

論文95-32A-6-1

구형도파관내의 라운드를 갖는 대칭형 인덕티브 아이리스에 대한 두께 보정에 관한 연구

(A Study on the Thickness Correction for Symmetrical Inductive Irises with Rounds in Rectangular Waveguides)

柳 旻 完 *, 朴 光 亮 *, 金 在 明 *

(Kyung Wan Yu , Kwang Ryang Park and Jae Myung Kim)

요 약

인덕티브 아이리스 구조는 저손실 및 높은 온도 안정성으로 인하여 고주파용 도파관 여파기에 많이 사용된다. 그러나 아이리스 두께를 저주파에서와 같이 무시할 수 없으며 두께를 고려하지 않은 모델로는 정확한 여파기 응답을 예측하기가 어렵다. 기존의 두께 보정은 두꺼운 아이리스에 대해서만 타당성을 갖는다. 일반적으로 라운드의 영향에 대한 연구가 이루어지지 않았으므로 도파관 여파기 설계시 두 인자, 즉 아이리스 두께와 라운드사이의 관계를 찾을 필요가 있다.

본 논문에서는 설계단계에서 유한한 크기의 두께와 라운드의 복합적인 영향을 고려한 상호간의 관계를 기술하였다. 변화된 관계의 타당성을 보이기 위해 몇가지 예를 들어 각각의 경우에 대해 측정치와 예상치를 비교하였다. 또한 라운드의 반경이 두꺼운 아이리스를 통한 전송계수에 뚜렷한 영향을 미침을 보였다.

Abstract

The structures of inductive irises are used commonly in waveguide filter, especially at higher frequencies, due to low loss and high temperature stability. However, the iris thickness can not be neglected, as it could be at the lower frequencies. Approximate models assuming zero thickness fail to predict the exact behavior of the filter. And current thickness correction is introduced which is valid in the case of thick irises only. Account of the effect of round is normally not taken. So the necessity of finding a relation for the two factors - iris thickness and round - arises in the design of waveguide filters.

This paper describes a mutual relation that considers the combined effect of finite thickness and round from the start. In order to test the validity of the changed relation, several examples are given. And the measured response of each case is then compared with the predicted response. And it is shown that the radius is of perceptible influence on the transmission coefficient through a thick iris.

I. 서 론

* 正會員, 韓國電子通信研究所
(Elec. and Telecommunications Research Institute)

接受日字: 1994年11月22日, 수정완료일: 1995年5月27日

현재 불연속 구조를 이용하여 공진기를 결합시키는 기법은 여러용도의 도파관 여파기를 설계하는데 있어 광범위하게 이용되고 있다. 일반적으로 인덕티브 아이리스 결합 여파기는 우수한 특성, 즉 저손실 및 온도

안정성으로 고주파에서 많이 사용된다. 저주파에서는 아이리스의 두께를 고려하지 않는 기존의 근사모델에 의해서도 동조용 나사를 사용하여 원하는 특성을 얻을 수 있으나 주파수가 높아짐에 따라 아이리스의 두께는 중요한 성능결정 인자로서 작용하게 된다. 즉 두께가 없다는 가정은 고주파에서 유지되기 어렵고 도파관의 크기 감소로 동조용 나사를 사용할 수 있는 공간에 제약을 받으며 전체적인 손실을 증가시킨다. 이와같은 근사모델에 유한한 두께를 갖는 불연속 구조를 집중정수 등가회로를 이용한 방법¹¹⁾으로 보정하고 두께로 발생하는 감쇄등을 고려할 수 있으나 일반적으로 주모드만을 고려하고 아이리스간 상호작용을 모르는 제약으로 실제 여파기 설계치에 오차를 줄 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 수치 해석방법으로서 불연속 구조의 상호작용을 회로망으로 모델링하는 방법^{12,3)}을 포함하여 불연속에 대한 필드분포 이론을 적용하는 우수한 논문이 많이 발표되었다.¹⁴⁻⁸⁾ 이러한 수치해석 방법은 고전력용 소자와 같이 동조용 나사를 사용하지 않는 특별한 경우에 매우 유용하다. 그러나 대부분의 경우 설계가 빠르고 용이하며 동조용 나사를 사용하여 허용수준으로 오차를 충분히 감소시킬 수 있다는 장점 때문에 주모드만을 고려하는 방법을 많이 사용한다. 그리고 이와같은 특성외에 실제 인덕티브 아이리스를 CNC(Computer Numerical Controlled) 밀링가공에 의해 제작하는 경우 아이리스와 도파관 접합부분이 둥글게 라운딩 처리되어 설계당시의 설계치와 비교하여 극히 적은 오차를 갖도록 가공되지 않으면 원하는 구조에 대한 결과를 얻을 수 없다.

