

페라이트층을 갖는 결합 Image線路의 非可逆 結合 특성에 관한 研究

(A Study on the Nonreciprocal Coupling Characteristics of Coupled Image Guides Containing a Ferrite Layer)

尹 相 元*

(Sang Won Yun)

要 約

페라이트층을 포함하는 결합 image 선로의 非可逆 結合 特性을 解析하였다. 解析에는 transverse resonance 方法과 有效 誘電率法이 사용되었다. 35GHz에서 結合 特性을 계산하였으며, 10GHz에서 實驗을 하여 理論에서 얻은 결과와 比較하였다.

Abstract

Nonreciprocal coupling characteristics are studied in the several coupled image guide structures containing a ferrite layer. The analysis is based upon the transverse resonance and the effective dielectric constant approach. Numerical results at 35 GHz are presented, and experimental results as well as theoretical ones at 10 GHz are also discussed.

I. 序 論

誘電體 導波관을 利用한 可逆 밀리미터波 素子들이 꾸준히 解析·開發되어 온 데 비해, 非可逆 特性을 갖는 素子에 대한 研究는 비교적 적은 편이다. 이는 誘電體 導波관을 利用한 밀리미터波 非可逆 素子 設計에 必要한 페라이트와 같은 磁性體의 포화 자화도와 외부 磁界의 세기가 非現實적으로 커져야 한다는 點에 기인한다.¹ 따라서, 從來의 마이크로波 帶域에서 사용되는 方式을 쓰기는 어려운 실정이다.

최근 image線路和 한 면이 도체에 접촉된 페라이트 슬랩사이의 非可逆 結合을 利用한 새로운 형의 isol-

ator가 제안 되었다.^{2,3} 이 素子는 페라이트 슬랩에서 얻어지는 非可逆 位相 定數를 利用한 것이다. 또한, 같은 原理를 이용하여 hollow image 선로의 일부를 페라이트 슬랩으로 대체하여 非可逆 結合 特性을 얻을 수 있음이 밝혀졌다.³

本 論文에서는 非可逆 結合 特性을 얻을 수 있는 構造를 제시한다. 제시된 構造는 結合 image 선로에 페라이트층을 첨가하여 構成되었으며, 페라이트-유전체-도체(FDM)의 結合 構造와 유전체-페라이트-도체(DFM)의 結合 構造를 比較하였다. 解析에는 Modified transverse resonance 方法⁴과 有效 誘電率法을 利用하였다.

II. 本 論

페라이트층을 포함하고 있는 結合 構造로서 그림 1에 제시된 세 가지를 생각한다. 각 構造는 세 영역으로 구성되어 있으며, 각 영역은 페라이트, 誘電體 또

*正會員, 西江大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Sogang Univ.)

接受日字: 1985年 12月28日

(*本 研究는 1985학년도 西江大學校 學内研究造成費에 依한 것임.)

는 공기층으로 構成되어 있다. 그림 1의 (a)와 (b)는 DFM構造를 이용한 것이고¹⁾(c)는 FDM構造를 이용한 것이다.¹⁾外部 磁界는 모두 x方向으로 걸려 있으며, 非可逆 結合 特性을 얻을 수 있는 E_x모드만을 고려한다. 시간에 대해서는 e^{jωt}로 변화한다고 가정한다.

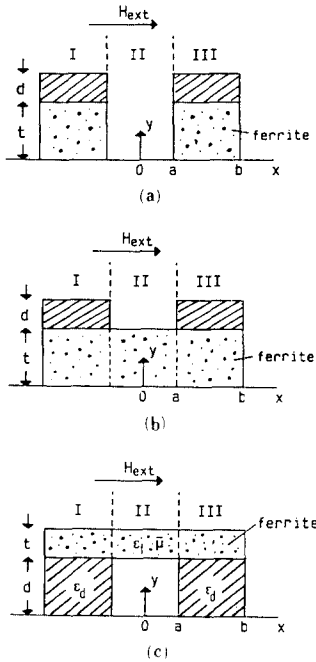


그림 1. 페라이트층을 포함하는 결합구조
(a) 결합구조 (b) 반전된 hollow image guide형
(c) Hollow image guide형
Fig. 1. Coupling structures with a ferrite layer.
(a) Simple coupled image guide type.
(b) Inverted hollow image guide type.
(c) Hollow image guide type.

