

# 저 손실 레디얼 전력 결합기와 수냉 시스템을 이용한 고전력 증폭기 구현

## Implementation of a High Power Amplifier using Low Loss Radial Power Combiner and Water Cooling System

최성욱<sup>1</sup> · 김 영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>금오공과대학교 전자및전기공학과

<sup>2</sup>금오공과대학교 전자공학부

Sung-Wook Choi<sup>1</sup> · Young Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic and Electrical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do, 39177, Korea

<sup>2</sup>School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do, 39177, Korea

### [요 약]

본 논문은 RF 전력 반도체를 사용한 고출력 전력증폭기를 구현한 것으로 기존의 플라즈마 발생 장치에 사용되는 마그네트론 방식의 고출력 증폭기 문제점인 낮은 효율과 짧은 수명, 유지 보수의 어려움 그리고 높은 운용비용 등을 개선하기 위한 것이다. 구현된 고출력 전력증폭기는 2.45 GHz ISM (industrial scientific medical) 대역에서 공간 결합 방식을 이용한 저 손실, 고출력 레디얼 결합기와 반도체로 3 kW급 출력을 얻기 위해서 300 W 급 전력 증폭기 16개의 증폭기로 구성되어 있다. 또한, 이 증폭기는 개별적인 증폭기에 수냉 방식의 구조를 적용하여 고출력에 따른 발열 문제를 극복하였다. 소형 시스템으로 구성된 이 전력증폭기는 원하는 출력에서 50%의 높은 효율을 얻었다.

### [Abstract]

In this paper, a high power amplifier using RF power solid-state semiconductor is implemented to overcome a problem of plasma generator which has the low efficiency, short life span, the difficult maintenance and the high-operation cost. This power amplifier consists of a radial combiner of low-loss and high power operation and the sixteen 300 W power amplifiers to obtain 3 kW output power for high power operation implemented in semiconductors at industrial scientific medical (ISM) band of 2.45 GHz. In addition, this amplifier overcomes the problem of heat generation due to high power by applying a water-cooled structure to the individual amplifiers. This power amplifier, which is made up of a small system, achieves 50% efficiency at the desired output.

**Key word** : 2.45 GHz amplifier, 3 kW high power amplifier, ISM band, Radial combiner, Water cooling system.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.4.319>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 18 July 2018; Revised 6 August 2018  
Accepted (Publication) 21 August 2018 (30 August 2018)

Corresponding Author; Young Kim

Tel: +82-54-478-7506

E-mail: youngk@kumoh.ac.kr

## I. 서론

플라즈마란 기체 상태의 물질에 더 큰 열(에너지원)과 압력을 가하면 물질을 이루고 있는 원자와 전자가 분리되어 양의 성질을 띠는 이온과 음의 성질을 갖는 전자가 서로 공존하는 상태를 말하는 것으로 1928년 Langmuir에 의해 플라즈마라고 명명되었다. 이것은 반도체 제조 공정부터 항공우주, 환경, 농식품 등 다양한 분야에 응용될 뿐만 아니라, 세포치료, 혈액응고 살균 등 바이오 메디컬 분야에 널리 응용되고 있으며 최근 산업 전 분야에서 관심이 높아지고 있는 추세이다. 또한, 최근에는 초고주파 플라즈마의 에너지원으로 사용되는 마그네트론을 대체하여 전기적 특성이 우수한 반도체 소자를 사용한 전력 증폭기에 관심이 커지고 있다 [1]-[3].

마그네트론의 장점으로는 높은 출력 전력과 높은 변환 효율, 그리고 제작비용이 작다는 것이다. 그러나 마그네트론 방식은 진공관 기술의 자유전자를 이용한 방식으로 주파수가변성이 10%내외로 작을 뿐만 아니라 주파수 안정도가 낮으며 많은 출력 노이즈를 포함하고 있다. 또한 이것은 캐소드를 이용하여 전자빔을 방출하기 때문에 수명 시간이 8,000 시간과 수 kW의 높은 입력 전력 필요하며, 그리고 구동 전압은 수 kV의 고전압이 요구되어 이 시스템을 소형으로 구성하는 것은 불가능 하다.

