

GaN HEMT를 이용한 광대역 80 W급 반도체 전력증폭기 설계

Design of Wide Band 80 W Solid State Power Amplifier Using GaN HEMT

김재덕 · 김보균* · 유승학* · 이기욱 · 이문석 · 이왕용

Jae Duk Kim · Bo Gyun Kim* · Seung Hak Yoo* · Ki Wook Lee · Moon Seok Lee · Wang Yong Lee

요약

본 논문에서는 GaN HEMT(gallium nitride high electron mobility transistor)를 이용한 광대역(S to C band) 80 W급 전력증폭기 설계 및 제작과 측정결과를 기술하였다. 제안된 광대역 80 W급 전력증폭기는 입력된 단일 RF 신호를 2개의 경로로 분배하고, 각각의 신호는 GaN HEMT Bare Die에서 증폭된 후 다시 전력결합 되는 평형 결합구조의 광대역 임피던스 매칭 기법을 적용하였다. 설계된 전력증폭기는 높은 열전도도의 Super CMC(S-CMC) 캐리어에 유테틱 본딩(eutectic bonding) 공정으로 패키징하여 80 W급 성능을 확보하였다. 제작된 광대역 80 W 전력증폭기 측정결과, 동작 주파수 전대역에서 42 dBm CW 입력 시에 평균 출력 81.4 W, 평균 전력부가효율(PAE) 36.65 %, 평균 전력 이득 7.1 dB 특성을 가진다. 또한, 4.5 GHz 주파수에서 41 dBm CW 입력 RF 신호 주입 시 최대출력 121.9 W, 최대 PAE 49.16 %, 최대 전력 이득 9.86 dB 특성을 가지는 것을 확인하였다. 전자전용 고출력 재밍 송신장치(전자전 재머, electronic warfare jammer) 적용 가능성을 검증하기 위해, 두 개의 광대역 80 W급 증폭기를 90° 하이브리드 커플링 전력결합구조로 120 W급 RF SSPA 모듈을 구현하고 측정하였다.

Abstract

This paper describes the design & fabrication and measurement results of a wide band(S to C band) 80 W solid state power amplifier(SSPA) using a GaN HEMT. The SSPA is fabricated with wide band impedance matching topology in a balanced combined configuration using two GaN HEMT bare dies and with a super CMC(S-CMC) structure with high thermal conductivity using the eutectic bonding carrier packaging method. The wide band 80 W SSPA, with 42 dBm CW input power injection at operation frequency, demonstrated performance with an average output power of 81.4 W, an average power addition efficiency(PAE) of 36.65%, and an average power gain of 7.1 dB. Furthermore, with 41 dBm CW input power injection at 4.5 GHz frequency, it had a peak output power of 121.9 W, a maximum PAE of 49.16 %, and a maximum power gain of 9.86 dB. To verify the applicability to an electronic warfare jammer, the designed 120 W RF SSPA module was implemented and measured by combining two such wide band 80 W SSPAs in a 90° hybrid coupled power configuration.

Key words: GaN, HEMT, SSPA, Wide-Band, S to C Band, Electronic Warfare

I. 서론

최근 전자전 분야에서 광대역 주파수 스펙트럼 범위가

다양화되고 있다. 이에 적의 물리적, 전자전 위협에 대응하기 위한 전자전 재머는 아군을 보호하기 위해 필수 장비이며, 전자전 재머의 핵심부품은 전력증폭기이다. 전자

LIG넥스원 전자전연구소(Electronic Warfare R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd.)

*유텔 연구소(U-Tel)

· Manuscript received July 7, 2020 ; Revised August 24, 2020 ; Accepted September 7, 2020. (ID No. 20200707-057)

· Corresponding Author: Jae-Duk Kim (e-mail: jaeduk.kim@lignex1.com)

전 재머의 전력증폭기 형태는 기존 진공 전력증폭기 (traveling wave tube power amplifier: TWTA) 에서 낮은 동작 전압과 우수한 MTBF(mean time between failure), 소형화, 경량화의 장점을 가진 반도체 전력증폭기(solid state power amplifier: SSPA)로 바뀌는 추세이다. 특히 광대역과 높은 출력, 그리고 고효율 특성의 반도체 전력증폭기를 사용한 전자전 재머에 대한 관심과 수요가 커지고 있다. 광대역 특성은 전자전 재머의 광대역 스펙트럼 위협 대응에 중요한 요소이고, 높은 출력 특성은 재머의 전자 공격범위의 중요한 요소이며, 고효율 특성은 재머의 방열 능력과 소모전력에 큰 영향을 미치는 요소로 냉각장치와 같은 추가적인 시스템 운용비용의 감소와 크기 및 무게 절감을 결정한다. 위의 세 가지 요소는 결국 전자전 재머 시스템의 매우 중요한 요소로 작용한다^[1].

반도체 전력증폭 소자 중에서도 GaN 반도체 소자는 군수분야 및 최근 5G 이동통신 분야 등에서 각광 받고 있으며, 광범위하게 사용되고 있다. 넓은 에너지 밴드 갭(wide energy band gap) 특성으로 높은 항복 전압의 장점과 높은 전자 포화 속도로 인해 더 높은 주파수 대역에서 동작이 가능할 뿐 아니라, 높은 열 전도성의 SiC HEMT 구조를 가지고 있어 방열에 유리한 장점을 가진 GaN 반도체 소자는 기존의 반도체 전력증폭 소자인 GaAs 반도체 소자나 Si LDMOS(laterally diffused metal oxide semiconductor) 소자에 비해 광대역 고효율 고풍출력 증폭기에 가장 적합하다고 볼 수 있다^{[2]~[4]}.

