성을 갖는 GaN HEMT(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)가 전력증폭기의 소자로 연구되고 있다^{6,7}.

본 논문은 고효율 전력증폭기 설계의 핵심 요소인 효율을 개선하기 위해 GaN HEMT를 이용한 고효율, 고효율 Pallet 전력증폭기 모듈 설계하고 측정결과에 대해 서술하였다.

2. 고효율 스위칭 모드 전력증폭기

Fig. 1-(a)는 Class-E와 Class-F 스위칭 모드 전력증폭기를 설명하기 위한 간략화된 등가회로를 나타낸다. Fig. 1-(b)와 Fig. 1-(c)는 각각 Class-E 및 Class-F 전력증폭기의 전압과 전류파형을 나타내었다. Fig. 1-(b)와 같은 Class-E 전력증폭기의 파형은 출력 부하의 짝수차수의 하모닉 주파수 성분 (Z_{2n})과 홀수차수의 하모닉 주파수 성분 (Z_{2n+1})이 모두 ∞ 가 되도록 하모닉 임피던스를 정합해줘야 한다. Class-E 전력증폭기는 트랜지스터가 이상적인 스위치로 동작할 때 스위치가 ON 되면 스위치 양단의 전압은 없고, 부하(R_{opt})에 전류가 흐르고 DC 전류(I_0)는 스위치를 통해 흐르게 된다. 스위치가 ON 되기 직전에 스위치로 흐르는 전류는 0이

되고, 스위치가 OFF 되는 순간에 전류는 스위치로부터 기생 커패시터 (C_p)로 흐르게 된다. 트랜지스터의 전압과 전류파형이 제로 스위칭이 이루어 질 때 이상적인 100%의 효율을 갖는다. 이때 V_{max} 는 $3.562 \cdot V_{cc}$ 이며, I_{max} 는 $2.8621 \cdot I_0$ 이다.

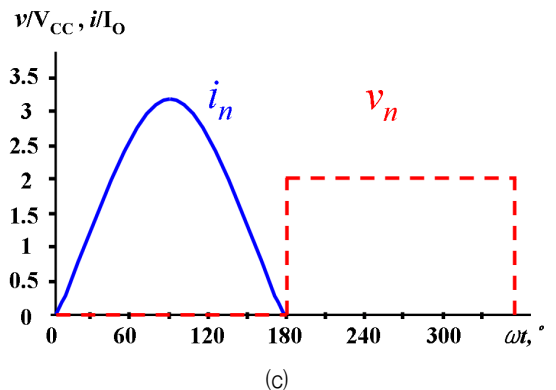
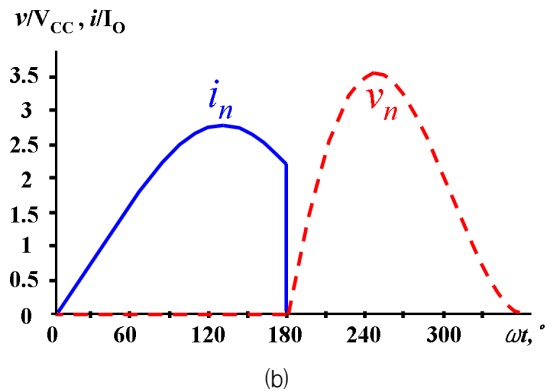
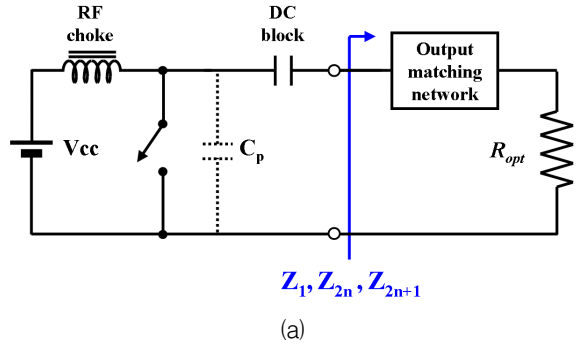


Fig. 1. 이상적인 스위칭 모드 전력증폭기 : (a) 간략화된 스위칭 모드 전력증폭기, (b) Class-E 전력증폭기의 전압 및 전류 파형, (c) Class-F 전력증폭기의 전압 및 전류 파형

이상적인 Class-F 전력증폭기는 부하 임피던스 회로에 의한 사인과 신호들의 합으로 전압과 전류의 파형이 Fig. 1-(c)와 같이 결정된다. Class-F 전력증폭기는 증폭기가 50%의 duty cycle의 갖는 바이어스 조건하에서 포화 영역까지 적용되면 전압 파형은 구형파처럼 형성되고 출력 부하의 짝수차수 하모닉 주파수 성분 (Z_{2n})은 단락이 되고 홀수차수의 하모닉 주파수 성분 (Z_{2n-1})이 ∞ 가 되도록 하모닉 임피던스가 정합되면 전압파형은 구형파가 되고 전류파형은 반파 사인파형이 된다. 즉 전압은 홀수차수 하모닉 성분만 존재하고 전류는 짝수차수 하모닉 성분만 존재하기 때문에 하모닉 성분에 대한 출력 손실이 없게 되어 이상적인 Class-F 전력증폭기의 효율은 100%가 된다. 이때 V_{max} 는 $2 \cdot V_{cc}$ 이며, I_{max} 는 $\pi \cdot I_0$ 이다.

