

FM Reflectometry를 이용한 마이크로파 대역 전송선로의 분산특성 측정에 관한 연구

박용현, 이정해
홍익대학교 전자공학과

(<http://huniv.hongik.ac.kr/~micro>)

A Study on the Measurement of Dispersion Characteristic of Microwave Transmission Line using FM Reflectometry

Yong-Hyun Park, Jeong-Hae Lee

Dept. of Radio Science & Engineering, Hongik University, Seoul, 121-791

요 약

본 논문에서는 FM Reflectometry를 이용하여 마이크로파 대역에서 다양한 전송선로의 분산특성을 측정하였다. 실험에 사용된 전송선로는 도파관에 금속봉이 주기적으로 위치한 구조로서 Gyro-TWT의 interaction circuit으로 사용되기 위해서 설계되었다. 도파관에 금속봉이 주기적으로 위치한 구조의 group velocity를 측정하기 위해서 FM Reflectometry와 기존의 Network Analyzer Time Domain 기능이 사용되었으며, phase velocity를 측정하기 위해서 short metal plate를 이용한 방법과 High Frequency Structure Simulator (HFSS)가 이용되었다. 측정된 결과는 이론치, 시뮬레이션과 비교했으며 각각의 비교는 잘 일치함을 보여 FM Reflectometry가 분산특성 측정에 사용될 수 있음을 보였다.

I. 서론

마이크로파 대역에서 전송선로의 분산특성은 소자 설계시 반드시 고려되어야 하는 중요한 성질이다. 특히 진행파관 (traveling wave tube (TWT))에서 빔과의 상호작용을 통해 광대역에서 출력을 얻기 위해서는 빔과 전파의 분산특성을 일치시켜야 하므로 진행파관의 분산특성을 정확히 알아야 한다. 따라서 전송선로의 분산특성을 정확히 측정하는 여러 측정 방법이 이전에 시도 되었다 [1][2]. 기존의 perturbation을 이용한 측정방법은 perturber의 크기와 유전체 선정 및 임피던스 정합문제로 상당히 까다롭고 시간이 많이 걸리며, 전송선로 가운데가 비어있지 않고 유전체나 불연속물체가 있을 경우 분산특성을 측정할 수 없는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이 같은 단점을 극복하고자 FM

Reflectometry를 적용하여 전송선로의 분산특성을 측정하였다. 이 기법은 perturbation 방법에 비해 간단하고 빠르며, 전송선로 내에 유전체나 다른 물질이 위치하더라도 분산특성을 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. FM Reflectometry는 이전에는 plasma density profile을 측정하거나 비행물체의 고도를 측정하는 분야에서 주로 사용되어져 왔다[3][4].

본 실험에 사용된 FM Reflectometry는 소스로부터 주파수를 modulation 시킨 후 발생된 전파를 측정하고자 하는 전송선로를 통과시켜 되돌아온 전파와 reference 신호의 beat frequency를 측정하여 지연된 시간의 차이를 계산하여 전송선로내의 group velocity를 알아냄으로써 분산특성을 측정하는 방법이다.

본 논문에서는 전송선로의 phase velocity를 측정하기 위해 short metal plate를 이용한 방법과 HFSS를

이용하여 비교하였고, FM Reflectometer로부터 얻어진 data를 검증하기 위하여 기존의 network analyzer의 time domain을 이용한 방법으로 비교하였다. 측정에 사용된 전송선로는 도파관에 금속봉이 주기적으로 위치한 것으로 Gyro-TWT[5][6]의 interaction circuit으로 사용하기 위해서 설계되었다. 이 구조는 금속봉의 높이를 조절함으로써 다양한 분산특성을 나타내고 분산특성이 선형화될 수 있다. 이를 통해 Gyro-TWT에서 빔과의 interaction을 조절 가능하기 때문에 광대역 Gyro-TWT의 interaction circuit으로 사용 되어질 수 있다.

II. 본 론

본 실험에 사용된 도파관에 금속봉이 주기적으로 위치한 구조는 그림 1과 같이 직각 도파관으로 WR-90이 사용되었으며, 도파관내의 금속봉은 높이가 조절 가능하게 제작되었다. 도파관내의 금속봉의 높이를 조절함으로써 glide, parallel, straight의 세 가지 구조로의 변환이 가능하다. 이 구조들에서 금속봉의 높이 h 는 도파관 벽으로부터 각각 2, 3.5, 5[mm]로 조절했으며, 금속봉과 금속봉사이의 길이 l 은 12[mm], 금속봉과 도파관 옆 벽과의 거리 d 는 5[mm], 금속봉의 반지름은 1[mm]로 설계되었다.

