

전자전용 S&C 대역 GaN 반도체 고출력증폭기 설계 및 제작

Design and Fabrication of S to C-Band GaN Solid State Power Amplifier for the Electronic Warfare

김재덕 · 정성훈 · 유승학* · 조정현* · 이종현 · 이왕용 · 문병호

Jaeduk Kim · Sunghun Jung · Seunghak Yoo* · Junghyun Jo* · Jonghyun Lee · Wangyong Lee · Byungho Moon

요 약

본 논문에서는 전자전용 고출력 재밍 송신장치(전자전 재머, electronic warfare jammer)에 사용하기 위해서 개발된 S&C 대역 GaN 반도체 고출력증폭기 설계 및 측정 결과를 소개한다. S&C 대역 GaN 반도체 전력증폭기는 광대역 아이솔레이터 없이 광대역 임피던스 정합 기법 및 Super CMC 캐리어조립체를 사용하는 80 W급 GaN 모듈의 다중 결합으로 제작되었고, GaN DRA와 GaN HPA 사이의 부정합(impedance mismatching) 성능을 개선하기 위해 다단의 90° Hybrid Coupler를 사용하여 소형의 광대역 정합회로를 설계하였다. 전자전용 S&C대역 GaN 반도체 전력증폭기는 2~6.5GHz의 주파수 범위의 연속파(CW) RF 주입조건에서 평균출력 225 W(최대출력 330 W), PAE 21.39 % 성능을 입증하였다. 또한 동작 주파수 범위의 1 % duty & 10 μ s PW Pulsed RF 주입조건에서 평균출력 287 W(최대출력 404 W)의 성능을 확인하였다.

Abstract

This paper describes the design and measurement results of an S to C-band gallium-nitride (GaN) solid-state power amplifier (SSPA) for an electronic warfare jammer. The S to C-Band GaN SSPA is fabricated, without wideband isolator, with multiple combined of 80 W GaN module using wide-band impedance matching topology and Super CMC (S-CMC) carrier structure, and designed small-sized broadband matching circuit using a cascaded 90° hybrid coupler for improve impedance mismatching performance between GaN DRA and GaN HPA. The S to C-band GaN SSPA for the electronic warfare, with a continuous wave (CW) RF injection condition over a frequency range of 2 to 6.5 GHz, demonstrated performance with a saturated average output power of 225 W (330 W peak output power), 21.39 % power added efficiency (PAE). Furthermore, with 1 % duty & 10 μ s PW Pulse RF injection condition over an operation frequency range, it had performance with a saturated average output power of 287 W (404 W peak output power).

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

I. 서 론

현대전 전장 환경은 광대역 주파수 스펙트럼 범위의 다양한 무기체계가 아군을 위협하며, 다양한 위협에 대응

하고 아군의 생존성 확보를 위해 광대역 고출력 전자전 재머가 필수적으로 요구되고 있다. 광대역 고출력 전자전 재머를 구현하기 위해서는 고출력과 광대역의 RF 신호를 CW 및 Pulse 모두 증폭할 수 있는 전력증폭기가 필수적

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

*유텔연구소(U-Tel)

· Manuscript received March 03, 2021 ; Revised April 4, 2021 ; Accepted April 15, 2021. (ID No. 20210303-019)

· Corresponding Author: Jaeduk Kim (e-mail: jaeduk.kim2@lignex1.com)

이다. 과거에는 TWTA(travelling wave tube amplifier)나 클라이스트론(klystron) 등의 진공관 전력증폭기를 이용하여 전자전용 재머의 고출력증폭기로 사용해 왔다. 하지만 TWT 기반의 진공관 전력증폭기는 긴 예열시간과 수 kV의 고전압 전원공급기를 필요로 하고, 해외 선진국에서는 단일 진공관 증폭기의 출력을 더 높이기 위해 CW 200 W급 수준의 TWTA 여러 개를 도파관 합성기 등으로 결합하는 방식으로 전자전용 재머를 구현하였다. 또한, 진공관 증폭기는 낮은 전력결합 효율과 RF 증폭 송신여부에 관계없이 발생하는 높은 대기전력으로 인한 발열을 낮춰주기 위해 추가적인 냉각장치 등이 필요하며, 이로 인해 전자전 재머 체계의 운용비용 증가 및 소형화, 경량화 구현이 어려운 단점과 kV 고전압 전원공급기 사용으로 항공용 전투기 재머로 사용 시 고고도(high altitude) 운용 제한(operational restriction)이라는 큰 단점이 있었다^[1].

최근에는 노후화된 진공관 전력증폭기를 대체하고, 기존 재머 체계 성능을 개선하기 위해 수십 V의 저전압 전원공급기를 사용하고, 낮은 상시 소모 전력과 낮은 잡음 특성을 갖는 GaN 기반의 화합물 반도체 소자를 이용한 광대역 SSPA로 대체 개발되는 추세이다. 또한, 해외에서도 도입하여 사용해 왔던 핵심부품인 진공관 전력증폭기의 수출제한(export licence)에 대한 대비와 차세대 전투기(6세대 전투기 이후) 적용 예정인 컴포널 능동배열 안테나형 재머 구현을 위해 광대역 고출력 SSPA의 국내 기술개발이 요구되고 있다.

최근 화합물 반도체 소자 중에서도 GaN 기반 화합물 반도체 소자는 SiC(silicon carbide) 기반의 공정이 더욱 발전을 이루어 방열 성능과 주파수 범위 성능이 개선되었고, 이러한 특성을 바탕으로 GaN 기반 반도체 전력증폭기는 진공관 전력증폭기를 대체하여 민수용 4G/5G 이동통신 분야와 군용 레이다 및 위성통신 체계 등 민수/군수 산업 전 영역에서 광범위하게 사용되고 있다. 하지만 국내에서 개발된 민수용/군용 GaN 기반 반도체 고출력증폭기의 주파수 대역폭은 수십~수백 MHz 수준의 협대역 증폭기가 주로 생산 및 개발되고 있으며, 수 GHz 수준의 광대역 대역폭과 수백 W 수준의 출력전력을 요구하는 전자전 고출력 재머용 GaN 증폭기는 아직 연구단계 수준이며, 수출제한이라는 한계가 있다^{[2],[3]}.