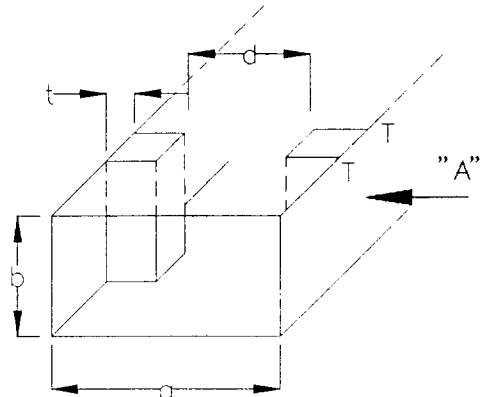
본 논문에서는 마이크로파 회로에서 중요한 역할을 하는 대칭형 인덕티브 아이리스 구조의 두께와 라운드에 대한 산란계수를 유한요소법(finite element method)을 이용하여 3차원 구조물을 해석하는 상용 프로그램인 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 이용하여 얻고 Marcuvitz가 제시한 공식에 의한 결과와 비교하여 라운드의 영향을 고찰하였다. 또한 산란계수의 변화를 아이리스의 두께를 변화 시킴으로써 보정하여 가공상 제약으로 발생하는 오차를 감소시킬 수 있음을 보였다.

II. 라운드를 갖는 유한한 두께의 인덕티브 아이리스

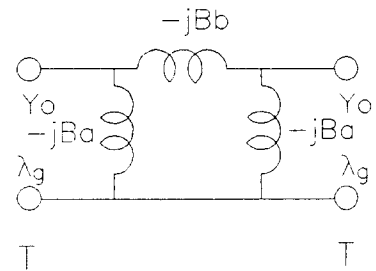
1. 유한한 두께의 인덕티브 아이리스

마이크로파 회로내에서 TE_{10} 모드가 입사하여 인덕

티브 아이리스 불연속 구조를 만나면 이 불연속 구조에 의해 반사가 일어나고 고차모드가 발생한다. 이 불연속 구조는 매우 간단하나 불연속 구조 전체에 걸친 전자계 분포에 대한 해를 구하는 과정은 어렵고 복잡하다.



(a)



(b)

그림 1. 유한한 두께의 인덕티브 아이리스

(a) 구조 (b) π -등가회로

Fig. 1. Inductive iris of the finite thickness.

(a) Geometry

(b) π -equivalent circuit

그러나 불연속 구조에서 발생하는 고차모드는 먼지점까지 전파하지 못하고 충분히 감쇄되어 불연속 구조 근방에서 에너지를 저장하므로 주 모드(dominant mode)만이 전파모드인 영역에서의 불연속 구조의 전기적인 특성을 구함으로써 근사적으로 TE_{10} 모드인 진행파와 반사파만이 존재하는 것으로 가정할 수 있다. Marcuvitz는 도파관내의 TE_{10} 모드 전체에 평행하고 유한한 두께를 갖는 대칭형 인덕티브 아이리스에 대한

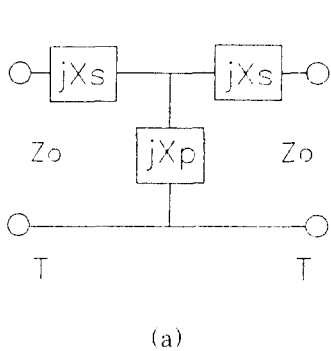
공식과 등가회로를 제시하였으며 이 모델은¹¹⁾

$$0.5 < \frac{a}{\lambda} < 1.5 \quad (1)$$

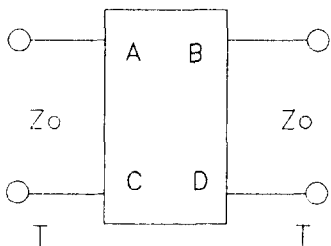
와 같은 파장범위에서 1%이내의 오차를 보이며 도파관의 전체 동작주파수에서 타당성을 갖는다.¹⁴⁾ 여기서 λ 와 a 는 각각 자유공간 파장과 도파관의 폭이다.

그림 1은 대칭형 인덕티브 아이리스의 구조와 π -등가회로이다. 여기서 불연속 구조는 폭이 d 이고 전송선로 길이가 t 인 도파관으로 고려할 수 있다. T 및 Y_0 와 λ_g 는 각각 불연속 구조에 대한 기준면, 특성 어드미턴스와 도파관내의 파장이다. 등가회로에서 병렬 서셉턴스 성분은 도파관의 변위전류가 도체벽을 통해 흘러 생겨나고 직렬 서셉턴스는 불연속면의 과잉전류에 의해 생기는 성분이다.

