

이중대역 정사각형 도파관 아이리스 편파기 설계

Design of a Dual-Band Square-Waveguide Iris Polarizer

황순미 · 고한웅* · 박동희** · 윤소현*** · 엄만석*** · 안병철*

Soon-Mi Hwang · Han-Woong Ko* · Dong-Hee Park** · So-Hyeun Yun*** · Man-Seok Uhm*** · Bierng-Chearl Ahn*

요 약

본 논문에서는 두 개의 주파수 대역에서 동작하는 주름형 정사각형 도파관 편파기의 설계 방법을 제시하였다. 두 개의 주파수 대역에서 축비 대역폭이 최적이 되며 낮은 입력 반사계수를 가지도록 아이리스의 개수, 두께, 높이 등의 설계 변수 결정법을 제시하였다. 설계기법의 적용 예로서 21 GHz와 31 GHz 대역에서 동작하는 편파기를 설계, 제작, 측정하였다. 제작된 편파기는 20.8~21.2 GHz 대역과 30.6~31.0 GHz 대역에서 -35 dB 이하의 반사계수와 0.3 dB 이하의 축비를 가짐을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we present methods for designing a square-waveguide iris polarizer operating at dual frequency bands. Methods are presented for determining the number of ireds, iris thickness, iris height and spacing between ireds so that the input reflection is low and the axial-ratio bandwidth is optimized at two frequency bands. As an example of the application of the proposed method, a polarizer operating at 21 GHz and 31 GHz bands is designed, fabricated and tested. The fabricated polarizer shows a reflection coefficient less than -35 dB and an axial ratio less than 0.3 dB at 20.8~21.2 GHz and 30.6~31.0 GHz.

Key words : Waveguide Polarizer, Iris Polarizer, Dual-Band Polarizer

I. 서 론

위성통신에 사용되는 주파수의 대역수가 증가함에 따라 각 대역에서 동작하는 여러 개의 피드 대신 한 개의 다중대역 반사경 안테나 피드가 사용되고 있다. 도파관 편파기는 반사경 안테나의 원편파 피드 구현에 흔히 사용된다. 도파관 편파기의 종류로는 유전체판 삽입형, 횡격막 삽입형, 아이리스형(=주름형) 등 여러 가지 형태가 있다. 이 중에서 1955년에 Simmons^[1]에 의해 제안된 정사각형 도파관 아이리스 편파기는 다른 편파기에 비해 광대역성을 보이

고 제작이 쉽다는 장점을 가진다.

그림 1과 같이 정사각형 도파관의 아랫면과 윗면

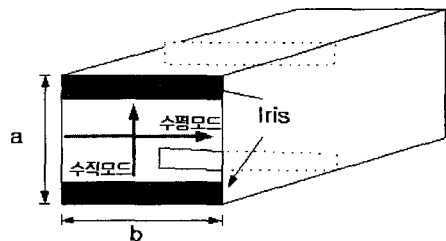


그림 1. 아이리스 편파기

Fig. 1. Iris polarizer.

전자부품연구원(KETI)

*충북대학교 대학원 전파공학과(Dept. of Radio Eng., Graduate School, Chungbuk National University)

**충주대학교 전기전자 및 정보공학부(School of Electrical, Electronics and Information Eng., Chungju University)

***한국전자통신연구원(ETRI)

· 논문 번호 : 20041105-01S

· 수정완료일자 : 2005년 2월 11일

에 일정한 간격으로 동일한 아이리스(또는 주름)를 설치할 경우 수평편파 모드의 위상정수(β_1)와 수직편파 모드의 위상정수(β_2)가 다르므로 아이리스가 설치된 도파관 부분의 길이를 적절히 할 경우 두 모드의 위상차가 정확하게 90° 가 되게 할 수 있다. 주파수가 증가할 수직편파 모드에 작용하는 용량성 장하(loading)는 증가하며 수평편파 모드에 작용하는 유도성 장하는 감소하므로 넓은 주파수 대역에 걸쳐 90° 의 위상차를 유지하게 되므로 광대역 편파기의 구현이 가능하게 된다^{[1],[2]}. 입력단에 전기장 벡터가 정사각형 도파관 단면의 수평축과 45° 가 되도록 선형편파 입사파를 인가할 경우 편파기의 출력단에는 원편파 전파가 나오게 된다^[3].