앞에서 언급한 것과 비교하여 반도체 소자를 사용한 전력 증폭기는 먼저, 노이즈 특성은 뛰어난 성능을 가지고 있으며, 수명시간은 마그네트론의 약 6배인 50,000시간을 갖고 있고, 주파수 가변성은 50%이상, 그리고 주파수 안정도는 마그네트론에 비해 월등히 우수하다. 또한 구동 전압도 직류 32 V 내외로 구동되어 고압 케이블이 필요 없고 소형화가 가능하다 [4]-[7].

본 논문에서는 ISM (industrial scientific medical) 대역 2.45 GHz 주파수에서 플라즈마 발생의 에너지원으로 사용되는 고출력 증폭기를 LDMOS FET 계열의 반도체 소자를 이용하여 구현한 것과 저 손실과 고출력 특성을 만족하는 레디알 공간 결합 방식의 결합기를 적용한 증폭기 시스템 구현에 대해서 서술하였다. 구현된 증폭기 시스템은 PLL (phase locked loop) 을 이용하여 CW (continuous wave) 신호를 발생 시킨 신호발생 장치와 이 신호를 구동 증폭기로 증폭하고, 높은 출력을 얻을 수 있는 최종 전력 증폭기로 구성되었다. 여기에서는 높은 출력 전력을 얻기 위해서 구동 증폭기 신호를 분배하는 16 경로 분배기와 중단 전력 증폭단의 신호를 하나의 출력으로 결합해 주는 16 경로 결합기를 사용하여 결합함으로써 만족할 만한 특성을 얻었다[8-10].

## II. 증폭기의 구성

### 2-1 전체 블록도

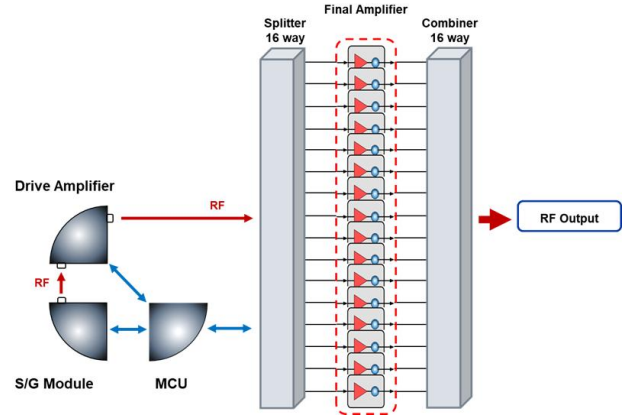


그림 1. 고출력 증폭기 전체 구성도  
Fig. 1. High power amplifier block-diagram.

이 증폭기는 삽입 손실이 작은 고효율 16 경로의 레디알 공간 결합기를 이용하여 300 W 출력을 갖는 전력 증폭기 16 개를 결합하여 고출력 증폭기 시스템을 구현한 것으로, 신호를 발생시키는 신호 발생기와 중단 증폭기를 구동 하는 구동 전력 증폭기 그리고 최종 출력을 결정 하는 중단 전력 증폭기로 구성되어 있으며 이것은 그림 1에 나타내었다.

### 2-2 신호 발생기와 구동 및 중단 전력 증폭기 기본구조

신호 발생기는 발진 신호를 발생시키는 PLL과 이득을 조절하는 전압 가변 감쇠기, 소 신호 증폭을 위한 증폭기, PLL 과 증폭기에서 발생되는 고조파 신호를 제거하기 위한 저역 통과필터로 구성되어 있다.