본 논문에서는 미래 전장 운용환경에서 광범위하게 사용할 수 있도록 기존의 S&C대역 진공관 전력증폭기와 동등 이상의 성능을 구현한 GaN 반도체 S&C SSPA를 설계 및 제작하였고, RF 성능 위주로 설계 및 제작결과를 소개하였다. 본 논문 II 장에서는 고이득 구동증폭모듈, 대전력 구동증폭모듈, 대전력 증폭모듈, 대전력결합기/커플러 네 종류의 RF Sub 모듈에 대한 개별 설계 및 제작 결과 내용을 제시하였고, III 장에서는 제작 완료된 광대역 고출력증폭기에 RF Pulse에서 RF CW 신호를 인가하며 주요 성능을 측정 및 확인하였다.

II. S&C대역 반도체 고출력증폭기 설계 및 제작

본 논문의 설계된 S&C대역 반도체 고출력증폭기(이하 S&C SSPA)는 0 ± 5 dBm의 2.0~6.5 GHz 동작주파수의 RF Pulse~CW 신호를 입력받아 넓은 주파수범위의 입력신호에 관계없이 동작하고, 동작주파수 전대역 평균 200 W 이상의 CW 출력 성능을 갖도록 설계하였다. S&C SSPA는 그림 1과 같이 고이득 구동증폭모듈, 대전력 구동증폭모듈, 대전력 증폭모듈, 전력결합기/커플러, 검출기, 제어모듈, AC/DC전원모듈과 DC전원분배모듈 및 EMI Filter로 구성되어 있다.

고이득 구동증폭모듈에는 0.1 W급(이하 AMP) 증폭기, 대전력 구동증폭모듈에는 10 W급 상용 GaN 소자(이하 GaN DRA) 증폭기를 사용하였고, S&C SSPA의 출력신호 세기를 결정하는 광대역 고출력 증폭기는 기존에 설계/제작하였던 80 W급 GaN 반도체 전력증폭기(이하 GaN HPA)^[4]를 사용하였다.

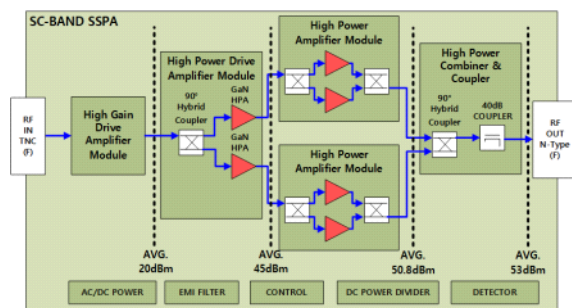


그림 1. S&C 대역 GaN 반도체 고출력증폭기 구성도
Fig. 1. Block diagram of S to C band GaN SSPA.

GaN HPA는 낮은 입/출력 반사손실로 인한 부정합으로 인해 각 GaN DRA와 GaN HPA 입/출력단 사이에서 광대역 신호 Ripple이 발생되어 증폭기 최종 출력 주파수 평탄도에 큰 영향을 주게 된다. 이를 개선하고 안정적으로 증폭기를 사용하기 위해서 일반적으로 물리적 크기가 큰 광대역 아이솔레이터(isolator)를 사용하지만, 본 논문에서 소개하는 S&C SSPA는 물리적 크기를 최소화하고, 입/출력 반사손실을 개선할 수 있도록 GaN DPA의 출력단과 GaN HPA의 입력단 사이에 다단의 90° Hybrid Coupler를 적용하였다.

대전력 구동증폭모듈에서는 90° Hybrid Coupler를 통해 분기된 후 GaN HPA에서 증폭된 45 dBm(31.6 W) RF 신호를 각 대전력 증폭모듈에 주입한다. 대전력 증폭모듈을 통해 증폭된 50.8 dBm(120 W) RF신호를 대전력결합기/커플러에서 90° Hybrid Coupler로 전력을 결합하여 최종 53 dBm(200 W)의 출력신호세기를 출력하고, 40 dB 커플러(coupler)를 통해 출력신호세기 및 역 반사전력을 검출할 수 있도록 설계하였다.^{[5]~[9]}

2-1 고이득 구동증폭모듈 설계 및 제작

일반적으로 광대역 증폭기는 협대역 증폭기에 비해 주파수별 신호세기의 편차가 존재하고, 적용하는 시스템에 따라 광대역 증폭기 외부에서 입력되는 RF 케이블의 길이와 증폭기 입력 전단 신호발생기의 주파수 평탄도에 따른 입력 신호세기 편차가 추가되어 RF 입력 신호세기의 편차가 더 크게 발생하게 된다.

고이득 구동증폭모듈은 S&C SSPA에 입력되는 RF 신호를 최초로 구동하는 증폭기이며, 그림 2의 구성도와 같이 10 dB 범위(-5 dBm~+5 dBm)의 광대역(S to C Band)

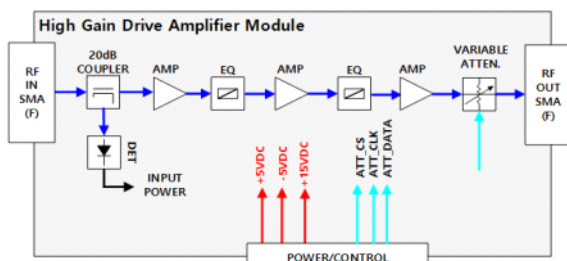


그림 2. 고이득 구동증폭모듈(HGDAM) 구성도
Fig. 2. Block diagram of high gain drive amplifier module.

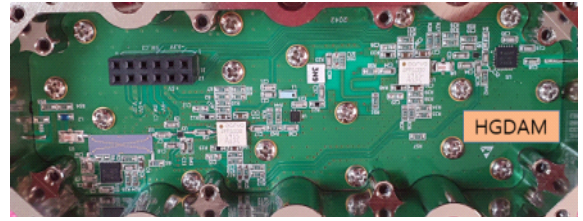


그림 3. 고이득 구동증폭모듈(HGDAM) 제작 사진
Fig. 3. Photograph of high gain drive amplifier module.

