

400W, 7.9~8.4GHz 이중슬롯 결합공진기 진행파관 증폭기 특성 연구

A Study on the Characteristics of a 400W, 7.9~8.4GHz Double-Slot Coupled-Cavity Traveling-Wave Tube

김형종*	김해진*	최진주*	소준호**
Hyoung-Jong Kim	Hae-Jin Kim	Jin-Joo Choi	Jun-Ho So

Abstract

This thesis focuses on the study of high-power, coupled-cavity traveling-wave tube(CCTWT) for radar applications. The CCTWT employed a reentrant double-slot staggered RF cavity structure. Computational analysis of the X-band, double-slot staggered structures is carried out through the use of HFSS code, which solves Maxwell's equations fully in three-dimensions. The non-linear, large-signal performance of CCTWTs are predicted from numerical simulations using a three-dimensional particle-in-cell code, MAGIC3D. With beam voltage set to 12.7~13kV and beam current at 300mA, the CCTWT produces a saturated radiation power of 350~430W, corresponding to an electronic efficiency of 8.9~11.2% and a gain of 23.7~24.2dB within a frequency range of 7.9~8.4GHz.

Keywords : Coupled-Cavity(결합공진기), Traveling-Wave Tube(진행파관 증폭기), Slow-Wave Structure(저속파 구조)

1. 서론

마이크로파 진공 전력 기술은 레이더와 전자전을 포함한 군용 플랫폼과 민간 통신용 영역에서 매우 중요한 기술 중의 하나이다. 최근 들어, 대부분의 군용과 상업용 통신 분야에서는 전자파의 높은 출력과 효율, 넓은 대역폭, 그리고 신호의 충실성이 점차 요구되어

지고 있다. 그리하여, 높은 주파수에서도 고출력을 낼 수 있는 진행파관 증폭기(TWT : Traveling-Wave Tube)를 포함한 진공 전력 증폭기 기술은 대부분의 군용 플랫폼에서 근간이 되고 있다^{1~3)}.

진행파관 증폭기는 저속파 회로의 구조에 따라 나선형(helix) 구조, 결합공진기(coupled-cavity) 구조, 접혀진 도파관(folded waveguide) 구조로 나누어진다. 자유전자를 이용한 진공 전력 증폭기에서 전자파를 증폭시키기 위해서 동작 주파수 대역에서 에너지 상호 교환 작용이 일어나야 하며, 에너지 상호 교환 작용을 일으키기 위해서는 저속파 회로를 따라 진행되는 전자파와 전자총에서 생성된 전자빔의 축 상 위상 속도

† 2009년 7월 13일 접수~2009년 10월 22일 게재승인

* 광운대학교(Kwangwoon University)

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김형종(hunkydory@kw.ac.kr)

를 맞추는 것이 중요하다^[4]. 다양한 결합공진기 저속파 구조에서 공간-하모닉(space-harmonic)구조로서 가장 널리 알려진 구조는 “Hughes” 구조이다^[5]. 하나의 슬롯이 엇갈려 있는 결합공진기 저속파 구조나 두개의 슬롯이 평행으로 배치된 구조는 Cumow에 의해서 등가회로 모델로 보고되어졌다^[6]. 최근에 들어서 3차원 컴퓨터 시뮬레이션 코드를 이용한 공간-하모닉 결합공진기 해석에 대한 연구가 발표되고 있다^[7~9]. 본 논문에서는 3차원 컴퓨터 코드를 이용하여 X-대역 고출력 이중슬롯 결합공진기 진행파관 증폭기의 분산특성과 비선형 특성을 살펴보았다. 3차원 전자파 해석 코드인 High Frequency Structure Simulator(HFSS)를 이용하여 두 개의 슬롯이 엇갈려 있는 결합공진기 저속파 회로의 분산 특성을 살펴보고 3차원 Particle-In-Cell(PIC) 코드인 MAGIC3D 코드를 이용하여 결합공진기 진행파관 증폭기의 비선형 특성을 예측하였다. 시뮬레이션을 통해 전자빔 전압이 12.7~13kV, 전자빔 전류가 300mA일 때 주파수 영역 7.9~8.4GHz에서 진행파관 증폭기의 포화 출력이 55.4~56.3dBm, 전기적 효율이 8.9~11.2%, 이득이 23.7~24.2dB임을 확인하였다.

