

페라이트 도파관 이상기내에서의 고차 모드 해석

이 병남*, 박 동철*, 윤 상원**

* 충남대학교 전자공학과

** 서강대학교 전자공학과

Higher Order Mode Analysis in Ferrite Waveguide Phase Shifter

Byeong Nam Lee*, Dong Chul Park*, Sang Won Yun**

* Dept. of Electronics Eng., Chungnam National Univ.

** Dept. of Electronics Eng., Sogang Univ.

Abstract

The structure consisting of an E-plane dielectric slab partially filling a rectangular waveguide is examined with attention on those higher order mode propagation characteristics that are relevant to the design of nonreciprocal remanence ferrite phase shifters.

The mechanisms for the elimination of LSE_{11} , LSM_{11} , LSE_{12} modes are introduced. Experimental verification of elimination of higher order mode is shown in the form of insertion loss measurements.

I. 서론

페라이트 토로이드를 이용한 도파관형 이상기에서 발생될 수 있는 고차 모드(higher order mode)는 이상기의 성능을 저하시키는 원인이 되는데 이러한 진행 고차 모드는 삽입 손실 특성 및 VSWR 특성에 스파이크(spike)들을 유발시킨다. 따라서 이러한 이상기로 위상 배열 안테나를 구성할 경우 복사 패턴에 예상치 못한 딥(dip) 현상이 나타날 우려가 있으므로 가능한 한 고차 모드의 발생을 억제 시켜야 한다. 그러나 실제적으로 사용 가능한 이상기를 구조면에서 살펴볼 때, 적어도 한 두 개의 고차 모드가 항상 존재 한다는 것을 해석적인 규명을 통해 알 수 있으므로 이에대한 적절한 제거 방법이 필요하다.

본 논문에서는 이상기 내에서의 고차 모드를 근사적으로 해석하고 더불어 이상기가 지니는 파라미터와 고차 모드와의 관계를 알아본 다음 본 논문을 위해 설계, 제작된

이상기 내에 존재할 것으로 예상되는 고차 모드의 분석과 이것의 억압(suppress) 방법에 관해 고찰하고 실험을 통해 고차 모드 억압 효과를 보여 주었다.

II. 본론

1. 고차 모드 해석

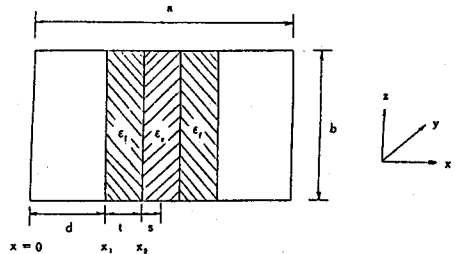


그림 1. 고차 모드 해석을 위한 이상기 모델

이상기 내의 페라이트가 자화된 상태에서의 고차 모드 해석은 대단히 복잡하기 때문에 고차 모드의 해석은 보통 그림 1과 같이 도파관 내에 순수한 유전체만 있는 경우로 근사화시켜 해석하게 된다[1]-[4].

실제적으로 페라이트는 유전체이면서 자성체이기 때문에 이러한 해석 방법이 다소 차이를 가져올 수 있으나 고차 모드 해석을 위해서는 변위차가 중요한 것이 아니라 진행되는 전자파의 차단 주파수(cutoff frequency)가 중요하기 때문에 페라이트가 자화되지 않은 경우, 즉 순수한 유전체인 경우, 로 보고 해석하여도 계산된 차단

주파수 값이나 공진이 일어나는 주파수 값은 큰 영향을 받지 않을 것이라는 예상하에 해석이 비교적 쉬운 이 모델을 사용한다. 참고로 [9]에 나타난 결과를 보면 패라이트 토로이드 및 이와 똑같은 치수를 갖는 유전체에 대한 실험적 공진 특성이 거의 일치함을 보여주고 있으며 [4]에서도 자화된 토로이드를 유전체로만 보고 고차 모드를 해석할 수 있는 근거를 보여주고 있다. 그런데 여기서 해석하고자 하는 토파관내의 유전체 슬랩 구조를 보면 그림 1에서 보는 바와 같이 유전체 슬랩은 x축을 따라 불연속 경계면을 포함하므로 TE(또는 TM) 모드보다는 LSE (Longitudinal Section Electric) 모드와 LSM(Longitudinal Section Magnetic) 모드로 나누어 해석하는 것이 편리하다[5].