3. S-대역 고효율 전력증폭기 모듈 설계

Table 1은 300W 전력증폭기 모듈의 설계 규격을 나타내었다. Fig. 2는 S-대역 300W급 전력증폭기 모듈의 전체 구성도를 나타낸다. 33dB의 이득을 얻기 위해 2단의 전력구동단과 1단의 전력증폭단으로 구성하였다. 전력증폭기 모듈에 사용된 모든 트랜지스터는 고효율, 고효율 특성을 갖는 GaN HEMT를 이용하였으며 전력구동단 첫 번째 단은 Class-E, 두 번째 단은 Class-F로 설계 하였으며 전력증폭단은 Class-F로 설계하여 고효율 특성을 갖는 구조로 구성하였다. 전력증폭기 설계 시 선행해야 할 것은 최적의 입력 임피던스와 부하 임피던스를 찾는 것이다. 본 논문에서는 최적의 입/출

Table 1. S-대역 300 W Pallet 전력증폭기 모듈 규격

항 목	설계 규격
주파수 (GHz)	2.7 - 2.9
최대 출력 (W)	300
이득 (dB)	33
Max duty cycle (%)	10
효율 (%)	50
펄스폭 (μ s)	100
PRF (Hz)	1-1000
출력 dynamic range (dB)	20

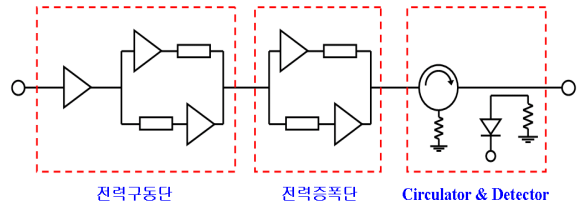


Fig. 2. S-대역 300W Pallet 전력증폭기 모듈 구성도

력 임피던스를 얻기 위해 Agilent Advanced Design System(ADS) 시뮬레이션 코드를 이용하여 load-pull과 source-pull을 시뮬레이션을 수행하였다.

가. 전력구동단 설계

첫 번째 전력구동단에 사용한 소자는 Cree사의 10 W, GaN HEMT CGH40010F를 사용하였다. load-pull과 source-pull에 사용한 트랜지스터의 모델은 Cree사에서 제공하는 비선형 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션에서 적용한 하모닉 차수는 회로의 크기 및 효율을 고려하여 3차 하모닉 주파수 성분까지 적용하여 Class-E 전력증폭기를 설계하였다. 시뮬레이션 바이어스 조건은 28V의 드레인 전압 바이어스 조건으로 설계하였다. 게이트 바이어스는 CGH40010F의 문턱전압(threshold voltage)인 -2.8V의 게이트 바이어스를 인가하여 load/source-pull 및 설계할 때 수행한 모든 시뮬레이션에 적용하였다. Load/source-pull 시뮬레이션을 이용하여 얻은 최적화된 입력 임피던스와 출력 임피던스를 마이크로 스트립라인으로 회로를 구현하여 시뮬레이션에서 입/출력 임피던스를 확인해 본 결과 각각 $8.412 - j7.191 \text{ ohm}$ 과 $10.864 + j8.521 \text{ ohm}$ 이며, 이 때 출력 2차 하모닉 임피던스는 $1.01 + j57.045 \text{ ohm}$ 이며, 3차 하모닉 임피던스는 $6.911 - j88.151 \text{ ohm}$ 이다. Fig. 3은 첫 번째 단의 전압과 전류 파형을 나타낸 것으로 Class-E 전력증폭기의 전압/전류 파형을 확인하였다. 설계 결과 주파수 대역내에서 $40.4 \pm 0.6 \text{ dBm}$ 의 출력 특성과 $64.4 \pm 1.9\%$ 의 전력부가효율 특성을 가지는 것을 확인하였다.

두 번째 전력구동단에 사용한 소자는 Cree사의 25 W, GaN HEMT CGH40025F를 사용하였다. 전력증폭기의 출력전력이 높아질수록 Class-E 보다 Class-F 또는 Class-F¹가 정합이 쉽고 효율 및 출력전력 관점에서 좋은 특성을 갖기 때문에 두 번째 전력구동단은 Class-F로 설계 하였다. 시뮬레이션에서 적용한 하모닉 차수는 첫 번째 단과 동일한 3차 하모닉 주파수 성분까

