

Ka대역 200W급 SSPA 설계 및 제작

이주흔*¹, 김효철*², 조흥래*³, 이덕재*⁴, 안세환**¹, 이만희**², 주지한**³, 김홍락**⁴

Design and Fabrication of 200W SSPA in Ka-band

Ju-Heun Lee*¹, Hyo-Chul Kim*², Heung-Rae Cho*³, Deok-Jae Lee*⁴, Se-Hwan An**¹,
Man-Hee Lee**², Ji-Han Joo**³, and Hong-Rak Kim**⁴

본 연구는 2020년도 LIG넥스원의 지원을 받아 수행된 연구결과임. (계약번호 LIGNEX1-2021-0326(00),
소형 고출력 반도체 송신기)

요약

본 논문에서는 10W급 MMIC의 T-junction 결합과 8-way 바이너리 결합기를 적용하여 제작된 100W급 SSPA 2대를 2-way 바이너리 결합하여 200W급 SSPA로 제작하는 연구를 진행하였다. Ka 대역 위성통신 시스템에서 고출력, 집적화를 위한 증폭기 연구가 지속적으로 이루어지는 가운데, 많은 예열시간과 높은 유지 보수를 갖는 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)를 대체하기 위해 상대적으로 크기가 작고 유지보수가 용이한 반도체형 결합 증폭기인 SSPA(Solid State Power Amplifier)가 연구되었다. SSPA는 TWTA에 비해 단일 소자 출력이 낮기 때문에 높은 출력을 충족하기 위해 저손실, 고효율의 결합 기술을 필요로 한다. 본 논문에서 제작된 SSPA는 20dB 이상의 반사 손실과 1dB 이하의 삽입손실을 갖는 8-way 도파관 바이너리 결합기를 이용하여 100W급 SSPA를 제작하고, 19.9dB의 반사 손실과 0.5dB 이하의 삽입손실을 갖는 2-way 도파관 바이너리 결합기를 적용하여 200W급 SSPA로 제작되었다.

Abstract

In this paper, a study was conducted to combining two 100W class SSPA produced by applying a 10W class MMIC T-junction combining and an 8-way binary combiner to manufacture 200W class SSPA. While research on amplifiers for high power and integration in Ka-band satellite communication systems continues, semiconductor-type combining amplifiers SSPA(Solid State Power Amplifier), which are relatively small and easy to maintain, have been studied to replace TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier) with warm-up time and high maintenance. SSPA requires low-loss, high-efficiency combining techniques to meet high output because it has lower single device output than TWTA. The SSPA produced in this paper produces 100W class SSPA using an 8-way waveguide binary combiner with a reflection loss of 20dB or more and an insertion loss of 1dB or less, a 2-way waveguide binary combiner with a reflection loss of 19.9 dB and insertion loss of 0.5 dB or less was applied to fabricate it as a 200W class SSPA.

Keywords

Ka band SSPA, Gan MMICs, millimeter wave, power amplifiers

* (주) 피플웍스 Military 사업개발본부(*³ 교신저자)

- ORCID¹ : <https://orcid.org/0000-0003-3904-8629>

- ORCID² : <https://orcid.org/0000-0003-4265-3993>

- ORCID³ : <https://orcid.org/0000-0002-2868-6564>

- ORCID⁴ : <https://orcid.org/0000-0001-7423-7228>

** LIG 넥스원 PGM 탐색기 연구소 4팀

- ORCID¹ : <http://orcid.org/0000-0002-8955-9067>

- ORCID² : <http://orcid.org/0000-0001-7016-4746>

- ORCID³ : <http://orcid.org/0000-0003-0643-6246>

- ORCID⁴ : <http://orcid.org/0000-0002-8745-7861>

• Received: Dec. 06, 2021, Revised: Jan. 14, 2022, Accepted: Jan. 17, 2020

Corresponding Author: Heung-Rae Cho

Dept. of Military R&D Team, peopleworks Co., Ltd. Korea

Tel.: +82-02-3282-1130, Email: hrcho@peopleworks.co.kr

I. 서 론

최근 Ka대역 위성통신 단말 시스템(VSAT) 및 소형레이더에서 고출력 증폭기는 고전압을 인가하여 구동시키는 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)를 사용하고 있다. TWTA는 단일 튜브로 고출력을 얻을 수 있으나 많은 예열시간 및 높은 유지 보수 비용으로 어려움이 있으며, 특히 EL(Export License)로 지정되어 수입에 많은 어려움이 있다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 GaN (Gallium Nitride) 소자를 이용한 SSPA(Solid State Power Amplifier)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 수요는 매년 증가하고 있다[1].

SSPA는 반도체형 소자인 GaN 집적회로(MMIC)를 N-way 결합기를 통해 높은 출력을 구현한 증폭기이다. GaN MMIC는 높은 에너지 밀도와 열전도율, 항복 전압 특성을 가지고 있어 고효율의 신뢰성 있는 제품 개발이 가능하다[2].