먼저 LSE 모드의 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential) Π_h 를

$$\Pi_h = \vec{a}_x \psi_h(x, z) e^{-j\beta y}$$

으로 놓으면 전계와 자계는

$$\begin{aligned} E &= -j\omega\mu_0 \nabla \times \Pi_h \\ &= -j\omega\mu_0 \left(\vec{a}_y \frac{\partial \psi_h}{\partial z} + \vec{a}_z j\beta \psi_h \right) e^{-j\beta y} \\ H &= \nabla \times \nabla \times \Pi_h \\ &= \left[\vec{a}_x (\beta^2 \psi_h - \frac{\partial^2 \psi_h}{\partial z^2}) - \vec{a}_y j\beta \frac{\partial \psi_h}{\partial x} + \vec{a}_z \frac{\partial^2 \psi_h}{\partial x \partial z} \right] e^{-j\beta y} \end{aligned}$$

이 되며 파동 방정식은

$$\frac{\partial^2 \psi_h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_h}{\partial z^2} + [\epsilon_r k_0^2 - \beta^2] \psi_h = 0$$

이 된다.

다음, LSM 모드에서는 LSE 모드에서와는 달리 x방향의 전기 벡터 포텐셜(electric vector potential) Π_e 만이 존재하게 되는데

$$\Pi_e = \vec{a}_x \psi_e(x, z) e^{-j\beta y}$$

로 표시되며 이때 전계와 자계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E &= \nabla \times \nabla \times \Pi_e \\ &= \left[\vec{a}_x (\beta^2 \psi_e - \frac{\partial^2 \psi_e}{\partial z^2}) - \vec{a}_y j\beta \frac{\partial \psi_e}{\partial x} + \vec{a}_z \frac{\partial^2 \psi_e}{\partial x \partial z} \right] e^{-j\beta y} \end{aligned}$$

$$H = j\omega\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \times \Pi_e$$

$$= j\omega\epsilon_0 \epsilon_r \left[\vec{a}_y \frac{\partial \psi_e}{\partial z} + \vec{a}_z j\beta \psi_e \right] e^{-j\beta y}$$

그리고 파동 방정식은

$$\frac{\partial^2 \psi_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_e}{\partial z^2} + [\epsilon_r k_0^2 - \beta^2] \psi_e = 0$$

이 된다.

본 논문에서 해석하려는 그림 1의 구조는 $x=a/2$ 에 대해 대칭이므로 여기에 전기벽(electric wall) 또는 자기벽(magnetic wall)이 있다고 생각하고 $x=a/2$ 인 영역에 대해서만 해석하고자 한다. 첫째, LSE 모드중에서 우모드(even mode), 즉 자기벽이 있는 경우에 대해 살펴보자.

각 영역에서의 포텐셜 함수를 삼각함수로 가정하고 이 포텐셜 함수로부터 구해지는 E_x 와 H_y 가 $x = x_1$, $x = x_2$ 에서 같다는 경계조건을 적용시켜 특성 방정식을 구하면

$$\begin{aligned} k_{x2}^2 - k_{x1} k_{x2} \cot k_{x1} d \cot k_{x2} t + k_{x1} k_{x3} \cot k_{x1} d \tan k_{x3} s \\ + k_{x2} k_{x3} \cot k_{x2} t \tan k_{x3} s = 0 \end{aligned}$$

이 된다

LSE 기모드(odd mode), 즉 전기벽이 있는 경우에 대해서도 마찬가지로 방법으로 특성 방정식을 구하면

$$\begin{aligned} k_{x2}^2 - k_{x1} k_{x2} \cot k_{x1} d \cot k_{x2} t - k_{x1} k_{x3} \cot k_{x1} d k_{x3} s \\ - k_{x2} k_{x3} \cot k_{x2} t \cot k_{x3} s = 0 \end{aligned}$$

이 된다.

같은 방법으로 LSM 모드에 대해서도 특성 방정식을 구하면

$$\begin{aligned} k_{x3} \frac{\epsilon_f}{\epsilon_r} \cot k_{x3} s \left[\frac{1}{\epsilon_f} \cos k_{x1} d \cos k_{x2} t - \frac{k_{x1}}{k_{x2}} \sin k_{x1} d \sin k_{x2} t \right] \\ - k_{x2} \frac{1}{\epsilon_f} \cos k_{x1} d \sin k_{x2} t - k_{x1} \sin k_{x1} d \cos k_{x2} t = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{x3} \frac{\epsilon_f}{\epsilon_r} \tan k_{x3} s \left[\frac{1}{\epsilon_f} \cos k_{x1} d \cos k_{x2} t - \frac{k_{x1}}{k_{x2}} \sin k_{x1} d \sin k_{x2} t \right] \\ + k_{x2} \frac{1}{\epsilon_f} \cos k_{x1} d \sin k_{x2} t + k_{x1} \sin k_{x1} d \cos k_{x2} t = 0 \end{aligned}$$

이 된다.