지 고려하여 Class-F 전력증폭기를 설계하였다. 시뮬레이션 바이어스 조건은 44V의 드레인 전압과 게이트 전압은 -2.7V의 문턱전압 조건으로 설계하였다. 첫 번째 단과 같은 방법으로 입/출력 임피던스를 결정하고, load-/source-pull 시뮬레이션에서 얻은 최적화된 입력 임피던스와 출력 임피던스를 마이크로 스트립라인으로 회로를 구현하여 시뮬레이션에서 입/출력 임피던스를 확인해 본 결과 각각 $9.81 - j4.95 \text{ ohm}$ 과 $8.878 + j2.049 \text{ ohm}$ 이며, 이 때 출력 2차 하모닉 임피던스는 $1.295 + j37.617 \text{ ohm}$ 이며, 3차 하모닉 임피던스는 $58.87 - j10.984 \text{ ohm}$ 이다. Fig. 4는 두 번째 단의 전압과 전류 파형을 나타낸 것으로 Class-F 전력증폭기의 전압/전류 파형을 확인하였다. 설계 결과 주파수 대역 내에서 $47 \pm 0.6\text{dBm}$ 의 출력 특성과 $9 \pm 0.6\text{dB}$ 의 이득, $65.1 \pm 1.5\%$ 의 전력부가효율 특성 및 $74.6 \pm 1.3\%$ 의 드레인 효율을 가지는 것을 확인하였다.

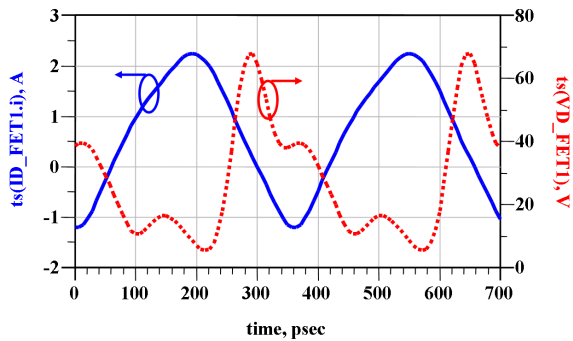


Fig. 3. 첫 번째 전력구동단 Class-E 전압/전류파형

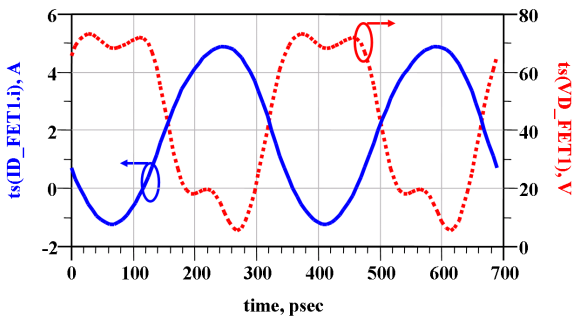
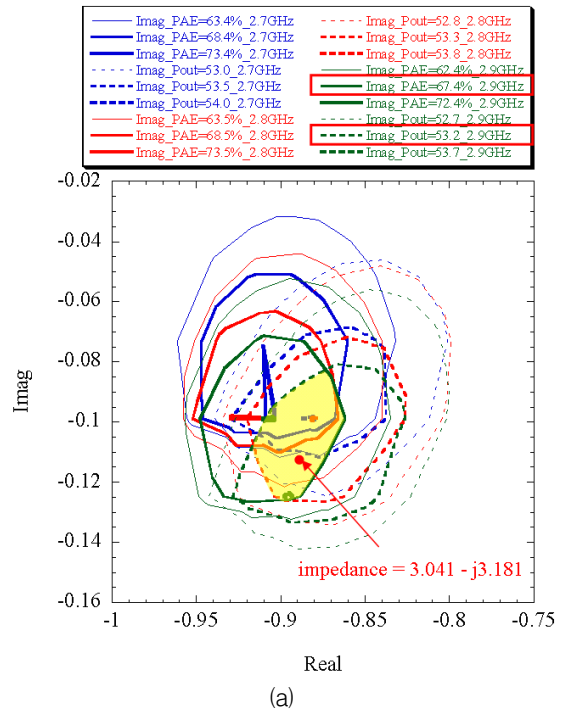


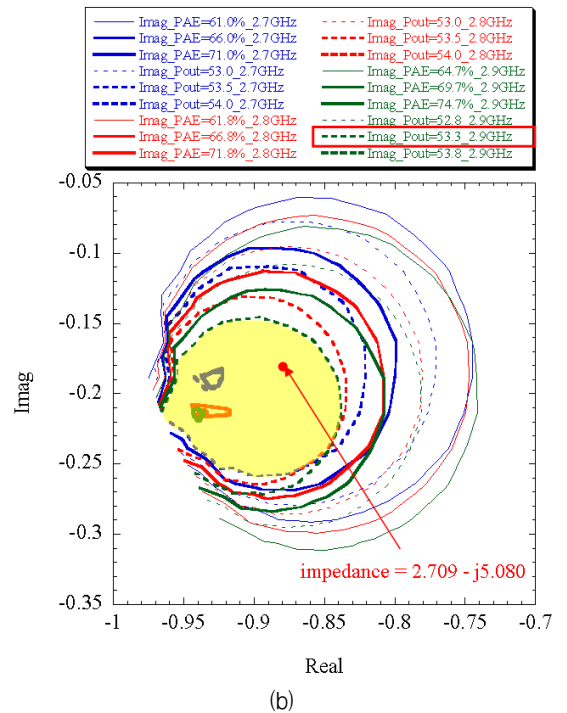
Fig. 4. 두 번째 전력구동단 Class-F 전압/전류파형

나. 전력증폭단 설계

전력증폭단에 사용한 소자는 Cree사의 120W, GaN HEMT CGH40120F를 사용하였다. load-pull과 source-



(a)