주모드에 대한 산란계수를 구하기 위해 그림 2와 같은 T-등가회로의 소자값과 2단자 회로에 대한 ABCD-parameter를 이용하였다.



(a)



(b)

그림 2. (a) T-등가회로 (b) ABCD-parameter
Fig. 2. (a) T-equivalent circuit (b) ABCD-parameter.

등가회로 소자값 B_0 , B_b 와 X_s , X_p 사이에는

$$X_p = \frac{B_b}{[2B_b + B_0] B_0} \quad (2)$$

$$X_s = \frac{1}{2B_b + B_0}$$

와 같은 관계가 있다.

ABCD 행렬에 대한 각각의 파라미터는

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+X_s}{X_p} & j \frac{X_s^2 + 2X_s X_p}{X_p} \\ -j \frac{1}{X_p} & \frac{1+X_s}{X_p} \end{bmatrix} \quad (3)$$

와 같이 표현된다. 또한 식 (3)을 이용하여 주모드에 대한 전달계수(transmission coefficient)와 반사계수(reflection coefficient)를

$$S_{11} = \frac{A+B-C-D}{A+B+C+D} \quad (4)$$

$$S_{21} = \frac{2}{A+B+C+D}$$

와 같이 나타내고 아이리스 구조를 분석하는데 이용하였다.

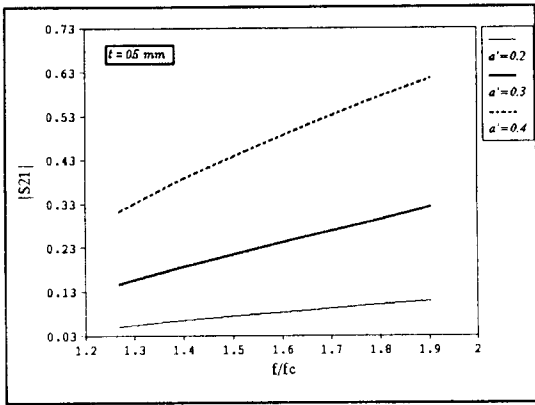
대칭형 인덕티브 아이리스에 대한 전달특성은 그림 3에서 보듯이 아이리스의 폭과 두께에 따라 다르다. $a = \frac{d}{\lambda}$ 으로서 도파관과 아이리스 폭의 비이고 f_c 는 도파관의 차단주파수이다.

일반적으로 밀링가공시 기계적인 안정성을 고려하여 아이리스 두께를 0.5mm이하로 가공하지 않는다. 그러므로 본 논문에서는 기준 아이리스 두께를 0.5mm로 두고 아이리스 폭과 주파수에 따른 전달특성의 변화를 나타냈다. 그림 3에서 보듯이 아이리스 폭이 증가하면 아이리스를 통해 전달되는 양이 증가하고 상대적으로 폭이 작은 경우에 비해서 주파수에 따른 특성변화가 크다. 즉 아이리스 특성은 주파수의 함수로서 폭이 증가할 수록 크게 영향을 받는다.

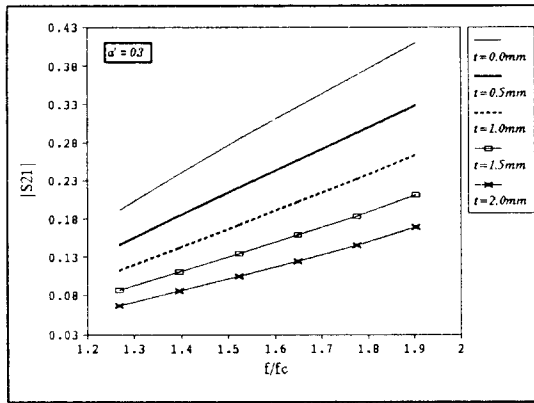
그림 3-(b)는 아이리스 폭을 고정시키고 두께를 변화시키면서 주파수에 따른 전달특성의 변화를 나타낸 것이다. 아이리스 두께가 증가하면 전달되는 양이 감소하고 두께가 얇은 경우에 비해 주파수에 대한 특성변화가 적다. 이와같이 아이리스의 동작특성이 구조에 따라 변하는 현상은 주파수가 상승할 수록 두께가 파장에 비해 커지므로 더욱더 중요하며 아이리스의 정확한 특성을 예측하기 위해서는 폭과 두께에 대한 주파수 특성을 고려해야 한다.