발진 신호를 발생시키는 PLL은 Roswin 사의 PLL2450MHz를 사용하여 CW 신호를 발생시키고 저역통과필터를 거쳐 Qorvo사의 TQP3M9028 MMIC로 증폭시킨다. 증폭된 신호는 감쇠기인 Analog Device사의 HMC973LP3E에서 0-30 dB 범위를 0.5 dB 단위로 이득 조절을 하였다. 또한, 위상 변환기인 Mini Circuit 사 JSPHS-2484+ 로부터 180° 위상 가변이 가능하다. 최종 출력은 TQP3M9028 MMIC를 거쳐 출력 포트에 출력된다.

제작된 구동 전력증폭기는 그림 2에 나타내었고, 입력은 SMA 커넥터, 출력은 N-Type 커넥터로 구현 하였고, 드레인 전원은 +32 Vdc를 공급하였다. 그림 2에서 ①번 영역은 구동 증폭기와 이득조절을 위한 가변 저항과 온도 이득 보상을 위한 Yantel 사의 Thermal PAD 3N9로 구현하였다. 1차 구동 증폭기는 Avago 사의 MGA-31289, 2차 증폭기는 Qorvo 사의 TQP7M9102를 사용하였다. ②번 영역은 중단 증폭기를 구동하기 위한 구동 증폭기로 NXP 사의 MHT1008N 를 사용하였다. 또, ③번 영역은 중단 증폭기로 NXP 사의 MHT1004N을 사용하였다.

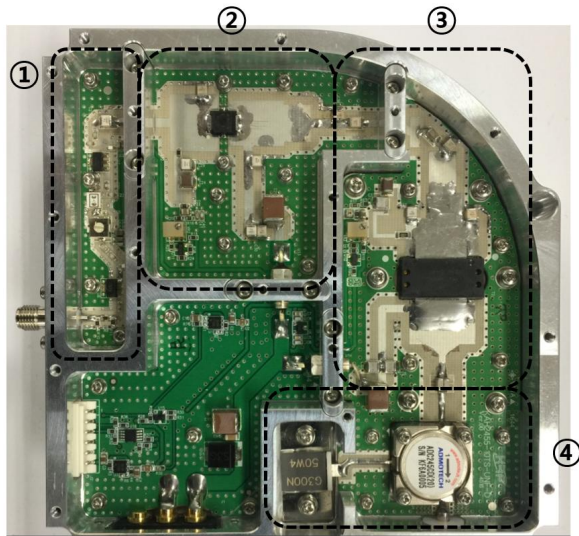


그림 2. 구동 전력증폭기  
Fig. 2. Drive power amplifier.

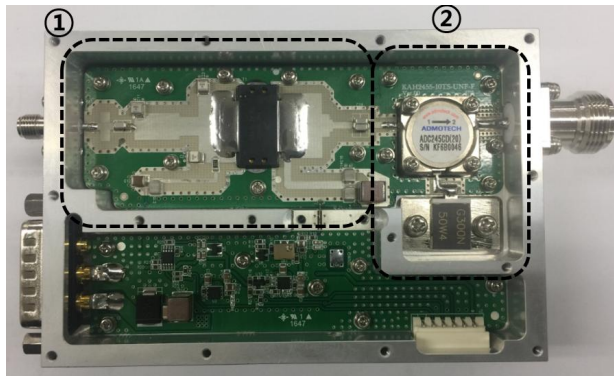
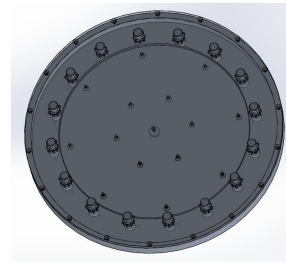


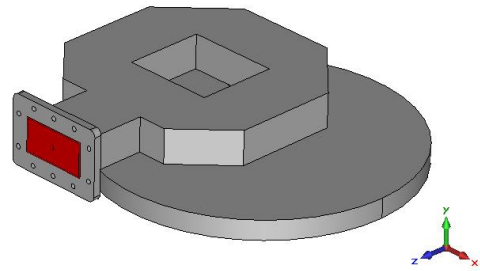
그림 3. 300 W 종단 전력증폭기  
Fig. 3. 300 W final power amplifier.