(b)

Fig. 5. 전력증폭단(CGH10120F) load-/source-pull 시뮬레이션 결과 : (a) load-pull, (b) source-pull

pull에 사용한 트랜지스터의 모델은 Cree사에서 제공하는 비선형 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션에서 적용한 하모닉 차수는 회로의 크기 및 효율을 고려하여 3차 하모닉 주파수 성분까지 적용하여 Class-F 전력증폭기를 설계하였다. 시뮬레이션 바이어스 조건은 46V의 드레인 전압과 게이트 전압은 -2.8V의 문턱전압 조건으로 설계하였다. Fig. 5는 수행한 load-/source-pull의 전력 등고선과 전력부가효율 등고선을 정규화된 반사계수를 이용하여 나타내었다. 최적의 임피던스를 결정하기 위해 먼저 Fig. 5-(a)에서 2.7~2.9GHz 대역에서 일정한 출력과 효율 특성을 갖는 영역을 선택하고 선택된 영역 내에서 임피던스를 결정하였다. 각 주파수에 대한 전력 등고선과 전력부가효율 등고선이 겹치는 영역 중 2.9 GHz 대역의 특성이 다른 주파수 대역에 비해 좋지 않기 때문에 임피던스 영역을 선택할 때 2.9GHz 대역의 특성 위주로 범위를 선정하여 임피던스를 결정하였다.

Load-pull과 source-pull 시뮬레이션을 이용하여 얻은 최적화된 입력 임피던스와 출력 임피던스를 마이크로 스트립라인으로 회로를 구현하여 시뮬레이션을 수행하였다. 입/출력 임피던스를 확인해 본 결과 각각 $3.041 - j3.181 \text{ ohm}$ 과 $2.709 - j5.08 \text{ ohm}$ 이며, 이 때 출력 2차 하모닉 임피던스는 $1.153 + j13.322 \text{ ohm}$ 이며, 3차 하모닉 임피던스는 $19.061 + j9.146 \text{ ohm}$ 이다. Fig. 6은 두 번째 단의 전압과 전류 파형을 나타낸 것으로 Class-F 전력증폭기의 전압/전류 파형을 확인하였다. 설계 결과 주파수 대역내에서 $52.94 \pm 0.64\text{dBm}$ 의 출력 특성과 $7.94 \pm 0.64\text{dB}$ 의 이득, $56.8 \pm 7.7\%$ 의 전력부가효율 및 $67.6 \pm 7.3\%$ 의 드레인 효율 특성을 가지는 것을 확인하였다.

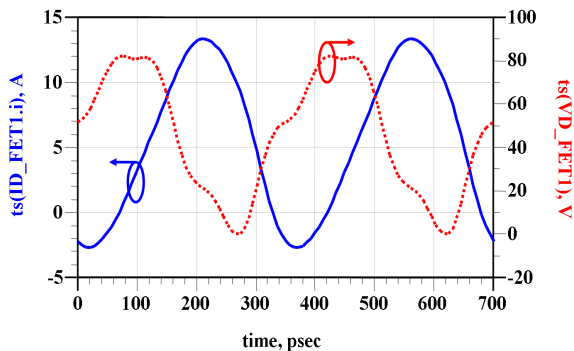


Fig. 6. 전력증폭단 Class-F 전압/전류파형

4. S-대역 고효율 전력증폭기 모듈 제작 및 측정

가. 전력 구동단 제작 및 측정

첫 번째 단은 전체 모듈의 크기를 고려하여 단순한 구조의 전원회로를 구현하기 위해 단일 구조로 설계하였다. Fig. 7은 설계된 결과를 바탕으로 TLX-7 테프론 기판($\epsilon_r=2.6$)을 이용해서 제작한 첫 번째 단의 단일 구조의 Class-E 전력구동단 증폭기의 제작 사진이다. Fig. 8은 주파수에 대한 첫 번째 단의 단일 구조 전력증폭기의 출력 전력과 전력 이득, 그리고 효율 특성을 나타낸 것이다. $100\mu\text{s}$ 의 펄스폭과 10%의 duty cycle을 가지는 펄스 조건에서, -3.7V의 게이트 전압과 28V의 드레인 전압을 인가하였을 때, 주파수대역 내에서 $41.4 \pm 0.2\text{dBm}$ 의 출력 전력과 $11.2 \pm 0.6\text{dB}$ 의 전력 이득, $62.2 \pm 2.2\%$ 의 전력부가 효율 및 $66.8 \pm 2.3\%$ 의 드레인 효율이 측정되었다.