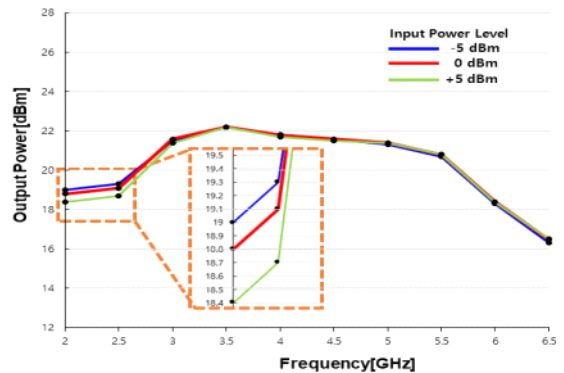


그림 4. -5 & 0 & 5 dBm 입력전력 시 고이득 구동증폭모듈의 주파수 변화에 따른 출력신호세기 CW 측정 결과

Fig. 4. Measured CW output power performance results of high gain drive amplifier module with frequency variation at -5 & 0 & 5 dBm input power.

신호가 입력되어도, 구동증폭모듈의 포화 동작을 통해 출력 신호세기가 일정하도록 설계하였다. 그림 3의 고이득 구동증폭모듈 제작 사진과 같이 Qorvo 社의 QPM 1000소자를 적용하여 제작하였다. 또한 증폭기에 입력되는 RF 신호를 검출하기 위해 20 dB RF 커플러와 RF Detector를 적용하여 설계하였다.

그림 4는 제작된 고이득 구동증폭모듈 입력전력 변화에 따른 출력신호세기 CW 측정결과를 나타내었다. 측정 결과, -5 ~ +5 dBm의 입력 신호 크기 변화에도 최대 0.6 dB의 편차 이내의 출력전력 평탄도를 유지할 수 있음을 확인하였다.

2-2 대전력 구동증폭모듈 설계 및 제작

대전력 구동증폭모듈은 구동증폭레벨을 최대화하기

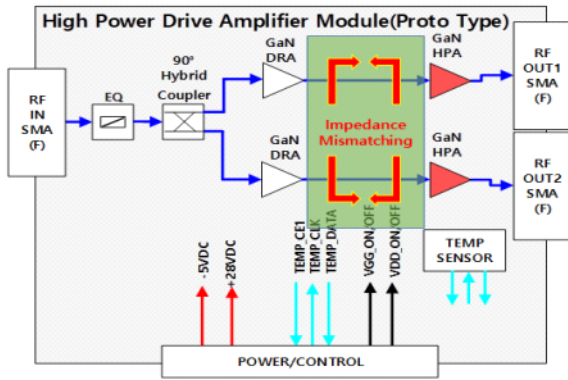


그림 5. 대전력 구동증폭모듈(HPDAM, proto type) 구성도
Fig. 5. Block diagram of high power drive amplifier module (proto type).

위해 그림 5의 Proto Type 구성도와 같이 설계하였다.

전단의 고이득 구동증폭모듈에서 주파수별 일정한 크기의 신호세기를 입력할 때, 전단의 주파수별 평탄도와 대전력 구동증폭모듈에서 사용하는 상용 10 W급 GaN DRA와 자체/설계 제작한 80 W급 GaN HPA의 주파수별 평탄도가 합산되어, 주파수별로 RF 출력신호세기 차이가 크게 발생한다. 일반적으로 높은 주파수 대역 대비 낮은 주파수 대역에서 더 높은 이득과 출력 값이 발생하게 되고, 상대적으로 높은 RF 입력신호세기가 대전력 증폭모듈의 GaN HPA에 전달되면, 과입력 RF주입에 의해 GaN HPA의 Gate Bias와 Drain Bias에 과전류 발생 및 열 스트레스 증가로 이어진다. 이로 인해 그림 6과 같이 GaN HEMT Bare Die 및 증폭기 내 주요 소자들의 손상이 발생

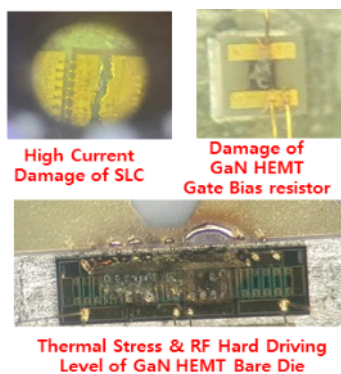


그림 6. 과입력 RF 주입에 의한 증폭기 고장 사례
Fig. 6. Amplifier failure by over-input RF injection.

하게 되며, 이는 S&C SSPA 전체의 MTBF(mean time between failure)에 좋지 않은 영향을 주게 된다.

이를 방지하기 위해 대전력 구동증폭모듈 입력단에 주파수 대비 역기울기의 등화기(equalizer)를 적용하여 대전력 구동증폭모듈의 전력이득(power gain) 평탄도와 동작 안정성을 개선하였다.

대전력 구동증폭모듈 Proto Type을 제작하여 출력신호세기 및 포화 전력이득 Ripple 변화량을 측정하였다. 측정 결과, GaN HPA가 -3 dB 이하 수준의 낮은 입력반사손실 특성을 보였으며^[4], 이로 인해 GaN DRA와 GaN HPA에 사이에 부정합이 발생하여 최대 ± 10 dB Power Gain Ripple을 확인하였다.

이를 개선하기 위한 일반적인 방법은 앞서 2장 서두의 설명과 같이 GaN DRA와 GaN HPA 사이에 광대역 내부정합회로(inter stage matching)를 적용하는 방안과 광대역 아이솔레이터를 적용하는 방안 크게 두 가지가 있다. 광대역 내부정합회로로 개선 방안을 적용 시, 추가적인 회로를 PCB에 제작할 공간 필요와 GaN HPA에 추가적인 설계변경이 필요한 단점이 있었다. 또한 광대역 아이솔레이터는 높은 허용전력과 낮은 삽입손실 특성을 구현하기 어려우며, 물리적 크기도 매우 크기 때문에 개선 방안으로 적용하기에 어려웠다.