2. 라운드 구조 해석

구형 도파관 H-plane을 이용한 불연속 구조는 많은



(a)



(b)

그림 3. 인덕티브 아이리스의 전달계수

Fig. 3. Transmission coefficients of inductive iris.

이크로파 회로에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 보통 구형구조를 이용하여 해석하고 있으나 CNC 밀링기법과 같이 현대에 많이 이용되는 가공방법을 쉽게 적용할 수 있는 구조에 대한 해석이 필요하다.

현실적으로 이와 같은 방법으로 여파기를 가공하는 경우 도파관과 아이리스의 접합부분에 그림 4에서 좌측 그림의 원부분과 같이 일정한 크기의 둥근면, 즉 라운드로 인해 설계시 고려되지 않은 빗금친 부분이 발생하며 이는 가공상 발생하는 한계점으로 측정결과에 영향을 미치며 그에 대한 영향을 설계시부터 고려할 필요가 있다. 그림 4는 그림 1을 측면 "A"부분에서 바라 본 구조로서 b 는 도파관의 높이, R 은 밀링가공시

사용된 드릴의 반경이고 점 P는 가공시 드릴이 위치하는 중심이다. 드릴의 반경은 도파관의 크기 및 아이리스 폭에 따라 가공가능한 형태로 결정되며 반경이 클수록 설계시의 구형구조와는 큰 가공오차를 갖는다. 일반적으로 일정한 크기의 라운드를 갖는 여파기는 상대적으로 작은 라운드를 갖는 여파기에 대해 반사손실과 리플특성이 변하고 주파수가 상승하는 특성을 보인다. 이는 아이리스의 두께가 설계당시와 다르게 제작된 경우에 나타나는 현상과 비슷하므로 라운드 발생을 두께의 증가로 가정하고 해석하고자 한다. 그림 4에서 t 는 설계당시의 아이리스의 두께이고 t' 은 가공상 발생하는 라운드를 보상하여 얻은 두께이다.

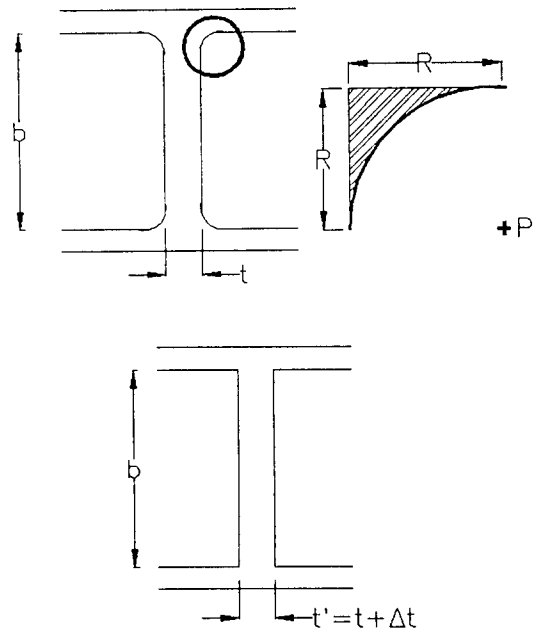
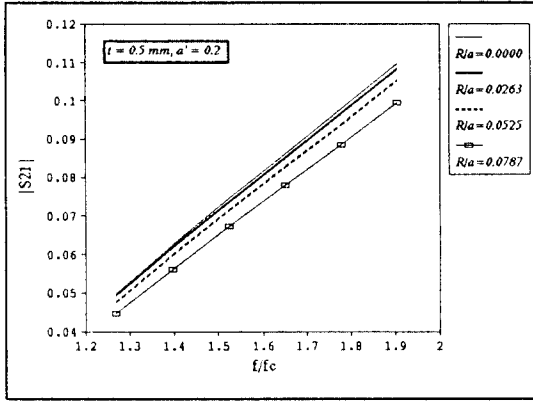


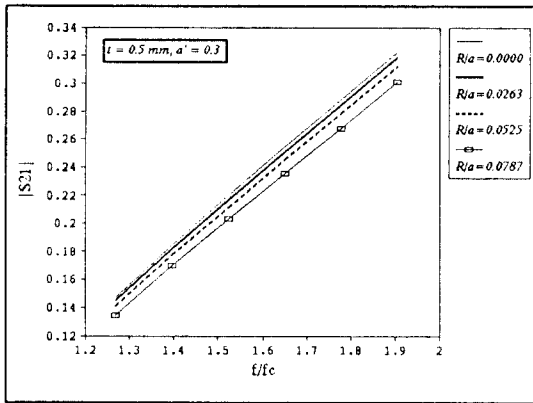
그림 4 라운드가 있는 아이리스와 보상된 두께의 아이리스

Fig. 4. Iris with rounds and iris with compensated thickness.