일반적인 CW Radar에서는 연속적인 신호를 target으로 보낸다. 여기서 target으로부터 되돌아온 신호는 도플러효과에 의해서 주파수 이동이 생기게 된다. 하지만 정지된 target에서 돌아온 신호만으로는 보내진 신호와의 시간차이를 알 수 없다. 따라서 되돌아온 시간을 측정하기 위해서는 보낸 신호에 있어서 시간마크를 해야 한다. 이 마크를 통해서 되돌아온 시간을 측정할 수 있는 것이다. 이와 같은 시간을 마크할 수 있는 방법에는 FM, AM, PM등의 방법이 있다. 본 실험에서는 간단하고 해석하기 쉬운 FM방법을 적용해서 신호가 되돌아오는 시간 차이에 의한 beat frequency를 측정함으로써 전송선로의 분산특성을 측정하였다.

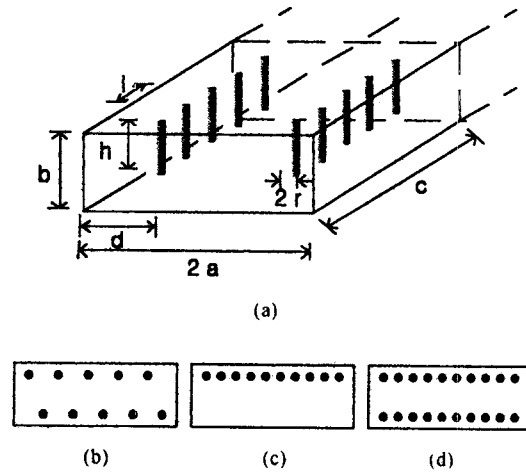


그림 1. 도파관에 금속봉이 주기적으로 위치한 구조(a) 3 차원 모습 (b) Glide type (c) Straight type (d) Parallel type

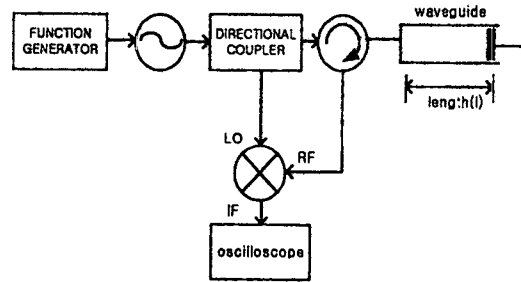


그림 2. FM Reflectometer 시스템 개략도

그림 2는 FM Reflectometry 시스템의 구성을 나타내고 있다. 먼저 소스로부터 주파수 변조를 시켜 분배기로 보내진다. 여기서 LO신호와 RF신호로 나누어지고, RF신호는 circulator를 통해 전송선로로 보내진다. 전송선로 끝부분은 금속으로 short되었기 때문에 모든 전파는 이곳에서 전부 반사되고, 다시 circulator를 통해서 mixer의 RF신호로 보내진다. Mixer에서는 LO신호와 RF신호를 받아 IF신호를 발생시키고, 그 신호는 oscilloscope를 통해서 분석할 수 있다. 여기서 circulator는 전송신호와 반사된 신호를 분리하기 위해서 사용되었다.