④번 영역은 증폭된 신호가 순방향으로 전달되게 하고 회로를 보호하기 위해 Admotech 사의 ADC264CD 써클레이터를 사용하였고, 역방향으로 반사된 신호를 중단시키기 위해 Anaren 사의 G3005N50W4 터미네이션을 사용하였다.

그림 3은 300 W 종단 전력증폭기를 나타낸 것으로 입력은 SMA 커넥터, 출력은 N-Type 커넥터로 설계 하였고, 드레인 전원은 D-SUB 3W3 커넥터를 사용하여 +32 Vdc를 공급 하였다. 내부는 총 1단의 증폭기와 아이솔레이터로 구성되어 있다. ①번 영역은 종단 전력증폭기로 NXP 사의 MHT1004N을 사용하였다. ②번 영역에서 증폭된 신호는 순방향으로 전달하고 회로를 보호하기 위해 Admotech 사의 ADC264CD 써클레이터를 사용하였고, 역방향으로 반사된 신호를 차단하기 위해 Anaren 사의 G3005N50W4 터미네이션을 사용하였다. 동일한 특성을 갖는 종단 전력증폭기 16개를 제작하였고 이 종단 전력증폭기가 결합기에서 결합이 되도록 각 종단 전력증폭기의 위상은  $\pm 5^\circ$  이내로 튜닝 하였다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 16 경로 전력 분배기 후면도 (b) 16 경로 전력 결합기 측면도

Fig. 4. (a) 16-way power divider rear view (b) 16-way power combiner side view.

### 2-3 레디알 전력 분배기 및 결합기

공간 분배 및 결합 방식은 16개의 소자를 공간상의 구조적인 대칭 특징을 이용하여 여러 단계의 분배와 결합을 거치지 않고 16개의 입력이 한 개의 출력으로 이루어졌다. 이러한 특징은 결합 갯수가 증가하는 경우 결합 시 효율이 증가하고 구조적으로 단순한 설계가 가능해진다. 또한 공간 결합방식의 대칭 구조 특징으로 인하여 각 입력단 사이의 전자기와 분배 배율과 위상배율이 전 주파수 대역에서 일정한 특성을 얻을 수 있다. 16 경로 분배기의 후면도는 그림 4(a)에 나타내었고, 고 전력용 16 경로 결합기를 설계하기 위해 그림 4(b)와 같은 구조를 고안하여 설계 하였으며 16개의 종단 전력증폭기를 1개의 포트에 결합하고 이 출력을 웨이브가이드 WR 340 출력으로 변환하는 변환기를 포함하고 있다. 16개의 종단 전력증폭기를 결합 할 때 저 손실 및 고출력이 가능하도록 각각의 포트의 크기 변동 폭은  $\pm 0.3$  dB 이내가 되도록 하고 위상 변동 폭은  $\pm 5^\circ$  이내가 되도록 설계 되었다.

## III. 전력증폭기 실험결과

### 3-1 증폭기 모듈과 전력 분배기/ 결합기 특성

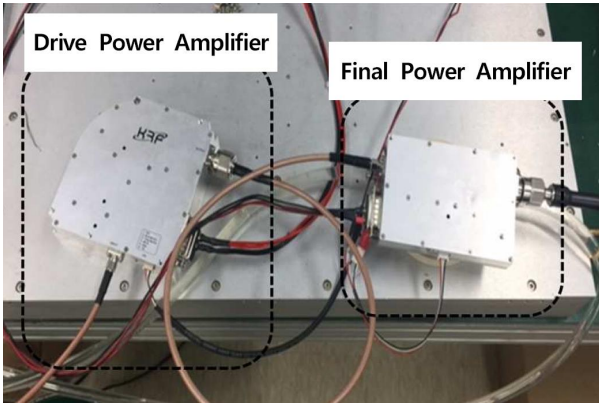


그림 5. 구동 증폭기와 300 W 종단 증폭기의 연동 실험 사진  
 Fig. 5. Photograph of drive amplifier and 300 W final amplifier interlocking experiment.