본 논문에서는 미래 전장 환경에서 전자전 재머에 사용 가능한 GaN HEMT를 이용한 광대역(SC-Band)의 80 W급 전력증폭기 설계 및 성능 측정 결과, 그리고 제작된 80W 급 전력증폭기의 전자전 재머 적용 가능성을 검증하기 위해 하이브리드 결합구조의 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈로 설계, 제작하여 측정된 성능 및 특성을 소개한다.

II. 광대역 80 W급 전력증폭기 설계

광대역 80 W급 전력증폭기를 설계 및 구현하기 위해 광대역의 주파수대역과 높은 최대출력전력을 우선순위에 두고 소자를 선정하였다. 표 1과 같이 DC~8 GHz 주

파수 대역까지 동작이 가능하며, 소자 최대출력전력 60 W의 특성을 갖는 WOLFSPEED 사의 GaN HEMT Bare Die (CG2H80060D) 소자로 선정하였다.^[5] 선정된 GaN HEMT 소자는 표 2의 설계 목표와 같이 2.0~6.5 GHz 광대역에서 80 W(49 dBm) 이상의 출력 전력 성능을 만족해야 하므로 50 W 증폭기 두 개를 전력 결합하는 평형 결합의 증폭기 구조로 설계 검토하였고, 목표 주파수 대역에서 소자 1개당 50 W(47 dBm) 이상의 출력 전력을 얻을 수 있는지와 동일한 소자 2개의 평형 결합구조로 설계된 증폭기가 80 W 이상의 출력 전력을 얻을 수 있는지에 대해, NI 사 AWR MWO 시뮬레이션 툴을 활용하여 설계 목표 성능을 검증하였다.

NI 사 AWR MWO 시뮬레이션 툴을 사용하여 설계 목표의 주파수 대역에서 $V_{DS}=28$ V, $I_{DQ}=500$ mA, $V_{GS}=-2.78$ V, Class AB 바이어스, 입력 RF 신호 조건은 GaN

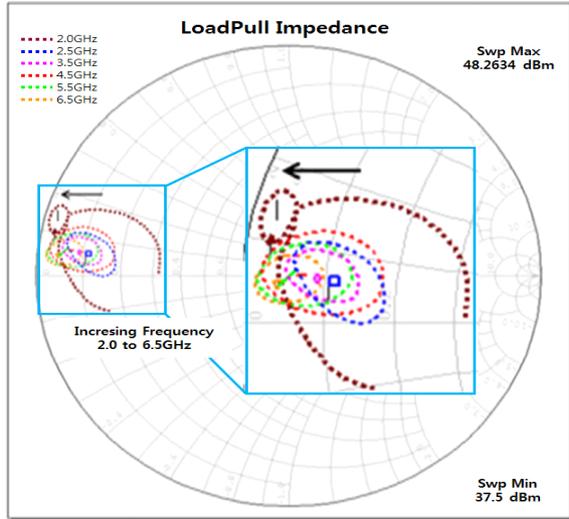
표 1. CG2H80060D GaN HEMT Bare Die 주요 특성
Table 1. CG2H80060D GaN HEMT Bare Die main characteristics.

Form	Discrete bare die
Die thickness	100 μ m(GaN on Sic)
Frequency range	up to 8 GHz Operation
Saturated power(P_{sat})	60 W(@4 GHz)
Small signal gain	15 dB @ 4 GHz, 12 dB @ 8 GHz
Drain efficiency(DE)	65 % @ 60 W
Operation drain-source voltage	28 V
Gate quiescent voltage	-2.78 V ($V_{DD}=28$ V, $I_{DQ}=500$ mA)
Drain-source breakdown voltage	120 V
Maximum drain current	6 A
Operation junction temperature	225 $^{\circ}$ C

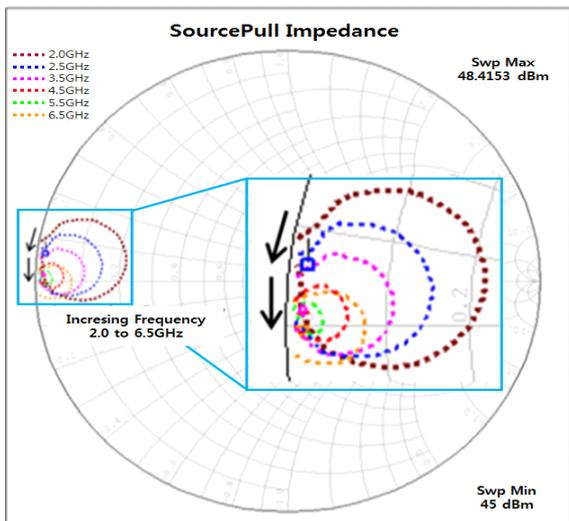
표 2. 광대역 80 W급 전력증폭기 설계 목표
Table 2. Design goals of wide band 80 W SSPA.

