

X-밴드 진행파관 증폭기 설계 및 제작

나영호, 손민호, 주지한, 김해진, 최진주, R. Kim*

광운대학교 전자공학과

*Dynamic Wave Telecom, USA

전화 : (02) 940-5298 / 팩스 : (02) 916-9270

E-mail : na05@gwu.ac.kr

Experimental investigation on an X-band Traveling-Wave-Tube Amplifier

Young-Ho Na, Min-Ho Son, Han-Ji Joo, Hae-Jin Kim, Jin-Joo Choi and R. Kim*

*Dynamic Wave Telecom, USA

Department of Radio Science and Engineering, Kwangwoon University

E-mail : na05@gwu.ac.kr

Abstract

X-band(8-12GHz)에서 50W의 고출력을 내는 진행파관 증폭기를 설계하고 제작하여 측정하였다. 본 연구에서는 전자빔과 전자파가 상호작용을 일으키는 Interaction Circuit을 나선형구조로 구성하였고 저속파구조의 분산특성을 얻기 위해 Sheath helix 모델링 이론을 적용하였고 HFSS(High Frequency Structure Simulator) Code를 사용해 분산특성을 얻었으며 이를 바탕으로 제작하여 측정하였다. 또한 2D-MAGIC Code를 통해 전자빔과 전자파와의 상호작용관계와 증폭기의 성능을 예측하였다. 시뮬레이션 결과 포화입력전력 100 mW를 넣었을 때 10GHz에서 43W의 출력전력과 26dB의 이득을 얻을 수 있었으며 측정을 통해 입력전력 30mW일 때 8W의 출력, 24dB의 이득을 얻을 수 있었다.

key words : 나선형 진행파관 증폭기, Helix, TWT, Microwave Tube

I. 서론

최근 정보화 사회로 나아감에 따라 무선통신은 문자 및 음성 외의 제한된 영역에서 벗어나, 대용량의 데이터 및 동화상의 실시간 전송에 이르기까지 영역이 넓혀지고 있다. 이에 따라 데이터는 그 종류뿐만 아니라, 크기에 있어서도 급격히 증가하고 있다. 따라서 문자, 음성, 영상 등의 멀티미디어 정보를 고품질로 전송하기 위하여, 고주파, 광 대역폭을 제공할 수 있는 증폭기가 요구되어 지고 있다. 일반적으로 신호원으로 쓰이고 있는 전자파 증폭기로는 크게 반도체를 사용하는 SSPA(Solid State Power Amplifier)와 진공에서 자유전자를 이용한 진공전자파 출력기(Vacuum Power

Tube)가 있다. SSPA는 작고 가볍고 잡음이 적다는 장점이 있지만 내열성이 약하기 때문에 고주파에서 고출력을 내는데 한계가 있다. 반면 진공관 증폭기는 SSPA보다는 크기가 크고 잡음이 많다는 단점이 있지만 고주파, 광 대역에서 고출력을 내는 특성을 가지고 있다. 1993년 미국 Northrop Grumman에서 발표한 차세대 증폭기인 MPM(Microwave Power Module)은 이 두 가지의 장점을 결합하여 고주파 광 대역에서 고출력을 내며 잡음특성 또한 좋은 특성이 있다 [1].

본 논문에서는 MPM에 응용되는 진공전자파 출력기(Vacuum Power Tube)중 광 대역 특성을 가지고 있는 나선형 진행파관 증폭기에 대해서 연구 내용을 기술한다.

진행파관 증폭기의 증폭원리는 전자빔과 전자파간

의 상호작용으로 이해가 된다. 그림 1과 같이 그 상호작용이 일어나는 구조에 따라서 진행파관 증폭기의 특성이 달라지는데 본 논문에서는 광 대역 특성을 내는 나선형 구조를 택하였다. 또한 진행파관의 출력 특성에 큰 영향을 미치는 전자총부분도 기존의 열전자를 방출하는 Thermionic cathode에서 carbon nanotube field-emitter-array(FEA) cathode로 대체하는 연구가 병행해서 진행중이다.