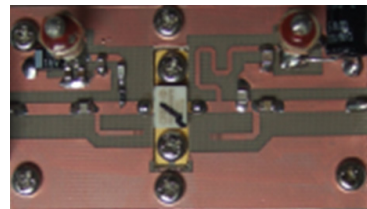


Fig. 7. 첫 번째단 Class-E 전력구동단 제작 사진

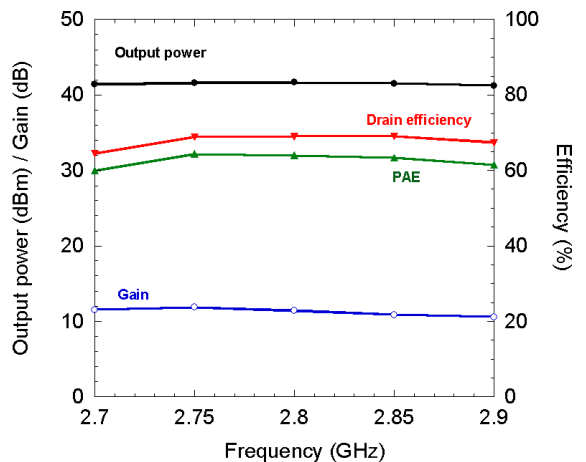


Fig. 8. 첫 번째단 Class-E 전력구동단 출력전력, 이득, 효율 특성 곡선

Fig. 9는 두 번째 단의 평형 구조 Class-F 전력구동단 증폭기의 제작사진이며 Fig. 10은 단일 구조의 두

번째 단 전력 증폭기의 출력 전력과 전력 이득 및 효율 특성을 나타낸 것이다.

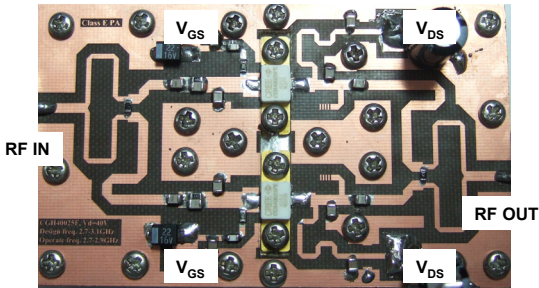


Fig. 9. 두 번째 단의 평형 구조 Class-F 전력구동단 제작 사진

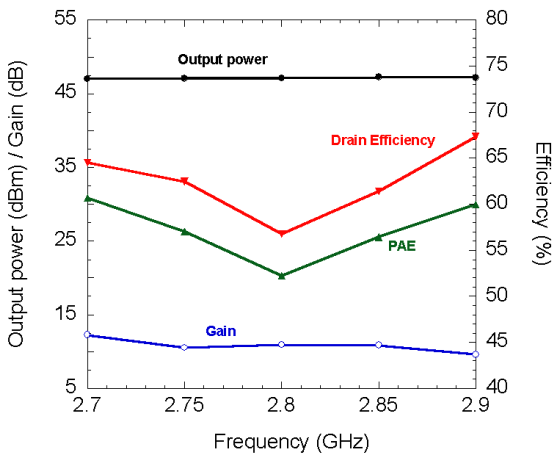


Fig. 10. 두 번째 단(단일 구조) Class-F 출력전력, 이득, 효율 특성 곡선

첫 번째 전력구동단과 동일한 펄스 조건에서, -3.8V의 게이트 전압과 46V의 드레인 전압을 인가하였을 때, 주파수대역 내에서 $47.1 \pm 0.1\text{dBm}$ 의 출력 전력과 $10.9 \pm 1.3\text{dB}$ 의 전력 이득, $56.4 \pm 4.2\%$ 의 전력부가 효율, $62.0 \pm 5.2\%$ 의 드레인 효율이 측정되었다. 두 번째 단은 전력증폭단을 구동하기 위해서 평형구조로 제작하여 적용하였다. Fig. 11은 두 번째 단의 평형 구조로 된 전력 증폭기의 출력 전력과 전력 이득, 그리고 효율 특성을 나타낸 것이다. 단일 구조와 동일한 실험 조건에서 주파수대역 내에서 $50.1 \pm 0.1\text{dBm}$ 의 출력 전력과 $10.7 \pm 0.2\text{dB}$ 의 전력 이득, $56.4 \pm 1.2\%$ 의 전력부가 효율 및 $61.7 \pm 1.3\%$ 의 드레인 효율을 가지는 것을 확인하였다.