국내의 Ka대역 SSPA는 최종 출력 50W급, 듀티비 00% 이하로 TWTA 대비 매우 낮은 수준이다. 위성통신 및 레이더 시스템에서 TWTA를 대체하기 위해서는 200W급 듀티비 40% 이상의 높은 출력이 필요하다. 이전 연구 결과는 표 1에 나타냈다.

표 1. Ka대역 고출력증폭기 이전 연구 결과[3]-[5]
Table 1. Ka band high power amplifier previous study results[3-5]

Item	Ref.[3]	Ref[4]	Ref[5]
Freq.(GHz)	29~31	29~31	35~36
Output power(dBm)	44.2	44.7	49.2
Duty(%)	-	2%	20
Pulse width	-	4us	0.2~100

본 연구에서는 200W급 SSPA 개발을 위해 상용 GaN MMIC 소자를 이용하여 16개의 고출력 증폭 모듈을 고효율 도파관 결합기로 결합하여 최종 출력 200W를 구현할 수 있는 구조를 제안하였다. 그 외에도 체계 적용에 용이하도록 회로를 보호하기 위한 여러 장치들을 구성하였지만 RF 성능 위주로 결과를 제시하였다

II. SSPA 구성품 설계

2.1 고출력 증폭모듈

고출력 증폭모듈은 10W급 상용 GaN MMIC 소자를 PCB T-junction 결합기를 통해 20W급으로 향상시키고, 모드 변환기를 통해 도파관 형태로 출력하도록 제작되었다. 사용된 MMIC의 화합물인 GaN은 갈륨비소(GaN)에 비해 넓은 밴드갭을 갖고, 고온 안정성에 장점이 있으며, 높은 열전도도 및 고전압 동작, 높은 전력 밀도를 얻으므로 고출력 전력소자용 MMIC로 적합하여 가장 활발히 연구되는 분야이다. 반도체는 소자 재료에 따라 각기 다른 성능을 보이는데, 반도체 재료별 전기적 특성은 표 2에 나타냈다.

표 2. 반도체 소자의 전기적 특성[6][7]
Table 2. Electrical properties of semiconductor devices[6][7]

Property	Si	GaAs	SiC	GaN
Energy GaP (eV)	1.11	1.43	3.2	3.4
Critical electric field (MV/cm)	0.6	0.5	3.0	3.5
Charge density (#×1×10 ¹³ /cm ²)	0.3	0.3	0.4	1
Thermal conductivity (W/cm/K)	1.5	0.5	4.9	1.5
Mobility (cm ² /V/s)	1,300	6,000	600	1,500
Saturation velocity (× 10 ⁷ cm/s)	1	1.3	2	2.7
Max. temperature(°C)	300	300	600	700

사용된 10W급 국산화 GaN MMIC 제품 사양은 표 3과 같다.

표 3. GaN MMIC 제품 사양
Table 3. GaN MMIC product specification

Parameter	Specification
Frequency	Ka band
Psat	10W 급
Small signal gain	17.0dB.
Large signal gain	12.0dB
Vd	24V
Idq	700mA

상용 10W급 GaN MMIC를 동축 구조에서 도파관구조로 변환시킬 수 있는 모드 변환기를 적용하고, PCB 구조의 T-junction 결합기를 통해 20W 출력을 구현하였다.[8][9] 그리고 각 모듈은 3D 시뮬레이션을 통해 최적화하였다.

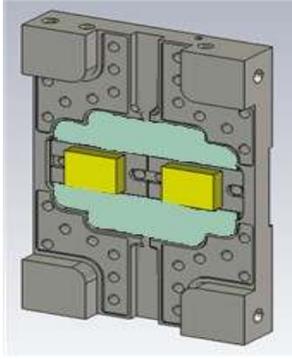


그림 1. 고출력 증폭 모듈 구조
Fig. 1. High power amplification module structure

그림 1은 고출력 증폭 모듈의 내부 구조를 나타낸 것으로 모드변환기 - 2way 분배기 - GaN MMIC(2개) - 2way 결합기 - 모드 변환기로 구성되며 모든 구조가 하나의 하우징에 일체형으로 구현되었다.

2.2 8-way 도파관 바이너리 결합기

결합기 설계에서 중요한 항목은 삽입손실, 결합 효율, 크기 및 정격전력이다. Ka 대역에서 동축 구조는 수백 와트의 전력을 견딜 수 없기 때문에 도파관 바이너리 결합기를 구현하였다. 매칭을 최적화하여 삽입 손실을 최소화 하고 결합효율을 높이기 위해 매칭 단자를 삽입하여 주파수 특성을 최적화하였다[1][10].

포트 간 격리도는 GaN MMIC 소자의 절연과파 성능을 고려하여 최소 10dB의 규격을 선정하고 3D 시뮬레이션을 통해 최적화하였다. 표 4는 SSPA의 버짓 계산을 통해 산출한 8-way 결합기의 전기적 규격을 나타냈다.

