

라운드 구조를 갖는 유도성 아이리스 대역통과 필터의 HSCI-MM 분석 및 설계

정회원 이용민*, 이우상**

HSCI-MM Analysis and Design of BPF with Inductive Irises including Rounded Corner Structure

Yong-Min Lee*, Woo-Sang Lee** *Regular Members*

요 약

본 논문은 구형 도파관내 임의의 H - 및 E -면 불연속 구조에 대해 효율적이고 정확한 해석이 가능한 하이브리드 단락 외형적분 모드매칭법(HSCI-MM)에 관한 연구이다. 제안한 하이브리드 방법은 임의의 구조의 공진영역에 대한 고유모드(eigenmode) 계수의 결정을 위해 단락 외형적분 접근법의 융통성(flexibility)과 각 공진기를 연결하는 도파관내의 H - 및 E -면 불연속 형태의 결합 포트에 대한 산란계수의 계산을 위해 모드매칭법의 효율성(eficiency)을 결합하였다. 결과적으로 제안한 분석결과를 바탕으로 각 공진기의 네 모서리가 임의의 반지름으로 둥글게 처리된 유한한 두께의 대칭형 유도성 아이리스 구조를 포함한 Ku-밴드 대역통과 필터를 설계, 분석함으로써 제안한 방법의 유용성을 입증하였다.

ABSTRACT

This paper describe the analysis of arbitrarily shaped H - and E -plane discontinuities in a rectangular waveguide by hybrid shorted contour integral-mode matching (HSCI-MM) method that can analyze the arbitrarily shaped H - and E -plane discontinuities structures efficiently and rigorously. This hybrid method combines the flexibility of the shorted contour integral technique and the efficiency of mode matching method. Therefore, the suggested method is verified by designed and analysed the Ku-band bandpass filter with finite thickness inductive irises including rounded corners that based on the result of analysis.

I. 서론

구형 도파관내의 H - 및 E -면 불연속은 많은 마이크로파 소자 예를 들면 필터, 테이퍼, 위상 변환기 그리고 서큘레이터 소자 등에 있어서 매우 중요한 역할을 차지하고 있다. 직각좌표계 또는 원통좌표계로 무리 없이 표현 가능한 두께가 얇은 아이리스 또는 원통형 포트 등과 같은 많은 일반적인 불연속 구조가 기존의 방법에 의해 곧바로 계산되어질

수 있음에도 불구하고, 보다 더 일반적인 형태의 불연속 해석을 위한 관심은 날로 증가하고 있다.

이러한 일반적인 형태의 불연속 구조에 대한 제안은 컴퓨터-제어 밀링 방법 또는 방전가공 방법 등과 같은 최신의 제작 방법들의 적용이 용이하게 함으로써 보다 정밀한 가공이 가능하도록 하기 위함이라고 볼 수 있다. 이미 몇몇의 기술들이 좀 더 복잡한 형태의 도파관 구조의 산란특성 분석을 위해 적용되어 왔다.

구형 도파관내의 원형 포트의 경우 모멘트법

* 인오시스템 주식회사 연구소(inno1111@unitel.co.kr)

** 동서울대학 전자통신과 조교수(wslee@haksan.dsc.ac.kr)

논문번호 : 99024-0909

접수일자 : 1999년 9월 9일

(moment method)^{[1],[2]}과 모드매칭법(mode matching method)^[3]에 의해 연구되어졌다. 그러나 그림 6.1과 같은 형태의 일반적인 구조에 대해서는 아직까지도 전파 모드매칭법(full-wave mode matching method)에 의한 연구가 이루어지지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 H-면 불연속, H-면과 E-면 불연속의 직렬 연결 등의 분석을 위해 매우 유용한 하이브리드 단락 외형적분 모드매칭법(HSCI-MM : hybrid shorted contour integral-mode matching method)을 보다 일반적인 구조 특히, 도파관 포트와 임의의 형태의 공진기의 높이가 일치하지 않는 구조에 대한 전파(full-wave) 특성 분석이라는 보다 더 일반적인 경우까지 확대하여 분석이 가능하도록 하였다. 유일한 제한이 있다면 그것은 바로 공진기 구조가 z-축 방향에 대해 균일(homogeneous)하다는 것이다.