1. 固有值 解析

그림 1(b) 構造에서 영역 I 과 III의 y方向으로의 有效 誘電率을 구하기 위하여 영역 I 과 III을 그림 2(a) 構造로 대체하여 생각한다. 이 영역은 DFM構造로 transverse resonance方法을 적용하기 위해 傳送線路를 이용하여 等價的으로 표시하면 그림 3을 얻는다. 여기서 각 層을 나타내는 전송 선로의 동가 특성 임피던스는 x方向의 傳播 定數에 逆比例하고, 길이는 각 層의 두께가 된다.¹⁾ 즉, 이 構造의 傳播 定數 k_{z1}은

$$k_{z1} = \epsilon_f \mu_e k_0^2 - k_f^2 = \epsilon_d k_0^2 - k_d^2 = k_0^2 - k_a^2 \quad (1)$$

이며, ε_f와 ε_d는 각각 페라이트와 유전체의 比誘電率이고, μ_e는 有效 透磁率로서

$$\mu_e = \frac{\mu^2 - k^2}{\mu}$$

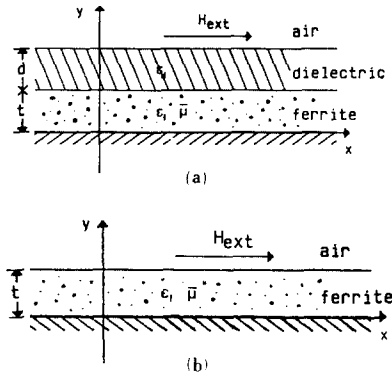


그림 2. 각 영역의 층구조 model
(a) 영역 I 과 II (b) 영역 II
Fig. 2. Layered structure model of each region.
(a) Region I and III. (b) Region II.

로 μ와 k는 투자율 텐서에서

$$[\bar{\mu}] = \mu_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & jk \\ 0 & -jk & \mu \end{bmatrix}$$

이다.¹⁾ 따라서, transverse resonance條件은 그림 3에서

$$Z_L + Z_U = 0$$

즉,

$$k_f(k_d + k_a \tan k_d d) + [(\mu_e k_a - \sigma k_{z1})(k_f + k_a \tan k_a d) - \mu_e(\epsilon_d - 1) \tan k_f d] \tan k_f t = 0 \quad (2)$$

여기서 σ = k/μ이다. 식(2)의 固有值 方程式을 풀면 k_{z1}이 구해지며, 영역 I 과 III의 有效 誘電率 ε_{e1}은

$$\epsilon_{e1} = \epsilon_f \mu_e - (k_f/k_0)^2 \quad (3)$$

이 된다.

그림 1(b)의 영역 II의 有效 誘電率도 같은 原理로 구한다. 먼저 그림 2(b) 構造로 대체하여 y方向으로의 等價 回路를 구하면 그림 3에서 1/k_d의 특성 임피던

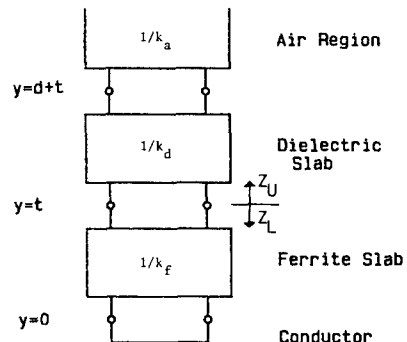


그림 3. 그림 2(a)의 y方向으로의 동가회로망
Fig. 3. Transverse equivalent network of Fig. 2(a).