2. 결합공진기 저속파 회로의 분산 특성

X-대역 RF 회로 제작의 편리성을 얻기 위해 밀리트론 구조의 결합공진기 저속파 회로를 적용하였다. 결합공진기 진행파관 증폭기에서 넓은 대역폭을 얻기 위해서 이중슬롯이 엇갈린 결합공진기 구조를 선택하였고 높은 상호 작용 임피던스를 얻기 위해 공진기에 옴목한 노즈를 갖도록 설계하였다. Fig. 1은 3차원 전자파 해석 코드인 HFSS 코드를 이용하여 이중슬롯이 90도 엇갈린 결합공진기 저속파 회로를 모델링한 것이다. 시뮬레이션을 통해 얻은 결합공진기 회로의 설계 변수를 Table 1에 나타내었다.

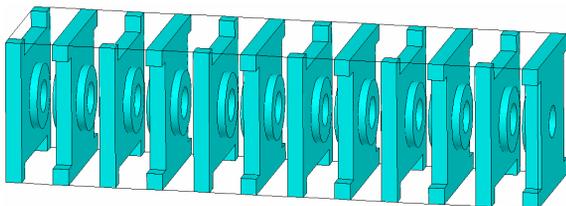


Fig. 1. 이중슬롯이 엇갈린 결합공진기 저속파 구조

Table 1. 이중슬롯 결합공진기 회로의 설계 변수

설계 변수	치수(mils)
공진기 크기	700×700
공진기 높이	160
결합 슬롯 크기	540×80
결합 슬롯 높이	80
결합 공진기 높이	200
공진기 노즈 반지름	160
공진기 노즈 높이	40
전자빔 터널 반지름	80

결합공진기 회로에서 분산 특성을 살펴보면 기본가지(fundamental branch)에서 후향파(backward wave)와 상호 작용을 하게 된다. 결과적으로 Fig. 1의 저속파 구조를 갖는 TWT는 원하는 동작 주파수에서 결합공진기의 위상 변이(phase shift)가 π 부터 2π 까지 변화되는 통과 대역에서 전향파(forward wave)가 진행되는 공간-하모닉 가지에서 전자빔과 전향파가 상호 작용하여 증폭이 일어나게 된다. 위상 천이와 공진기의 주기는 회로에서 전자파의 속도를 결정하는데, 전자파의 속도는 전자빔의 속도와 동기화시킴으로써 강한 상호 작용을 갖도록 해야 한다. 동작 주파수의 튜닝 범위는 캐소드 전압을 조절하면서 상응되는 전자빔 속도 직선을 분산 관계에 중첩하여 표현함으로써 확인할 수 있다.

HFSS 시뮬레이션을 통해 설계 변수의 변화에 따른 엇갈린 이중슬롯 결합공진기의 분산 특성을 살펴보았다. Fig. 2는 Table 1의 결합공진기 회로의 설계변수에서 공진기 높이를 제외한 나머지 변수는 고정시키고 공진기 높이 변화에 따른 저속파 구조에서의 분산 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3은 Fig. 2의 경우와 마찬가지로 공진기의 크기만 550mils에서 800mils로 50mils씩 증가 시킬 때 결합공진기의 분산관계를 나타낸 것이다.

Fig. 2를 보면 공진기의 높이가 110mils에서 180mils로 커질수록 결합공진기에서 공진모드에 따른 공진주파수가 전체적으로 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