II. 단락 외형적분 모드매칭법(HSCI-MM)

그림 1의 임의의 형태의 공진 영역에 대한 전자계는 원통좌표계로 표현되는 파동 함수의 완전한 집합의 형태로 전개되어진다. 또한 도파관 포트에 대한 경계에 대해서는 모드매칭법을 곧바로 적용함으로써 빠른 수렴과 높은 수치해석적 안정도를 얻을 수 있다. 더욱이 도파관 포트에 대한 고유모드의 진폭계수를 임의의 형태의 부분영역에 대한 원통좌표계로 표현되는 파동 함수 전개식에 의하여 상호간에 완벽하게 표현할 수 있음에 따라, 해당 영역의 모드 산란행렬을 직접적으로 구할 수 있다.

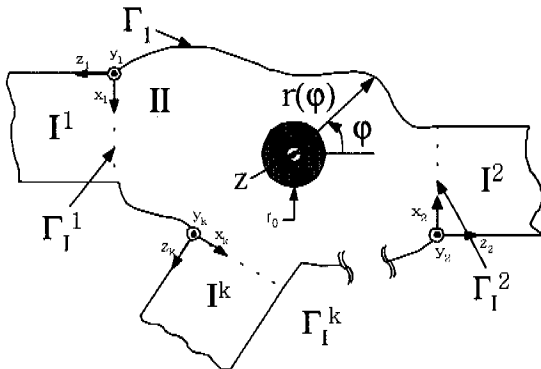


그림 1. k개의 도파관 포트를 포함한 일반적인 H- 또는 E-면 구조

그림 1과 같은 기하학적 구조의 해석을 위한 부분영역에 대한 전자계는 전계 및 자계 벡터 포텐셜

\vec{F}_μ 와 \vec{A}_μ 의 z축 성분으로부터 유도되어질 수 있다.

$$\vec{E}_\mu = -\nabla \times \vec{F}_\mu + \frac{\eta}{jk} \nabla \times \nabla \times \vec{A}_\mu$$

$$\vec{H}_\mu = \nabla \times \vec{A}_\mu + \frac{1}{jk\eta} \nabla \times \nabla \times \vec{F}_\mu \quad (1)$$

여기서, η 와 k 는 각각 자유공간 임피던스와 파수(wave number)이고, 각 주파수 ω 를 포함한 $e^{j\omega t}$ 형태의 주기적 시간의 함수이다. 부분영역 $\mu = I^k$ (즉, 균일한 구형 도파관 내부)에 있어서의 횡전자계는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{E}_I^k = \sum_{(p)} \sqrt{Z_{pk}^e} \vec{e}_{pk}^e (a_{pk}^e + b_{pk}^e) + \sqrt{Z_{pk}^h} \vec{e}_{pk}^h (a_{pk}^h + b_{pk}^h)$$

$$\vec{H}_I^k = \sum_{(p)} \sqrt{Y_{pk}^h} \vec{h}_{pk}^h (a_{pk}^h - b_{pk}^h) + \sqrt{Y_{pk}^e} \vec{h}_{pk}^e (a_{pk}^e - b_{pk}^e) \quad (2)$$

여기서, $Z, Y^{e,h}$ 는 각각 해당 모드의 파동 임피던스 또는 어드미턴스이고, a, b 는 도파관 k 포트에 대한 모드 산란행렬을 직접적으로 구하기 위해 적절히 정규화된 고유 모드 진폭 계수이다.

그림 1에서 각 축 방향이 균일하고 $z = 0$ 과 $z = w$ 에서 완전 도체에 의해 단락 되었다고 가정된 임의의 경계(contour)를 갖는 공진 영역에 있어서, 벡터 포텐셜은 식(3)과 같은 원통좌표계로 표현되는 파동 함수의 형태로 전개되어진다.

$$\vec{A} = \vec{u}_z \psi^e(r, \phi, z), \quad \vec{F} = \vec{u}_z \psi^h(r, \phi, z) \quad (3)$$

도파관 포트에서의 횡전자계와 마찬가지로, 공진 영역에 대한 접선방향의 전자계는 다음과 같다.

$$\vec{E}_{tc} = \sum_{(a)} \frac{\eta}{j} \vec{e}_a^e \alpha_a^e + \vec{e}_a^h \alpha_a^h$$

$$\vec{H}_{tc} = \sum_{(a)} \frac{1}{j\eta} \vec{h}_a^h \alpha_a^h + \vec{h}_a^e \alpha_a^e \quad (4)$$

구형 도파관 영역과는 반대로, 식(4)의 함수들은 직교성(orthogonal)을 갖지 않을 뿐만 아니라, 파의 진폭이 단순히 간접적으로 사용되어지기 때문에, 이들의 복소 전력(complex power)에 대한 정규화는 필요하지 않다. 식(4)에서, 접선방향의 전자계 벡터는 식(3)의 벡터 포텐셜에 의하여 식(1)의 해당 전자계의 투영(projection)에 의해 나타내어진다.