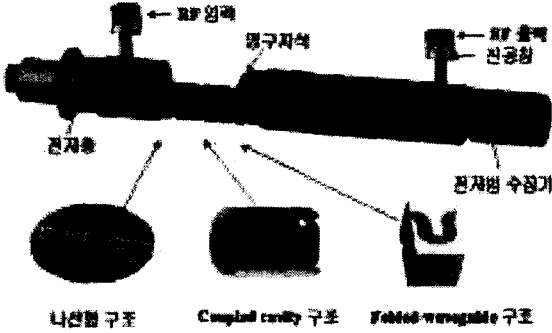


그림 1. 진행파관 증폭기의 구조

II. 나선형 저속파 구조의 해석

진행파관 증폭기에서 증폭이 가장 잘 일어나는 조건은 전자빔의 속도와 전자파의 축상 위상속도가 동기를 이룰 때이다. 나선형 저속파 구조를 해석하는 것 중 가장 중요한 것은 바로 이 주파수에 따른 위상속도 즉 분산특성을 얻는 것이다. 이 분산특성을 알 때 전자파의 축상 위상속도를 구할 수 있고 이에 따른 전자빔 전압을 결정할 수 있으며 동시에 동작영역을 구할 수 있다.

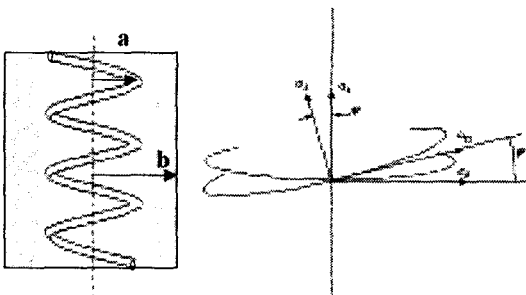


그림 2. Sheath helix 모델링

그림 2는 Sheath helix 모델링 한 것이다. 복잡한 구조물을 경계조건과 가정을 써서 맥스웰 방정식으로 부터 유도해 내어 나선형 구조의 분산특성을 구할 수 있다 [2]. 식 (1)은 이를 통하여 얻은 X-밴드 나선형 구조의 분산특성이다.

$$\frac{k_0 \cot \psi}{r} = \left[\frac{I_0(\gamma a) K_0(\gamma a)}{I_1(\gamma a) K_1(\gamma a)} \right]^{1/2} D_H \quad (1)$$

여기서

$$D_H = \left[\left(1 - \frac{I_0(\gamma a) K_0(\gamma b)}{K_0(\gamma a) I_0(\gamma b)} \right)^{-1} \times \left(1 - \frac{I_1(\gamma a) K_1(\gamma b)}{K_1(\gamma a) I_1(\gamma b)} \right) \times \{ 1 + (\epsilon_r - 1) \gamma a I_0(\gamma a) K_1(\gamma a) \times I_0(\gamma a) K_1(\gamma a) \left(1 + \frac{I_1(\gamma a) K_0(\gamma b)}{K_1(\gamma a) I_0(\gamma b)} \right) \right]^{-1/2}$$

이고 $\gamma = (\beta^2 - \omega^2 \mu_0 \epsilon_0)^{1/2}$, $K_0 = \frac{\omega}{c}$, $\psi =$ pitch angle, a는 나선형 구조의 반지름, b는 barrel의 반지름이다.



그림 3. HFSS로 모델링한 X-밴드 나선형 구조

그림 3은 HFSS 시뮬레이터로 모델링한 X-밴드 나선형 구조이다. HFSS 시뮬레이터를 통하여서 이론보다 더 근접한 분산특성을 얻을 수 있으며 이를 통해서 축상 위상속도를 구했다 [3].

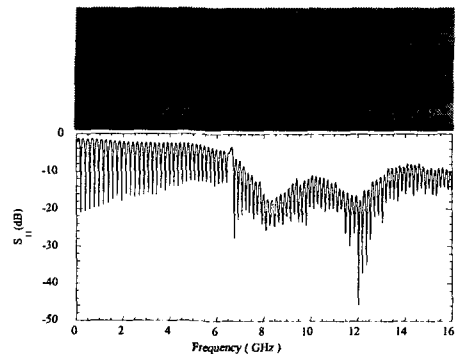


그림 4. 제작된 나선형 구조물과 공진주파수

그림 4는 실제 제작한 나선형 구조물이다. Vector Network Analyser를 통해서 공진 모드를 구하고 이를 통해 축상 위상속도를 간접적으로 구했다.

