

# 무선통신용 진행파관 증폭기 설계

## Design of a Traveling-Wave-Tube Amplifier for Wireless Communications

나영호, 손민호, 주지한, 김해진  
(광운대학교)

최진주, R.Kim\*  
(광운대학교, 교수)  
(\*Dynamic Wave Telecom)

### 목 차

- I. 서론
- II. 나선형 저속파 구조의 해석
  - 1. Sheath 이론을 통한 분산특성
  - 2. HFSS를 통한 분산특성
  - 3. 측정된 분산특성
- III. 2D-PIC Code를 이용한 비선형 특성
- IV. 실험
- V. 결론
- 참고문헌

## I. 서 론

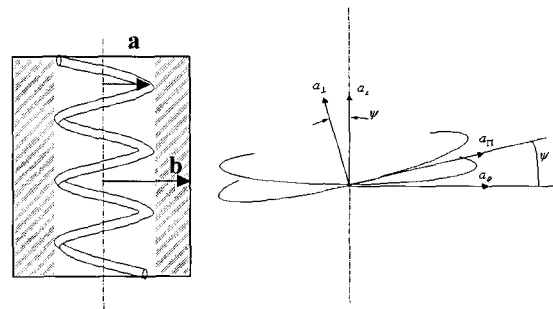
지능형 교통체계는 교통체계의 정리를 무선통신과 접목하여서 원활한 제어와 통제 그리고 정보제공을 하는 새로운 교통체계 시스템이다. 교통과 관련해서 사용되기 때문에 대부분의 사용자는 고속도로나 국도 등 큰 도로에 집중되어 있다. 그러므로 차량과 무선통신을 하기 위해서는 각각 수신, 송신, 제어기능을 갖춘 기지국이 필요하며 RF 증폭기의 성능과 감도에 따라서 그 기지국간의 거리가 결정되어지게 된다. 그러나 높은 주파수대역으로 올라갈수록 증폭기의 출력을 높이는 일은 아직까지 어려운 기술로 남겨져 있다. 그런 문제의 해결을 위해서 고주파 고출력이 가능한 진공관소자인 진행파관 증폭기에 대한 연구가 진행되었다.

진행파관 증폭기의 증폭원리는 전자빔과 전자파간의 상호작용으로 이해가 된다. 전자총에 있는 캐소드와 애노드와의 전압차로 인해서 가속된 전자빔은 입력된 전자파에너지와 상호교환 작용을 일으킨다. 일반적으로 전자빔의 속도와 전자파의 축 상 위상속도가 같을 때 에너지 교환 작용이 가장 잘 일어나며 전자빔은 축 상 전기장에 의해 다시 변조되어 회로에 전압을 인가하게 된다. 이때 인가된 전압은 다시 전자빔을 변조시키며 더 많은 에너지 교환이 일어나게 된다. 결국 전자빔의 운동에너지가 전자파에너지로 교환되어 증폭기 끝단에는 고출력의 전자파가 발생하게 된다.

## II. 나선형 저속파 구조의 해석

### 1. sheath 이론을 통한 분산특성

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



〈그림 1〉 Sheath helix 모델링

〈그림 1〉은 Sheath helix 모델링 한 것이다. 나선형 구조를 가진 분산특성은 경계조건과 가정을 써서 맥스웰 방정식으로부터 유도해 낼 수 있다 [1]. 식 (1)은 이를 통하여 얻은 나선형 구조의 분산특성이다.

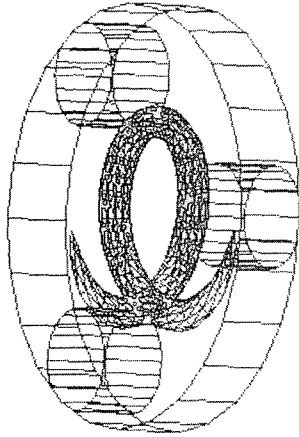
$$\frac{k_0 \cot \phi}{r} = \left[ \frac{I_0\{\gamma a\} K_0\{\gamma a\}}{I_1\{\gamma a\} K_1\{\gamma a\}} \right]^{1/2} D_{1f} \quad (1)$$

여기서,

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

이고  $\gamma = \sqrt{\beta^2 - \omega^2 \mu_0 \epsilon_0}$ ,  $K_0 = \frac{\omega}{c}$ ,  $\phi = \text{pitch angle}$ , a는 나선형 구조의 반지름, b는 barrel의 반지름이다.