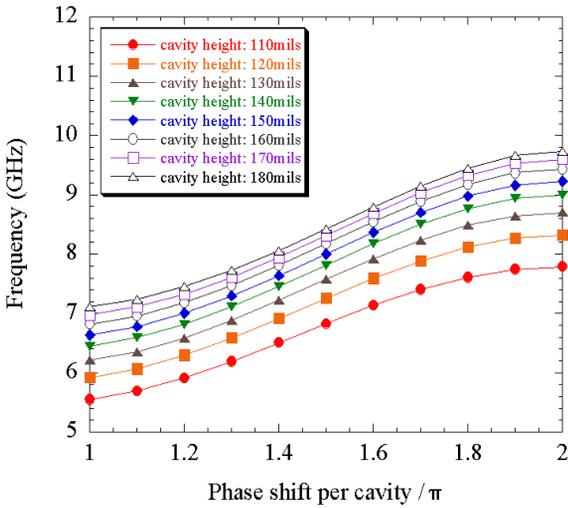


Fig. 2. 공진기의 높이 변화에 따른 엇갈린 이중슬롯 결합공진기의 분산 특성

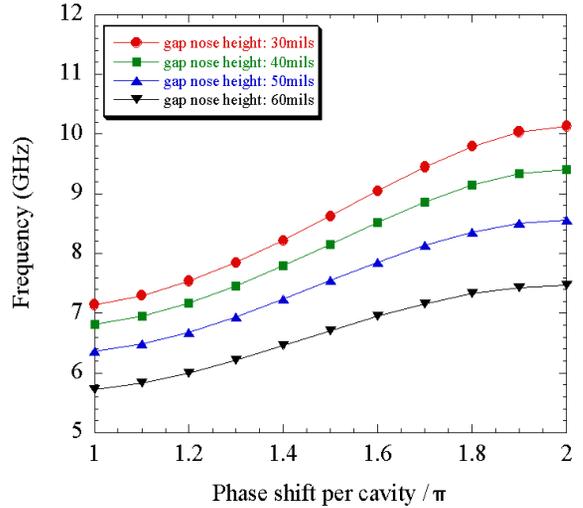


Fig. 4. 공진기 노즈의 높이 변화에 따른 엇갈린 이중슬롯 결합공진기의 분산 특성

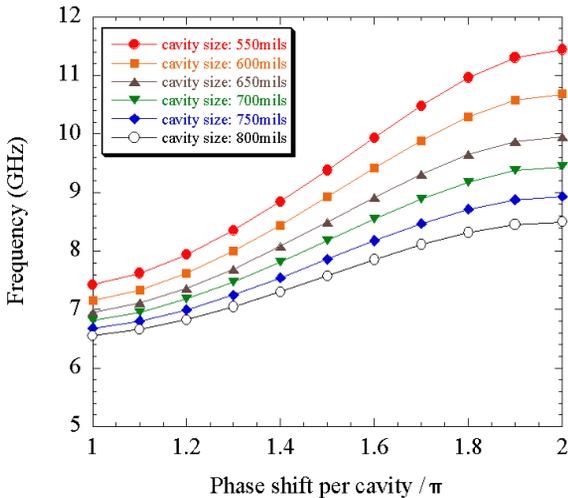


Fig. 3. 공진기의 크기 변화에 따른 엇갈린 이중슬롯 결합공진기의 분산 특성

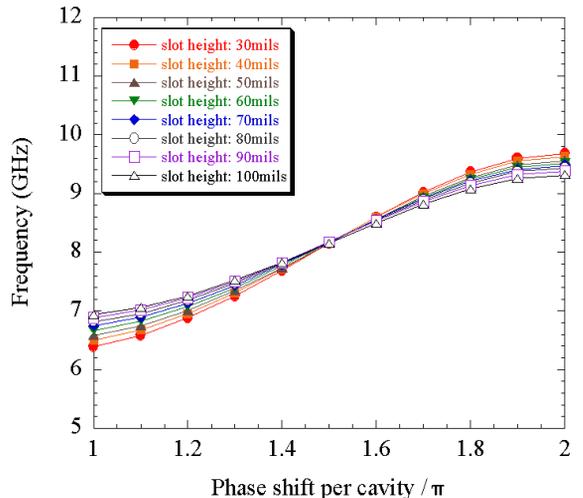


Fig. 5. 결합 슬롯의 높이 변화에 따른 엇갈린 이중슬롯 결합공진기의 분산 특성

Fig. 4는 Fig. 2의 경우와 마찬가지로 공진기 노즈의 높이를 30mils에서 60mils로 10mils씩 증가시킬 때 결합공진기의 분산 관계를 나타낸 것이다. 공진기 노즈의 높이가 증가됨에 따라 회로의 분산 특성이 낮은 주파수로 이동됨을 확인하였다. 공진주파수 변화량을 살펴보면 공진기 노즈의 높이 변화에 따른 주파수 변화량이 공진기 높이 변화에 따른 변화량보다 더 많음을 확인하였다. Fig. 5는 결합 슬롯의 높이 변

화에 따른 이중슬롯 결합공진기의 분산 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 보면 결합 슬롯의 높이가 30mils에서 100mils로 증가될 때 결합공진기의 전체적인 분산 특성은 변화가 거의 없었다. Fig. 6은 Table 1의 설계 변수를 갖는 엇갈린 이중슬롯 결합공진기의 분산 특성을 나타낸 것이다. 결합공진기 진행파관 증폭기에서 원하는 동작 주파수에서 전자파의 증폭을

연구 위해서는 통과 대역에서 전자파의 위상 속도와 전자빔의 운동 속도가 일치되도록 캐소드 전압을 조절하면 된다. 동작 주파수의 튜닝 범위는 캐소드 전압을 조절하면서 상응되는 전자빔 속도 직선을 분산 관계에 중첩하여 표현함으로써 확인할 수 있다.