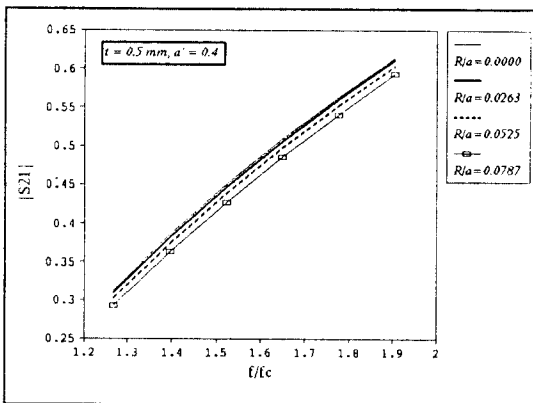
본 연구에서는 라운드를 갖는 아이리스의 산란계수를 결정하기 위해 유한요소법(finite element method)을 사용하여 3차원 구조물을 해석하는 상용 프로그램인 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 이용하였다. 또한 그 결과를 Marcuvitz가 제시한 공식에 의한 결과와 비교하였다. 유한요소법에 의한 결과는 불연속 구조물을 해석하는 과정에서 주어지는 가중인자(weighting factor)에 따라 다른 값을 갖는다.



$a' = 0.2$



$a' = 0.3$



$a' = 0.4$

그림 5는 주모드만을 고려하여 얻은 라운드의 크기 및 아이리스 폭에 따른 전달계수의 변화이다. 폭이 일정할 때 아이리스의 전달특성은 라운드의 크기에 관계 없이 주파수에 따라 동일한 형태로 증가하며 라운드가가 증가하면서 전달되는 양은 감소한다. 아이리스 폭이 넓은 경우 주파수에 대한 전달계수는 상대적으로 폭이 좁은 경우에 비해 라운드가 증가할 수록 큰 비율로 감소한다.

표 1은 라운드를 갖는 아이리스의 특성을 비교하기 위해 임의의 주파수 $f/f_c = 1.65$ 에서 나타난 전달계수로서 다른 주파수에서도 비슷한 현상을 보인다.

표 1. 라운드를 갖는 아이리스의 전달계수

Table 1. Transmission coefficients of irises with rounds.

	$a'=0.2$	$a'=0.3$	$a'=0.4$
$R/a=0.0000$	0.0862	0.2542	0.5091
$R/a=0.0787$	0.0780	0.2354	0.4857

표 1에서 $R/a=0.0000$ 은 설계시 고려할 수 있는 일적인 형태인 반면, $R/a=0.0787$ 은 실제가공시 발생 형태이다. 각각의 아이리스 폭에 대해 라운드로 인한 산란계수 오차는 9.28%, 7.40%, 4.6%이다. 아이리스 폭이 작은 경우 큰 경우에 비해 상대적으로 라운드에 의한 전달계수의 오차가 크다. 즉 아이리스 폭이 넓은 경우에 비해 좁은 경우가 라운드의 영향을 크게 받는다.

3. 아이리스 두께 보정

이상의 결과에서 보듯이 라운드의 크기에 따른 산란계수가 설계당시와 비교해서 큰 오차를 보임을 알 수 있다. 이러한 오차를 보상하기 위해 새로운 크기의 아이리스 두께를 다음과 같은 과정에 의해 구하였다.

(과정 1) 설계과정, 즉 라운드를 고려하지 않은 경우($R=0$ mm)

- 아이리스 폭 및 두께 : d, t

- 산란계수 : S_{11}, S_{21}

(과정 2) 가공상 라운드가 발생하는 경우

($R > 0$ mm)

- 아이리스 폭 및 두께 : d, t

- 산란계수 : S_{11}, S_{21}

(과정 3) 설계과정에서 라운드를 새로운 두께로 보정한 경우($R=0$ mm)

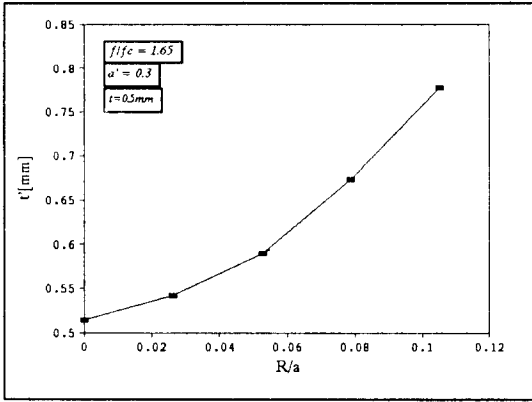
그림 5. 라운드를 갖는 아이리스를 통한 전달계수
Fig. 5. Transmission coefficients through the irises with rounds.