그림 5는 300 W 종단 증폭기와 구동 증폭기의 연동 실험을 나타낸 사진이다. 이 증폭기의 연동 실험에 의한 이득과 반사손실 특성을 살펴보면, 69 dB의 이득과 반사 손실은 -24 dB 이상 나오는 것을 확인하였다.

그림 6은 종단 전력 증폭기의 효율을 계산하기 위해서 나타낸 결과로 출력이 251 W 출력시 전압은 30 V, 전류는 14.42 A를 소모됨으로 인하여 그에 따른 효율은 약 58%가 되는 것을 알 수 있었다.

또한, 제작된 16 경로 결합기의 측정 결과는 신호 결합시 정상적인 출력을 얻을 수 있는 삽입손실의 변화율 ( $-12.35 \pm 0.15$  dB)과 위상 변화율( $20.16 \pm 1.7^\circ$ )을 그림 7에 나타내었다.

**3-2 시스템 형상과 300 W 증폭기 모듈 결합**

각각의 제작된 신호 발생기 및 증폭기 모듈을 레디알 결합기에 효율적으로 조립이 될 수 있도록 원형 구조로 배치하여 그림 8과 같이 설계 하였다. 각각의 증폭기 모듈은 내부 트랜지스터 소자에서 발생하는 발열을 최소화 하도록 방열해 주기 위해 수냉식 방열을 고안하여 각각의 모듈이 일정한 온도를 유지 할 수 있도록 설계 하였다.

전체 시스템의 수냉식 방열을 위한 연결은 그림 9와 같으며 종단 전력 증폭기 각각의 모듈에 방열을 위해 입수구를 통해 들어온 물이 16개로 분배가 되고 유속이 일정하게 유지 되도록 같은 길이의 호스를 제작 하였다. 일정한 물의 온도 유지와 유속이 일정하게 되도록 조정하기 위해서는 외부에 칠러 장비를 이용하여 압력의 조절이 필요하다. 1개의 구동 전력증폭기와 16개의 종단 전력증폭기의 효과적인 방열을 위해 모듈 내부의 트랜지스터와 가장 가깝게 물의 흐름이 위치 하도록 하고 모듈의 입수구와 출수구는 분리 구조가 될 수 있도록 쿨랜스 사의 피팅인 QD3-FS10X13-BK를 사용 하였다.



그림 6. 종단 전력증폭기의 출력과 소모 전류  
 Fig. 6. Output power and current consumption of final amplifier.

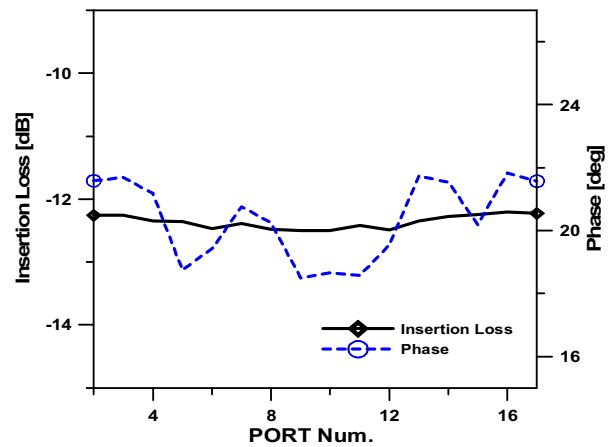


그림 7. 16 경로 결합기의 삽입 손실과 위상 변화를 측정결과  
 Fig. 7. Measurement results of 16-way combiner insertion loss and phase variation.