Frequency(GHz)	2.0~6.5
Saturated output power(W)	≥ 80 (49 dBm)
Gain(dB)	≥ 7
Power added efficiency (% PAE)	≥ 20

HEMT Bare Die 단위소자 한개에서 포화출력을 갖는 입력전력 36.0 dBm을 인가하는 조건으로 로드풀(load-pull)과 소스풀(source-pull) 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 그림 1과 같이 Wolfsped 사에서 제공하는



(a)



(b)

그림 1. 로드풀(a)과 소스풀(b) 시뮬레이션을 수행한 GaN HEMT Bare Die(CG2H80060D) 소자 최적화 소스 및 부하 임피던스 등고선

Fig. 1. Optimum source and load impedances contour of GaN HEMT Bare Die(CG2H80060D) device using load-pull(a) & source-pull(b) simulation.

GaN HEMT Bare Die(CG2H80060D)의 비선형 모델에서 최저 동작주파수 2.0 GHz에서부터 최대 동작주파수 6.5 GHz까지의 최적화 전력 정합으로 얻을 수 있는 최대 출력 전력의 소스 임피던스 및 부하 임피던스를 확인하였다. GaN HEMT Bare Die 단일 소자 최적화 설계 시 얻을 수 있는 2.0 GHz / 4.5 GHz / 6.5 GHz 주파수별 최대출력 전력과 전력 이득, 전력부가효율(PAE), 입/출력 반사손실과 소신호 이득은 표 3의 결과로 확인할 수 있으며, 이를 토대로 광대역 정합 기법으로 증폭기 설계 시 발생하는 정합 손실을 고려하여 GaN HEMT Bare Die 단일 소자의 목표 출력전력을 50 W(47 dBm), 동일한소자 2개를 사용하는 평형 결합구조로 설계된 광대역 광대역 80 W 급 전력증폭기 설계 목표를 표 2의 성능으로 확정하였다.

그림 2는 동일한 GaN HEMT Bare Die 소자 2개를 사용한 평형 결합구조의 광대역 80 W급 전력증폭기 회로구성을 나타낸다. 입력된 RF 신호를 2개의 GaN Bare Die 입력단으로 주입하는 2way 분배회로와 GaN Bare Die에서 증폭된 RF 신호를 4way 결합하는 형태의 Step Impedance Transformer 정합기법을 사용하여 광대역 외부 입/출력 회로 영역을 설계하였고, Shunt-C(SLC)와 Au Wire Bonding을 사용한 L-C 정합 광대역 내부 입/출력 회로 영역 그리

표 3. 로드풀과 소스풀 시뮬레이션을 수행한 GaN HEMT Bare Die(CG2H80060D)소자의 최적화 소스 및 부하 임피던스

Table 3. Optimum source and load impedances of the GaN HEMT Bare Die(CG2H80060D) device using source-pull/load-pull simulation.

Frequency(GHz)	2.0	4.5	6.5	
Z'S, source impedance(Ω)	0.77+j3.88	0.8+j0.65	0.81-j0.27	
Z'L, load impedance(Ω)	5.28+j2.04	3.43+j3.10	2.13+j2.46	
P_{out}	W	64.6	63.1	57.4
	dBm	48.1	48.0	47.59
P_{in} (dBm)	36.0	36.0	36.0	
Power gain(dB)	12.1	12.0	11.59	
PAE(%)	60.1	61.7	59.33	
S_{21} (dB)	21.9	19.55	16.45	
S_{11} (dB)	-1.07	-4.95	-4.57	
S_{22} (dB)	-1.53	-3.48	-7.55	

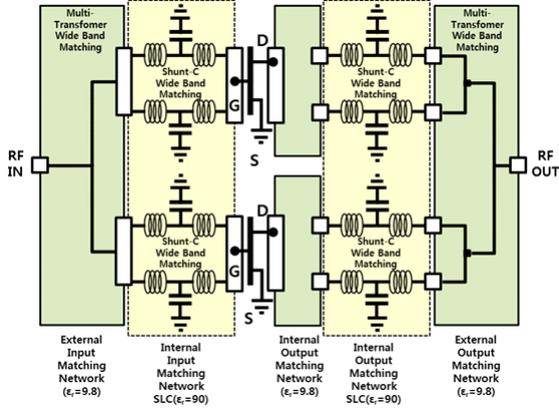


그림 2. 평형 결합구조의 광대역 80 W급 전력증폭기 회로 구성도
 Fig. 2. Simplified block diagram of the wide band 80 W SSPA with a balanced combine configuration.

고 2개의 GaN HEMT Bare Die 칩에서 증폭된 신호를 4way 분배 및 Bias 회로로 사용되는 내부 출력 회로 영역으로 설계하였다^{[6]-[8]}.

설계된 증폭기는 알루미늄기판 및 고유전율 기판과 그리고 이를 전기적으로 연결하는 Au Wire Bonding으로 구현하여 EM 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행 결과, 그림 3과 같이 2.0~6.5 GHz 주파수 범위에서 10 dB 이상의 소신호 이득과 -8 dB 이상의 출력 반사손실, -4.5 dB 이하의 입력반사손실 특성을 확인하였다.