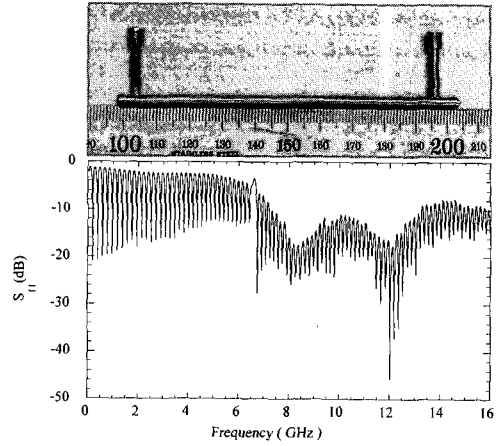
## 2. HFSS 코드를 이용한 분산특성



〈그림 2〉 HFSS로 모델링 한 나선형 구조

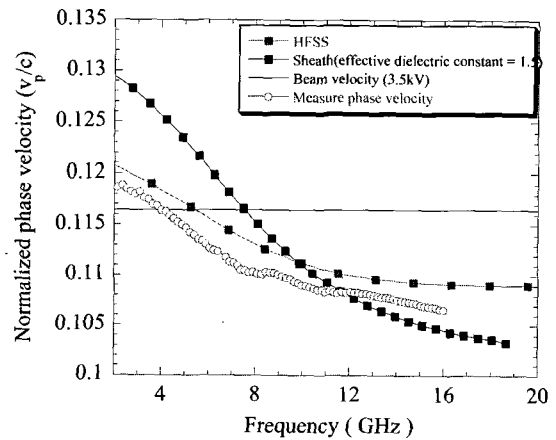
〈그림 2〉는 HFSS 코드로 모델링 한 나선형 구조이다. 가운데 있는 것이 나선형 구조이며 BeO 유전체 3개가 나선형 구조를 받치고 있다. HFSS 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여서 이론보다 더 근접한 분산특성을 얻을 수 있으며 이를 통해서 측정 위상속도를 구했다 [2]. HFSS 시뮬레이션을 통하여 분산특성을 구할 때 두 가지 방법이 있는데 하나는 공진기의 공진특성을 통하여 분산특성을 구하는 방법과 두 번째는 위상이동을 통하여 분산특성을 구하는 방법이 있다. 그런데 나선형 구조와 같은 복잡한 구조를 해석하기 위해서는 많은 주기와 길이를 필요로 하는 공진특성을 통하여 구하는 방법보다는 위상이동을 통하여 분산특성을 구하는 것이 시뮬레이션 시간도 줄일뿐더러 더 효율적이다. 일반적으로 공진특성을 통하여 구할 때는 시간이 15시간 걸리는데 위상이동특성을 통하여 구하면 1시간 걸리게 된다. 그래서 본 논문은 위상이동특성을 분석하는 것을 이용하였다.

## 3. 측정된 분산특성



〈그림 3〉 제작된 나선형 구조물과 공진주파수

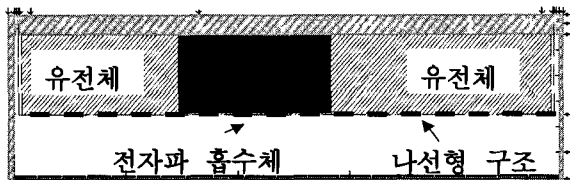
〈그림 3〉은 HFSS 시뮬레이션을 통하여 설계된 나선형 구조물이다. Vector Network Analyzer를 통해서 나선형 구조물의 공진 모드를 측정하였고 이를 통해 측정 위상속도를 간접적으로 구했다. 이 세 가지 방법을 통하여서 위상속도를 구했으며 〈그림 4〉와 같이 비교하였다. 이론은 실제로 Sheath 모델을 가정으로 하였기 때문에 오차가 심했지만 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 분산특성은 실제로 제작하여 측정 한 분산특성 값과 3% 정도의 오차를 가지며 비교적 근사함을 확인할 수 있었다. 오차의 원인은 나선형 구조를 컴퓨터 시뮬레이터를 통하여 모델링 할때 모델링된 구조물의 메싱 문제로 인해 실제나선형 구조와 같이 정확하게 구현하는데 한계가 있기 때문이다.