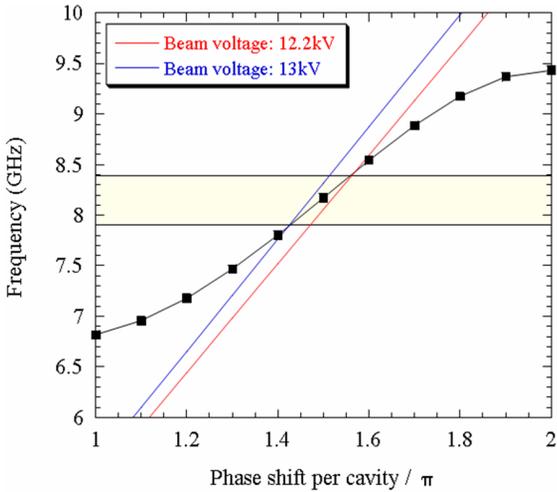
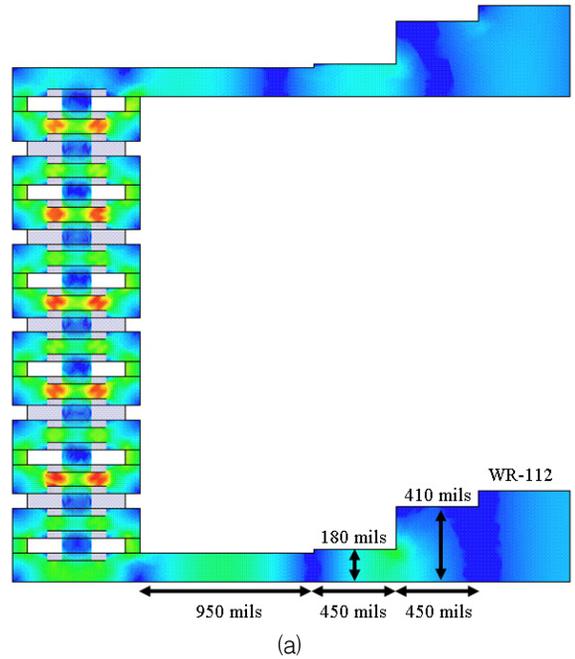


Fig. 6. 전자빔 속도와 전자파 속도와의 분산 관계

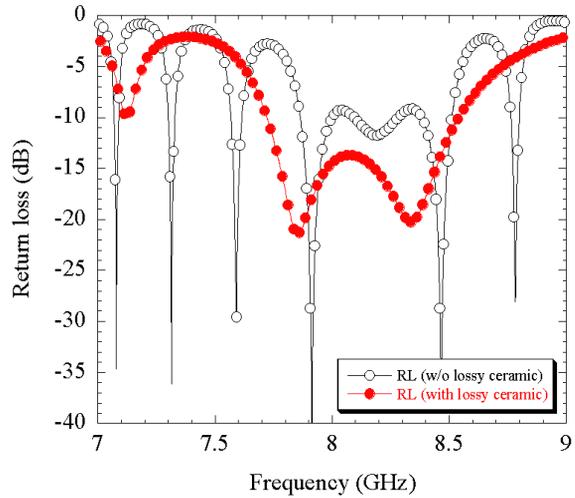
Fig. 6에서 직선은 캐소드 전류가 300mA일 때 전자빔의 속도를 나타낸 것이다. 설계된 저속파 구조에서 캐소드 전압이 12.2~13kV일 때 상호 작용이 일어나는 주파수가 변화하는 범위는 7.9~8.4GHz임을 확인하였다.

RF 입력 신호를 엇갈린 이중슬롯 결합공진기 회로에 인가시키고, 또한 증폭된 신호를 출력단으로 손실 없이 전송시키기 위해서는 임피던스 변환기가 필요하게 된다. Fig. 7(a)는 HFSS 코드를 이용하여 설계된 입력/출력 임피던스 변환기이고, Fig. 7(b)는 설계된 2단 임피던스 변환기의 반사 손실(return loss) 특성을 나타내는 그래프이다.