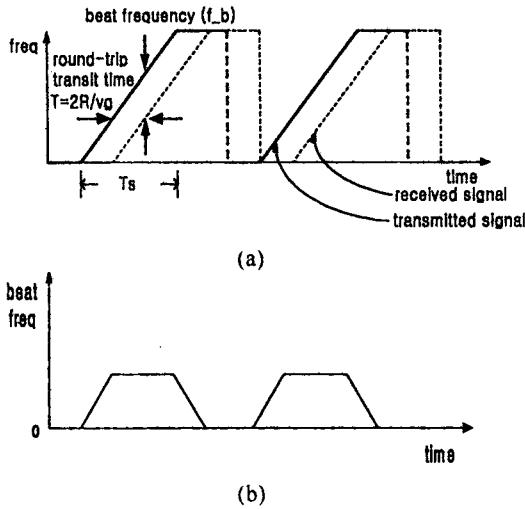


그림 3. FM Reflectometry 동작원리
 (a) 전송신호와 수신신호와의 관계
 (b) beat frequency

그림 3은 FM Reflectometry의 동작원리를 나타내고 있으며, 그림 3(a)에서 주파수는 변조된 주파수를 나타내고 T_s 는 sweep time을 나타낸다. 그림 3 (b)는 전송신호와 수신신호의 propagation delay에 의해 발생하는 beat frequency를 나타내고 있다. 먼저 전송신호는 주파수가 변조되어 전송선로에 보내지고, 수신신호는 거리차에 의해 되돌아오는 시간의 차이를 갖는다. 따라서 mixer에서 IF신호는 이 두 신호 차이인 beat frequency를 발생시킨다. 여기서 주파수 변조의 중심주파수는 분산특성을 측정하고자 하는 주파수에 일치시키고, 변조범위를 측정대상의 길이를 고려해서 정확한 결과를 얻기 위해 최소한의 beat frequency를 만드는 범위 내에서 설정한다. 측정 도파관의 길이가 길어질수록 전송신호와 수신 신호간의 간격이 커져 이에 따라 발생하는 beat frequency는 거리에 비례하며, 시간에 따른 주파수 변조크기에 비례하여 커지게 된다. 전송선로의 분산특성을 측정하기 위해서는 먼저 FM Reflectometry 시스템 구성상 발생하는 거리차를 없애기 위해서 도파관이 없는 상태에서 동축선 끝단을 short시킨 상태에서 beat frequency를 측정한다. 측정하고자 하는 도파관을 연결한 상태에서의 beat frequency를 측정한다. beat frequency와 측정 도파관의 길이와의 관계는 식 (1)과 같다.

$$f_{b-c} = \frac{2R_E}{v_c} \frac{df}{dt} \quad (1)$$

여기서 dt 는 sweep time이고 df 는 변조주파수 범위이며, R_E 는 residual path length error. v_c 는 동축선로의 group velocity, f_{b-c} 는 동축선로의 끝단이 short 되었을 때의 beat frequency이다. 여기서 시스템을 calibration 하고자 R_E 를 식(2)로부터 구한다.

$$R_E = \frac{f_{b-c} v_c T_s}{2\Delta f} \quad (2)$$

특히 식(2)로부터 측정된 R_E 는 정확한 시스템 구현에서 상당히 중요하다. 정확한 R_E 를 구해야 최종 측정에서도 정확도를 가질 수 있다. 다음으로 측정하고자 하는 도파관을 동축선에 연결한 후, beat frequency를 측정한다.

$$f_{b-w} = \frac{2\Delta f}{T_s} \left(\frac{R_E}{v_c} + \frac{R}{v_{g-w}} \right) \quad (3)$$

$$v_{g-w} = \frac{R}{\left(\frac{f_{b-w} T_s}{2\Delta f} - \frac{R_E}{v_c} \right)} \quad (4)$$

여기서 R 은 측정 도파관의 길이, f_{b-w} 는 측정하고자 하는 도파관이 연결된 상태에서의 beat frequency. v_{g-w} 는 도파관내의 group velocity이다. 최종적으로 식(4)를 통해서 도파관의 group velocity을 측정하게 된다. 본 실험에서는 FM Reflectometry방법을 검증하기 위해서 먼저 붕이 없는 직각 도파관에 적용하였다.

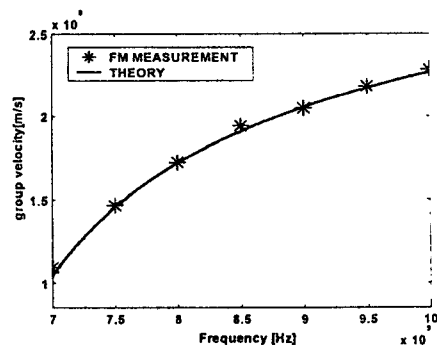


그림 4. FM Reflectometry를 이용한 직각 도파관의 group velocity 측정결과

그림 4에 FM Reflectometer로 측정된 결과를 나타

내었고, 보는 바와 같이 측정결과와 이론값이 정확히 일치하고 있다. Group velocity 측정방법으로는 기존의 network analyzer의 time domain 기능을 이용한 방법이 있다. 도파관 끝단을 short시키게 되면, 그 지점에서의 반사계수는 최대가 되므로 Time domain 에서 각각의 주파수에서의 반사계수가 최대가 되는 지점의 시간을 측정할 수 있다. 그림 5에 도파관내 금속봉이 주기적으로 위치한 구조들의 group velocity를 FM Reflectometer와 network analyzer를 이용하여 측정 비교하였다.