- 아이리스 폭 및 두께 : d, t
- 산란계수 : S_{11}, S_{21}

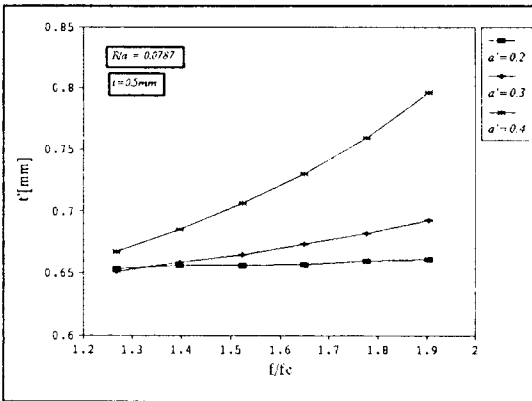
이상의 과정으로부터 $S_{11} = S_{11}^i, S_{21} = S_{21}^i$ 를 만족하는 새로운 두께 t 을

$$t = t(R=0) + \Delta t \tag{5}$$

와 같이 표현할 수 있다.



(a) R/a의 크기에 대한 t'의 변화



(b) 주파수와 아이리스 폭에 대한 t'의 변화

그림 6. 보상된 아이리스 두께(라운드, 아이리스 폭, 주파수의 함수)

Fig. 6. Compensated iris thickness as a function of R, d, f.

우측의 첫번째 항 $t(R=0)$ 는 라운드를 고려하지 않은 설계시의 두께이다. 그러나 가공시 발생하는 일정한 크기의 라운드로 인한 오차를 보상하고자 두께를 변화

시켰다. 즉, 두번째 항 Δt 는 실제 가공시 발생하는 라운드를 보상할 때 고려되는 두께 변화량이다. 여기서 Δt 는 라운드와 주파수 및 아이리스 폭에 따라 다른 값을 가지므로

$$\Delta t = g(R, d, f) \tag{6}$$

와 같이 표현할 수 있다.

그림 6은 $t(R=0)$ 를 0.5mm로 고정시키고 식 (6)의 각각의 변수에 대하여 t 을 표현한 것이다. 그림 6-(a)에서 보듯이 아이리스 폭과 주파수를 고정시켰을 때 t 은 라운드의 크기에 따라 증가한다. 여기서 $R/a=0.00$ 인 경우 정확히 $t'=0.5$ mm을 만족시키지 못하는 것은 사용된 상용 프로그램에서 처리되는 가중 인자에 기인한다. 즉 상용 프로그램과 Marcuvitz의 구조 해석방법의 차이에 기인하는 오차라고 볼 수 있으므로 전체적인 아이리스 동작을 고찰하는데 있어 값 자체는 큰 의미가 없다. 그림 6-(b)에서 아이리스의 폭이 좁은 경우 t 은 주파수에 대해 거의 변화가 없고 폭이 증가하면서 t 은 큰 기울기를 갖고 증가한다. 그러므로 라운드를 보상하기 위해 두께를 변화시켜 마이크로파와 회로내의 리액턴스 소자로 사용하고자 하는 경우 아이리스 폭과 설계 주파수에 대한 고려가 반드시 필요하다.

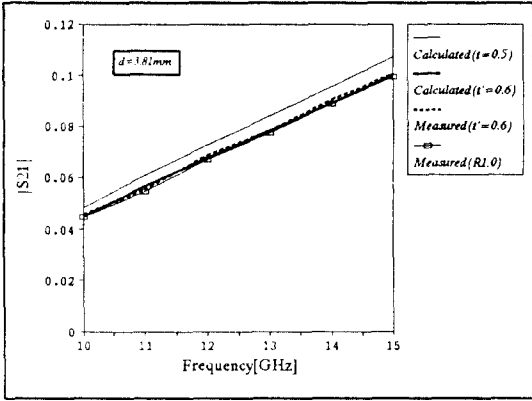
III. 설계 및 제작

본 논문에서는 이상과 같은 라운드 해석방법의 타당성을 보이고자 아이리스를 제작하여 측정하고 이론치와 비교하였다. 표 2는 WR-75(19.05mm×9.53mm) 표준 도파관내에 제작된 아이리스의 크기이다.