초고주파 대역에서 삽입손실 만큼 중요한 항목은 내전력이다. 다수의 증폭기 결합으로 높은 전력을 얻을 시 최종 출력 전력을 견딜 수 없다면 상위 시스템에 심각한 결함을 초래할 수 있다. 특히 방산, 위성 통신 레이더 시스템에서 듀티비 30 ~ 40%의 출력을 요구하기 때문에 매우 중요하다[7]. 종래의 공간결합 방식은 최종 출력을 동축 라인으로 구현하기 때문에 고출력에 적합하지 않다. 그래서 안정적인 평면결합 방식인 바이너리 결합기를 설계, 제작하였다.

표 4. 도파관 바이너리 결합기 전기적 규격
Table 4. Waveguide binary combiner specifications

Parameter	Specifications
Passband	Ka band
Insertion loss	0.8dB Max. (Split loss : 9.0dB)
Return loss	15dB Min.
Amplitude balance	± 0.3 dB
Phase balance	$\pm 5^\circ$
Isolation	10dB Min.

그림 2는 바이너리 결합기의 시뮬레이션 모델링으로 내부에 중단 포트 매칭을 위한 매칭 단자를 삽입하여 격리도를 확보하였다. 매칭 단자는 실제 가공 및 조립 구조를 적용하여 예상 성능을 확인하였다.

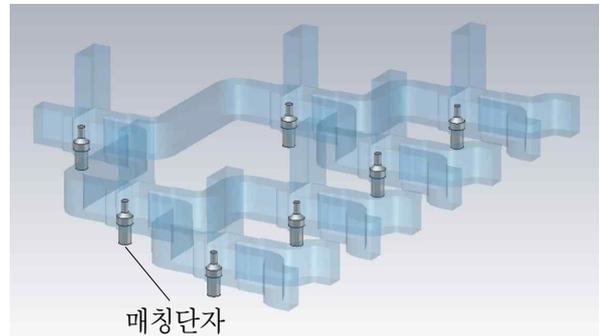


그림 2. 도파관 바이너리 결합기 시뮬레이션 모델링[1]
Fig. 2. Modeling of the waveguide binary combiner[1]

그림 3은 시뮬레이션 결과로 사용 대역에서 반사 손실 23dB 이상, 삽입손실 9.1dB 이하의 결과를 얻었다.

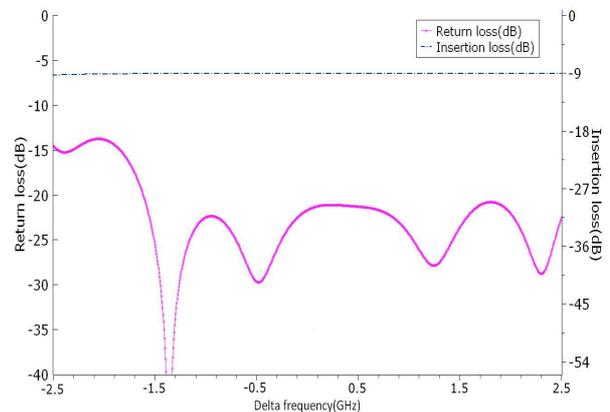
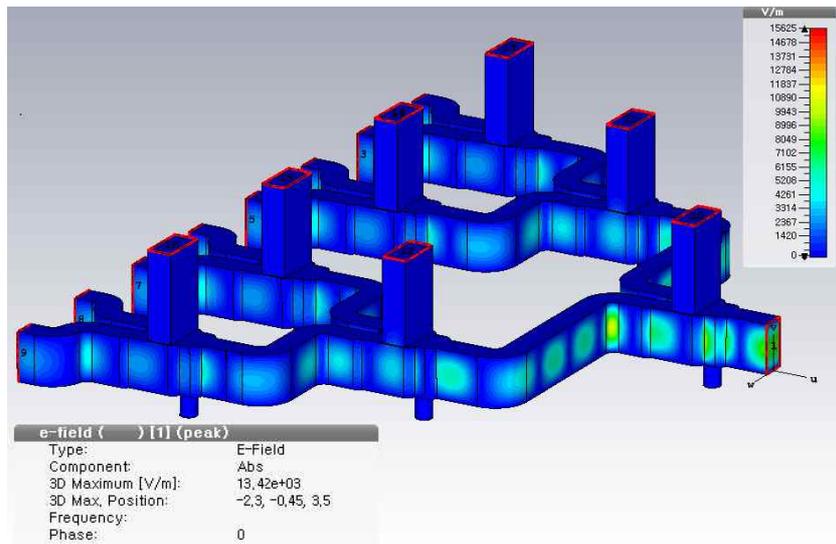