그림 4는 설계한 광대역 80W급 전력증폭기를 WOLF-

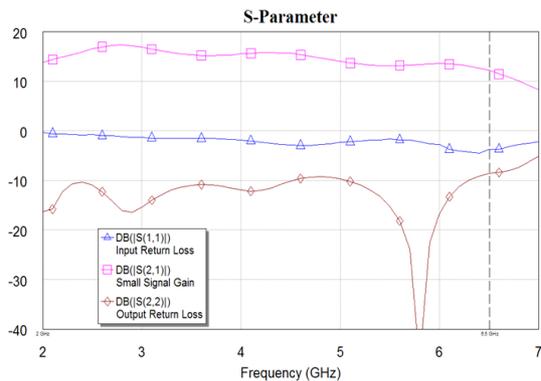


그림 3. 광대역 80 W급 전력증폭기의 소신호 시뮬레이션 결과
 Fig. 3. Small signal simulation result of the wide band 80 W SSPA.

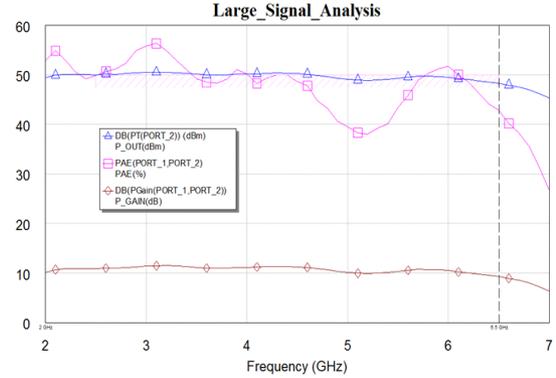


그림 4. 광대역 80 W급 전력증폭기의 대신호 시뮬레이션 결과
 Fig. 4. Large signal simulation result of the wide band 80 W SSPA.

SPEED사에서 제공하는 GaN HEMT Bare Die 비선형 모델에 대해 Harmonic Balance 시뮬레이션을 수행한 결과, 39 dBm의 입력전력에서 평균 49.0 dBm(80 W) 이상의 최대출력전력과 최소 PAE 38 % 이상 그리고 평균 전력 이득 10 dB 이상의 시뮬레이션 결과를 확인하였다.

III. 광대역 80 W급 전력증폭기 제작 및 시험

광대역 80 W급 전력증폭기는 그림 5와 같이 제작되었다. GaN HEMT Bare Die 소자는 열전도도가 높은 22.0×22.0 mm² 크기의 S-CMC Carrier 위에 AuSn(80/20) 유테틱

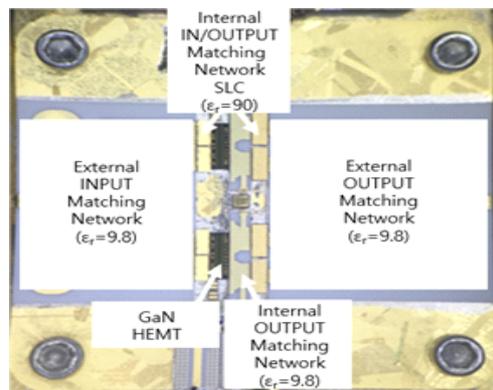


그림 5. S-CMC 캐리어에 조립된 광대역 80 W급 전력증폭기의 제작 사진
 Fig. 5. Photograph of the wide band 80 W SSPA assembled S-CMC carrier.

(eutectic) 공정을 사용하여 접합하는 방법으로 제작하였고, 입/출력 정합회로에 적용한 알루미늄기판(Al_2O_3 , $\epsilon_r=9.8$) 및 단일층 캐패시터(single layer capacitor: SLC), 고유전율 기판($\epsilon_r=90$)을 Gold wire Wedge Bonding 1 mil을 사용하여 전기적으로 연결하였다.

특히 GaN HEMT Bare Die 소자가 유테틱 공정을 통해 직접 부착되는 캐리어는 증폭기 운용 시 많은 발열이 발생하므로 표 4의 캐리어 소재 중에서 비교적 열전달 계수가 높은 S-CMC 소재를 선정하여 적용하였다^{[9],[10]}. 알루미늄 기판은 전력증폭기 동작 시 과전류에 의한 단선(fusing current)을 고려하여 표 5의 ATC사에서 제공하는 고전력용 도체공정을 적용하여 제작하였다^[11].

내부 입출력 정합회로는 두 개의 GaN HEMT Bare Die 소자와 Au Wire로 형성된 인덕터 및 SLC와 저항, 알루미늄 기판으로 구현하였으며, 고유전율 기판을 Shunt-C 정합으로 GaN HEMT Bare Die 소자의 게이트와 드레인에 인접하여 배치함으로써 내부 입출력 정합회로의 크기를 소형화하였다. 외부 입/출력 정합회로는 고유전율 기판이 아닌 Microstrip의 Multi-Transformer로 정합된 알루미늄기판과 Au Wire로 형성된 인덕터를 이용한 전력 결합/분배기 및 SLC로 구성하여 저손실/광대역으로 정합하였다.

표 4. 전력증폭기 캐리어 및 방열 소재의 열전달 계수
Table 4. Heat transfer coefficient of power amplifier carrier composition and materials for thermal management.

Composition		k(W/mK)
Aluminum		205
CuW	W90Cu10	180
	W75Cu25	220
CuMo	Mo50Cu50	250
CMC	Cu:Mo:Cu (1:1:1)	250 ~ 305(direction: Z-XY)
CPC	Cu:Mo70Cu:Cu (1:4:1)	300 ~ 340(direction: Z-XY)
S-CMC	Cu:Mo:Cu:Mo:Cu (Mo 10 %)	335 ~ 369(direction: Z-XY)
Aluminum diamond		500
Silver diamond		700

표 5. ATC사 알루미늄 기판의 고전력용 도체공정
Table 5. High power metalization of ATC company Alumina PCB.