변환기의 입력/출력 도파관은 WR-112를 사용하였다. 결합공진기 회로에서는 각각의 공진기와 슬롯의 공진 주파수에 따라 특성 임피던스가 크게 변화되므로, 광대역 특성을 내기 어렵다. Fig. 7(b)는 광대역 특성을 내기 위하여, 결합공진기 안에 전자파 손실 물질인 AlN-SiC(60:40)을 삽입하였으며, 반사 손실 -10dB를 기준으로 하여, 약 820MHz의 주파수 대역폭을 가지는 것을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 7. 설계된 2단 입력/출력 임피던스 변환기 : (a) HFSS 모델, (b) 반사 손실 특성

3. 결합공진기 진행파관 증폭기의 비선형 특성

결합공진기 진행파관 증폭기의 비선형, 대신호 성능을 예측하기 위해서 3차원 PIC 코드인 MAGIC3D를

이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. MAGIC3D 코드는 초기상태에서 시간과 공간에 따라 진행되는 하전 입자(charged particle)와 전기자기장(electromagnetic fields)의 상호 작용을 시뮬레이션할 수 있으며, 수치적 계산은 유한요소 해석을 사용한다. 시간의 증가에 따라 진행되는 전기자기장은 맥스웰 방정식을 이용하여 공간적으로 해석되고 새로운 전기자기장에서 모든 하전 입자들의 좌표와 운동량은 로렌츠 방정식으로 해석되어진다. MAGIC 코드에서 전자파와 하전입자의 상호 작용은 자체적으로(self-consistent) 해석되어지게 된다.

Fig. 8은 MAGIC3D를 이용하여 2개의 포트를 가지는, 64개의 결합공진기에 전자파 손실 물질인 AlN-SiC (60:40)을 삽입한 진행파관 증폭기를 모델링한 것이다. 설계된 결합공진기 진행파관 증폭기에서 전자빔 전압은 12.7~13kV, 빔 전류는 300mA이고 전자빔의 직경은 50mils이다. 일반적으로, 불필요한 전자파의 발진을 막기 위해 진행파관 증폭기의 저속과 구조 내부에 sever를 삽입하거나 전자파를 감쇄시키는 전자파 손실체(lossy material)를 사용한다. 전자기적으로, 손실 세라믹은 진행파관 증폭기의 발진을 억제시킬 뿐만 아니라, 원하는 신호에서 안정적인 증폭을 얻게 하며, 주파수 대역폭을 넓게 하고, 이득 특성을 조절 할 수 있다. 본 논문에서는 전자파 손실 물질인 AlN-SiC (60:40)을 결합공진기 내에 삽입하여, 회로의 안정성을 높이도록 모델링하였다.

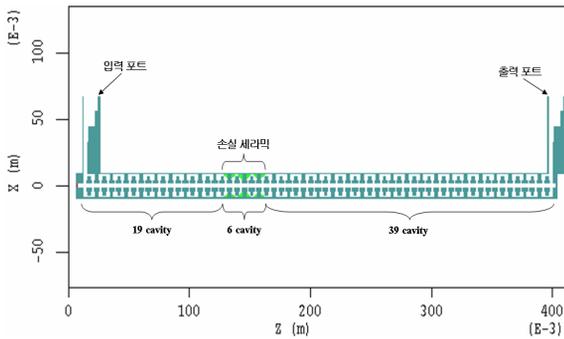
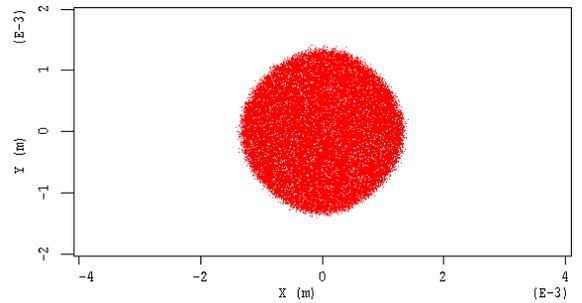


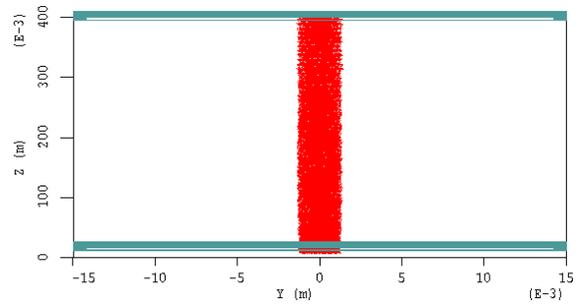
Fig. 8. 손실 세라믹이 삽입된 결합공진기 진행파관 증폭기의 MAGIC3D 모델

64개의 결합공진기 진행파관 증폭기의 비선형 특성을 살펴보기 위해서 전자빔 전압 10kV, 전자빔 전류 300mA일 때 주파수 8.3GHz에서 입력된 전자파 전력 이 0.7W일 때 전자빔 현상과 이득 및 출력 특성을 살