스를 갖는 傳送 線路가 없는 境遇에 해당한다. 이 영역에서 얻어지는 固有值 方程式은 z方向으로의 傳播 定數를 k_{z2} 라 할 때

$$k'_y + (k'_a \mu_e - \sigma k_{z2}) \tan k'_y t = 0 \quad (4)$$

가 된다. 각 層에서의 y方向으로의 전파 정수 k'_y, k'_a 과 k'_a 는 식(1)을 만족시킨다. (4)식을 풀어 k_{z2} 를 계산하여 영역II의 有效 誘電率 ϵ_{e2} 를 구하면

$$\epsilon_{e2} = \epsilon_f \mu_e - (k_{z2}/k_0)^2 \quad (5)$$

이 된다.

그림 1(c)와 같이 FDM構造를 利用한 境遇에도 위의 方法을 사용하여 y方向으로의 固有值 方程式을 유도하면, 영역 I 과III에 대해서

$$\mu_e k_a k'_y (1 + \tan k_a d) + [\mu_e (\mu_e k_a - \sigma k_{z1}) (k_a + k_a \tan k_a d) - 1] (k_{z1} - \mu_e k_a)^2 + k_y'^2 \tan k_a d \tan k_y t = 0 \quad (6)$$

가 얻어지며, 영역 II 에 대해서

$$\mu_e k_a' (1 + \tan k_a' d) (\mu_e k_a' - \sigma k_{z2} + k_y' \tan k_y t) - 1 (\sigma k_{z2} - \mu_e k_a')^2 + k_y'^2 \tan k_a' d \cdot \tan k_y t = 0 \quad (7)$$

가 얻어진다.³ 식(6)과 (7)을 풀고 식(3)과 (5)로 부터 각 영역의 有效 誘電率을 얻을 수 있다.

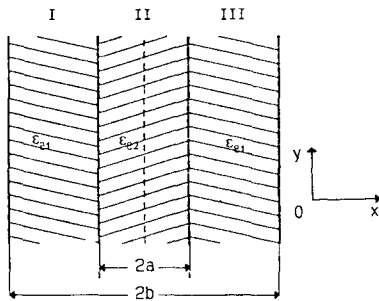


그림 4. 그림 1 구조들과 등가한 가상적인 층구조
Fig. 4. Hypothetical (layered) structure equivalent to structures in Fig. 1.

이제 y方向으로 구한 有效 誘電率을 이용하여 그림 4와 같은 가상적인 層構造(layered structure)를 생각하여 分散 特性을 구한다. 그림 4에서 보듯이 이 構造는 $x=0$ 을 중심으로 對稱性을 가지므로 $x=0$ 平面에 電氣壁(奇모드) 또는 磁氣壁(偶모드)이 있다고 가정하여 固有值 方程式을 유도한다. 먼저 z方向의 傳播 定數를 $\beta_{e,o}$ (β_e :偶모드, β_o :奇모드)라 하면,

$$\beta_{e,o}^2 = \epsilon_{e1} k_0^2 - \eta^2 = \epsilon_{e2} k_0^2 - \zeta^2 = k_0^2 + \xi^2 \quad (8)$$

이 만족되어야 한다. 여기서 η, ζ 와 ξ 는 각각 영역 I, II 그리고 공기층에서 x方向으로의 傳播 定數이다. 식(8)을 이용하여 그림 3과 같은 transverse net-

work을 構成하여 transverse resonance 條件을 적용시키면

$$\eta \epsilon_{e1} (\xi - \eta \tan \eta w / \epsilon_{e2}) + \zeta (\xi \epsilon_{e2} \tan \eta w + \eta) \begin{cases} \coth \xi a \\ \sinh \xi a \end{cases} = 0 \quad \begin{matrix} \text{(偶모드)} \\ \text{(奇모드)} \end{matrix} \quad (9)$$

를 얻으며 여기서 $w=b-a$ 이다. 식 (8)과(9)를 풀면 그림 1의 세 구조에 대한 分散 特性을 얻을 수 있다.