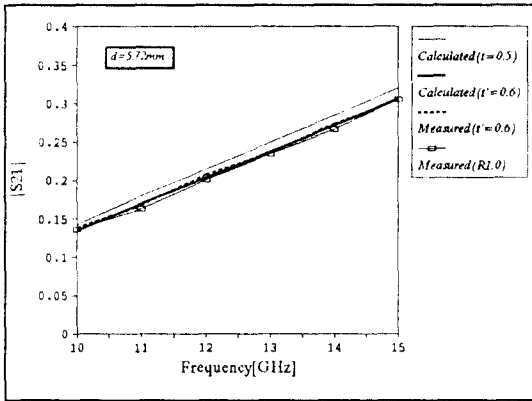
표 2. 제작된 아이리스의 크기

Table 2. Dimensions of manufactured iris.

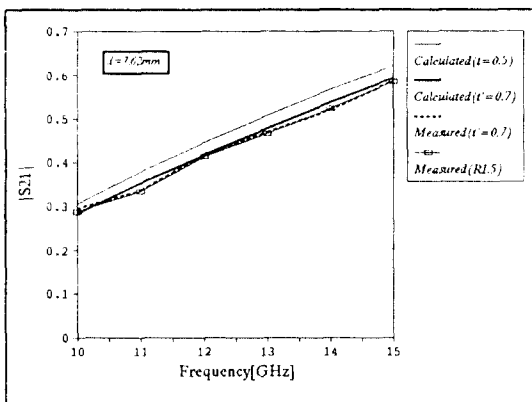
항목	아이리스 폭 d[mm]	아이리스 두께 t[mm]	라운드 반경 R[mm]
# 1	3.81	0.5	1.0
# 2	3.81	0.6	0.0
# 3	5.72	0.5	1.0
# 4	5.72	0.6	0.0
# 5	7.62	0.5	1.5
# 6	7.62	0.7	0.0



(a) $d = 3.81\text{mm}$



(b) $d = 5.72\text{mm}$



(c) $d = 7.62\text{mm}$

그림 7. 아이리스에 대한 전달계수의 이론 및 측정 결과
Fig. 7. Computed and measured results of transmission coefficients for irises.

제작된 각각의 아이리스의 전달계수를 측정하고 계산치와 비교하여 그림 7에 전송특성을 보였다. 그림에서 보듯이 각각의 전송특성이 라운드를 고려하지 않은 경우에 비해 크게 향상되었다. 이와같은 오차는 여파기와 같은 마이크로파 회로의 전체적인 특성에 변화를 주며 주파수가 상승할 수록 심각하다.

표 3. 설계주파수에서의 전달계수

Table 3. Transmission coefficients at design frequency.

표 3-(a)	S21
	f=13GHz
1) Calculated(t=0.5)	0.08422
2) Calculated(t=0.6)	0.07862
3) Measured(t=0.6)	0.07827
4) Measured(R1.0)	0.07748

표 3-(b)	S21
	f=13GHz
1) Calculated(t=0.5)	0.24949
2) Calculated(t=0.6)	0.23768
3) Measured(t=0.6)	0.23654
4) Measured(R1.0)	0.23488

표 3-(c)	S21
	f=12GHz
1) Calculated(t=0.5)	0.44609
2) Calculated(t=0.7)	0.41811
3) Measured(t=0.7)	0.41999
4) Measured(R1.5)	0.41370

그림 7-(a), (b), (c)는 각각 설계주파수 13GHz, 13GHz, 12GHz에서 라운드 효과를 보정하기 전의 예상결과와 보정후의 예상결과 및 측정결과이다. 여기서 측정된 반사특성은 회로망 분석기(Network Analyzer)인 HP8510C의 교정상태(calibration)에 따라 크게 영향을 받아 아이리스의 본래의 동작을 바르게 설명할 수 없다. 예를들어 $a' = 0.2$ 인 경우 이론적인 반사계수는 주파수 영역에서 최대 0.004의 변화를 갖고 단조감소 특성을 보이나 측정된 반사계수는 최대 0.012의 변화를 보이며 단조함수 특성을 갖지 못한다. 이러한 현상은 아이리스 폭이 클 수록 적어지지만 상대적으로 아이리스 폭이 좁은 경우 반사계수가 크고

주파수에 대한 변화가 적어 반사계수에 대한 신뢰성이 떨어진다. 그러므로 본 논문에서는 아이리스 폭에 따른 특성변화에 일관성을 유지할 수 있는 전달계수를 이용하여 아이리스의 동작을 설명하였다.