〈그림 4〉 나선형 구조의 분산특성

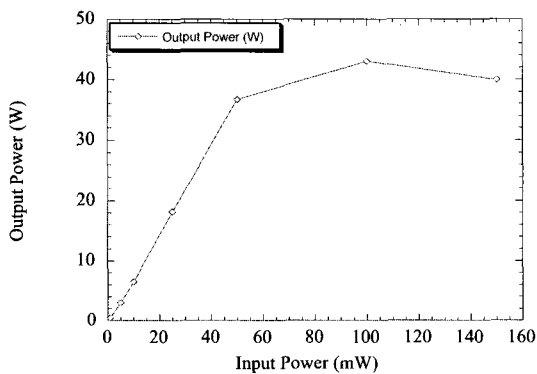
### III. 2D-PIC 코드를 이용한 비선형특성

나선형 전자파 증폭기의 비선형 특성을 예측하기 위해서 Particle-In-Cell (PIC) 코드인 MAGIC2D를 사용하였다. MAGIC2D 코드는 공간전하와 전자파사이의 상호작용관계를 맥스웰 방정식과 로렌츠의 힘의 법칙을 이용해 계산을 하여 해석해주는 컴퓨터 시뮬레이터다 [3]. <그림 5>는 MAGIC2D를 이용하여 모델링 된 나선형 구조이다. 2차원 코드이므로 축 방향으로 대칭적으로 해석 해준다. 빗금 친 부분은 나선형구조를 받쳐주기 위한 유전체이며 점선부분은 나선형 구조의 Sheath 모델이다. 가운데의 검은 부분은 전자파의 Backward 발진을 막기 위한 전자파 흡수체이며 총 48 dB를 감쇄시키도록 설계하였다.



<그림 5.> 나선형 진행파관 증폭기의 MAGIC2D

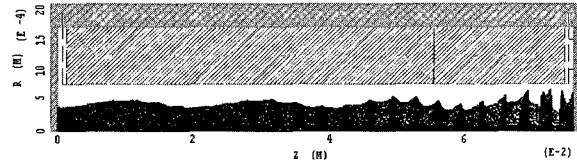
<그림 5>의 모델링에서 전자빔 전압 3.95 kV, 전자빔 전류 50 mA를 입사하고 10 GHz, 100 mW의 전자파 입력을 넣었다. 100 mW는 <그림 6>과 같이 구동 곡선을 통하여서 포화 전력을 구하였다.



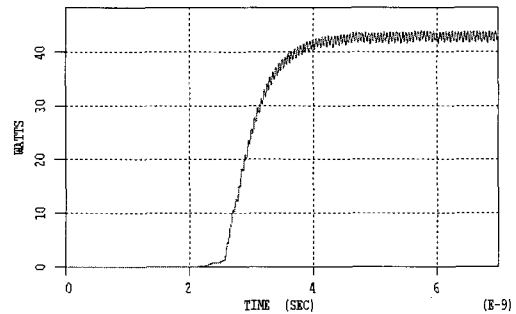
<그림 6> 10 GHz에서의 구동 곡선

이 때 전자파와 상호작용을 일으키는 전자빔이 변조현상을 일으키는 것을 <그림 7(a)>와 같이 확인 할 수 있었다. 에너지를 잃은 전자빔이 전자파에너지로 증폭되어서 나오는 것을 <그림 7(b)>를 통하여서 확인할 수 있으며 10 GHz에서 최종 43 W의 출력과 26 dB

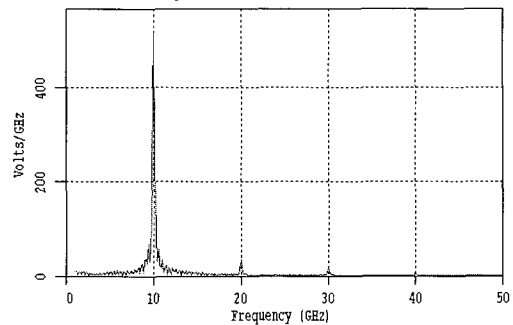
의 이득이 나왔다. <그림 7(c)>은 출력 주파수 스펙트럼이며 출력 쪽에 조화성분이 있지만 무시할 정도로 작다.



<그림 7(a)> 전자빔 변조현상



<그림 7(b)> 출력전압



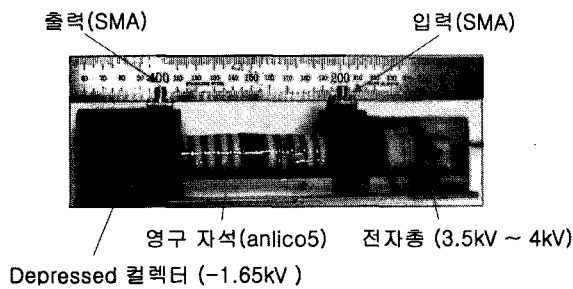
<그림 7(c)> 출력 주파수 스펙트럼

### IV. 실험

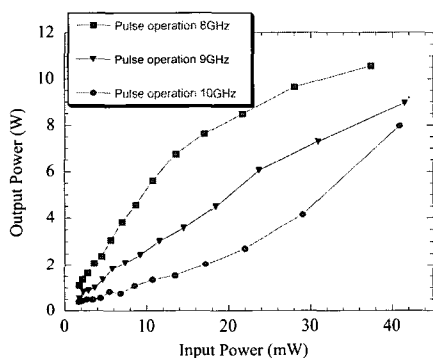
이론과 시뮬레이션을 바탕으로 제작된 나선형 진행파관 증폭기를 <그림 8>에 나타내었다. 실험을 할 때 펄스 모드 동작과 CW 동작으로 할 수 있다. 펄스 모드는 전자총에 인가되는 고전압을 펄스로 주어서 펄스 인가 시 전자빔이 방출되도록 한다. 실험 시 나선형 진행파관의 내부 회로를 보호하기 위해서 먼저 펄스 모드로 실험을 하였다.