본 논문에서는 이를 해결하기 위해 그림 7의 구성도와 같이 대전력 구동증폭모듈 Final은 물리적 크기의 변경이 없고, PCB 설계 변경을 최소화하도록 GaN HPA의 입력

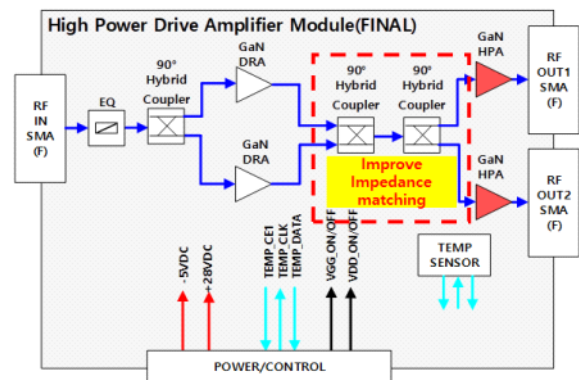


그림 7. 대전력 구동증폭모듈(HPDAM, final) 구성도
Fig. 7. Block diagram of high power drive amplifier module (final).

반사손실 영향을 최소화할 수 있는 방안으로 변경 제안하였다. 제안된 대전력 구동증폭모듈 Final 설계 구조는 광대역 아이솔레이터 없이도 GaN DRA와 GaN HPA 사이의 격리도를 확보할 수 있도록 두 개의 90° Hybrid Coupler를 다단으로 적용하여 작은 크기로 광대역 매칭을 구현하였다. GaN DRA와 GaN HPA 사이에 두 개의 90° Hybrid Coupler를 적용한 그림 7의 대전력 구동증폭모듈 (HPDAM, final) 설계 구조는 그림 5의 Proto Type 구조에 비해 90° Hybrid Coupler 추가 장착으로 인한 삽입손실 증가의 단점이 있으나, 증폭기의 광대역 입/출력반사손실을 개선하고, GaN DRA와 GaN HPA 간 격리도를 확보하여 안정적으로 전력이득 평탄도의 성능이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

표 1은 제작된 대전력 구동증폭모듈 Proto Type과 제안 구조로 제작된 대전력 구동증폭모듈 Final의 출력세기 및 전력이득 Ripple 변화량의 측정결과를 비교하였고, GaN DRA와 GaN HPA에 사이에 ± 7.6 dB Power Gain Ripple 부정합 개선과 2.2 dB의 출력전력 및 포화전력 이득 개선 효과를 확인할 수 있다.

그림 8은 대전력 구동증폭모듈 Final의 제작 사진이다. 대전력 구동증폭모듈에 사용된 PCB는 Taconic사의 TLY-5 31 mil($\epsilon_r=2.2$)기판으로 Microstrip RF 전송선로를 적용하였고, 상용 90° Hybrid Coupler는 주파수 대역 2.0~6.8 GHz에서 삽입손실 0.3 dB, 격리도 17 dB, RF Power

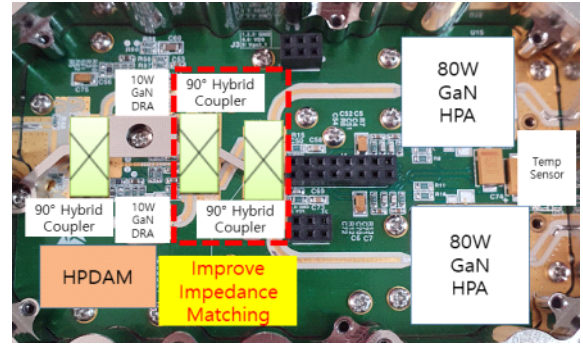


그림 8. 대전력 구동증폭모듈(HPDAM) final 제작 사진
Fig. 8. Photograph of high power drive amplifier module final.

Rating 100 W 이상의 성능을 갖는 Innovative社のIPP-7043 소자 세 개를 사용하였다. 대전력 구동증폭모듈은 두 가지 종류의 증폭기 소자를 사용하였고, 상용 10 W급 GaN DRA와 자체 설계/제작한 80 W급 GaN HPA를 적용하여 제작하였다.

상용 10 W급 GaN DRA는 Qorvo社의 QPA1003D GaN MMIC 소자를 패키징하여 사용하였고, 패키징은 열전도도가 높은 9.6×7.2 mm² 크기의 CuW Carrier 위에 AuSn(80/20) 유테틱(eutectic) 공정으로 접합하는 방법으로 제작하였다. 패키징된 GaN DRA의 전원 공급은 Gold Wire Wedge Bonding 1 mil과 Gold Ribbon Bonding 3 mil을 사용하여 전기적으로 공급하였다. 또한 자체 설계/제작한 80 W급 GaN HPA 제작 공정은 GaN HEMT Bare Die (CG2H80060D) 소자를 열전도도가 높은 22.0×22.0 mm² 크기의 S-CMC Carrier 위에 AuSn(80/20) 유테틱 공정을 사용하여 접합하는 방법으로 제작하였고, 입/출력 정합회로에 알루미늄나기판(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^[4]. 대전력 구동증폭모듈 조립은 구리(Cu) 하우징 바닥면과 PCB간 Ag 에폭시를 사용하였고, DC Bias 연결은 Gold Ribbon Welding 10 mil과 20 mil, RF 전송선로 간 연결은 Gold wire Wedge Bonding 1 mil을 사용하여 전기적으로 연결하였다.

특히 대전력 구동증폭모듈에는 자체 설계/제작한 80 W급 GaN HPA 2개가 인접하여 장착되고, 모듈 출력 단에

표 1. 제작된 대전력 구동증폭모듈 proto type과 final 측정결과 비교

Table 1. Comparison of measured results of fabricated high power drive amplifier module proto type vs final.