Metalization	Application	Attachment method	Metalization	Typical value
TiW-Au-Cu-Ni-Au	High power/low loss RF and power supply	Pb/SN, Au/Sn soldering epoxy wire bonding	TiW 300 to 1,000 Å	500
			Au 3000 to 5,000 Å	3,000 min.
			Cu 200 to 2,000 Å	500
			Ni 300 to 1,000 μin	50 min.
Au 20 to 200 μin	150 min.			

제작된 광대역 80 W급 전력증폭기는 열 방출을 위해 heat sink의 온도를 상온으로 유지할 수 있는 구리 방열지그 위에 부착하여 $V_{DS}=28$ V, $I_{DQ}=1.0$ A, $V_{GS}=-2.86$ V의 조건에서 측정하였다. 그림 6은 광대역 80 W급 전력증폭기 소신호(S-parameter) 시뮬레이션 결과(dot, 점선)와 측정 결과(dash, 실선)를 비교한 그래프이다. 2.0~6.5 GHz에서 측정된 선형 이득은 7.25~13.62 dB이며, 시뮬레이션 결과와 비교할 때 최대 약 5.0 dB 정도 감소하는 특성을 보였다. 위와 같이 S_{21} (이득)과 S_{22} (출력반사손실)의 특성이 시뮬레이션 결과와 측정결과가 다른 것은 EM 시뮬레이션 시 구현한 Au Wire Bonding 모델링 값과 증폭기

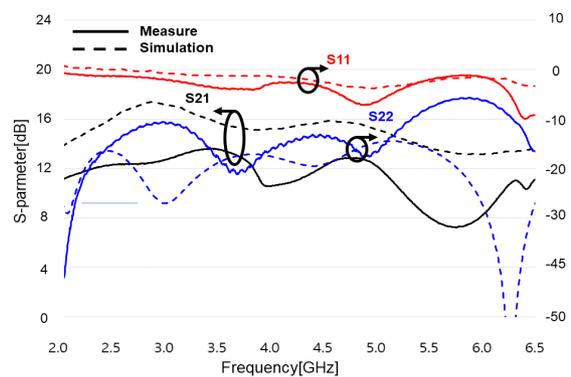


그림 6. 광대역 80 W급 전력증폭기의 시뮬레이션(점선) & 측정(실선) S-parameter 결과
Fig. 6. Simulated(dot) & measured(dash) S-parameter results of the wide band 80 W SSPA.

제작 시 사용된 다수의 Wire Bonding 제작 공정 오차로 인한 영향으로 분석된다.

그림 7은 제작된 광대역 80 W급 전력증폭기의 4.5 GHz, CW RF 입력신호를 주입하여 입력 전력 변화에 따른 출력 전력 특성을 보여주고 있다. 측정결과, 입력전력 CW RF 41 dBm 주입 시 121.8 W(50.86 dBm)의 최대 출력전력과 48.19 %의 최대 PAE, 그리고 9.86 dB의 최대 전력이득을 확인하였으며, 목표 출력전력인 80 W(49 dBm)를 상회하는 결과임을 확인할 수 있다. 또한, 측정 결과(실선)와 시뮬레이션 결과(점선)를 비교할 때 출력전력 및 효율은 시뮬레이션 결과와 유사한 경향임을 확인할 수 있다.

그림 8은 제작된 광대역 80 W급 전력증폭기에 입력전력 42 dBm CW 신호 주입 시 주파수 2.0~6.5 GHz에서 측정된 출력 특성을 나타내었다. 측정결과, CW RF 주입 시 동작주파수 전대역 평균 81.4W(49.10 dBm)의 출력전력과 전대역 평균 36.65 %의 전력부가효율(PAE), 평균 7.1 dB의 전력 이득(power gain)으로 표 2의 설계 목표를 만족함을 확인할 수 있다.

표 6은 제작된 광대역 80 W급 전력증폭기와 기존 발표된 증폭기 및 상용 제품과 주요 성능을 비교하였고, 넓은

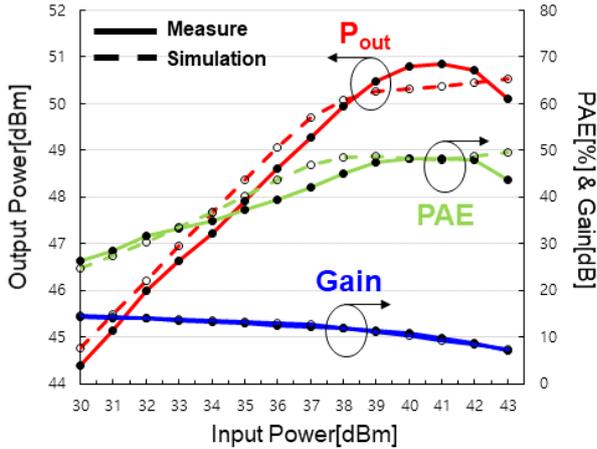


그림 7. 4.5 GHz 입력전력 크기 변화에 따른 광대역 80 W급 전력증폭기의 시뮬레이션(점선)과 측정(실선) CW 출력 특성

Fig. 7. Simulated(dot) & measured(dash) CW output performance of the wide band 80 W SSPA with 4.5 GHz input power level variation.