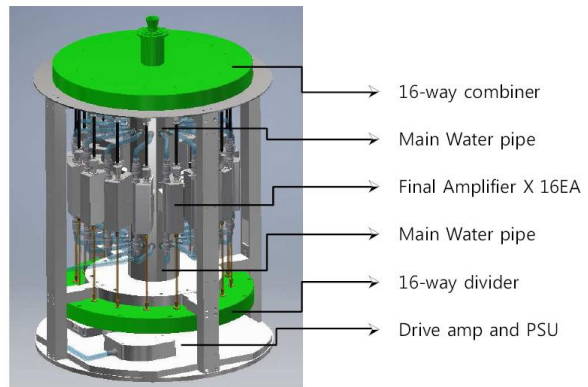


그림 8. 레디알 결합기를 이용한 3 kW급 고출력 반도체 전력 증폭기 구조  
 Fig. 8. Structure of 3 kW solid-state high power amplifier using radial combiner.

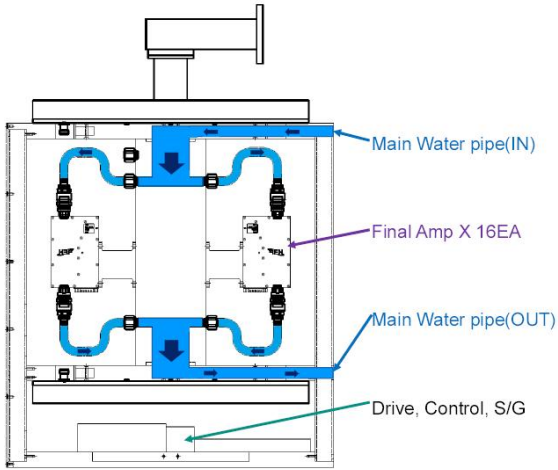


그림 9. 수냉식 방열용 물 흐름도  
Fig. 9. Water flow for water cooling heat sink.

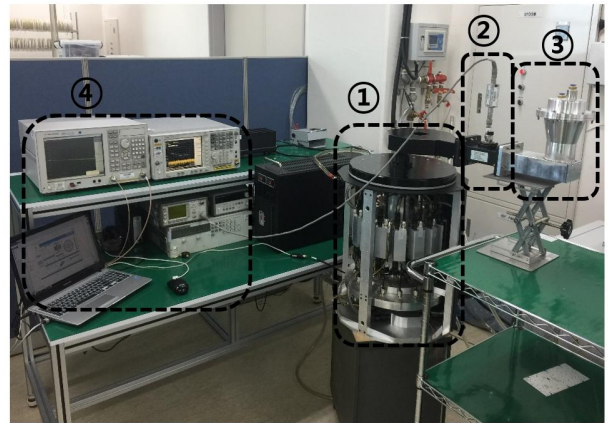


그림 10. 고출력 신호 발생 장치 측정 구성도  
Fig. 10. Measurement setup of high power signal generator.

### 3-3 최종 실험 결과

고출력 반도체 전력증폭기 시스템의 측정 구성도는 그림 10에 나타내었다. 제작된 고출력 반도체 전력증폭기 시스템에 전원을 연결하였고, 출력 신호는 웨이브가이드 커플러에 연결하였다. 최종 출력은 워터로드로 연결하여 고출력 신호를 중단시켰고, 고출력 반도체 전력증폭기를 방열시키고 일정한 온도가 유지되며 출력이 안정되도록 외부의 칠러의 내부 수냉 파이프를 통해 물을 순환 시켰다. 또한, 웨이브가이드 커플러의 커플링 포트에서 출력된 신호를 파워미터 또는 스펙트럼 분석기로 최종 출력을 확인하였다. 전력증폭기 장치의 고장을 방지하기 위해서 신호 발생기의 감쇠기를 GUI(graphical user interface)로 제어하여 순차적으로 출력을 변화시키면서 실험 하였다.