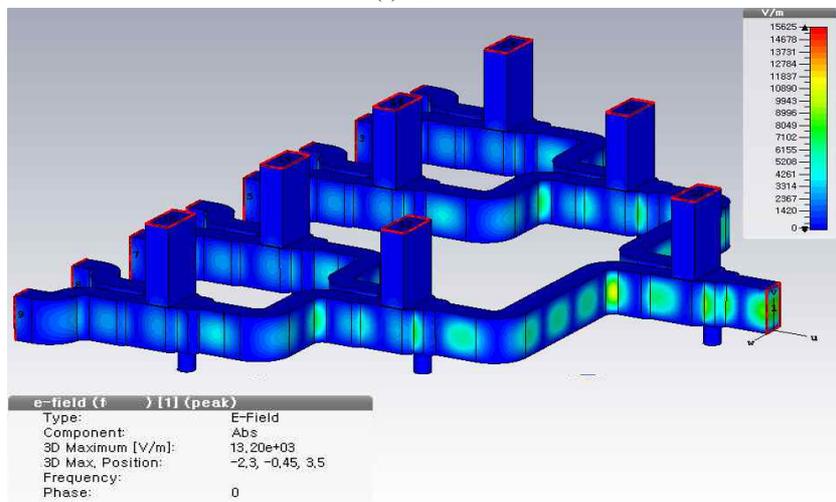
그림 3. 도파관 바이너리 결합기 시뮬레이션 결과[1]
Fig. 3. Simulation result of the waveguide binary combiner[1]

최종적으로 전자장 해석을 통해 최종 출력에서 방전 임계전력을 산출하여 이상적인 조건에서 충분

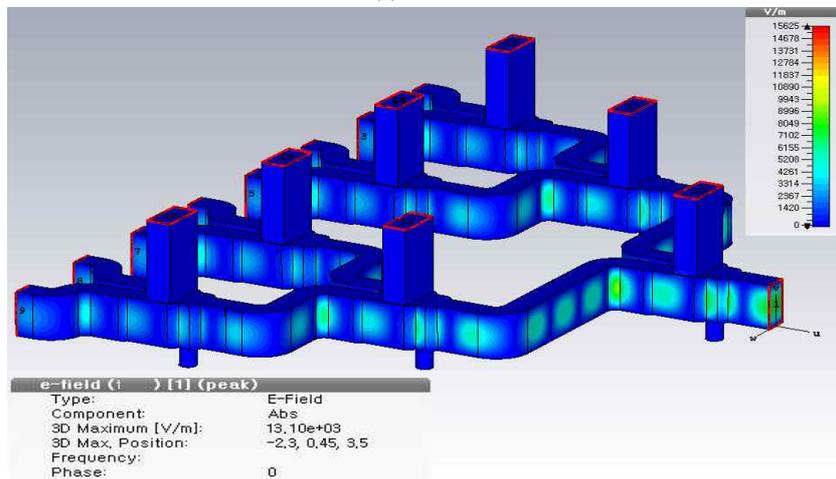
한 전력 마진이 있는지 확인을 하였다. 결과는 그림 4와 표 5에 나타내었다.



(a) f_L GHz



(b) f_C GHz



(c) f_H GHz

그림 4. 전력 결합기 전계 분포[1]

Fig. 4. E-field distribution in the power combiner[1]

표 5. 도파관 바이너리 결합기의 방전 임계전력 산출[1]
Table 5. Power rating of waveguide binary combiner[1]

Freq.(GHz)	Electric field	Discharge threshold power
f_L	105.8×10^3 V/m	804.0W
f_C	107.2×10^3 V/m	783.1W
f_H	96.69×10^3 V/m	962.6W

상기 분석을 통해 사용 전력 대비 수배 이상의 충분한 마진을 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 불연속면을 최소화하여 도파관 내부에서 아크(Arc)가 발생하지 않도록 모서리에 라운드 처리를 하여 시제를 제작하였다[1].

III. SSPA 구성품 제작

3.1 고출력증폭모듈

고출력 증폭모듈은 10W급 GaN MMIC 2개를 T-junction으로 결합 후 모드 변환기를 통해 도파관 전송 모드로 변환한 20W급 증폭 장치이다.

MMIC 2개를 결합하기에 앞서 단품 시험을 진행하였다. 그림 5는 MMIC 단품 시험 구성도이며, 아래 표 6은 MMIC 단품 시험 결과이다. 이득은 12.1~12.9dB를 갖으며, 출력 전력은 40dBm 이상으로 10W를 만족하는 성능을 보였다.