	Design target	Proto type	Final
Input power [dBm]	20 (AVG.)	20 (AVG.)	20 (AVG.)
Output power [dBm]	≥ 45 (AVG.)	43 (AVG.)	45.2 (AVG.)
		38~45	45.1~45.3
Saturated power gain [dB]	≥ 25	23	25
Power gain ripple variation [dB]	± 3	± 10	± 2.4

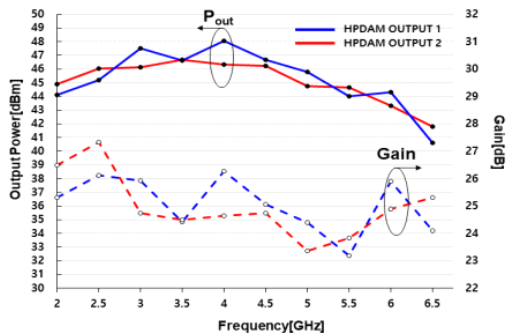


그림 9. 0 dBm CW 입력전력 시 다단 연결한 고이득 구동증폭모듈 & 대전력 구동증폭모듈의 주파수 변화에 따른 출력 1 & 2의 성능 측정 결과

Fig. 9. Measured output 1 & 2 performance results of cascade high gain & high power drive amplifier module with frequency variation at 0 dBm CW input power.

300 W 이상의 발열량이 집중되므로 GaN HPA 보호를 위해 온도 센서를 추가하여, 설정 온도 이상의 고온이 측정되면 Gate/Drain Bias 전원을 순차적으로 차단하도록 설계/제작하였다.

그림 9는 고이득 구동증폭모듈에 0 dBm의 CW RF 신호 주입 시 대전력 구동증폭모듈에서 출력을 측정한 결과이다. 측정결과, CW RF 신호 주입 시 2.0~6.5 GHz 동작주파수 전 대역 평균 45.19 dBm(33 W)의 출력전력과 평균 25 dB의 전력 이득으로 표 1의 설계 목표를 만족함을 확인할 수 있다.

2-3 대전력 증폭모듈 설계 및 제작

대전력 증폭모듈은 그림 10의 구성도와 같이 설계하였

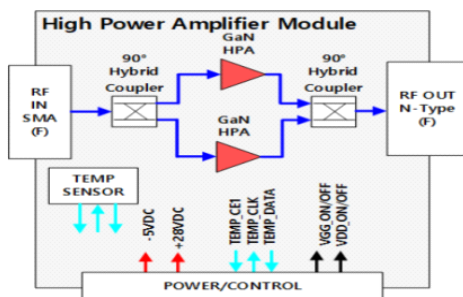


그림 10. 대전력 증폭모듈 구성도

Fig. 10. Block diagram of high power amplifier module.

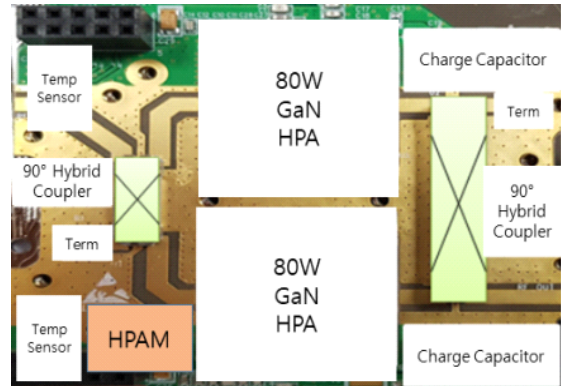


그림 11. 대전력 증폭 모듈(HPAM) 제작 사진

Fig. 11. Photograph of high power amplifier module.

고, 그림 11과 같이 대전력 구동증폭모듈의 제작 사양과 동일하게 PCB 및 기구물 그리고 자체 설계/제작한 GaN HPA를 적용하였다. 또한 대전력 증폭모듈의 입/출력 RF Power Rating을 고려하여 2중의 상용 90° Hybrid Coupler를 적용하였으며, GaN HPA 입력단에는 Innovative社の IPP-7043 소자를, 출력단에는 주파수 대역 2.0~6.0 GHz, 삽입손실 0.4 dB, 격리도 17 dB, RF Power Rating 150 W 이상의 성능을 갖는 Innovative社의 IPP-7150 소자를 적용하여 제작하였다.

대전력 증폭모듈은 높은 RF 신호 입력 조건에서 동작하므로 400 W 이상의 발열량이 발생하여 각각의 GaN HPA 보호를 위해 온도 센서를 좌/우 GaN HPA 입력단에 각각 장착하였고, CW 및 Pulse RF 주입 동작 조건에서 순간적으로도 최대 출력을 안정적으로 증폭 동작할 수 있도록 Charge Capacitor를 장착하였다.

그림 12는 고이득 증폭모듈, 대전력 구동증폭모듈의 출력을 통해 입력된 신호에 의한 대전력 증폭모듈 하나 기준의 출력 측정결과이다. 측정결과, CW RF 신호 주입 시 동작주파수 전 대역 평균 50.80 dBm(120 W)의 출력전력과 평균 5.61 dB의 전력 이득을 확인하였다.

2-4 대전력결합기/커플러 설계 및 제작

대전력결합기/커플러는 대전력 구동증폭모듈 내에서 GaN HPA 입력단의 90° Hybrid Coupler에 의해 분기된 후, 두 개의 대전력 증폭모듈에서 각각 증폭된 대전력 RF 신호

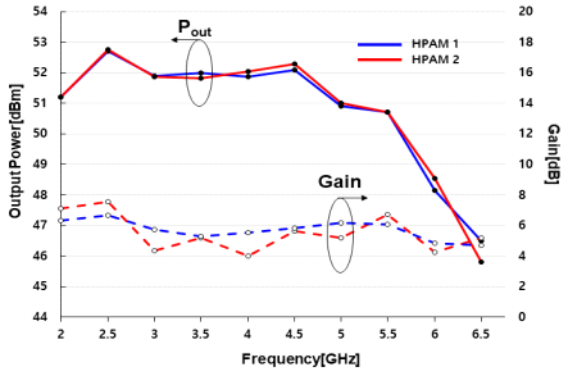


그림 12. 0 dBm CW 입력전력 시 다단 연결한 고이득 구동증폭모듈 & 대전력 구동증폭모듈 & 대전력 증폭모듈의 주파수 변화에 따른 출력 성능 측정 결과

Fig. 12. Measured output performance results of cascade high gain & high power drive amplifier module & high power amplifier module with frequency variation at 0 dBm CW input power.