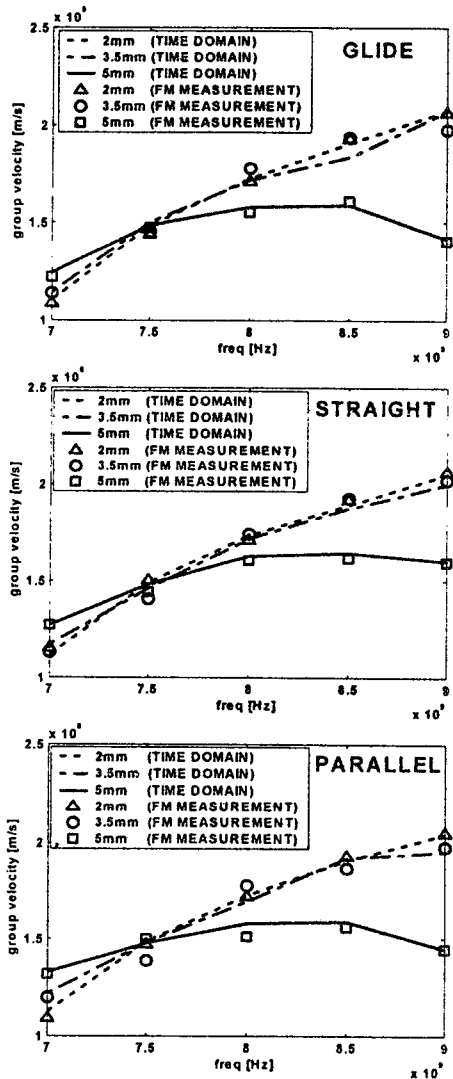


그림 5. straight, glide, parallel type에서의 봉높이에 따른 group velocity 측정결과
그림에 보듯이 두 측정 방법이 잘 일치함을 볼 수 있다. 특히 금속봉의 높이가 증가함에 따라 group

velocity가 점점 평탄해지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 분산특성이 봉의 loading에 의해 선형화 됨을 보여준다.

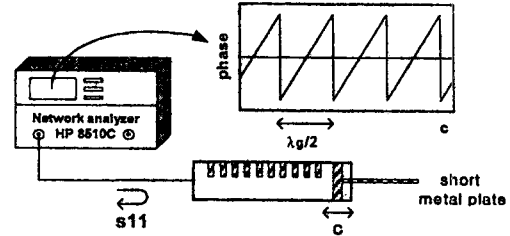


그림 6. short metal plate를 이용한 phase velocity 측정방법

그림 6에 도파관의 phase velocity를 측정하기 위하여 기존의 short metal plate를 이용한 방법을 보였다. 반사계수(S_{11})의 위상은 short metal plate가 반파장 이동함으로 360° 변한다. 각 위상변화에 다른 거리를 측정함으로써 도파관의 파장(λ_g)를 구할 수 있으며, 이를 통해 각각의 주파수에 따른 phase velocity를 측정할 수 있다. 그림 7에는 봉이 없는 직각 도파관을 사용하여 측정한 결과와 이론값을 비교하였고, 결과가 정확히 일치함을 보이고 있다. HFSS 시뮬레이션에서는 도파관 중앙의 필드의 크기의 거리를 관찰함으로써, λ_g 를 구할 수 있으며, 이를 통해 각각의 주파수에 대해서 phase velocity를 측정할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 그림 7과 동일하게 이론값과 정확히 일치하였다.