제작된 고출력 반도체 증폭기 시스템은 ①번 영역에 위치하고 ②번 영역의 웨이브가이드 커플러와 연결시켜 출력 신호를 커플링 시켰으며, 최종 출력은 ③번 영역의 워터로드로 입력되어 중단시켰다. ②번 영역에서 커플링 된 신호는 ④번 영역의 계측기로 입력되어 신호를 측정하였다.

고출력 반도체 전력증폭기 시스템의 출력과 소모 전류는 그림 11에 나타내었다. 파워미터에 측정된 값은 65.08 dBm으로 2.45 GHz에서 3.05 kW의 고출력 RF 신호가 발생 되는 것을 확인 할 수 있다. 측정된 결과 값은 3.05 kW 출력에서 전압 +29.8 Vdc의 소모 전류는 201 A로 총 5,989 W의 전력이 소모되었으며, 시험 결과 고출력 RF 신호 발생 시스템의 전력 효율은 약 51%이다. 중단 증폭기가 약 58% 효율임을 감안했을 때 16 개의 증폭기를 결합했음에도 50% 이상의 효율 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

### 3-4 대역폭 ± 5 MHz 출력 범위 확인 및 고조파 특성

고출력 반도체 전력증폭기 장치는 주파수가 발전기의



그림 11. 고출력 신호 발생 장치의 최종 출력과 소모전류  
Fig. 11. Measurement output power and current consumption of high power generator.

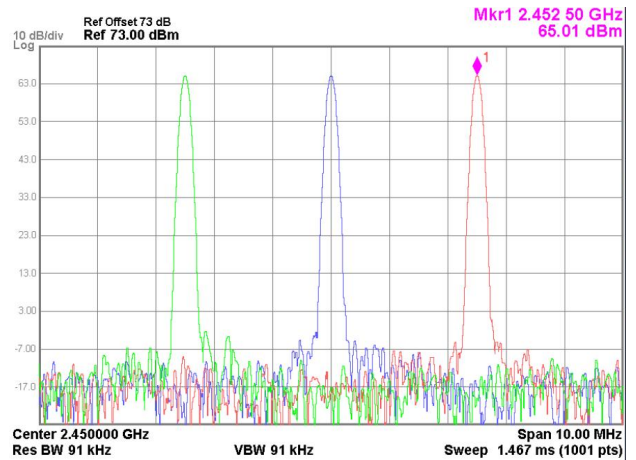


그림 12. 고출력 신호 발생 장치의 주파수 변화폭  
Fig. 12. Frequency variation of high power signal generation system.

주파수 영역만큼 이동이 가능하다는 장점이 있기 때문에 최대 출력을 5 MHz 단위로 각각 이동하여 출력을 확인하였고, 대역폭 ± 5 MHz에서도 아래 그림 12와 같이 동일한 출력을 얻을 수 있었다.

고출력 반도체 증폭기 장치에서 발생되는 고조파 성분을 측정하기 위한 실험에서 4.90 GHz에서 이차 고조파는 -43.92

dBc, 7.35 GHz에서 3차 고조파는 -44.61 dBc로 측정 되었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서 고출력 증폭기 시스템을 구성하는데 필요한 신호발생기, 구동 전력 증폭기, 중단 전력 증폭기, 16 경로 분배기 및 결합기 등의 각 모듈의 특성을 각각 확인하였고 이 모듈을 시스템 형상과 같이 조합하고 각 모듈의 방열을 위해 수냉식 구조를 적용하여 제작 하였다. 본 실험을 통해 반도체 소자를 이용한 전력증폭기를 16개 결합하여 최종 3 kW 출력을 얻었고, 50% 이상의 효율을 얻었다.