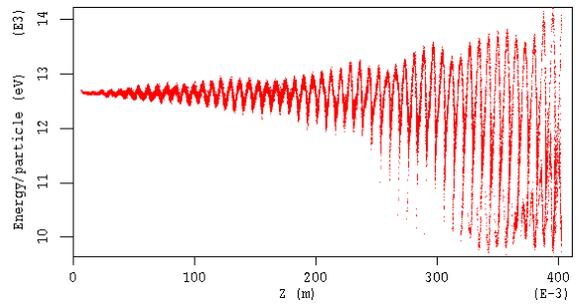
펴보았다. Fig. 9는 결합공진기 진행파관 증폭기를 따라 진행되는 전자빔의 위상 공간(phase space)를 x-y 평면과 y-z 평면에서 살펴본 것이다. Fig. 9(a)는 전자빔 터널을 따라 전송되는 전자빔의 단면을 나타낸 것이고 Fig. 9(b)는 전자빔이 회로를 따라 진행하면서 전자빔과 RF의 상호 작용으로 회로의 출력부분에서 전자빔이 변칭(bunching)되는 것을 나타낸 것이다. Fig. 9(c)는 축 방향을 따라 진행되는 전자빔의 모멘텀(momentum)을 나타낸 것이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. 전자빔의 phasespace : (a) x-y 평면, (b) y-z 평면, (c) 회로길이에 따른 전자빔의 모멘텀

Fig. 9(c)를 보면 회로 출력부분에서 전자빔의 모멘텀이 줄어드는 것은 전자빔의 에너지가 전자파 에너지로 변환되는 것을 의미한다. 전자빔의 운동에너지가 RF 에너지로 변환되면서 다발화된 전자빔은 출력 단에서 속도가 줄어들게 되는데 이런 과정을 거쳐서 전자파의 증폭이 일어나게 된다.

Fig. 10은 2개의 도파관 포트를 갖는 손실 세라믹이 삽입된 이중슬롯 결합공진기 진행파관 증폭기의 시간

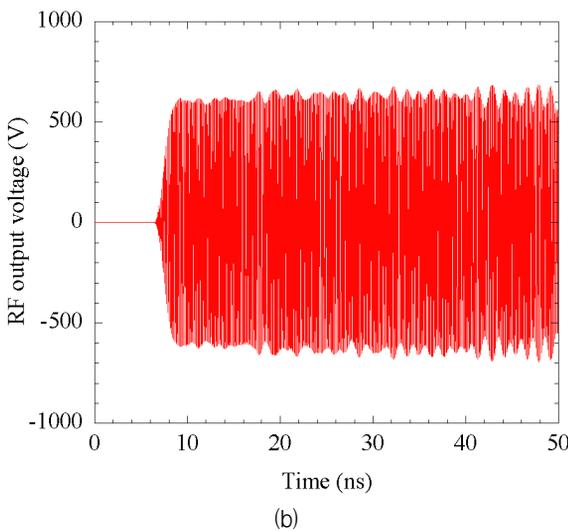
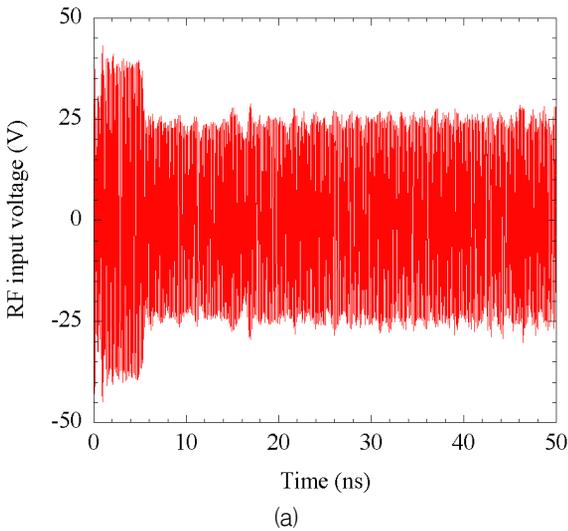


Fig. 10. 결합공진기 진행파관 증폭기의 입력과 출력 포트에서 측정된 RF 전자파 전압 : (a) 입력 포트, (b) 출력 포트(8.3GHz)