Calculated($t=0.5$)는 두께 $t=0.5\text{mm}$ 인 아이리스에 대한 이론적인 특성이다. 그러나 실제 가공시 일정한 크기의 라운드가 발생하며 R1.0와 R1.5는 각각 가공시 사용된 드릴의 반경이 1.0mm와 1.5mm임을 의미한다. Measured(R1.0) 및 Measured(R1.5)는 가공된 아이리스에 대한 측정결과이다. 그리고 Calculated($t'=0.6$)와 Calculated($t'=0.7$)는 이러한 현상을 보상한 새로운 두께가 각각 $t'=0.6\text{mm}$ 와 $t'=0.7\text{mm}$ 인 아이리스에 대한 이론적인 특성이다. 또한 보상된 두께를 갖는 아이리스를 가공하여 측정하고 Measured($t'=0.6$)와 Measured($t'=0.7$)로 나타냈다.

그림에서 보듯이 전송특성은 아이리스 두께를 설계 주파수에서 보상하는 경우 오차를 최소화시킬 수 있다.

표 3-(a), (b), (c)는 각각 그림 7-(a), (b), (c)의 특성에 대해 각각의 설계주파수에서의 값만을 비교한 것이며 2]와 4]의 오차는 각각 1.45%, 1.18%, 1.0%이다. 이 결과는 1]과 4]의 오차 8.00%, 5.86, 7.26%에 비해 크게 향상된 결과이다. 즉, 설계단계에서 라운드를 고려함으로써 좀 더 정확한 아이리스 동작을 예측할 수 있다.

IV. 결 론

마이크로파 회로에서 중요한 역할을 하는 인덕티브 아이리스를 밀링기법으로 가공하는 경우 도파관과 아이리스의 접합부에 유한한 크기의 라운드가 발생한다. 이러한 가공방법은 라운드 발생이라는 가공상의 한계 점에도 불구하고 사용이 용이하고 대량생산이 가능하다는 점에서 많이 이용된다. 본 연구에서 제시한 라운드 해석방법은 이러한 현대 가공기술과 부합하는 것으로 라운드가 인덕티브 아이리스 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위한 것이다.

본 연구에서는 가공상 제약으로 발생하는 라운드를 두께의 증가로 가정하고 라운드의 크기에 따른 아이리스의 특성변화를 설명하고 이것을 보상하기 위해 아이리스 두께와의 관계를 설명하였다. 그리고 이러한 접근

방법의 타당성을 보이하고자 아이리스를 제작하고 측정하였다. 측정결과 라운드로 발생하는 특성의 오차를 크게 감소시켰다.

이와같은 측정결과로 미루어 일정한 크기의 라운드를 갖는 인덕티브 아이리스는 설계단계에서 아이리스 두께로 보상이 가능하다. 그러나 본 논문에서 제시한 아이리스에 대한 특성과 더불어 이러한 구조에 대해 더욱더 많은 보정인자를 고려하여 라운드의 동작을 일반화시킬 필요가 있다. 또한 여러개의 아이리스가 존재하는 경우 아이리스간의 상호작용을 고려하기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] N.Marcuvitz, Waveguide Handbook, New York, McGraw-Hill, 1951.
- [2] T.E.Rozzi, "Equivalent Network for Interacting Thick Inductive Irises," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-20, 1972.
- [3] T.E.Rozzi, "The Variational Treatment of Thick Interacting Inductive Irises," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-21, 1973.
- [4] Roger F. Harrington, Time-Harmonic Electromagnetic Fields, New York, McGraw-Hill, 1961.
- [5] R.E. Collin, Field Theory of Guided Waves, New York, IEEE Press, 1991.
- [6] P.J.B. Clarricoats and K.R. Slinn, "Numerical Solution of Waveguide Discontinuity Problems," Proc. IEE, vol. 114, 1967.
- [7] A. Wexler, "Solution of Waveguide Discontinuities by Modal Analysis," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-15, 1967.
- [8] Khostro Shamsaifar, "Designing Iris-Coupled Waveguide Filters Using the Mode-Matching Technique," Microwave Journal, pp.156-164, Jan.1992.

저 자 소 개

柳 兪 完(正會員) 제31권 A편 8호 참조
현재 한국전자통신연구소 위성통신
기술연구단 탑재장치연구실 연구원

朴 光 亮(正會員) 제31권 A편 8호 참조
현재 한국전자통신연구소 위성통신기
술연구단 탑재장치연구실 선임연구원

金 在 明(正會員) 제31권 A편 8호 참조
현재 한국전자통신연구소 위성통신
기술연구단 위성통신시스템 연구부
책임연구원