$k + 1$ 개의 미정계수의 집합은 식(5)의 경계 조건에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{kc} &= \begin{cases} \vec{E}_i^k & (\Gamma = \Gamma_k \text{ 인 경우}) \\ 0 & (\Gamma \neq \Gamma_k \text{ 인 경우}) \end{cases} \\ \vec{H}_i^k &= \vec{H}_{kc} \quad (\Gamma = \Gamma_k \text{ 인 경우}) \end{aligned} \quad (5)$$

전계에 대한 경계 조건은 다음과 같은 선형 방정식 시스템을 얻는데 사용된다.

$$S_p \vec{a}_p = E_p (\vec{a} + \vec{b}) \quad (6)$$

여기서 행렬 S_p 의 성분들은 공진 영역의 전자계 벡터의 결합 적분(coupling integrals)들이며, 공진 영역의 직교하지 않은 경계 부분들로 인하여 이 행렬은 대각행렬이 될 수 없다. 행렬 E_p 는 공진 영역에 있어서의 원통좌표계로 표현되는 파동 함수에 의한 도파관 포트에 대한 전계의 전개식을 나타낸다.

도파관 포트에서의 자계에 대한 경계 조건들은 다음과 같은 형태의 k 개의 방정식을 유도해 낸다.

$$-\vec{a} + \vec{b} = \frac{1}{j\eta} \sum_{(p)} E_p^T \vec{a}_p \quad (7)$$

여기서, T 는 역행렬을 의미하며, 결국 여기 계수(excitation coefficients) \vec{a}_p 는 식(6)에 의해 소거되고 다음 식(8)을 얻게 된다.

$$(-\vec{a} + \vec{b}) = C(\vec{a} + \vec{b}) \quad (8)$$

이 때,

$$C = \frac{1}{j\eta} \sum_{(p)} E_p^T S_p^{-1} E_p \quad (9)$$

이다.

결국, k -포트 도파관 집합에 대한 구하고자 하는 산란행렬(scattering matrix) T 는 다음과 같다.

$$T = (I - C)^{-1}(I + C) \quad (10)$$

I 는 단위 행렬(identity matrix)이다.

III. HSCI-MM을 이용한 라운드 구조를 포함한 아이리스 해석

그림 2에 해석하고자 하는 라운드를 포함한 대칭

형 유도성 아이리스 구조를 나타내었다. 그림 2(b)는 그림 2(a)를 전계면에서 바라본 구조로서 a 는 도파관의 폭, R 은 밀링가공시 발생하는 엔드밀의 반지름과 같고 P 는 가공시 엔드밀이 위치하는 중심점이다.

그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 일반적으로 밀링과 같은 회전형 절삭공구에 의해 도파관내 아이리스를 가공하면 아이리스와 주 도파관 사이의 접합면에 일정부분 절삭되지 않는 부분이 존재하게 된다. 가공에 사용되는 엔드밀의 반경이 커지면 커질수록 이 부분은 증가하여, 만약 아이리스 구조의 설계시 이 부분이 고려되지 않았다면 원하는 특성과 상당히 큰 가공상의 오차를 초래하게 된다. 이것은 당초에 고려되지 않은 H -면상의 무수히 많은 계단형 불연속이 더해진 것으로 볼 수 있어 리플특성의 변화에 기인하는 것이다.