대역폭에서 높은 출력전력과 고효율 및 전력이득 측면에서 경쟁력을 갖추고 있음을 알 수 있다.

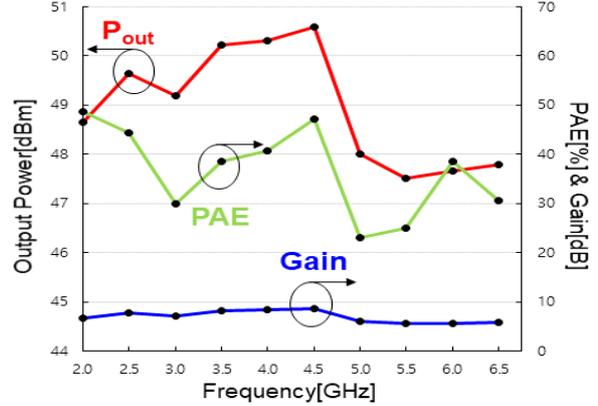


그림 8. 42 dBm 입력전력에서 주파수 변화에 따른 광대역 80 W급 전력증폭기의 CW 출력 특성 측정결과

Fig. 8. Measured CW output performance results of the wide band 80 W SSPA with frequency variation at 42 Bm input power.

표 6. 제작된 광대역 80 W급 전력증폭기 측정결과와 기존 발표된 전력 증폭기 결과의 비교

Table 6. Comparison of measured results of the fabricated wide band 80 W SSPA and previously published SSPA results.

	This work	Ref. [12]	Ref. [13]	Ref. [14]	Ref. [15]
Frequency [GHz]	2.0 ~ 6.5	0.85 ~ 5.4	2.0 ~ 6.0	2.0 ~ 6.0	2.5 ~ 6.0
Fractional BW(%)	105.8	145.6	100	100	82.3
Power gain [dB]	7.1	8	16	22	20.5
P_{out} [W]	81.4	25	39	31.6	44.5
PAE [%]	36.65	45	40	30	36
V_{DS} [V]	28	30	32	28	30
Pulse/CW	CW	CW	CW	CW	CW
Amplifier type	HMIC (discrete bare die)	HMIC (discrete)	Packaged MMIC	Packaged MMIC	Packaged MMIC
Size [mm ²]	484	Over 1,000	230	231	197

IV. 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈 제작 및 시험

광대역 120 W급 RF SSPA 모듈은 그림 9와 같은 회로 구성도로 설계하였다. 그림 10은 제작된 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈 제작 사진을 나타내며, 두 개의 광대역 80 W급 전력증폭기를 90° 하이브리드 커플러를 사용하여 출력전력을 결합하는 구조로 제작하였다.

제작된 광대역 80 W급 전력증폭기에서 -6 dB 이하의 입력반사손실 특성과 -8 dB 이하의 출력반사손실 특성으로 인해 발생할 수 있는 불안정 요소를 제거하기 위해 90° 하이브리드 커플링 전력 결합구조를 적용하여 광대

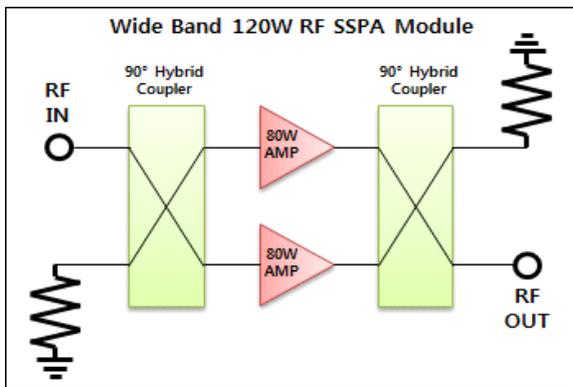


그림 9. 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈의 회로 구성도
Fig. 9. Simplified block diagram of wide band 120 W RF SSPA module with 90° hybrid coupler.

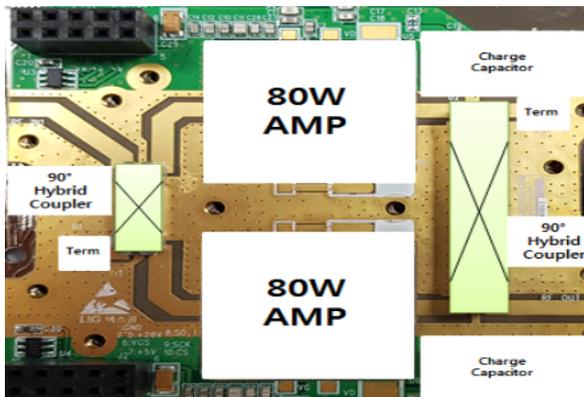


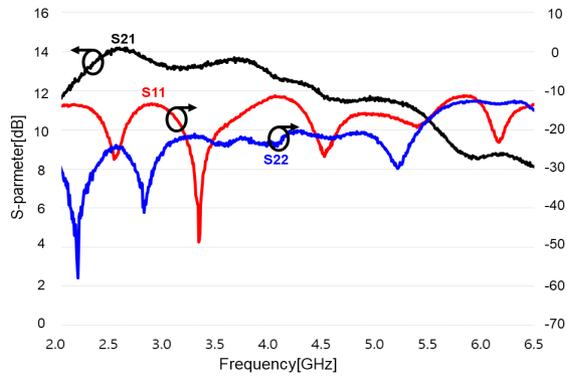
그림 10. 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈 제작 사진
Fig. 10. Photograph of the wide band 120 W RF SSPA module.