이 세 가지 방법을 통하여서 위상속도를 구했으며 그림 5와 같이 HFSS 시뮬레이션을 하였을 때 측정값과 실제측정값이 3%의 오차를 가짐을 볼 수 있었다. 이는 HFSS를 모델링하여 제작할 때 모델링 자체의 메싱 문제로 인해 정확하게 똑같이 만드는데 한계가 있기 때문이다.

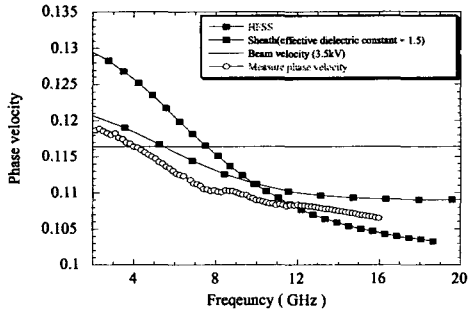


그림 5. X-밴드 나선형 구조의 분산특성

III. 2D-PIC code를 이용한 비선형특성

전자파 증폭기의 비선형 특성을 이해하기 위해서 PIC(Particle-In-Cell) code인 MAGIC2D를 사용하였다. MAGIC2D code는 공간전하와 전자파사이의 상호작용 관계를 맥스웰 방정식과 로렌츠의 힘의 법칙을 이용해 계산을 하여 해석해주는 시뮬레이터다 [4]. 그림 6와 같이 나선형 구조를 모델링 할 수 있으며 2D code 이므로 축 방향으로 대칭적으로 해석 해준다. 가운데의 검은 부분은 전자파의 Backwarding 오실레이션을 막기 위한 전자파 흡수체이며 총 48dB를 감쇄시키도록 설계하였다. MAGIC2D simulator는 C-밴드 Northrop Grumman 진행파관 증폭기를 벤치마킹하여 측정값과 비교하므로 성능예측을 확인하였다 [5][6].

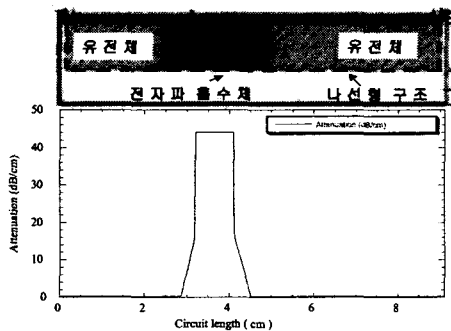


그림 6. 나선형 진행파관 증폭기의 MAGIC2D 모델링과 전자파 흡수체 모델링

그림 6과 같은 모델링을 통해서 전자빔 전압 3.95kV, 전자빔 전류 50mA를 입사하고 10GHz에서 100mW의 입력을 넣었을 때 전자파와 상호작용을 일으키는 전자빔이 변조현상을 일으키는 것을 그림 7(a)과 같이 볼 수 있다. 이렇게 해서 에너지를 잃은 전자빔이 그림 7(b)와과 같이 전자파에너지로 증폭되어서 나오는 것을 확인할 수 있으며 그림 7(c)와 같이 10GHz에서 최종 43W의 출력이 나왔다. 그림 8(b)는 출력 주파수 스펙트럼이며 출력 쪽에 harmonics가 있지만 무시할 정도로 작다. 그림 9는 Driving curve이고 100mW 입력을 넣었을 때 포화됨을 볼 수 있다.