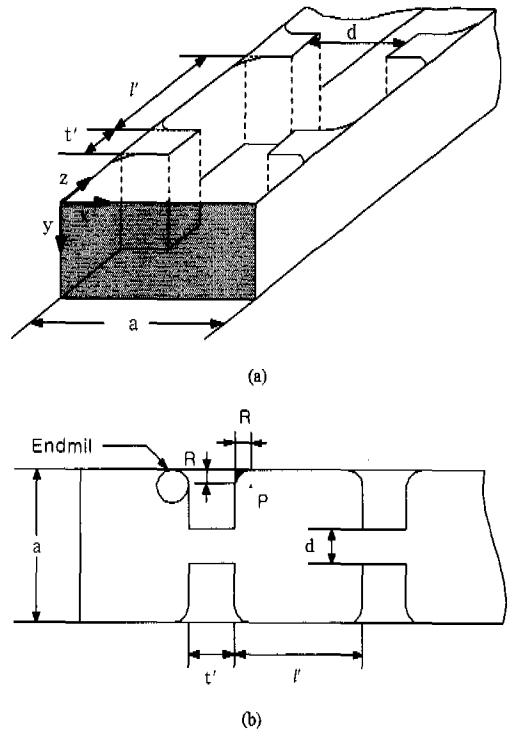
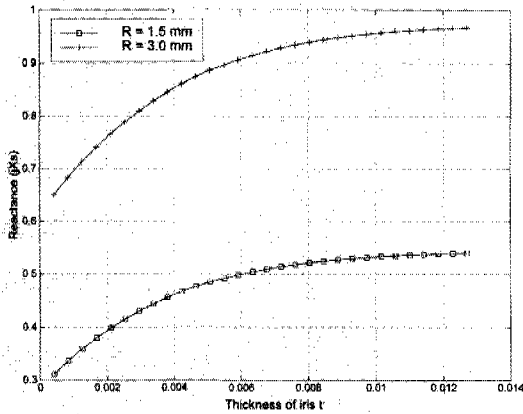
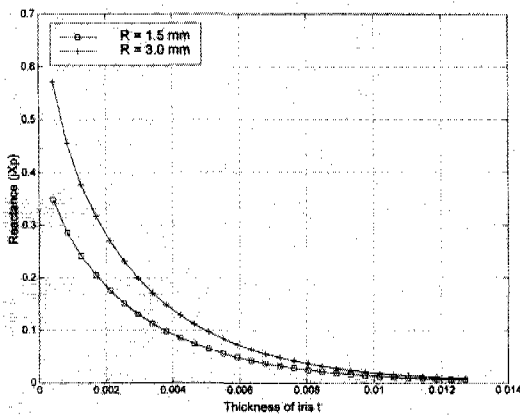


그림 2. 라운드를 포함한 대칭형 유도성 아이리스

그림 3은 모드 수 20개에 대한 $R/a = 0.0787$ ($\phi = 1.5$)일 때 HSCI-MM에 의해 분석된 정규화 리액턴스 X_s 와 X_p 를 나타내었다. 이 때, 아이리스의 두께는 가공상에 발생하는 아이리스의 구조적 안정도를 고려하여 $t = 0.05$ inch로 고정하였다.



(a)



(b)

그림 3. $R(R = 1.5 \phi)$ 이 고려된 유도성 아이리스 구조에 대한 리액턴스 (a) 직렬 리액턴스 (b) 병렬 리액턴스

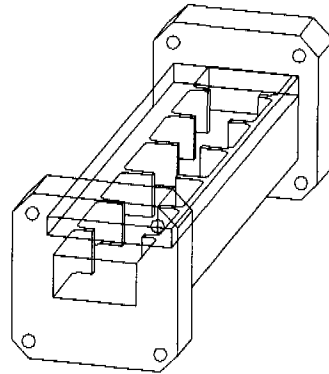


그림 4. 라운드를 포함한 H-면 대칭형 유도성 아이리스 구조의 도파관 필터

실험은 WR-75($a = 0.75$ inch, $b = 0.355$ inch) 구형 도파관을 이용하여 통과대역이 14.0 ~ 14.5 GHz인 Ku-밴드 대역통과 필터를 설계, 제작하여 계산 결과와 측정 결과를 비교하였다.



그림 5. 라운드 구조를 포함한 Ku-밴드 대역통과 필터

IV. 라운드 구조를 포함한 Ku-밴드 대역통과 필터

본 논문에서 제안한 하이브리드 단락 외형적분 모드매칭(HSCI-MM)법의 이론적 타당성을 검증하기 위하여 라운드를 포함한 H-면 대칭형 유도성 아이리스 구조의 도파관 필터를 Ku-밴드와 Ka-밴드에 대해 설계하여 HSCI-MM법으로 분석하였다.

접근 방법은 먼저 단순히 유한한 두께를 갖는 대칭형 유도성 윈도우 구조의 대역통과 필터를 설계한 후, HSCI-MM법에 의해 라운드가 고려된 대역통과 필터의 산란계수를 계산하여 아이리스의 두께와 공진기 길이를 보정함으로써 두 경우에 대한 산란계수 오차가 5%이내가 되도록 하였다.

그림 4에 제안한 HSCI-MM법이 적용된 라운드를 포함한 H-면 대칭형 유도성 아이리스 구조의 도파관 필터의 외형을 나타내었다.