표 6. GaN MMIC 단품 시험 결과
Table 6. GaN MMIC single unit test results

Delta freq. [GHz]	-1.0	-0.2	0	+0.2	+1.0
Pin [dBm]	27.4	28.0	27.8	27.2	28
Pout [dBm]	40.1	40.1	40.2	40.1	40.2
Gain [dB]	12.7	12.1	12.4	12.9	12.2

그림 6은 고출력 증폭 모듈의 20W 출력 구현을 위해 모드 변환기와 일체형으로 구현된 PCB

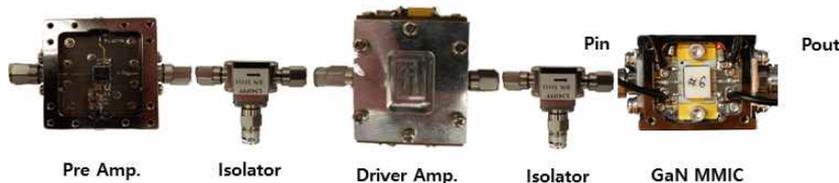


그림 5. GaN MMIC 단품 시험 구성도
Fig. 5. GaN MMIC single unit test composition diagram

T-junction 결합기로 삼입손실과 반사손실 측정 사진이다. 사용하지 않는 포트는 종단을 하였다. 시험 결과는 표 7에 수치로 나타났다.

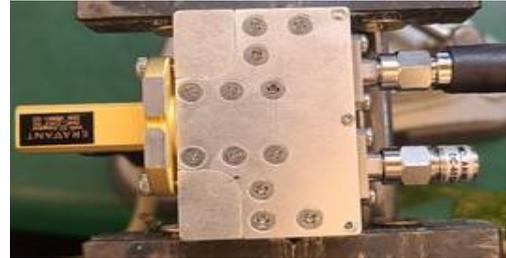


그림 6. 모드변환기 일체형 PCB T-junction 결합기
Fig. 6. Mode transition integrated PCB T-junction combiner

표 7. T-Junction 결합기 시험 결과
Table 7. T-Junction combiner test results

Parameter	Specification	Test data
Pass band	Ka band	-
Insertion loss_1	0.9dB max.	0.65
Insertion loss_2		0.48
Return loss	13.0dB Min.	24.8
Amplitude balance	± 0.3 dB	± 0.09
Phase balance	$\pm 5^\circ$	± 1.2

주 증폭모듈은 그림 7과 같은 형태로 구성되며, 실제 제작된 형상은 그림 8과 같다. 시험 결과는 표 8과 같이 측정되었다. 출력 전력은 입출력 어댑터 손실을 미포함한 값이며, 펄스반복주파수 000kHz 듀티비 40%에서 포화 전력값은 20W를 충분히 만족하게 측정되었다.

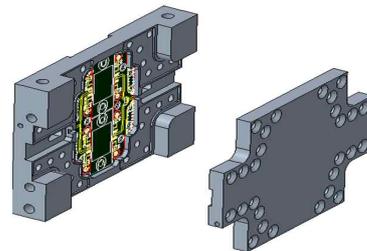


그림 7. 주증폭모듈 분해도
Fig. 7. Main amplifier module decomposition diagram

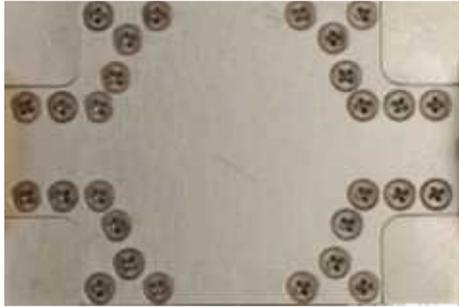


그림 8. 주 증폭모듈 제작 형상
Fig. 8. Main amplifier module production shape

표 8. 주 증폭모듈 시험 결과

Table 8. Main amplification module test results

Delta freq. [GHz]	-1.0	-0.3	0	+0.3	+1.0
Pin[dBm]	28.2	27.8	27.5	26.9	28.2
Pout[dBm]	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5
Gain[dB]	14.3	14.7	15.0	15.6	15.3

3.2 8-way 도파관 바이너리 결합기

기구 가공을 통해 회로를 설계하는 도파관에 경우 가공 방식에 따른 오차와 조립 구조에 따라 많은 성능 변화가 발생한다. 설계 단계에서 기구적 요인을 면밀히 확인하여 최적화를 진행하고, 도면화하여 제작하였다. 도금은 도전율이 가장 높은 은도금으로 선정하여 전송 손실을 최소화하였다.[11] 제작 사진은 그림 9와 같다.



그림 9. 도파관 바이너리 결합기[1]
Fig. 9. Waveguide binary combiner[1]

도파관 플랜지(Flange)는 국제 표준 규격인 UG-383/U를 선택하여 적용하였다. N5224A 회로망 분석기, N4693-60002 E-Cal kit을 통해 교정(Calibration) 하고, 도파관 어댑터를 연결하여 시험하였다. 측정하지 않는 포트는 종단을 하였다. 측정 사진은 그림 10에 나타내었다.