영역에서 본 RF 입력과 출력의 전압 신호를 나타낸 것이다. 입력 주파수는 8.3GHz를 인가하였으며, 입력 포트와 출력 포트에서 각각의 RF 전압의 세기는 25V, 600V이다. 2개의 포트에서 측정된 RF 전압의 크기를 통해서 입력 포트에서 입사된 전자파의 신호가 회로를 지나면서 전자빔과 상호 작용을 통해 증폭되어 출력 포트에 나옴을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 설계된 이중슬롯 결합공진기 진행파관 증

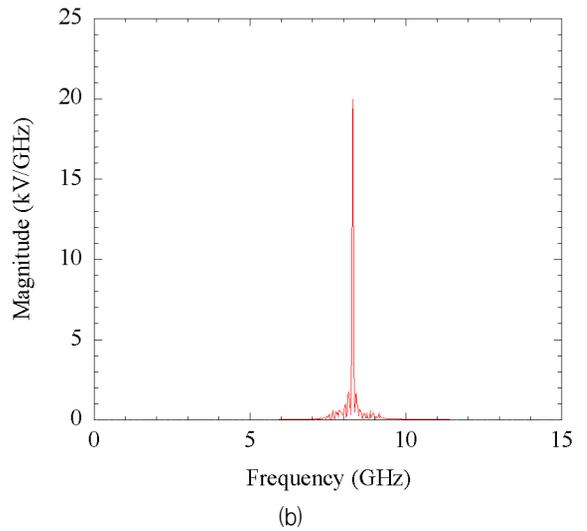
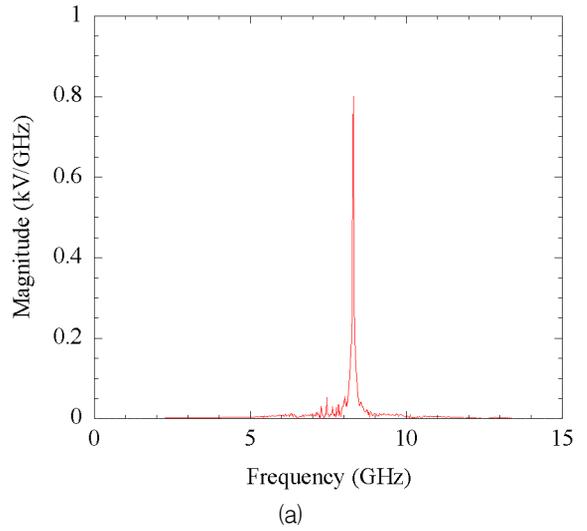


Fig. 11. 결합공진기 진행파관 증폭기의 입력과 출력 도파관 포트에서 측정된 RF 전압의 주파수 스펙트럼 : (a) 입력 포트, (b) 출력 포트(8.3GHz)

폭기의 입력 포트와 출력 포트에서 측정된 RF 신호에 대한 주파수 스펙트럼이다. 8.3GHz의 주파수를 가지는 신호를 입력하였을 때, 출력 포트에서 불요파(spurious signal)없이 단일 주파수로 안정적인 증폭이 일어나는 것을 확인하였다.

Fig. 12는 설계된 손실 세라믹을 삽입한 64개의 이중슬롯 결합공진기를 가지는 진행파관 증폭기의 구동 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 13은 설계된 손실 세라믹을 삽입한 64개의 이중슬롯 결합공진기를 가지는 진