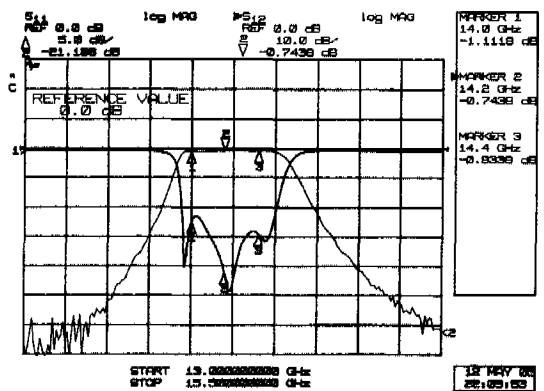


그림 6. 라운드 구조를 포함한 Ku-밴드 대역통과 필터의 측정 결과

HSCI-MM에 의한 이론적 결과를 바탕으로 가공 프로그램에 의한 CNC 밀링을 이용하여 직접 제작하였으며, 그림 5는 설계, 제작된 라운드 구조를 포함한 14.0 ~ 14.5 GHz Ku-밴드 도파관 필터의 외형이다. 그림 5와 같이 제작된 Ku-밴드 대역통과 필터의 삽입손실과 반사손실 특성을 측정하여 그림 6에 나타내었다

V. 결론

본 연구에서는 도파관내의 입의의 공진기 구조에 대한 정확한 모드 산란 행렬(modal scattering matrix)의 계산과 해석상의 융통성(flexibility) 및 효율성(eficiency)을 높일 수 있는 HSCI-MM법을 이용하여 라운드를 포함한 대칭형 유도성 아이리스 구조를 해석하였다. 이 때, 네 개의 모서리가 라운드 처리된 입의의 공진 영역에 대한 고유 모드(eigenmode)들은 단락 외형적분법에 의해 결정되고, 유한한 두께를 갖는 아이리스 불연속에 대한 일반화된 산란 행렬은 잘 알려진 모드매칭법에 의해 계산되었다.

본 논문에서 제안한 HSCI-MM에 의한 계산결과를 바탕으로 Ku-밴드 대역통과 필터를 설계한 결과 밀링에 의한 라운드 구조의 영향을 충분히 보정함으로써 제작 및 측정을 통해 그림 6의 측정결과에 제시한 바와 같이 제안한 해석 방법의 타당성을 충분히 검증하였다.

참고 문헌

[1] P. G. Li, A. T. Adams, Y. Leviatan, and J. Perini, "Multiple post inductive obstacle in rectangular waveguide", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. MTT-32, Apr. 1984.
 [2] H. Auda and R. F. Harrington, "Inductive posts and diaphragm of arbitrary shape and number in a rectangular waveguide", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. MTT-32, pp. 606-613, June 1984.
 [3] R. Gesche and N. Loechel, "Two cylindrical obstacles in rectangular Waveguide-Resonances and filter applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 37, pp. 962-968, June 1989.

[4] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, New York; McGraw-Hill, 1960, ch. 8, pp. 348-360.
 [5] R. Mittra and J. Pace, *A New Technique for Solving a Class of Boundary Value Problems*, Rep. 72, Antenna Laboratory, University of Illinois, Urbana, 1963.
 [6] G. F. Van Blaricum, Jr. and R. Mittra, "A modified residue-calculus technique for solving a class of boundary value problems Part II. Waveguide phase arrays, modulated surfaces, and diffraction gratings", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-17, pp. 310-319, June 1969.
 [7] K. Ise and M. Koshiba, "Numerical analysis of H-plane waveguide junctions by combination of finite and boundary elements", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 36, pp. 1343-1351, Sept. 1988.

이 용 민(Yong-Min Lee)

정회원



1993년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1995년 2월 : 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1999년 2월 : 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1999년 6월~현재 : 한국과학기술연구원(KIST) 복합기능세라믹연구센터 위촉선임연구원
 1999년 10월~현재 : 인오시스템 주식회사 연구소장 <주관심 분야> 마이크로파 및 밀리미터파 능동/수동 회로설계, 이동통신 및 위성통신 부품개발, 전파전파 및 전자기 해석

이 우 상(Woo-Sang Lee)

정회원



1983년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1985년 2월 : 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1991년 2월 : 광운대학교 대학원

전자공학과 졸업

(공학박사)

1991년 3월~현재 : 동서울대학 전자통신과 조교수