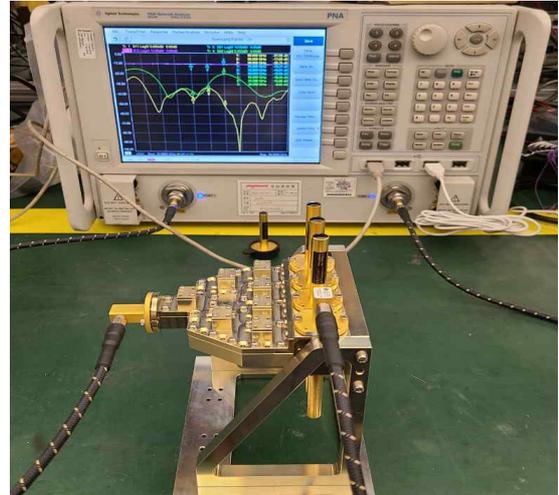


그림 10. 8-way 도파관 바이너리 결합기[1]
Fig. 10. 8-way waveguide binary combiner[1]

시험 결과는 반사 손실 20dB 이상, 삽입손실은 0.3 ~ 0.8dB의 분포를 보였다. 각 포트의 손실이 상이한 주된 원인은 가공 공차 및 조립 공차에 의한 것으로 판단된다. 그림 11은 시뮬레이션 대비 시험 결과를 비교하여 나타냈다.

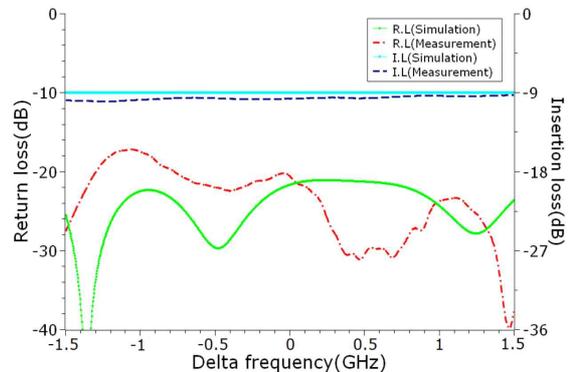


그림 11. 8-way 도파관 결합기 측정 결과[1]
Fig. 11. Measurement result of the waveguide combiner[1]

3.3 100W급 SSPA

10W급 고출력 증폭모듈 8개와 이를 결합하기 위해 8-way 도파관 바이너리 결합기를 적용하였다. 100W급 SSPA 조립시 조립 오차로 인한 RF 손실을 최소화하기 위해 기구물간 가이드핀을 적용하였다.

그림 12는 100W급 SSPA 형상이며, 200W로 결합하기 위해 제작된 100W급 SSPA 2대 측정 결과는 표 9 및 그림 13과 같다.



그림 12. 100W급 SSPA 제작 형상
Fig. 12. 100 class SSPA production shape

표 9. 100W급 SSPA 측정 결과
Table 9. 100W class SSPA measurement results

Delta freq. [GHz]	-0.5	-0.3	0	+0.3	+0.5
Pout[dBm]_SSP A #1	50.8	51.1	51.3	51.1	51.3
Pout[dBm]_SSP A #2	50.5	51.1	51.2	51.3	50.2

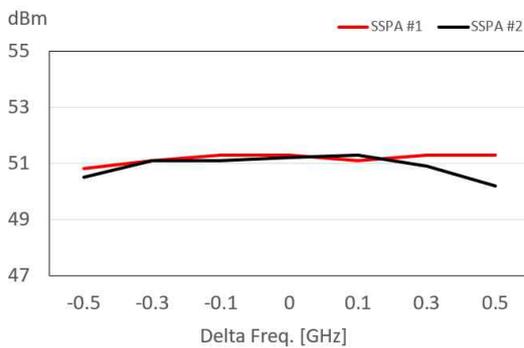


그림 13. 100W급 SSPA 측정 결과
Fig. 13. 100W class SSPA measurement results

3.4 200W급 2-way 도파관 바이너리 결합기

100W SSPA 2대를 결합하여 최종 200W 출력을 내기 위해서는 고출력 저 손실 2-way 결합기가 필요하다. 특히 각 고출력 SSPA 2개를 안정적으로 결합하기 위해 높은 격리 특성이 필요하다. 2-way 결합기의 시험 결과 및 제작 형상은 표 10 및 그림 14에 나타내었다.

표 10. 2-way 결합기 시험 결과
Table 10. 2-way combiner test results

Parameter	Specification	Test data
Pass band	Ka band	-
Insertion loss_1	0.5dB Max.	0.45
Insertion loss_2	(split loss : 3.0dB)	0.12
Return loss	15.0dB Min.	19.9
Isolation	15dB Min.	16.5



그림 14. 2-way 결합기 제작 형상
Fig. 14. 2-way combiner production shape

IV. 200W SSPA 제작 및 시험

200W급 SSPA는 그림 15와 같이 100W급 SSPA 2대와 2-way 도파관 바이너리 결합기로 구성된다. 설계 및 조립에 앞서 도파관 기구물의 가공 오차로 인한 RF 손실을 최소화하고 조립성을 개선하기 위해 3D 시뮬레이션으로 최적화하였다.