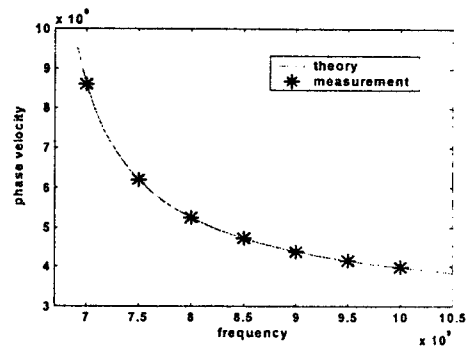


그림 7. 직각도파관의 phase velocity를 short metal plate를 이용하여 측정한 결과

그림 8의 측정결과는 각각의 구조에 따라서 봉의 높이가 길어짐에 따라서 분산특성이 선형화 됨을 보여준다. 이로부터 빔의 선형 분산특성과 구조의

분산특성을 적절하게 일치하게 함으로 이들 구조가 광대역 Gyro-TWT의 interaction circuit으로 사용 되어질 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 도파관에 금속봉이 주기적으로 위치한 구조의 group velocity를 측정하기 위해서 FM Reflectometry가 적용되었으며, network analyzer의 time domain을 이용하여 비교 검증하였다. 또한 phase velocity를 측정하기 위해 short metal plate를 이용한 방법과 HFSS 시뮬레이션이 적용되었으며, 각각의 결과는 잘 일치함을 보였다. 측정결과로 나타난 도파관내 금속봉이 주기적으로 위치한 구조의 분산특성은 금속봉의 높이를 조절함으로써 선형되었다. 따라서 이들 구조는 광대역 Gyro-TWT의 interaction circuit으로 사용되어질 수 있음을 알 수 있다.

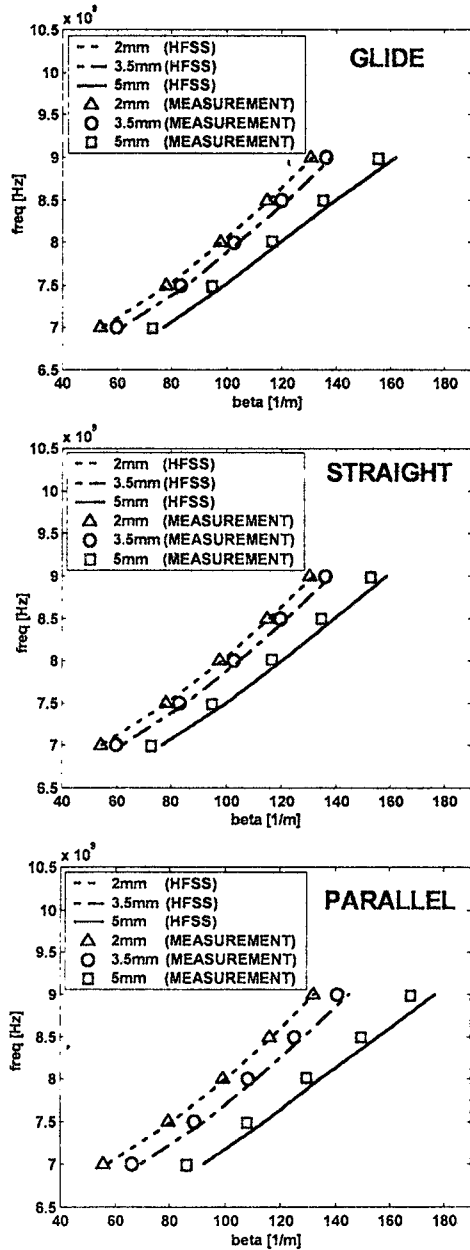


그림 8. glide, straight, parallel 구조에서 봉 높이에 따른 분산특성 측정결과

III. 결론

참고문헌

- [1] D.T. Swift-Hook, "Dispersion curves for a helix in a glass tube." Proc. IEEE. Vol.150b. Supp., pp.747-755, 1958.
- [2] J.F. Gittins, "Power traveling-wave tubes." New York, American Elsevier Publishing Company, INC.
- [3] K.W. Kim, E.J. Doyle et al., "Advances in reflectometric density profile measurements on the DIII-D Tokamak." Rev. Sci. Instrum., Vol. 66(2), 1995.
- [4] Merrill Skolnik, "Radar Handbook." McGraw-Hill, 1990.
- [5] B.N. Basu, "Electromagnetic theory and applications in beam-wave electronics." 1995.
- [6] J.R. Pierce, "Traveling wave tubes." New York : Van Nostrand, 1950.