그림 7(a). 전자빔 변조현상

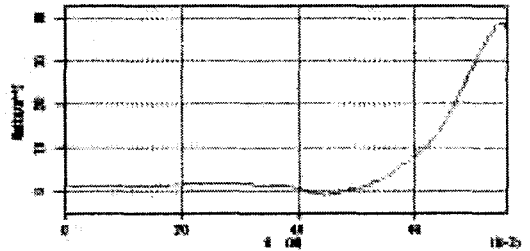


그림 7(b). 축상 전력분포

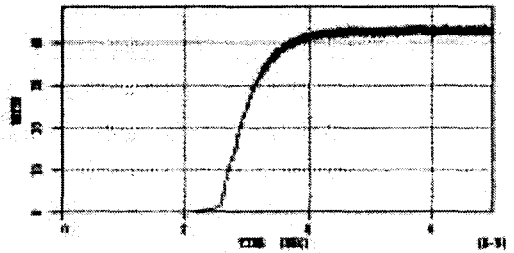


그림 7(c). 출력전압

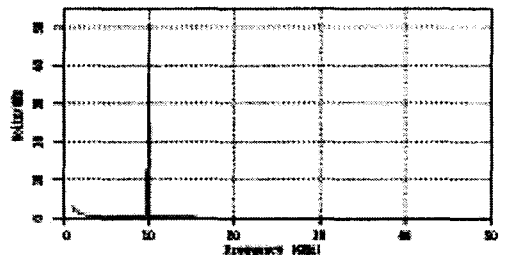


그림 8(a). 입력 주파수 스펙트럼

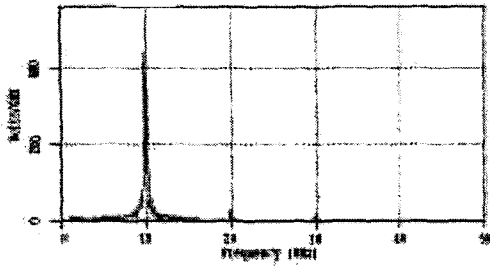


그림 8(b). 출력 주파수 스펙트럼



그림 11. CW 측정을 위한 실험 환경

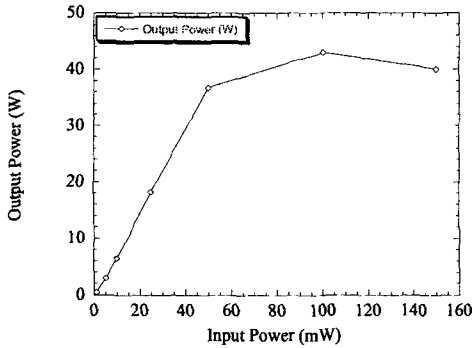


그림 9. 10GHz에서의 Drive curve

캐소드 전압	-3.5 kV
애노드 전압	+102 V
컬렉터 전압	-1.784 kV
히터 전압	5.2V
히터 전류	1 A
감쇠기	40 dB
입력주파수	8~12 GHz
입력 전력	~ 36mW

표 1. CW 동작 조건

IV. 실험

그림 10은 이론과 시뮬레이션을 바탕으로 제작된 나선형 진행파관 증폭기이다. 전자총은 3.5~4 kV까지 빔 포커싱이 되며 영구자석은 anlico5 물질을 썼으며 전자빔을 가이딩하기 위해 사용되었다. 전자파에너지와 상호작용이 일어난 후 전자빔은 컬렉터로 수집되는데 Depressed 컬렉터를 쓰므로 전체 효율을 40% 이상 높일 수 있었다.

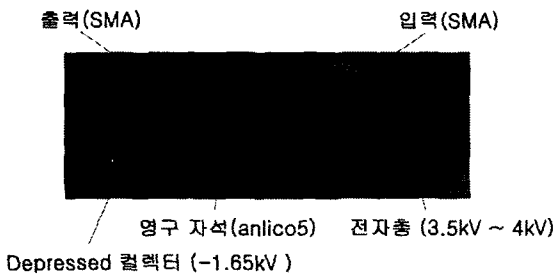


그림 10. 제작된 나선형 진행파관 증폭기

이 나선형 진행파관 증폭기를 CW로 실험하기 위해서 그림 11과 같이 실험 환경을 준비하였으며 표 1과 같은 조건을 두고 실험이 수행되었다.

CW로 동작하여 주파수에 따른 Drive curve를 그림 12에 나타내었다. 입력전력이 100mW 일때 포화되도록 설계하였는데 실제로 실험을 할 때 100mW 신호원이 없어 35mW까지 측정을 하였다. 이후 200mW의 Balanced type SSPA를 제작하여 입력단을 구동하여 다시 측정할 것이다.

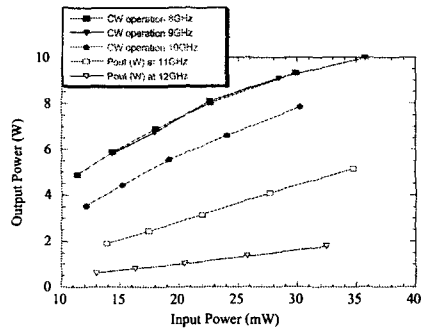


그림 12. CW로 측정된 Drive curve

30mW의 입력을 넣었을 때 주파수대 출력을 그림 13에 나타내었다. 실험을 할 때 시스템을 보호하기 위해서 펄스모드로 먼저 실험을 하고 나중에 CW모드를 테스트 하는데 첫 번째 나선형 진행파관을 테스트할 때 컬렉터에 전압인가의 문제점이 생겨 전자빔이 뒤로 되돌아가 나선형 회로가 끊어져버려 다시 제작을 하여 측정하였다. 이때 전자빔 전압이 3.5로 낮아져 빔에너지가 줄어 출력이 줄었다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 RRC (과제번호 : R12-1996-006-18003-0)지원사업으로 수행되었습니다.