실험조건은 캐소드 전압이 -3.95 kV, 애노드 전압이 50 V, 애노드 전압을 접지로 두지 않고 양 전압을 인가하는 이유는 첫 번째로 빠져나가지 못하는 전자들 때문에 전자빔 잡음성분이 생기기도 하는데 이 전자들

을 흡수하는 것이며 다른 한 가지는 양이온들이 뒤로 가속되어 되돌아올 때 캐소드에 부딪혀서 캐소드표면을 망가지게 하는 것을 방지하게 하기 위한 것이다. 컬렉터 전압은  $-1.68\text{ kV}$ 이며 컬렉터에 전압을 걸어주는 이유는 전체 효율을 높이기 하기 위함이다.  $-3.95\text{ kV}$ 의 전압 차에 의한 전자빔은 그 속도로 컬렉터의 표면을 때리는데 이때 대부분의 에너지가 열로 바뀌어 방출된다. 그러나 컬렉터에 전압을 걸어주면 걸어준 만큼 전자들의 속도가 줄면서 살포시 컬렉터에 흡수되게 된다. 이때 만약에 전원공급기를 하나로 쓰게 된다면 그 구조상 이 에너지들이 다시금 충전이 되는 것이다. 히터 전압은  $5.37\text{ V}$ , 히터 전류는  $1\text{ A}$ 로 이는 열 방출 캐소드를 이용하기 때문에 열전자를 방출하기 위해서 캐소드 표면을 가열해 주는 역할을 한다. 펄스 모드로 동작 시 펄스폭은  $10\ \mu\text{sec}$ 이고 펄스반복주기는  $0.1\text{ sec}$ 로 하였다.

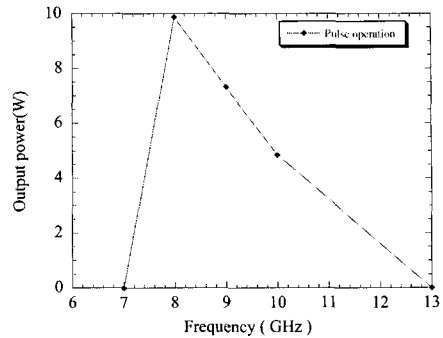


〈그림 8〉 제작된 나선형 진행파관 증폭기



〈그림 9〉 구동 곡선

〈그림 9〉와 같이 입력전력이 부족해서 포화전력  $100\text{ mW}$ 까지는 실험을 하지 못하였다. 전력측정은 crystal detector를 통하여서 측정하였고 입력전력  $30\text{ mW}$ 를 넣었을 때 주파수대 출력전력 곡선이 〈그림 10〉에 나와 있다.



〈그림 10〉 주파수 대 출력전력 (입력전력= $30\text{ mW}$ )

## IV. 결론

X-밴드 나선형 진행파관 증폭기를 설계하고 제작 측정 하였다. Sheath 이론, HFSS 시뮬레이터, 측정을 통하여 분산특성을 구하였고 전자빔 전압  $3.95\text{ kV}$ 를 결정할 수 있었다. 증폭기의 비선형특성을 예측하기 위해서 MAGIC2D simulation을 하였고  $10\text{ GHz}$ 에서  $100\text{ mW}$ 를 입사시켰을 때  $43\text{ W}$ 의 출력과  $26\text{ dB}$ 의 이득을 얻을 수 있었다. 실제로 펄스로 동작하였을 때 입력 전력  $30\text{ mW}$ 에서  $8\text{ W}$ 의 출력을 얻을 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한양대학교 RRC와 광운대학교 ITRC 지원사업으로 수행 되었습니다. 본 연구를 위해 많은 도움을 주신 미국 Dynamic Wave Telecom.의 Engineering support team 분들께 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

1. B. N. Basu, *Electromagnetic theory and applications in beam-wave electronics*. New Jersey : World Scientific, pp.169-234, 1995
2. 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 International, 2002 Paper P2.2
3. B. Goplen, L. Ludeking, and D. Smithe, *MAGIC Users Manual*, Tech. Rep. AFSOR, MRC, Mar. 1999