정사각형 도파관 내부에 아이리스를 설치할 경우 아이리스의 높이가 클수록 반사계수가 증가하며 두 모드의 위상차가 커지게 된다. 낮은 높이의 아이리스를 많이 사용하여 반사계수를 낮게 유지하며 90° 의 위상차를 구현할 수 있다. 그러나 이 경우 아이리스의 개수가 많으므로 가공오차에 의해 위상차가 민감하게 변하므로 최적설계에서 벗어나게 된다^{[4],[5]}. 그러므로 아이리스 편파기의 최적설계는 최소 개수의 아이리스를 사용하여 광대역에 걸쳐서 낮은 반사계수와 양호한 축비를 구현하는 것이다. 최적설계를 위해 입출력 부분에는 낮은 높이의 아이리스를 사용하며 중간 부분에는 테이퍼 방식이 흔히 적용된다^{[4]~[6]}. 편파기를 더욱 광대역화 하기 위해 아이리스의 두께와 깊이를 동시에 조절하는 방법도 제안되었다^[7].

정사각형 도파관 아이리스 편파기 설계의 핵심은 아이리스가 있는 도파관의 위상정수를 확보하는 것이다. 이를 위해 보통 해석적 방법^{[1],[2],[12]}을 사용하거나 모드정합법^{[6],[8]~[11]}이 흔히 사용된다. 본 연구에서는 상용 전자장 해석 소프트웨어를 이용하여 정사각형 아이리스 편파기의 설계에 필요한 기초 데이터를 추출한 후 이를 이용하여 최적 특성의 편파기를 설계하는 방법을 제안한다.

II. 편파기 설계

2-1 편파기의 설계 변수

아이리스 편파기의 설계변수는 정사각형 도파관의 크기, 아이리스의 두께, 아이리스의 간격, 아이리

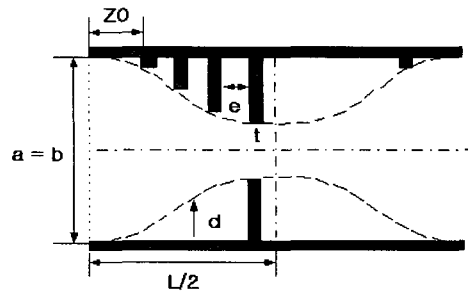


그림 2. 아이리스 편파기의 내부 구조
Fig. 2. Inside structure of an iris polarizer

스의 개수, 아이리스의 높이 등이 있다. 그림 2는 아이리스 편파기의 단면을 보인 것이다.

도파관 내부에 사용되는 아이리스 간격은 특성에 그다지 큰 영향을 미치지 않지만 두께나 높이는 위상차와 반사 특성에 큰 영향을 미치는데, 두께나 높이가 클 경우 위상차를 증가시킬 수 있지만 반사 특성이 나빠지기 때문에 원하는 특성을 얻기 위해서 세밀하게 고려되어야 하는 설계 변수이다.

아이리스의 두께(t)는 두꺼울수록 위상차가 증가하고 얇을수록 위상차를 조절하기 쉽기 때문에 되도록이면 얇은 것을 쓴다. 일반적으로 아래 범위의 값을 사용한다.

$$t = 0.05 \lambda_m - 0.10 \lambda_m \quad (1)$$

여기서 λ_m 은 동작주파수의 중심 주파수 파장이다.

아이리스 간격(e)은 위상차에 큰 영향을 주지 않지만, 아이리스 개수가 많아질 경우엔 위상차에 변화를 준다. 일반적으로 아이리스 두께의 2배로 하는 것이 적합하다. 즉,

$$e = 2t \quad (2)$$

아이리스 높이(d)는 위상 변화나 반사 특성에 가장 큰 영향을 주는 변수로써, 높이가 클수록 위상차가 증가한다. 일반적으로 아래 범위의 값을 많이 쓴다.

$$d = 0.01 \lambda_m - 0.10 \lambda_m \quad (3)$$

반사를 줄이기 위해 테이퍼 형태가 사용되는데, 종류로는 선형 테이퍼, sine 테이퍼, 지수함수 테이퍼 등이 있는데 반사를 가장 줄일 수 있는 형태는 지수함수 테이퍼이다.

아이리스 개수(N)는 일반적으로 12~24를 사용하

며 이중대역에서 동작하는 편파기를 설계하고자 할 경우 각 대역의 중심 주파수에서 두 모드의 위상차가 90°가 되도록 개수를 정한다.