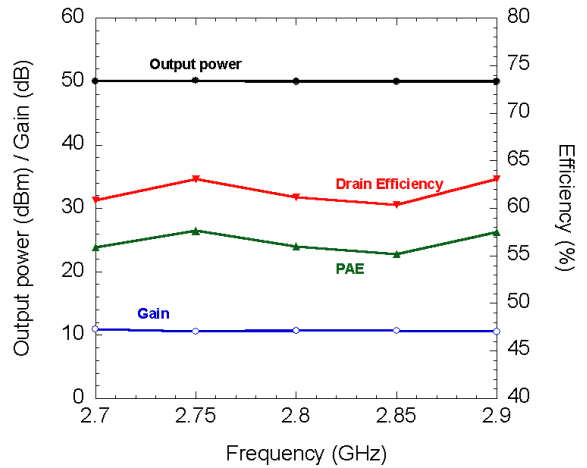


Fig. 11. 두 번째 단(평형 구조) Class-F 출력전력, 이득, 효율 특성 곡선

나. 전력증폭단 제작 및 측정

Fig. 12는 제작된 최종단의 평형 구조의 전력 증폭기를 보여준다. Fig. 13은 주파수에 대한 최종단의 단일 구조로 된 전력 증폭기의 출력 전력과 전력 이득, 그리고 효율 특성을 나타낸 것이다. 전력구동단과 동일한 펄스 조건에서 -4.4V의 게이트 전압과 46V의 드레인 전압을 인가하였을 때, 주파수대역 내에서 $52.5 \pm 0.2\text{dBm}$ 의 출력 전력과 $7.0 \pm 1.3\text{dB}$ 의 전력 이득, $64 \pm 3\%$ 의 드레인 효율을 가지는 것을 확인하였다.

전력증폭기 모듈의 출력전력을 300W 이상 얻기 위하여 전력증폭단을 평형 구조로 제작하였으며, Fig. 14는 평형 구조의 전력증폭단 출력 전력과 전력 이득, 효율 특성을 나타낸 것이다. 전력구동단과 같은 펄스 조건에서 -4.4V의 게이트 전압과 46V의 드레인 전압을 인가하였을 때, 주파수대역 내에서 $55.2 \pm 0.1\text{dBm}$ 의 출력 전력과 $6.8 \pm 1.4\text{dB}$ 의 전력 이득, $60 \pm 3.5\%$ 의 드레인 효율을 가지는 것을 확인하였다.

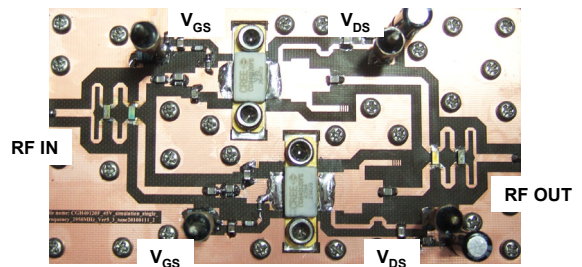


Fig. 12. 전력증폭단 평형 구조 Class-F 제작 사진

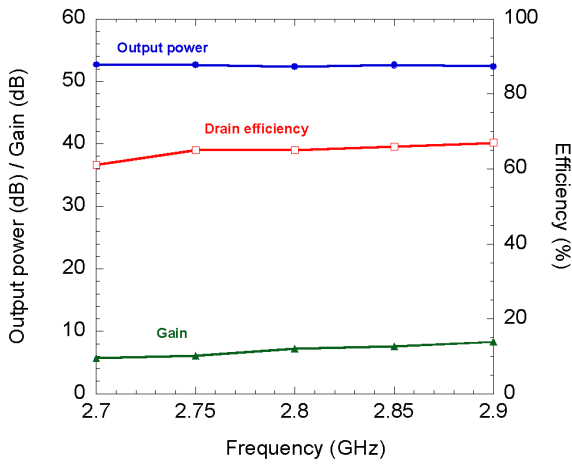


Fig. 13. 전력증폭단 단일 구조 Class-F 출력전력, 이득, 효율 특성 곡선

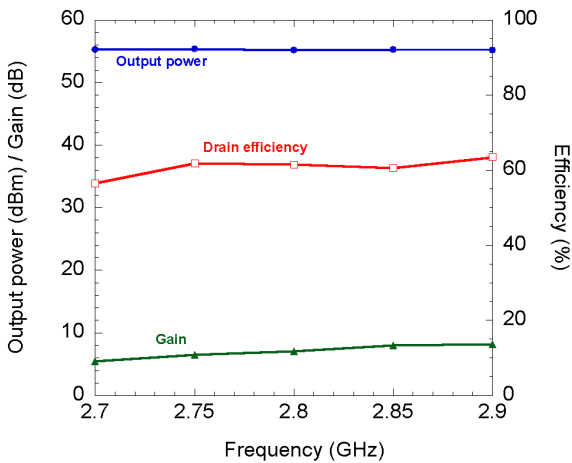
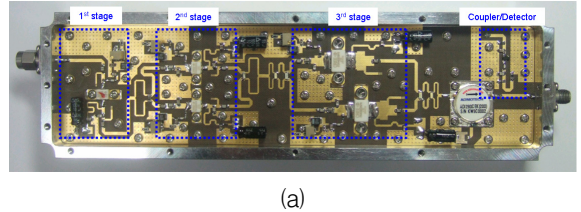