본 연구를 위해 많은 도움을 주신 미국 Dynamic Wave Telecom.의 Engineering support team 분들께 진심으로 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] A. Brees, G. Dohler, J. Duthle, G. Groshar, G. Pierce and R. Weyrich "Microwave Power Modele(MPM) Development and Results", Eleton Devices Meeting, 1993. Techincal Digest., International, 1993 pp. 145-148
- [2] B. N. Basu, *Electromagnetic theory and applications in beam-wave electronics*. New Jersey : World Scienrific, pp.169-234, 1995
- [3] Rasheda Begum, Jim Legarra " Application of 3D Microwave Design Tools to Predict Cold-Test and Hot-Test Characteristics of a Helix-TWT," Vacuum Electronics Conference, 2002. IVEC2002. Third IEEE Internationnal, 2002 Paper P2.2
- [4] B. Goplen, L. Ludeking, and D. smithe, *MAGIC Users Manual*, Tech. Rep. AFSOR, MRC, Mar. 1999
- [5] H. P. Freund, E. G. Zaidman, "Time-depeneent simulation of helix traveling wave tubes," Pys. Plasma, Vol. 7, No. 12, December 2000
- [6] H. P. Freund, "Three-Dimensional Nonlinear Theory of Helix Traveling-Wave-Tubes." IEEE transactions on plasma science, Vol.28, No. 3, June 2000
- [7] Nick Potheary, *Feedforward Linear Power Amplifiers*. Boston : Artec House 1999

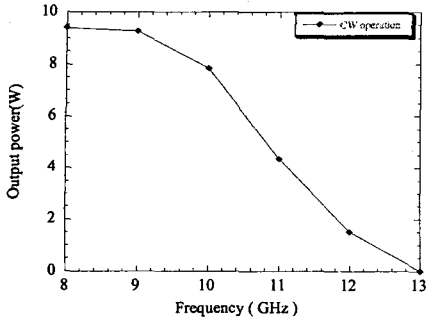


그림 13 . CW로 측정 한 대역폭 (입력=30mW)

앞으로 계속하여서 주파수 스펙트럼분석을 통하여 3d Harmonics와 IMD를 측정할 것이다. 그리고 무선 통신시스템에 적용하기 위해서 IMD 성능을 향상시키기 위해서 선형화기를 연구하고 제작하고 있는 중이다. 선형화기는 일반적으로 back-off, feedback, predistorion, feedforward 방식이 널리 쓰이고 있는데 그림 14와 같이 가장 IMD성능을 줄일 수 있는 feedforward 방식을 이용하여 설계하고 있다 [7].

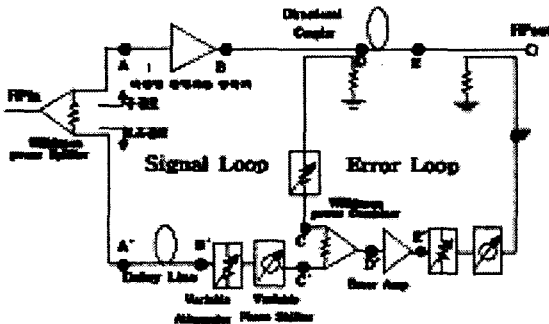


그림 14.. Feedforward 선형화 방식을 이용한 선형화된 진행파관 증폭기

V. 결론

X-밴드 나선형 진행파관 증폭기를 설계 제작하였다. 이론, HFSS, 측정을 통하여 분산특성을 구하였고 MAGIC2D simulation을 통해서 10GHz에서 100mW를 입사시켰을 때 43W의 출력과 26dB의 이득을 얻을 수 있었으며 측정을 통해서 10GHz에서 입력 30mW를 입사시켰을 때 8W의 출력, 24dB의 이득, 52% 효율을 얻었다.