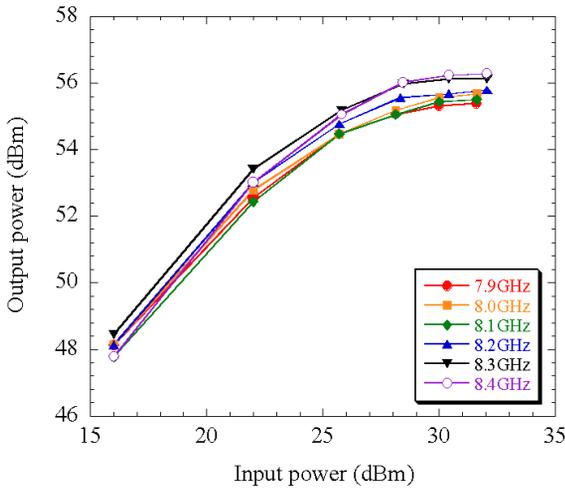


Fig. 12. X-대역 이중슬롯 결합공진기 진행파관 증폭기의 구동 곡선

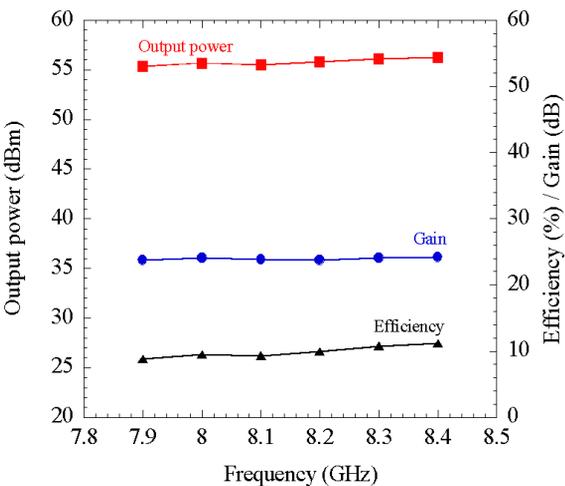


Fig. 13. X-대역 이중슬롯 결합공진기 진행파관 증폭기의 포화 출력과 이득, 효율

행파관 증폭기의 포화 출력과 이득, 효율을 나타낸 것이다. 동작 주파수 대역에서 포화 출력은 350~430W를 가지며, 이득은 23.7~24.2dB, 그리고 효율은 8.9~11.2%를 가지는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 레이더용 X-대역 결합공진기 진행파관 증폭기 설계에 대한 연구를 수행하였다. 3차원 전자파 해석 코드인 HFSS 코드를 이용하여 이중슬롯 결합공진기 구조로 된 상호 작용 회로를 모델링하고, 전자파의 분산 특성을 예측하였다. 또한, 이중슬롯 결합공진기 진행파관 증폭기의 비선형 특성을 예측하기 위해 3차원 PIC 코드인 MAGIC3D를 이용하였다. MAGIC3D 시뮬레이션을 통해 64개의 이중슬롯 결합공진기를 갖는 X-대역 진행파관 증폭기에서 전자빔 전압이 12.7~13kV, 전자빔 전류가 300mA일 때 동작 주파수 대역에서 포화 출력이 350~430W를 가지며, 이득은 23.7~24.2dB, 그리고 효율은 8.9~11.2%를 가지는 것을 확인하였다.

X-대역 이중슬롯 결합공진기 진행파관 증폭기의 설계를 통하여 무선 통신의 핵심 기술로서 군수 분야뿐만 아니라 위성 통신 및 정보 통신 등의 민수 분야에도 많이 사용되고 진행파관 증폭기의 국내 자체 개발 가능성을 제시하였다.

후 기

본 연구는 2008년도 연구년 기간 동안에 수행되었음.

Reference

[1] Legarra J. R., Kolda P. E., Freund H. P., Antonsen T. M., Jr., and Levush B., "Ka-Band Coupled-Cavity TWT Amplifiers for Military Radar and Commercial Satellite Communication", Microwave Symposium Digest, 2002 IEEE MTT-S International, Vol. 2, June 2002.

[2] Jeffrey D. Wilson, "Design of High-Efficiency Wide-Bandwidth Coupled-Cavity Traveling-Wave Tube

- Phase Velocity Tapers with Simulated Annealing Algorithms”, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 48, No. 1, January 2001.
- [3] Khanh T. Nguyen, Jeffrey P. Calame, Dean E. Pershing, Bruce G. Danly, Morag Garven, Baruch Levush, and Thomas M. Antonsen, Jr., “Design of a Ka-Band Gyro-TWT for Radar Applications”, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 48, No. 1, January 2001.
- [4] A. S. Gilmour, Jr., “Principle of Traveling Wave Tube”, Artech House, 1994.
- [5] Jeffrey D. Wilson and Carol L. Kory, “Simulation of Cold-Test Parameters and RF Output Power for a Coupled-Cavity Traveling-Wave Tube”, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 42, No. 11, November 1965.
- [6] H. J. Curnow, “A General Equivalent Circuit for Coupled-Cavity Slow Wave Structures”, Microwave Symposium Digest, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. MTT-13, 1965.
- [7] James R. Legarra, Jennifer Cusick, Rasheda Begum, Peter Kolda, and Michael Cascone, “A 500-W Coupled-Cavity TWT for Ka-Band Communication”, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 52, No. 5, May 2005.
- [8] D. M. Park and J. J. Choi, “Three-Dimensional Simulations of an X-Band Coupled-Cavity Traveling-Wave-Tube Amplifier”, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 43, No. 6, December 2003.
- [9] WenQiang Lei and ZhongHai Yang, “Software Cold Test Simulation of Coupled Cavity Slow-Wave Structure in Millimeter Wave TWT”, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 24, No. 1, January 2003.