도파관의 크기($a=b$)는 사용 주파수 대역에서 고차 모드를 차단하는 최대의 크기로 한다. 그 이유는 도파관 크기가 클수록 아이리스 주파수 특성 변화가 작기 때문이다. 도파관 크기는 아래의 두 식을 사용해서 결정한다.

$$a = 0.8 \lambda_m - 1.2 \lambda_m \quad (4a)$$

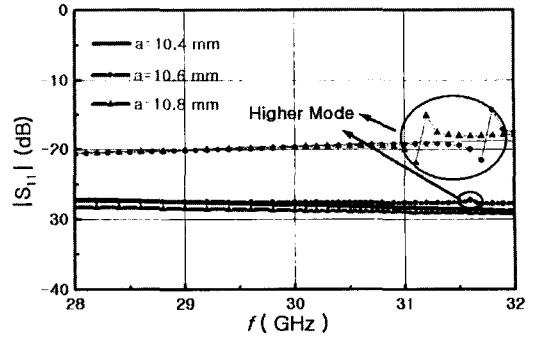
$$2a = \frac{c}{f_c} ; f_c = 0.7 f_{min} - 0.9 f_{min} \quad (4b)$$

여기서 c , f_{min} 은 각각 광속, 최저 사용 주파수이다.

2-2 편파기의 최적 설계

이제 20.8~21.0 GHz 대역과 30.6~31.0 GHz 대역에서 최적 특성을 가지는 아이리스 편파기의 최적 설계 과정을 살펴 보기로 한다. 우선 정사각형 도파관의 크기를 결정한다. 식 (4a)와 (4b)를 이용해서 일차적으로 도파관의 크기를 정한다. 동작 대역의 최저 주파수인 20.8 GHz의 0.7배인 14.56 GHz를 f_c 로 정하고 a 를 구해 보면, 10.3 mm 정도가 된다. 10.3 mm를 전후해서 도파관 크기를 변화시켜가면서 원하는 두 대역의 중심 주파수($f_1=21.0$ GHz와 $f_2=30.8$ GHz)에서 위상차가 90°에 가장 근접한 것과 전대역에서 고차 모드가 발생하는지 여부를 체크해서 가장 적당한 도파관 크기를 찾는다. 임의적으로 아이리스 두께 0.5 mm, 아이리스 개수 5개, 아이리스 높이 0.6 mm, 아이리스 간격 1 mm로 하여 Ansoft HFSS[®]를 이용하여 시뮬레이션을 해보면, 도파관 크기가 10.6 mm일 때부터 31.5 GHz 주위에 고차모드 (TE_{21})가 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 3은 도파관 크기에 따른 고차 모드 발생 정도를 보여준다. 상세한 시뮬레이션을 통해 도파관 크기가 10.4 mm일 때, 고차 모드가 발생하지 않으면서 원하는 두 대역에서 위상차가 가장 적다는 것을 알 수 있었다.

설계의 다음 단계는 아이리스의 두께를 결정하는 것이다. 식 (1)에서 제시한 범위 내에서 아이리스 두께를 결정한다. 아이리스 두께는 얇을수록 전체적인 반사 특성, 위상 특성 등을 조정하기가 쉬우므로, 제작성을 고려하여 가능한 얇은 수치를 택한다. 3차원



(굵은선 : 수평 모드 가는선 : 수직 모드)

그림 3. 도파관 크기에 따른 고차 모드 발생 유무
Fig. 3. Occurrence of higher-order modes versus waveguide size.

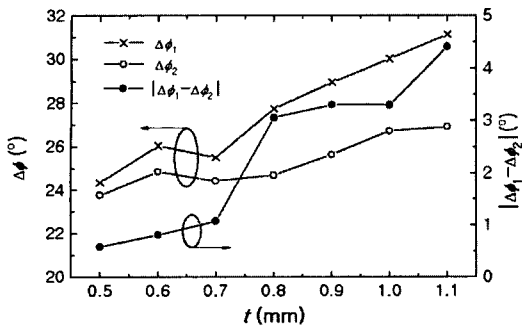
밀링 가공의 경우 아이리스 두께가 0.5 mm부터 1/10 mm씩 가공이 가능하므로, 아이리스 두께는 0.5 mm로 정하였다. 다른 설계치수도 가공성을 고려해서 1/100 mm 이내에서 설계를 한다.

다음 단계로 아이리스의 개수는 5개로 두고, $e=2t$, $d=0.05 \lambda_m$ 으로 놓고, 두 모드의 위상차가 $f_1=21.0$ GHz와 $f_2=30.8$ GHz의 두 주파수에서 같은 값이 되도록 t , e , d 를 다시 조정한다. 아이리스 간격은 아이리스 두께의 2배, 아이리스의 높이는 $0.05 \lambda_m$ 으로 두고, 원하는 두 대역의 중심에 그림 4는 각각의 변수에 따른 위상 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이, 시뮬레이션 결과 아이리스 두께는 0.5 mm, 아이리스 간격 1.74 mm, 아이리스 높이 0.6 mm 일 때 원하는 두 대역에서 위상차가 최소임을 알 수 있다. 표 1은 두 대역 중심 주파수에서 두 모드의 투과 위상차를 보인 것이다.