세 구조에서 얻어지는 有效 誘電率은 각각 주파수의 함수이며, 페라이트의 非可逆 特性으로 인해 傳播 方向에 따라 다른 값을 갖는다. 따라서 分散 特性도 非可逆 特性을 갖는다.

2. 結合 特性

一般的인 結合 image線路의 結合 係數는 그림 5에서

$$|s_{21}| = |\cos[(\beta_e - \beta_o)l/2]| \quad (10)$$

$$|s_{31}| = |\sin[(\beta_e - \beta_o)l/2]| \quad (11)$$

로 표시된다.⁴ 여기서 l은 結合 構造의 길이이다. 非可逆 結合 特性을 利用하는 方法의 하나로 isolation mechanism을 생각하자. 그림 5에서, 1을 알맞게 선택하여 port 1으로 電力이 공급되는 경우 port 2로 대부분의 전력은 전달되고(順方向), port 2에서 공급되는 경우 port 4로 結合되게(逆方向)하면 된다. 즉,

$$|s_{21}| = 1 \text{ 과 } |s_{31}| = 0 \text{ (順方向)} \quad (12)$$

$$|s_{12}| = 0 \text{ 과 } |s_{42}| = 1 \text{ (逆方向)} \quad (13)$$

을 만족시키면 된다. 식(12)로부터 順方向時

$$\Delta \beta l_r / 2 = n\pi \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

을, 逆方向時

$$\Delta \beta l_b / 2 = (zm-1)\pi / 2 \quad m=1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

을 얻을 수 있다. $\Delta \beta = \beta_e - \beta_o$ 이고 l_r, l_b 는 각각 식 (12)와 (13)을 만족시키는 順方向, 逆方向 전파時 요구되는 結合 構造의 길이이다. l_r 와 l_b 는 $m=n=1$ 인 경우 가장 짧지만, 값이 서로 다르기 때문에 m과 n을 조정하여 두 길이가 비슷하도록 하면 된다.

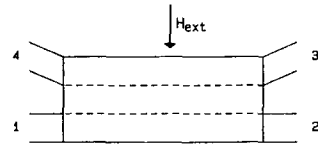


그림 5. 그림 1 구조들의 평면도
Fig. 5. Top view of structures in Fig. 1.

3. 結果

35GHz 근처에서 computer simulation을 하였으며,

이 경우 유전체는 $\epsilon_r=9.6$, 페라이트는 $\epsilon_r=12.0$, $4\pi M_s=1.75\text{KG}$, $H_{\text{ext}}=5.0\text{KOe}$ 로 하였다. 그림6은 식 (9)에서 얻은 그림 1(b) 구조의 분산 특성이며 다른 두

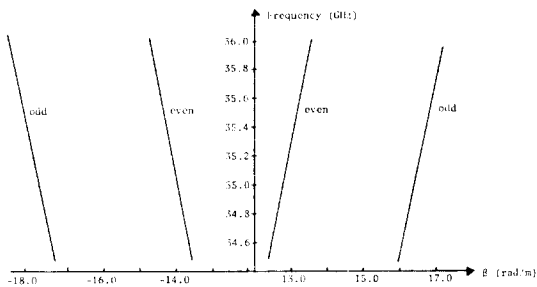


그림 6. 그림 1(b) 구조의 분산특성 ($t=0.9\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$, $a=0.1\text{mm}$, $b=1.7\text{mm}$)

Fig. 6. Dispersion characteristics the structure in of Fig. 1 (b).