반도체 소자를 적용한 고출력 증폭장치는 마그네트론에 비해 월등히 높은 운용 시간과 낮은 고장률 그리고 유지 보수비용이 작은 장점을 갖고 있지만, 그것과는 반대로 제작 과정이 복잡하고 마그네트론에 비해 상대적으로 제작비용이 높은 단점을 갖고 있다. 하지만, 이 증폭 시스템은 전체 시스템 안정도와 에너지 직접도, 그리고 유지보수 등을 고려했을 때 마그네트론 및 클라이스트론을 대체 할 수 있는 증폭장치가 될 수 있음을 확인하였다.

#### References

[1] I. Langmuir, "The Interaction of Electron and Positive Ion Space Charges in Cathode Sheaths," *Physical Review Journals Archive*, Vol. 33, No. 6, pp. 954-989, June 1929.

[2] J. Winter, R. Brandenburg and K-D Weltmann, "Atmospheric pressure plasma jets : an overview of devices and new directions," *Plasma Sources Science and Technology*, Vo. 24, No. 6, pp. 1-19, Oct. 2015.

[3] H. C. Lee, S. J. Oh and C. W. Chung, "Experimental observation of the skin effect on plasma uniformity in

inductively coupled plasmas with a radio frequency bias," *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1-6, May, 2012.

[4] C. Paolo, G. Franco and L. Ernesto, *High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers*, 1<sup>st</sup> ed. West Sussex, United Kingdom: John Wiley and Sons, 2009.

[5] K. Krishnamurthy, M. J. Poulton, J. Martin, R. Vetury, J. D. Brown, and J. B. Shealy, "A 250W S-Band GaN HEMT Amplifier," in *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*, Portland: OR, pp. 1-4, Oct. 2007.

[6] E.C. Niehenke, R. A. Pucel, and I. J. Bahl, "Microwave and millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Transaction Microwave Theory & Technology*, Vol. 50, No. 3, pp. 846-857, Mar. 2002.

[7] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, S. Zygadlo, and A. Rutkowski, "A high power amplifiers for L-Band Transmitter with AM modulation," in *12<sup>th</sup> International Conference on Microwaves Radar and Wireless Communications*, Krakow: Poland, May, 1998.

[8] V.A Goryashko, "A megawatt class compact power combiner for solid-state amplifiers," *Journal of Electromagnetic Waves and applications*, Vol. 28, No. 18, pp. 2243-2255, Sep. 2014.

[9] K. Song, Y. Fan, "Broadband radial waveguide power amplifier using a spatial power combining technique," *IET Microwave, Antennas & Propagation*, Vol. 3, No. 8, pp. 1179-1185, 2009.

[10] A. Jain, D. K. Sharma, A. K. Gupta, and P.R. Hannurkar, "Design of high power radio frequency radial combiner for proton accelerator," *Review of Scientific & Instruments*, Vol. 80, No. 1, pp. 1-4, Feb. 2009.



**최 성 욱 (Sung-Wook Choi)**

2016년 2월 : 가톨릭관동대학교 전자공학과 (공학사)  
 2018년 8월 : 금오공과대학교 산업대학원 전자공학부 (공학석사)  
 2004년 7월 ~ 2009년 11월 : 세원텔레텍(주) 선임연구원 (이동통신용 전력증폭기 개발)  
 2010년 1월 ~ 2011년 3월 : 텔레맥스 책임연구원 (전술 항법 장비 TACAN 개발)  
 2011년 3월 ~ 현재 : (주)케이알에프 개발실장 (이동통신 및 RF Energy 전력증폭기 개발)  
 ※ 관심분야 : RF 및 전력증폭기 회로설계, Microwave 플라즈마



**김 영 (Young Kim)**

1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사), 2002년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)  
 1988년 1월 ~ 1993년 5월 : 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원  
 1993년 6월 ~ 1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원  
 1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수  
 2003년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수  
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계