LSE 와 LSM 각 모드의 단면에서의 전자계 분포를 구하기 위해서는 먼저 y 방향의 위상 정수를 구하고, 스칼라 포텐셜의 미지수 A, B, C, D를 경계 조건을 통해 한가지 정수 A로 표시한 후 임의로 A=1로 놓고 그 값을 계산하여 $x-y$ 평면에서 구할 수 있다. 또한 LSE 우모드와 기모드, LSM 우모드와 기모드의 차단 주파수 특성은 위에서 구해진 특성 방정식들을 풀음으로써 구할 수 있다.

2. 이론적 계산 결과

본 논문에서 고차 모드 해석을 위해 사용된 이상기의 구조에 대해 토로이드 부분과 변환기 부분에서의 고차 모드 분산 특성을 알아 보았다. 여기에 사용된 데이터들 표 1 에, 데이터가 나타내는 각 부분을 그림 2에, 그리고 이 데이터를 사용해 계산한 토로이드와 변환기 부분에서의 분산 특성을 그림 3, 4 에 나타내었다.

표 1. 토로이드와 변환기 부분의
첫수 및 비유전율

토로이드 부분	변환기 부분
$d = 11.53\text{mm}, b = 10.16\text{mm}$	$a = 22.86\text{mm}, b = 10.16\text{mm}$
$s = 0.66\text{mm}, t = 1.525\text{mm}$	$s = 0.507\text{mm}, t = 0$
$l_t = 38.1\text{mm}$	$l_t = 5.6844\text{mm}$
$\epsilon_r = 12.4, \epsilon_r = 13$	$\epsilon_r = 13$

(d, b, s등은 그림 2 참조)

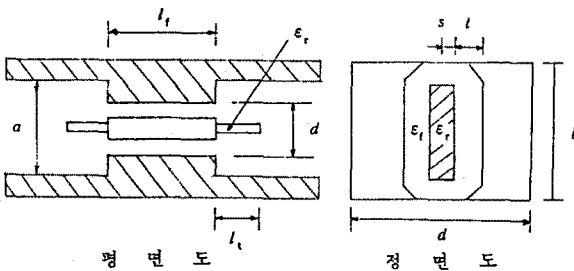


그림 2. 단일 비트 이상기

그림 3과 4를 볼때 토로이드 부분에서는 9.1GHz 근처에서 LSE₁₁과 LSM₁₁ 두개의 고차 모드가 나타나고 있으며 변환기 부분에서는 단 하나의 고차 모드도 존재하지 않음을 알 수

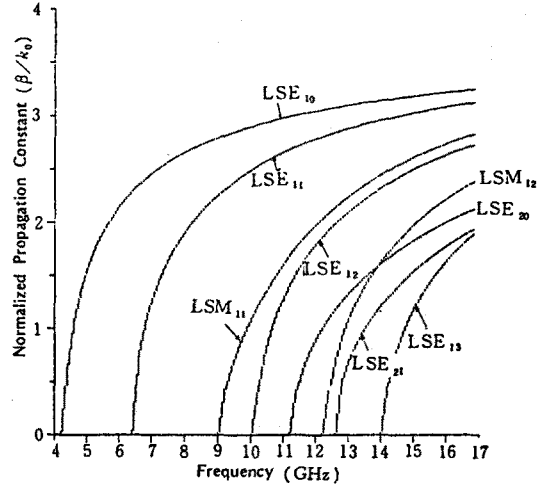


그림 3. 토로이드 부분의 분산 특성

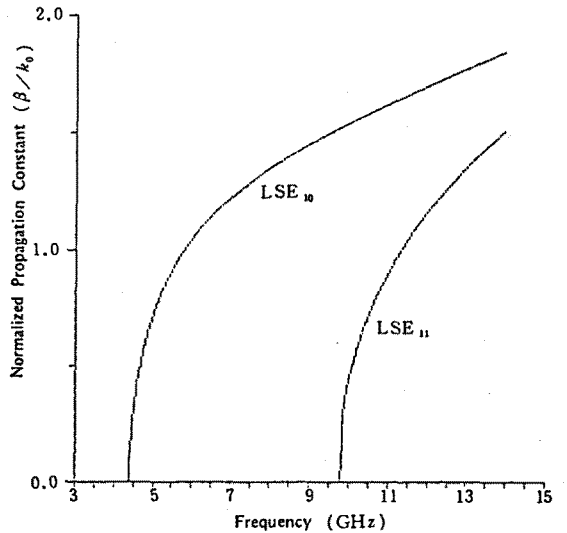


그림 4. 변환기 부분의 분산 특성

있다. 따라서 LSE₁₁ 및 LSM₁₁ 모드를 억압시키기 위한 적절한 방법이 요구되는데 이를 위해서는 도파관의 $y-z$ 평면에서 본 전계의 분포를 알아야 한다. $y-z$ 평면에서 본 LSE₁₁과 LSM₁₁의 전계 분포는 그 모양이 같은 형태로 나타나기 때문에 [3] 두 모드를 동시에 같은 방법으로 억압시킬 수 있다.