호를 90° Hybrid Coupler로 대전력 결합하는 기능, 대전력 출력 신호세기의 순방향/역방향 RF신호를 검출하여 장비 보호 및 실시간 RF 출력성능 점검기능을 수행하기 위해 90° Hybrid Coupler와 40 dB 커플러가 결합된 구조로 설계하였다.

대전력 증폭모듈에서 입력받은 대전력 RF 신호의 삽입손실 최소화와 대전력 결합 시 발생하는 열을 최소화하고, 방열에 유리하도록 스트립라인 형태로 설계하였다. 또한, 대전력결합기/커플러에 인가될 수 있는 125 W CW 역전력을 견딜 수 있도록 EMC Technology 社의 Flange Mount Type 상용 High Power Term인 CT1310DHT 소자를 적용하였다.

그림 13은 HFSS EM 해석 설계 툴을 사용하여 스트립라인 구조의 대전력결합기/커플러를 분석한 시뮬레이션 결과이며, 삽입손실 S_{31} -3.52 dB 이상, S_{32} -3.39 dB 이상, 대전력결합기/커플러의 반사손실은 -16.8 dB 이하, 입력 포트 간 격리도 -15.4 dB 이하, 순방향/역방향 커플링 -39.93 dB / -39.62 dB 이하의 특성을 확인할 수 있다.

그림 14는 대전력결합기/커플러 제작 사진을 나타냈으며, PCB는 Park Electrochemical Corp의 N9000, NX Series 10 mil과 62 mil($\epsilon_r=2.5$)기판을 사용하였다. 5층의 PCB를

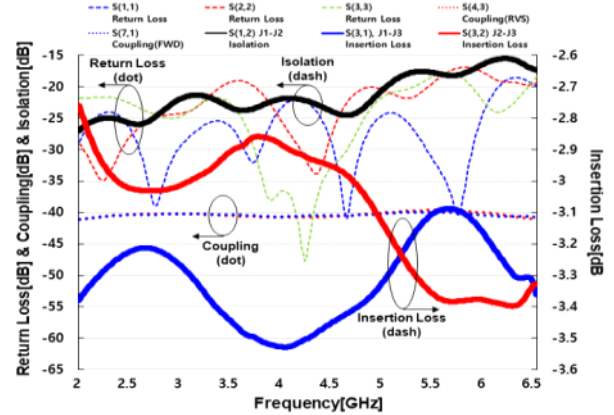


그림 13. 대전력결합기/커플러 HFSS EM시뮬레이션 결과
Fig. 13. HFSS EM simulation results of high power combiner/coupler.

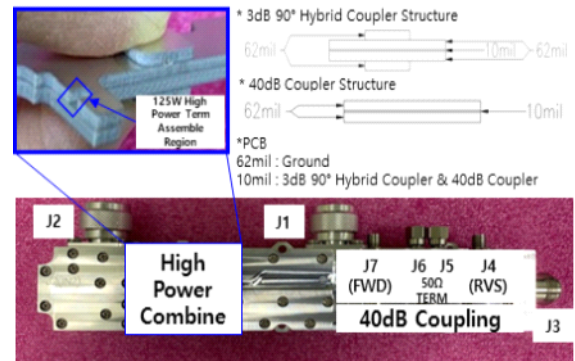


그림 14. 제작된 대전력결합기/커플러 제작사진
Fig. 14. Photograph of fabricated high power combiner/coupler.

사용한 Broadside-Coupled Symmetric Stripline RF 전송선로 구조의 3 dB 90° Hybrid Coupler에서 각 대전력증폭모듈에서 증폭된 90° 편차가 있는 RF신호가 결합하도록 하였고, 증폭기 최종 출력단의 순방향 전력 검출기능과 역방향 전력 검출기능을 하는 40 dB 커플러는 3층의 PCB를 사용한 Edge-coupled Symmetric Stripline RF 전송선로 구조로 제작하였다.

그림 15는 대전력결합기/커플러의 측정 결과이다. 측정 결과, 삽입손실 S_{31} -4.25 dB 이상, S_{32} -4.07 dB 이상, 반사손실은 -13.54 dB 이하, 입력 포트 간 격리도 -14 dB 이하, 순방향/역방향 커플링 -40.8 dB / -37.8 dB 이하의

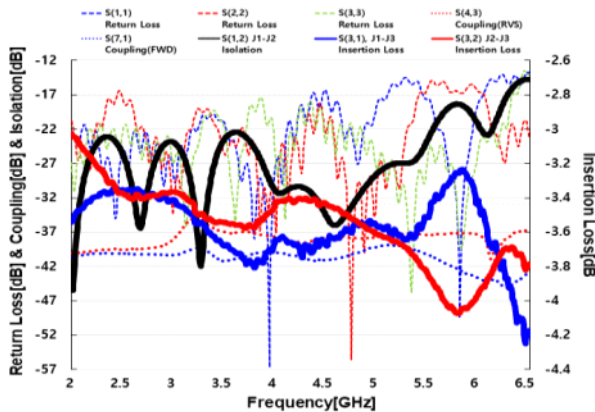


그림 15. 대전력결합기/커플러 측정 결과
Fig. 15. Measurement results of high power combiner/coupler.