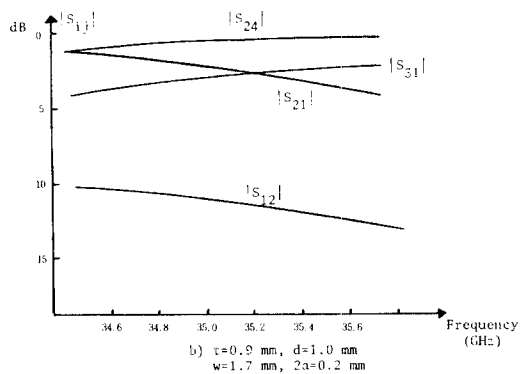
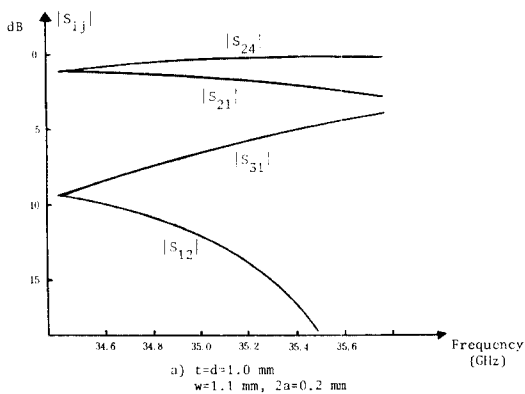


그림 7. 이론적인 산란특성

- (a) 결합 image guide형
- (b) Inverted hollow image guide형

Fig. 7. Theoretical scattering coefficients.

- (a) simple coupled image guide type.
- (b) Inverted hollow image guide type.

구조에서도 비슷한 특성을 얻을 수 있다.^{13,14} 非可逆位相定數特性은 DFM구조를 사용할 때가 FDM 구조를 사용할 때 보다 더 두드러짐을 확인하였다. 이 분산 특성으로부터 식 (10), (11)을 이용하여 계산된 분산 특성이 그림 7 (a), (b)이다. 계산에 사용된 페라이트의 電子 스핀에 의한 共振周波數 $f_0=16.27\text{GHz}$ 이므로, 有效誘磁率의 陰의 값을 갖는 f_0 근처에서 充分히 멀리 떨어져 있다. 따라서, 이 效果들에 의해서는 35 GHz 근처에서 非可逆位相定數만이 뚜렷이 나타나고, 이에 따른 非可逆結合이 일어난다고 볼 수 있다.

위의 理論的인 結果를 확인하기 위하여 x-band 에

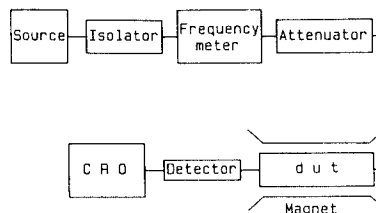


그림 8. 측정 장치도

Fig. 8. Experimental setup.

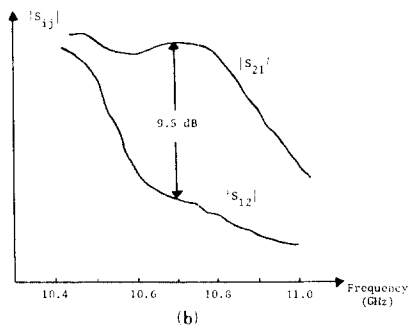
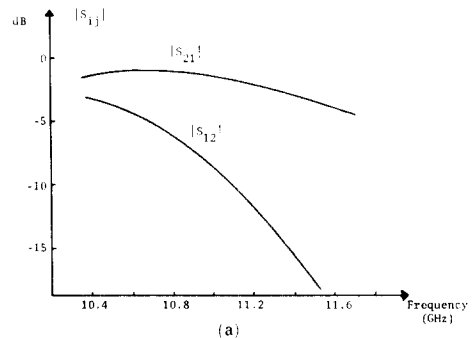


그림 9. X-Band에서의 산란특성, (a) 이론치

- (b) 측정치 ($t=4.5\text{mm}$, $d=2.0\text{mm}$, $a=0.2\text{mm}$, $b=4.7\text{mm}$)

Fig. 9. Scattering coefficients at X-Band.