Fig. 14. 전력증폭단(평균 구조) Class-F 출력전력, 이득, 효율 특성 곡선

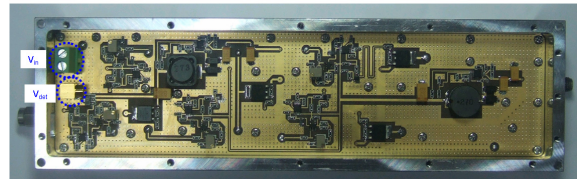
다. 300W Pallet 전력증폭기 모듈 제작 및 측정

Fig. 15-(a)는 제작한 300W 전력증폭기 모듈의 RF 회로의 제작 사진이다. 평면 면적을 줄이기 위해서 RF 회로 뒷면에 DC 전원회로를 구성하였다. DC 전원회로는 46V의 단일 전원을 사용하기 위하여 각 트랜지스터의 게이트 전원과 전력구동단의 첫 번째 드레인 전압을 위해 Texas Instruments사의 1.5A, 60V step down DC/DC converter를 사용하여 각 회로에 맞는 전압으로 낮추었으며, 안정적인 트랜지스터의 동작을 위해 순차 시간 제어 회로를 포함하여 제작하였다. Pallet 전력증폭기 모듈의 크기는 위상배열 레이더에

적용하기 위해 전력증폭기 모듈의 출력 포트 간격이 $\lambda/2$ 를 유지 할 수 있도록 모듈의 폭(width)을 고려하여 설계/제작 하였다. 또한 최종 출력단에 circulator, 방향성 결합기 및 탐지회로를 삽입하여 출력전력을 모니터링 할 수 있도록 하였다.



(a)



(b)

Fig. 15. 300W GaN HEMT 전력증폭기 모듈 제작 사진 : (a) RF 회로, (b) DC 전원 회로

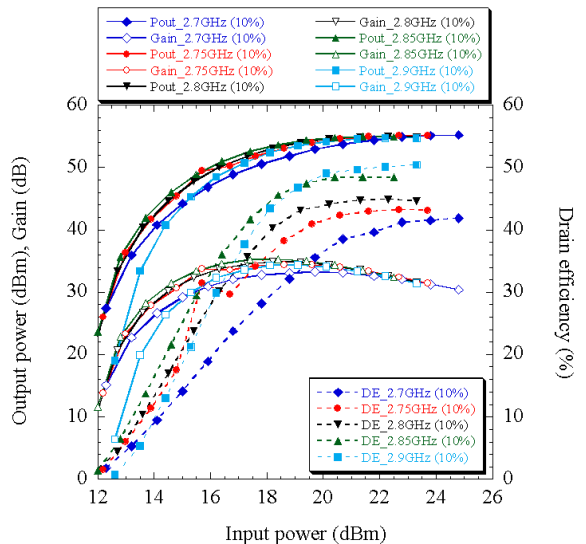


Fig. 16. 입력전력에 따른 출력전력, 이득 및 효율 특성 곡선(duty 10%)

Fig. 16은 입력 전력에 따른 300W GaN HEMT 전력 증폭기 모듈의 출력 전력과 이득 및 효율 특성을 나타

낸 것이다. 100 μ s의 펄스폭과 10%의 duty cycle을 가지는 펄스 조건에서 측정하였으며, Fig. 17은 duty cycle에 따른 300W GaN HEMT 전력 증폭기 모듈의 출력 전력, 이득 및 효율 특성을 나타낸 것이다. duty cycle이 10%일 때 주파수대역 내에서 54.9 \pm 0.1dBm의 출력 전력과 32.8 \pm 0.7dB의 전력 이득, 45.7 \pm 4.8%의 효율을 가지며, duty cycle이 1%일 때는, 주파수대역 내에서 55.0 \pm 0.2 dBm의 출력 전력과 33 \pm 0.7dB의 전력 이득, 46.2 \pm 4.8%의 효율을 가지며, duty cycle이 0.1%일 때는, 주파수대역 내에서 55 \pm 0.2dBm의 출력 전력과 33 \pm 0.7dB의 전력 이득, 46.3 \pm 4.75%의 효율을 가지고, duty cycle이 0.01%일 때는, 주파수대역 내에서 55 \pm 0.2dBm의 출력 전력과 32.9 \pm 0.7dB의 전력 이득, 46.1 \pm 4.9%의 효율을 가지는 것을 확인하였다.

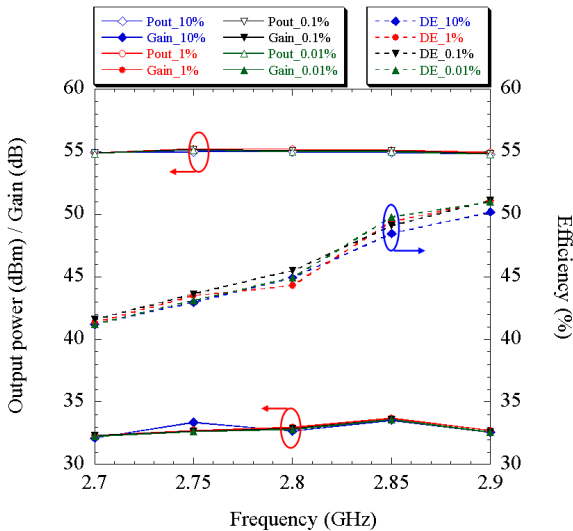


Fig. 17. duty cycle에 따른 출력전력, 이득 및 효율 특성 곡선

Table 2는 현재 개발된 GaN HEMT 전력증폭기 모듈과 본 논문에서 연구한 전력증폭기 모듈 특성을 비교한 것으로 출력은 각각의 운용 전압에서 최대 출력을 나타내며 이때 pallet 모듈의 특성을 나타내었다. 참고문헌 [8]은 1단으로 구성된 pallet 모듈의 특성을 기술한 Eudyna에서 발표한 논문으로 전력구동단을 포함한 전체 효율이 50%를 나타내기 위해서는 70% 이상의 효율을 갖는 전력구동단으로 구성되어야 한다. 또한 참고문헌 [9]는 RFHIC사의 RRP31250-10의 데이터시트를 나타낸 것이다. 이 pallet 모듈은 본 논문과 같은 3