100W급 SSPA, 200W급 2-way 도파관 바이너리 결합기는 조립 오차를 최소화하기 위해 가이드 핀을 적용하였다

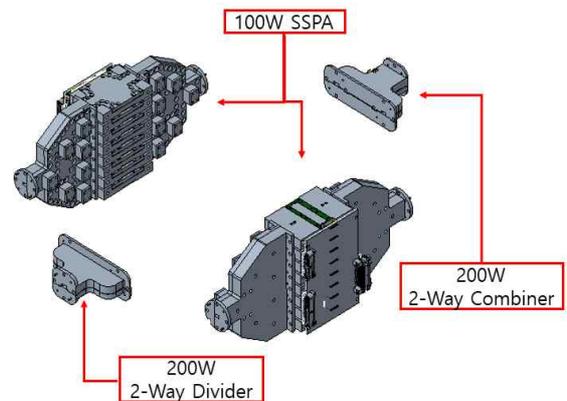


그림 15. 200W급 SSPA 분해도
Fig. 15. 200W class SSPA exploded view



그림 16. 200W급 SSPA 제작 형상
Fig. 16. 200W class SSPA production shape

200W급 SSPA 제작 형상은 그림 16과 같다.

시험 결과는 표 11과 같이 입력 전력 -10.0~-2.0dBm에서 출력 전력 53dBm 이상을 만족하는 결과를 나타내었다.

표 11. 200W급 SSPA 시험 결과

Table 11. 200W class SSPA test results

Delta freq. [GHz]	-0.5	-0.3	0	+0.3	+0.5
Pin[dBm]	-2.0	-2.0	-10.0	-2.0	-2.0
Pout[dBm]	53.0	53.3	53.2	53.5	53.2
Gain[dB]	55.0	55.3	63.2	55.5	55.2

V. 결 론

본 논문에서는 Ka 대역 초고주파 시스템에 적용 가능하며, TWTA의 단점인 예열시간, 유지보수, EL을 해결하기 위해 반도체형 소자를 사용한 200W SSPA에 대해 연구하였다.

연구된 200W급 SSPA는 100W급 SSPA 2대를 도파관 바이너리 결합하여 제작되었다. 설계시 적용한 전기적 길이와 기구적 치수는 EM-시뮬레이터, 3D-시뮬레이터를 사용하여 가공 오차로 인한 성능 저하를 시뮬레이션하여 최적에 값으로 도출하였다.

특히 전력을 결합하는 바이너리 결합기 설계시 도파관 형태로 200W급 대전력을 운용을 위해 전계 분석 시뮬레이션을 하여 기구 형상에 대한 정격 전력을 이론적으로 계산 후 제작시 가공 오차로 인한 성능 저하에 적용하기 위해 충분한 마진을 확보하여 설계 및 검증하였다.

200W 결합을 위해 제작된 100W급 SSPA_#1, SSPA_#2는 사용 대역에서 각각 최소 120.2W, 104.7W로 100W 이상을 만족하였고, 200W 결합을 위해 사용된 2-way 결합기의 경우 안정적으로 결합하기 위해 19.9dB의 높은 격리도를 갖도록 설계되었다. 결합된 200W급 SSPA의 최종 성능은 사용 대역에서 199.5W~223.9W이며 이득은 55.0~63.2dB로 측정되었다.

본 연구를 통해 확보한 결과는 초고주파, 고출력 레이저 시스템에 사용되고 있는 TWTA를 대체하는 고출력 SSPA로 적용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Hyo-Chul Kim, Heung-Rae Cho, Ju-Heun Lee, Deok-Jae Lee, Se-Hwan An, Man-Hee Lee, Ji-Han Joo, Jun-Beom Kwon, Hae-Chang Jeong, and So-Su Kim, "Design and Fabrication of Ka-band High Power and Low Loss Waveguide Combiner" The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC) Vol. 21, No. 3, pp. 35-42, Jun. 2021. <https://doi.org/10.7236/IIBC.2021.21.3.35>.
- [2] Yun-Ho Choe, Yun-Seop No, and In-Bok Yeom, "GaN HPA MMIC Technology Trends", The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 25, No. 2, pp. 73-78, Mar. 2014.
- [3] Honggu Ji, Younsub Noh, Younho Choi, Changsoo Kwak, In-bok Youm, Injong Seo, Hyungjin Park, Inho Jo, Byungchang Nam, and Donguk Kong, "Design and Fabrication of 25W Ka-Band SSPA Based on GaN HPA MMICs", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering And Science, Vol. 26, No. 12, pp. 1083-1090, Dec. 2015. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2015.26.12.1083>.
- [4] Young-Rak Choi, Jong-Woo Lee, Su-Hyun Lee, Se-Hwan An, Man-Hee Lee, and Hong-Rak Kim, "Development of the Ka-band 20watt SSPA(Solid State Power Amplifier) Using a Spatial Combiner", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 19, No. 1, pp. 231-238, Feb. 2019. <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.1.231>.
- [5] Jae-Sub Han, Joo-Yong Jung, Seong-Min Park, Kyung-Deok Yu, Bo-Gyun Kim, and Hyo-Chul Kim, "Design and Fabrication of Ka-Band 50W Class Solid-State Power Amplifier", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering And Science, Vol. 32, No. 1, pp. 56-65, Jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.1.56>.
- [6] N. J. Koliass, C. S. Whelan, T. E. Kazior, and K.