역 120 W급 RF SSPA 모듈이 안정적인 동작하도록 보완하였다. 모듈에 사용된 PCB는 Taconic사의 TLY-5 31mil ($\epsilon_r=2.2$)기판으로 Microstrip RF 전송선로를 적용하였고, Power Rating을 고려하여 주파수 대역 2~6 GHz, 삽입손실 0.4 dB, 격리도 17 dB 성능을 갖는 2중의 상용 90° 하이브리드 커플러를 사용하였다. SSPA 모듈 조립은 구리 (Cu) 하우징 바닥면과 PCB간 Ag 에폭시를 사용하였고, DC Bias 연결은 Gold Ribbon Welding 10 mil&20 mil, RF 전송선로 간 연결은 Gold Wire Wedge Bonding 1mil 사용하여 전기적으로 연결하였다.

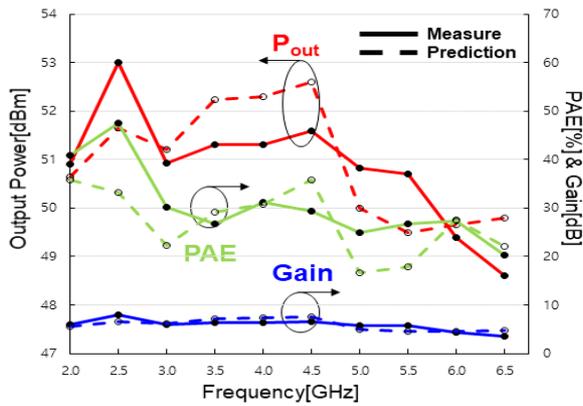
제작된 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈은 열 방출을 위해 Heat Sink의 온도를 상온으로 유지 할 수 있는 수냉식 방열 지그 위에 부착하여 $V_{DS}=28$ V, $I_{DQ}=2.0$ A, $V_{GS}=-2.76$ V의 조건에서 측정하였고, 측정결과가 그림 11과 같다. 그림 11(a)는 소신호 특성을 나타내며, 그림 6에서 측정된 광대역 80 W급 전력증폭기의 -6 dB 이하의 입력 반사손실이 90° 하이브리드 커플링 전력 결합구조를 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈에 적용하여 입출력 반사손실(S_{11} , S_{22}) 모두 -10 dB 이하로 개선되었음을 확인할 수 있다. 그림 11 (b)는 입력전력 45 dBm의 CW RF 입력신호를 주입하여 주파수 2.0~6.5 GHz에서 CW 측정된 출력 특성(실선)과 산술적 예측 출력전력 결과(점선)를 비교한 대신호 특성을 보여주고 있다.

앞서 측정된 그림 8의 제작된 광대역 고효율 80 W급 전력증폭기 주파수별 출력전력 측정결과에 3 dB 더한 결과에서 결합손실과 CW 운용 시 열에 의한 출력성능 저하를 1 dB를 감안하여 총 2 dB를 더해 산술적으로 결과를 예측하였고, 대신호 출력특성 중 출력전력 측정 결과와 산술적 예측 출력전력 결과는 유사한 것을 확인할 수 있었으며, 특히 2 GHz~3 GHz 대역과 5 GHz~6 GHz 대역은 90° 하이브리드 커플러 사용으로 개선된 입출력 반사손실로 인해 출력 전력이 광대역 80 W급 전력증폭기의 산술적 예측 대비 높은 성능을 갖게 된 것으로 분석된다.

최종적으로 제작된 광대역 120W급 RF SSPA 모듈의 측정 결과의 대역폭, 출력전력, 효율을 감안하면 120W급 RF SSPA모듈 여러 개를 전력 결합하여 기존 전자전용 재머 대체 가능성과 다양한 RF 응용시스템에서 활용 가능성을 기대할 수 있다.



(a)



(b)

그림 11. (a) 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈의 소신호 측정결과 (b) 45 dBm 입력전력에서 주파수 변화에 따른 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈 측정(실선)과 산술적 예측(점선) CW 출력 특성

Fig. 11. (a) Measured S-parameter results of the wide band 120 W RF SSPA module, (b) Measured (dash) & calculated prediction(dot) CW output performance of the wide band 120 W RF SSPA module with frequency variation at 45 dBm input power.

V. 결 론

본 논문에서는 미래 전장 환경에서 고출력 재머에 사용 가능한 GaN HEMT를 이용한 광대역 80 W급 전력증폭기와 120 W급 RF SSPA 모듈의 설계 및 성능 측정결과를 확인하였다. 설계된 광대역 80 W급 전력증폭기는 Shunt-C 광대역 정합기법과 임피던스 Transformer 광대역 정합기