LSE₁₁ 및 LSM₁₁ 모드를 억압시키려면 $y-z$ 평면에서 보았을때 E_y 성분(전자파 진행 방향으로의 전계 성분)이 가장 큰 부분에 흡수체를 평행하게 놓아야 하며 이곳은 도파관

높이의 중간이 되는 선을 따라 형성 된다. 이와 같이 흡수체를 놓았을때 기본 모드인 LS_{10} 모드의 전계는 흡수체에 대하여 수직으로 서 있으므로 거의 영향을 받지 않는다. 만일 고차 모드로서 LSE_{14} 가 발생 된다면 위와 같은 이유로 인해 E_y 성분이 가장 큰 도파관 높이의 1/3 및 2/3 되는 지점에도 흡수체를 놓아야 한다.

III. 실험 및 고찰

정합이 잘 된 변환기를 사용할 경우 삽입 손실이나 VSWR 특성 곡선에 나타나게될 고차 모드에 의한 공진 현상을 확인 하기 어렵기 때문에 고차 모드의 억압 실험은 정합이 덜 된 상태의 변환기를 사용해야 고차 모드의 억압을 위한 조치가 잘 되었는지를 알 수 있다.

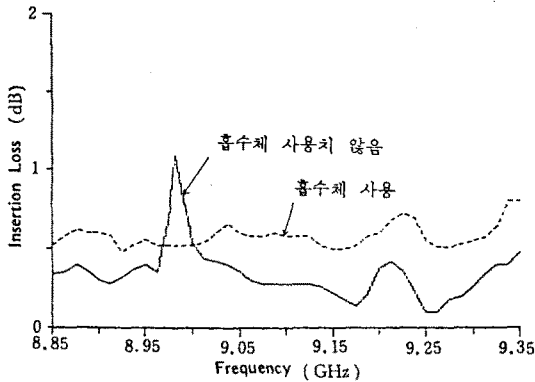


그림 5. 고차 모드 억압 효과

그림 5는 흡수체로서 EMERSON & CUMING 회사의 ECCOSORB SF (고무 형태)를 사용해 고차 모드를 억압 (suppress) 시킨 결과를 보여주고 있는데 흡수체로 인한 전체적인 삽입 손실이 약간 증가 되었음을 볼 수 있다. 본 연구에서 제작된 이상기내에서 진행가능한 고차 모드인 LSE_{11} 과 LSM_{11} 을 억압하려면 토로이드가 놓인 영역에서 도파관 높이의 중간 지점에 흡수체를 놓아야하는데 흡수체 사용시에 흡수체를 토로이드와 평행하게 세워 놓을 경우 전체적인 삽입 손실은 다소 증가되어 약 1.4 dB 정도가 된다.

이러한 현상은 흡수체가 기본 모드에 까지 영향을 준 것으로 예상할 수 있는데 만일 흡수체를 토로이드와 수직이 되게 뉘어 놓을 경우에는 삽입 손실을 1 dB 미만으로 줄이면서 고차 모드를 억압할 수 있었다.

IV. 결 론

페라이트 도파관 이상기내에서 진행 가능한 고차 모드를 해석하고 실험을 통해 고차 모드로 인해 삽입 손실에 나타난 스파이크를 제거할 수 있었다. 흡수체 사용시 삽입 손실을 좀더 줄이기 위해서는 이상기에서 사용이 용이한 흡수체를 선정해 고차 모드의 억압이 필요할 것으로 예상되는 정확한 위치에 최소의 흡수체를 고정시키는 작업이 중요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Seckmann, "Propagation of TE modes in Dielectric Loaded Waveguides," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-14, pp. 518-527, November 1966.
- [2] F. E. Gardiol, "Higher-Order Modes in Dielectrically Loaded Rectangular Waveguides," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-16, pp. 919-924 November 1968.
- [3] G. N. Tsandoulas, D. H. Temme, and F. G. Willwerth, "Longitudinal Section Mode Analysis of Dielectrically Loaded rectangular Waveguides with Application to Phase Shifter Design," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-18, pp. 88-95, February 1970.
- [4] G. N. Tsandoulas, F. G. Willwerth, and W. J. Ince, "LSE-Mode Characteristics in Phase-Shifter Parametrization," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-20, pp. 253-258, April 1972.
- [5] R. E. Collin, Field Theory of Guided Waves, New York McGraw-Hill 1960, Ch.6.