- V. Smith, "GaN technology for microwave and millimeter wave applications", 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2010, Anaheim, CA, USA, pp. 1222-1225, May 2010. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2010.5517592>.
- [7] Umesh K. Mishra et al., "AlGaIn/GaN HEMTs-An overview of device operation and applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 6, pp. 1022-1031, Jun. 2002. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2002.1021567>.
- [8] N. Estella, E. Camargo, J. Schellenberg, and L. Bui, "High-Efficiency, Ka-band GaN Power Amplifiers", 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Boston, MA, USA, pp. 568-571, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2019.8701005>.
- [9] Charles F. Campbell, Yueying Liu, Ming-Yih Kao, and Sabyasachi Nayak, "High Efficiency, Ka-band Gallium Nitride power amplifier MMICs", 2013 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2013), Tel Aviv, Israel, pp. 1-5, Oct. 2013. <https://doi.org/10.1109/COMCAS.2013.6685246>.
- [10] By Li Zhao, Jun Xu, Lei Wang, and Mao-Yan Wang, "A Novel Ka-Band Solid-State Power Combining Amplifier", Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 23, pp. 161-173, Aug. 2011. <https://doi.org/10.2528/PIERC11061408>.
- [11] Dong-Hak Lee and Doo-Yeong Yang, "Analysis and Design of a Wide Corrugated Conical Horn Antenna Based on Mode Matching Converter", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. Vol. 17, No. 7, pp 1-7, Jul 2016. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.7.1>.

저자소개

이 주 흔 (Ju-Heun Lee)



2017년 2월 : 호서대학교
전자공학과 (공학사)
2019년 2월 : 호서대학교
전자디스플레이공학부(공학석사)
2019년 2월 ~ 현재 : (주)피플웍스
관심분야 : 초고주파 능동/수동회로,
구성 안테나 시스템, 초고주파 센

서 네트워크 시스템 등

김 효 철 (Hyo-Chul Kim)



2007년 2월 : 제주대학교
통신공학과(공학사)
2007년 1월 ~ 2008년 3월 :
(주)액티팩스 연구원
2008년 3월 ~ 2017년 4월 :
(주)이너트론 선임연구원
2017년 4월 ~ 2020년 8월 :

(주)성산전자통신 선임연구원

2020년 8월 ~ 현재 : (주)피플웍스 수석연구원

관심분야 : 공간결합기, 도파관결합기, 모드변환기 등

조 흥 래 (Heung-Rae Cho)



2003년 2월 : 위덕대학교 정보통신
(공학사)
2002년 11월 ~ 2004년 4월 :
(주)알트론 연구원
2005년 3월 ~ 현재 : (주)피플웍스
수석연구원
관심분야 : 레이다시스템,

마이크로파 송수신기 등

이 덕 재 (Deok-Jae Lee)



1998년 2월 : 충남대학교
전자공학과 (공학사)
2000년 2월 : 충남대학교
초고주파공학 (공학석사)
2000년 2월 ~ 2001년 11월 :
(주)래트론 연구원
2001년 12월 ~ 현재 : (주)피플웍스

이사

관심분야 : 레이다시스템, 마이크로파 송수신기 등

안 세 환 (Se-Hwan An)



2004년 2월: 숭실대학교
정보통신공학과 (공학사)
2006년 2월: 숭실대학교
정보통신공과(공학석사)
2007년 1월~현재: LIG넥스원(주)
수석연구원
관심분야 : 초고주파 회로 설계,
마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

이 만 희 (Man-Hee Lee)



2007년 2월 : 충남대학교
전기정보통신공학부 (공학사)
2009년 2월 : 충남대학교
전파공학과(공학석사)
2009년 1월 ~ 현재 :
LIG넥스원(주) 선임연구원
관심분야 : 마이크로웨이브 탐색기,
초고주파 회로 및 시스템

주 지 한 (Ji-Han Joo)



2002년 8월 : 충북대학교
전파공학과(공학사)
2004년 8월 : 광운대학교
전파공학과(공학석사)
2008년 8월 : 광운대학교
전파공학과(공학박사)
2008년 7월 ~ 현재 :

LIG넥스원(주) 수석 연구원
관심분야 : 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및
시스템

김 흥 락 (Hong-Rak Kim)



1995년 2월 : 대구대학교
전자전기컴퓨터학부 (공학사)
1997년 8월 : 대구대학교
전자공학과 (공학석사)
1997년 7월 ~ 현재 :
LIG넥스원(주) 수석연구원
관심분야 : 초고주파 회로 설계,
마이크로파 신호처리, 마이크로파 송수신기,
마이크로파 탐색