단으로 구성되었으며 pallet 모듈의 전체 효율이 38%을 나타낸다. 이와 같은 특성을 갖는 pallet 모듈과 본 논문에서 연구한 pallet 모듈의 효율 특성을 비교해보면 13% 이상 전체 효율 특성이 우수한 것을 확인할 수 있다. 기존의 pallet 모듈은 설계의 편의성 및 크기를 고려해서 전력구동단을 Class-A 혹은 Class-AB 모드의 전력증폭기를 적용하였으나 본 논문에서는 효율 특성을 최적화하기 위하여 전력구동단 및 전력증폭단을 고효율 특성을 갖는 스위칭 기법을 적용하여 높은 효율을 얻을 수 있었다.

Table 2. GaN HEMT 전력증폭기 모듈 성능 비교

	Eudyna[8]	RFHIC[9]	본 논문
주파수 (GHz)	2.9 - 3.3	2.9 - 3.3	2.7 - 2.9
최대 출력 (W)	870	250	300
포화 이득 (dB)	10	32	33
Duty (%)	10	20	10
효율 (%)	55	38	51
DC전원 (V)	65	40	46
단수 (stage)	1단	3단	3단
크 기 (mm)	58.4*40*8.9	145*30*6	213*60*37
전원회로	×	×	○

5. 결론

본 논문에서는 GaN HEMT를 이용한 고효율 특성을 갖는 S-대역 위상배열 레이더용 전력증폭기 모듈을 설계 및 제작하였다. 전력증폭기 모듈의 효율 특성을 개선하기 위해 구성된 전력증폭기는 Class-E, F 스위칭 모드 전력증폭기로 설계하였다. 또한 스위칭 전력증폭기의 올바른 설계 방법을 제시하여 주파수 대역 내에서 모든 특성이 일정하도록 설계하였다. 높은 효율 특성을 갖도록 하기 위해 기본 주파수에 대한 출력 임피던스 정합뿐만 아니라 2차 및 3차 하모닉 임피던스 성분까지 고려하여 출력 임피던스 정합을 하였다. 측정결과 2.7GHz~2.9GHz 대역에서 300W 이상의 출력전력과 51%의 최대 전력증폭기 모듈의 효율 특성 및 32.8 \pm 1.4dB의 이득이 측정되었다. 향후 GaN

HEMT를 이용한 스위칭 전력증폭기 모듈을 2×2 또는 1×4 배열로 구성하면 kW 이상의 출력전력을 얻을 수 있고, 다기능 레이더(MFR : Multi-function Radar) 뿐만 아니라 일반 무선통신분야에 적용될 수 있을 것이라 예상된다. 또한 모듈의 특성을 개선하기 위해 Class-J를 이용하면 고효율, 광대역 특성을 갖는 모듈을 설계가 가능하다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

Reference

- [1] B. A. Kopp, M. Borkowski, and G. Jerinic, "Transmit/receive Modules", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 50, No. 3, pp. 827~834, Mar. 2002.
- [2] H. Hommel and H.-P. Feldle, "Current Status of Airborne Active Phased Array(AESA) Radar Systems and Future Trends", in European Radar Conference Digest, pp. 12~123, 2004.
- [3] M. Adolph, U. Hackenberg, R. Reber, R. Rieger, B. Schweizer, B. Adelseck, H. Brugger, and M. Lorcher, "High-precision Temperature Drift Compensated T/R-Module for Satellite Based SAR Applications", in European Microwave Conference Proceedings, pp. 813~816, 2005.
- [4] S. C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, Artech House, 2006.
- [5] A. Grebennikov, N. O. Sokal, Switch Mode RF Power Amplifiers, Newnes, 2007.
- [6] K. Joshin et. al., "A 174W High-efficiency GaN HEMT Power Amplifier for W-CDMA Base Station Applications" IEDM Technical Digest, pp. 12.6.1~12.6.3, 2003.
- [7] Y. Tateno et. al., "A High Power and High Efficiency GaN HEMT Amplifier for W-CDMA Base Station Applications", IEEE MTT-S Workshop Digest, 2004.
- [8] E. Mitani, M. Aojima and S. Sano, "A kW-class AlGaIn and GaN HEMT pallet Amplifier for S-band High Power Application", in Proc. of 2nd European Microwave Integrated Circuits Conference, pp. 176~179, Oct. 2007.
- [9] <http://www.rfhic.com/>, Pulsed Amp Module RRP 31250-10(datasheet).