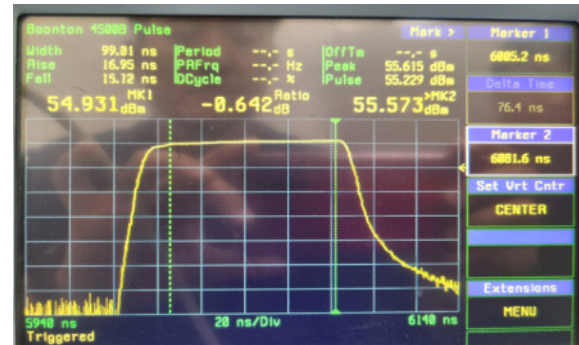
특성을 가진다. 전반적으로 시뮬레이션 결과와 유사한 경향의 특성을 확인할 수 있었으며, 시뮬레이션 대비 발생한 오차의 원인으로 3층 & 5층의 스트립라인 PCB와 스트립라인의 Ground 역할을 하는 대전력결합기/커플러 금속 기구물과의 조립공정 오차로 인한 영향으로 판단된다.

III. S&C 대역 반도체 고출력증폭기 시험 결과

S&C 대역 반도체 고출력증폭기는 고이득 구동증폭모듈과 대전력 구동증폭모듈을 Cascade 연결하여 구동 증폭한 후 두 개의 대전력 증폭모듈 각각에 대전력 증폭된 RF 신호를 최종단인 대전력결합기/커플러에서 대전력결합할 수 있도록 구성하였고, S&C대역의 Pulse와 CW RF 0 dBm 신호 인가 조건에서 동작주파수 전 대역 평균 200 W 이상의 출력신호세기를 목표로 설계하였다.

그림 16은 S&C SSPA에 2.5 GHz, 0 dBm 의 Pulse(PW : 100 ns, PRI: 1 μ s, Duty 10 %)와 CW RF 입력 신호조건 의 신호를 주입하여 측정된 계측기 측정 화면을 나타냈으며, 100 ns의 Short Pulse 조건에서 CW 조건까지 안정적인 출력성능을 확인할 수 있다.

그림 17은 0 dBm의 입력전력에서 Pulse와 CW RF 신호를 S&C SSPA에 주입 시 2.0~6.5 GHz의 주파수 영역에서 측정된 출력 특성을 나타내었다. 측정 결과, CW RF 주입 시 동작주파수 전 대역 평균 225 W(최대 출력 330 W, 4.5 GHz)의 출력전력과 동작 주파수 전 대역 평균



(a) Pulse



(b) CW

그림 16. S&C SSPA의 출력전력
Fig. 16. Output power of S&C SSPA.

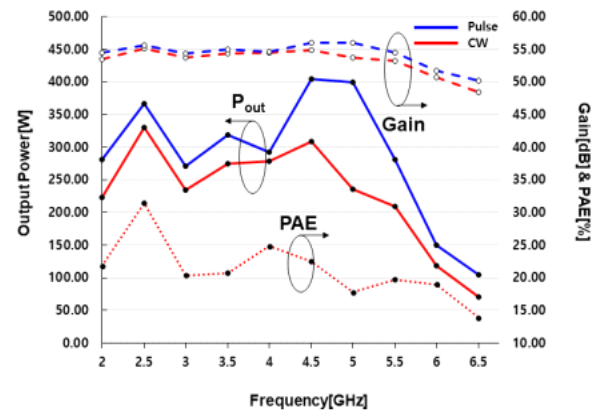


그림 17. 0 dBm pulse(blue) 와 CW(red) 입력전력에서 주파수 변화에 따른 S&C SSPA 의 RF 출력 성능 측정 결과
Fig. 17. Measured RF output performance results of S to C band SSPA with frequency variation at 0 dBm pulse(blue) RF & CW(red) input power.

표 2. 제작된 S&C SSPA 측정결과와 기존 발표된 광대역 반도체 전력증폭기와 진공관 전력증폭기 성능 비교

Table 2. Comparison of measured results of the fabricated Sto C band SSPA and previously published SSPA & TWTA performance.

	This work	Ref. [10]	Ref. [11]	Ref. [12]	Ref. [13]
Frequency [GHz]	2.0~6.5	2.0~6.0	2.0~6.0	2.5~8.0	2.0~6.5
Fractional BW (%)	105.8	100	100	95.45	105.8
Power gain [dB]	53.32	50	53	35	36.5
CW pout [W]	225 (avg.)	100 (max.)	200 (min.)	320 (min.)	325 (min.)
PAE [%]	21.39	22	18	14.7	35
AMP type	SSPA	SSPA	SSPA	TWTA	TWTA
Size [mm]	375.2×165×99	175×90×23	387.35×177.8×67.8	554×75.9×69	445×91.4×87.6
Heat sink	With	Without	Without	Without	Without

21.39 %의 전력부가효율(PAE), 53.52 dB의 전력이득 출력 성능을 확인하였다. 또한, 1 % duty & 10 μ s PW의 Pulse RF 주입 시 동작주파수 전 대역 평균 287 W(최대 출력 404 W, 4.5 GHz)의 출력전력과 54.58 dB의 전력이득 출력 성능을 확인할 수 있다. 전력부가효율은 EMI 필터에서 소모되는 전력을 제외하였고, CW 조건에서만 측정하였다.

표 2는 제작된 S&C SSPA 측정결과와 기존 발표된 광대역 SSPA와 TWTA의 결과를 비교하였고, 본 논문의 S&C SSPA는 넓은 대역폭에서 높은 출력전력과 고효율 및 전력이득 측면 그리고 방열판이 포함되어 있는 크기 측면에서 경쟁력을 가지고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 미래 전장 환경에서 전자전용 고출력 재머에 사용할 수 있는 전자전용 S&C대역 GaN 반도체 고출력증폭기의 설계 및 제작에 대해 확인하였다. 설계된

S&C SSPA는 자체 설계/제작한 GaN HPA 그리고 대전력 결합기/커플러를 사용하여 물리적 크기를 최소화하였고, 90° Hybrid Coupler를 활용한 전력결합기법으로 물리적 크기가 큰 광대역 아이솔레이터 없이 입/출력 반사손실을 개선하여 증폭기 최종 출력 주파수 평탄도 성능을 향상하였다. 0±5 dBm의 입력전력 세기 변화에 관계없이 최소 100 ns PW의 Pulse부터 CW RF 신호를 S&C SSPA에 주입 시 안정적으로 동작함을 확인하였다. 동작주파수 2.0~6.5 GHz에서 CW 기준 평균 225 W(최대 출력 330 W, 4.5 GHz)의 출력 성능과 1 % duty & 10 μ s PW Pulse 기준 동작주파수 전대역 평균 287 W(최대 출력 404 W, 4.5 GHz)의 출력성능을 확인할 수 있었다. 또한, 지속파(CW) 최대출력 증폭 시에도 안정적인 성능확인을 위해 93 °C 고온 챔버에서 별도로 1시간 CW 연속 증폭 동작 시험을 수행하여 증폭기의 성능 안정성을 추가로 검증하였다.