법을 사용하여 CW 입력전력 주입조건에서 2.0~6.5 GHz, fractional BW 105.8 %의 광대역특성과 동작주파수 전대역 평균 49.10 dBm(81.4 W), 전대역 평균 36.65 %, 평균 7.1 dB 전력이득을 확인하였고, 4.5 GHz 41 dBm 입력세기에서 50.86 dBm(121.9 W)의 최대출력전력, 48.19 %의 전력부가효율(PAE), 9.86 dB의 전력이득을 확인할 수 있었다. 광대역 80 W급 전력증폭기 제작 시 높은 열전도도의 S-CMC Carrier를 적용하여 지속파(CW) 최대출력 증폭시에도 안정적인 성능을 낼 수 있는지 시험을 통해 검증하였고, 설계된 전력증폭기의 낮은 입력력 반사손실을 개선하기 위해 90° 하이브리드 커플링 전력 결합구조를 적용하였으며, 광대역 120 W급 RF SSPA 모듈이 안정적으로 동작하도록 제작 및 구현하여 기존 전자전 재머 전력증폭기의 형태인 진공 전력증폭기(TWTA)의 대체 가능성을 확인하였다. 본 논문을 통해 개발된 광대역 80 W급 전력증폭기는 향후 개발되는 전자전용 광대역 고출력 재밍 송신장치 및 다양한 응용 시스템에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] N. Escalera, W. Boger, P. Denisuk, and J. Dobosz, "Ka-band, 30 watts solid state power amplifier," in *2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, 2000, vol. 3, pp. 561-563.
- [2] K. Nakatani, T. Ishizaki, "A 2.4 GHz-band 100 W GaN HEMT high-efficiency power amplifier for microwave heating," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 15, no. 2, pp. 82-88, Apr. 2015.
- [3] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y. F. Wu, "AlGaIn/GaN HEMT: An overview of device operation applications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1022-1031, Jun. 2002.
- [4] R. Pengelly, S. M. Wood, J. W. Milligan, S. T. Sheppard, and W. L. Pribble, "A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 6, pp. 1764-1783, Jun. 2012.
- [5] Wolfspeed, "GaN HEMT CG2H80060D: 60-W, 8.0-GHz,

- GaN HEMT die." Available: <https://www.wolfspeed.com/rf/products/general-purpose-broadband-28-v/cg2h80060d>
- [6] K. Yamanaka, K. Iyomasa, H. Ohtsuka, M. Nakayama, Y. Tsuyama, and T. Kunii, "S and C band over 100 W GaN HEMT 1-chip high power amplifiers with cell division configuration," in *European Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium, GAAS 2005*, Paris, Oct. 2005, pp. 241-244.
- [7] I. Takenaka, K. Ishikura, K. Takahashi, K. Kishi, Y. Ogasawara, and K. Hasegawa, et al., "A 240 W power heterojunction FET with high efficiency for W-CDMA base stations," in *2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Phoenix, AZ, May 2001, vol. 2, pp. 645-648.
- [8] E. Mitani, M. Aojima, A. Meakawa, and S. Sano, "An 800-W AlGaIn/GaN HEMT for S-band high-power application," in *CS MANTECH Conference*, Austin, TX, May 2007, pp. 213-216.
- [9] FJ Composite, "Heat sink." Available: <http://www.fj-composite.com/en/products/heat-sink.html>
- [10] Torrey Hills Technologies, "Cu/Mo/Cu heat sinks (CMC)." Available: <https://www.torreyhillstech.com/hscmc.html>
- [11] American Technical Ceramics, "Engineered thin film-solution." Available: <https://atceramics.com/engineered-thin-film-solutions>
- [12] H. Taleb-Alhagh Nia, V. Nayyeri, "A 0.85~5.4 GHz 25 W GaN power amplifier," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 3, pp. 251-253, Mar. 2018.
- [13] Wolfspeed, "CMPA2060035F." 2020. Available: <https://www.wolfspeed.com/media/downloads/1492/CMPA2060035F.pdf>
- [14] Qorvo, "TGA2578-CP: 2~6 GHz, 30 Watt GaN power amplifier." 2019. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/TGA2578-CP>
- [15] Qorvo, "QPA2576N." 2018. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2576N>

김 재 덕 [LIG넥스원 전자전연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7059-1542>



2010년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 2012년 2월: 광운대학원 전자공학과 (공학석사)
 2012년 1월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 선임연구원

[주 관심분야] RF Power Amplifier, RF

Jamming System, Electronic Warfare System 등

김 보 균 [유텔연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7215-9991>



2011년 2월: 순천향대학교 전기통신공학과 (공학사)

2011년 1월~현재: (주) 유텔연구소 선임연구원

[주 관심분야] RF Power Amplifier, Microwave Active Circuit and Wireless Communication 등

유 승 학 [유텔 연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3160-8217>



2001년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2002년 9월 ~ 2004년 12월: 기릉전자연구소 주임연구원
2008년 3월 ~ 현재: (주) 유텔연구소 수석연구원
[주 관심분야] Microwave Active Circuit and Wireless Communication 등

이 문 석 [LIG넥스원 전자전연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5429-943X>



1997년 ~ 2001년 : LG정밀 연구3그룹 연구원
2010년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 ~ 현재: LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원
[주 관심분야] Electronic Warfare System, Embedded Software, Signal Processing

이 기 옥 [LIG넥스원 전자전연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7130-3864>



2002년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 ~ 2004년: LG이노텍 주임연구원
2018년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2005년 11월 ~ 현재: LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원

[주 관심분야] High Power Microwave Circuit Design, HPPEM, Electronic Warfare System 등

이 왕 용 [LIG넥스원 전자전연구소/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0002-9955-5983>



1996년 2월: 경북산업대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 2월: 아주대학교 정보전자공학과 (공학석사)
1995년 ~ 현재: LIG넥스원 전자전연구소 연구위원
[주 관심분야] Electronic Warfare System, RF Circuit/Signal Processing 등