- (a) Theoretical. (b) Measured.

서 그림 1(a)의 결합 구조를 제작하여 그림 8과 같은 실험 장치로 그 특성을測定하였다. Sweep source로는 HP8260C를, 磁石은 Hall stabilizer가 달린 Bruker社 제품 B-MN 155/45를 사용하였다. 그림 5에서 逆方向 傳播時 port 4로 결합되는 電力을 吸收시키기 위해, 또한 順方向時 port 3에 결합되는 小量의 電力을 제거하기 위해 두 port에 電磁波 吸收 物質 (eccobond)을 접착시켰다. 實驗에 사용된 誘電體는 teflon ($\epsilon_r = 2.5$)이고, 페라이트는 TT2-130 ($\epsilon_r = 11.47$, $4\pi M_s = 987 G$)이며, $H_{ext} = 1.0 KO_e$ 로 하였다. 이 경우 페라이트의 스핀 共振 周波數는 3.96 GHz로 實驗 周波數 領域에서 充分히 멀리 떨어져 있다. 測定된 非可逆 결합 특성이 그림 9(b)이다. Image 線路를 혼 안테나로 launching시킬 때의 效率 및 周波數 特性까지 포함되어 있으므로 理論值와의 엄밀한 比較는 곤란하다. 그러나, 그림 9(a)의 理論的인 특성과 비교해 볼 때, $isolation(|s_{21}| - |s_{12}|)$ 은 그 變化 추세가 비슷하다. 최대 isolation은 10.7 GHz에서 약 9.5 dB를 얻었다. 10.8 GHz이상의 周波數 범위에서는 $|s_{12}|$ 보다 혼끼리 결합되는 電力이 더 큰 값을 갖는다.

III. 結 論

非可逆 결합 특성을 얻을 수 있는 image線路를 이용한 구조들이 제시되었다.

35 GHz에서 理論的인 산란 계수를 계산하여, 결합 image guide 형이 다른 구조보다 더 큰 非可逆 결합 특성을 가짐을 알았다. 이 구조를 X-band에서 제작, 그 특성을測定하였다. 10.7 GHz에서 약 9.5 dB의 isolation을 얻었다.

이러한 구조들은, 從來의 isolator 具現 방식이 갖는 문제점 없이 밀리미터波 帶域에서 isolator를 具

現하는 데 이용할 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] I. Awai and T. Itoh, "Coupled-Mode Theory Analysis of Distributed Nonreciprocal Structures," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-29, pp. 1077-1086, Oct. 1981.
- [2] S.W. Yun and T. Itoh, "A Distributed Millimeter-wave Isolator Using Nonreciprocal Coupling Structure," *Int. J. Infrared and Millimeter-waves*, vol. 5, pp. 775-792, May 1984.
- [3] S.W. Yun and T. Itoh, "Nonreciprocal Wave Propagation in a Hollow Image Guide with a Ferrite Layer," *Proceedings of IEE*, vol. 132, pp. 222-226, July 1985.
- [4] I. Awai and T. Itoh, "Multilayered Open Dielectric Waveguide with a Gyrotropic Layer," *Int. J. Infrared and Millimeter-waves*, vol. 2, pp. 1-14, Jan. 1981.
- [5] 윤상원, 장익수, "페라이트층을 갖는 결합 誘電體 導波管에 관한 研究," 대한전자 공학회 하계 종합학술대회 논문집, 제 8 권, 제 1 호, pp. 450-452, 1985년 8 월
- [6] R.F. Soohoo, *Theory and Application of Ferrites*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1960.
- [7] J.F. Miao and T. Itoh, "Hollow Image Guide and Overlaid Image Guide Coupler," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-30, pp. 1826-1830, Nov. 1982.