본 논문을 통해 개발된 200 W급 전력증폭기는 기존에 전자전용으로 전력화되어 사용 중인 S&C대역 TWT 및 고전압 전원공급기를 사용한 전력증폭기를 GaN 기반 반도체 증폭기 및 저전압 전원공급기를 사용한 전력증폭기로 대체 가능함을 확인할 수 있었다. 개발된 전력증폭기의 전력화를 통해 기존 재머 체계의 소형화, 경량화라는 기능적 측면뿐만 아니라, 증폭기 국산화로 인한 운용 가용도 향상 측면의 운용효율 향상과 수리 부속비용 절감/수리부속 조달시간 단축 측면의 경제성 개선에 기여할 것으로 판단된다.

향후 본 논문을 통해 개발된 광대역 고출력 증폭기 기술을 기반으로 능동배열안테나 전자전 재머 구현에도 확장적용이 가능하고, 기존 전자전 재머 체계 외 주요 거점 드론 방어용 재밍 분야, 광대역 스펙트럼 기반 SDR (software defined radio) 및 CR(cognitive radio) 형태의 통신 시스템과 광대역 형태의 FMCW(frequency modulated continuous wave) 레이다시스템 등 다양한 시스템에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. W. Dong, Y. Z. Dong, Y. Wang, and L. M. Gong, "High power and efficiency power combining with multi-way TWTAs for satellite communications," in

- IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Jun. 2012, pp. 1-3.
- [2] 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.
- [3] R. S. 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.
- [4] J. D. Kim, B. K. Kim, S. H. Yoo, K. W. Lee, M. S. Lee, and W. Y. Lee, "Design of wide band 80 W solid state power amplifier using GaN HEMT," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 9, pp. 770-779, Sep. 2020.
- [5] J. C. Jeong, D. P. Jang, D. H. Shin, I. B. Yom, J. D. Kim, and W. Y. Lee, et al., "An AlGaIn/GaN based ultra-wideband 15-W high-power amplifier with improved return loss," *ETRI Journal*, vol. 38, no. 5, pp. 972-980, Oct. 2016.
- [6] E. Reese, D. Allen, C. Lee, and T. Nguyen, "Wideband power amplifier MMICs utilizing GaN on SiC," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Anaheim, CA, May. 2012, pp. 1230-1233.
- [7] 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*, Paris, Oct. 2005, pp. 241-244.
- [8] Y. Alekajbaf, N. Masoumi, and S. Safavi-Naeini, "Design and fabrication methodology for industrial broadband high power amplifiers," *IET Microwaves Antennas & Propagation*, Dec. 2020, pp. 2053-2063.
- [9] Y. Alekajbaf, N. Masoumi, M. Mohammad-Taheri, and S. Safavi-Naeini, "A 200 W broadband high power amplifier using hybrid power combining network and digital level control," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 5, p. e22159, Jan. 2020.
- [10] RFHIC, "RWP2060080-50." Available: <https://rfhic.com/ko/products/rwp2060080-50-100w-2000mhz-6000mhz-gan-wideband-amplifier/>
- [11] Comtech PST, "BME2969-300." Available: <https://www.comtechpst.com/Portals/0/Documents/Products/Amplifiers/258.pdf>
- [12] CPI, "VTG-6329S1B." Available: <https://www.cpii.com/product.cfm/1/19/63>
- [13] Teledyne, "MEC 5500E." Available: https://www.teledynedefenseelectronics.com/microwavesolutions/Documents/TWT_Product_Selection_Guide.pdf

김 재 덕 [LIG넥스원 전자전연구소/선임연구원]

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



2010년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)

2012년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2012년 1월 ~ 현재: LIG넥스원 전자전연구소 선임연구원

[주 관심분야] RF Power Amplifier, RF Jamming System, Electronic Warfare System 등

정 성 훈 [LIG넥스원 전자전연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5243-9689>



2009년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)

2012년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2012년 1월 ~ 현재: LIG넥스원 전자전연구소 선임연구원

[주 관심분야] Microwave Circuits, Antenna, Wireless Communication System 등

유 승 학 [유텔연구소/팀장]

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



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

조 정 현 [유텔연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1767-4872>



2008년 2월: 순천향대학교 정보기술공학과(공학사)
2007년 11월 ~ 2015년 1월: (주)세원텔레텍 연구소 주임연구원
2016년 2월 ~ 2020년 2월: (주)로젠시스연구소 선임연구원
2020년 3월 ~ 현재: (주)유텔연구소 수석연구원

원

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

문 병 호 [LIG넥스원 전자전연구소/연구소장]

<https://orcid.org/0000-0003-1208-200X>



1997년 2월: 대구대학교 전자공학과 (공학사)
2019년 2월: 한양대학교 통신정보공학과 (공학석사)
1997년 ~ 현재: LIG넥스원 전자전연구소 연구소장
[주 관심분야] Electronic Warfare System, RF Circuit/Signal Processing 등

이 중 현 [LIG넥스원 전자전연구소/팀장]

<https://orcid.org/0000-0002-1743-8274>



2001년 2월: 인천대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 2월: 연세대학교 통신방송공학과 (공학석사)
2000년 ~ 현재: LIG넥스원 전자전연구소 팀장
[주 관심분야] Electronic Warfare System, RF Circuit/Signal Processing 등

RF Circuit/Signal Processing 등