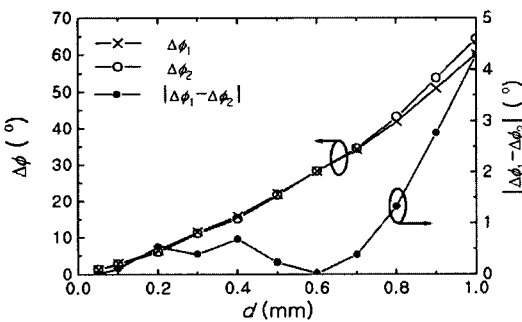
설계의 다음 단계는 두 모드의 위상차가 90°가 되도록 아이리스의 개수를 정하는 것이다. 예를 들어,

표 1. 각 대역에서의 두 모드의 투과 계수 위상차
Table 1. Difference in transmission phased of two modes at each band.

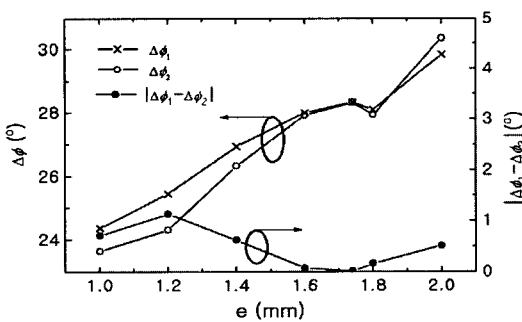
Tx 대역 주파수(GHz)	20.8	21.0	21.2
투과 위상차(도)	28.49	28.34	27.98
Rx 대역 주파수(GHz)	30.6	30.8	31.0
투과 위상차(도)	28.08	28.33	28.41



(a) 아이리스 두께
(a) Iris thickness



(b) 아이리스 높이
(b) Iris height



(c) 아이리스 간격
(c) Gap between iris

그림 4. 설계 변수에 따른 두 모드의 위상차
Fig. 4. Phase difference of two modes versus.

아이리스가 5개일 경우 두 모드의 위상차가 15° 이었다면, 90/15=6이므로, 전체 아이리스 개수는 5×6=30이 된다. 앞에서의 결과를 적용하면 아이리스 개수가 16개가 된다. 아이리스 개수를 16개로 증가시킨 결과는 아래의 표 2와 같다. 표 2에서 보는 바와 같이, 원하는 대역에서 두 모드의 투과계수의 위상차가 약 90°가 됨을 알 수 있다.

표 2. 아이리스 개수를 조정한 후 두 모드의 위상차
Table 2. Phase difference of two modes after adjusting the number of iris.

Tx 대역 주파수(GHz)	20.8	21.0	21.2
투과 위상차(도)	91.47	90.66	89.94
Rx 대역 주파수(GHz)	30.6	30.8	31.0
투과 위상차(도)	88.64	89.18	89.72

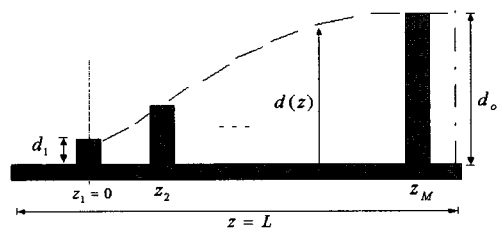


그림 5. 아이리스 편파기 수직단면 구조
Fig. 5. Vertical cross section of the iris polarizer.

편파기 설계의 다음 단계는 반사 특성을 개선하기 위해 아이리스 높이에 테이퍼를 주는 일이다. 본문에서는 다음 식에서와 같이 지수함수형 테이퍼를 사용해서 아이리스의 높이를 결정했다.

$$d(z) = d_1 \exp \left[\ln \left(\frac{d_o}{d_1} \right) \frac{z}{L} \right] \quad (5)$$

도파관 내의 반사 특성은 앞쪽의 아이리스 높이에 크게 영향을 받으므로 테이퍼를 주는 목적도 입출력 부분 아이리스 높이를 감소시키는데 있다. 도파관 내의 전체적인 아이리스의 체적만 변화하지 않는다면 이론적으로 투과 위상차는 변화가 없어야 한다. 반사 특성을 좋게 하기 위해선 앞쪽의 아이리스 높이가 낮을수록 좋겠지만, 가공성을 고려해서 0.2 mm 이상은 되어야 한다. 그림 6은 각 테이퍼 형태에 따른 반사 특성 변화를 보여주며, 지수함수형 테이퍼의 경우에 반사 특성이 가장 좋음을 알 수 있다.

편파기 설계의 최종 단계는 아이리스 테이퍼로 인해 두 모드의 위상차가 90°에서 벗어난 것을 아이리스 높이 d와 간격 e를 미세 조정하여 90°가 되게 하는 것이다.

III. 편파기의 제작 및 측정

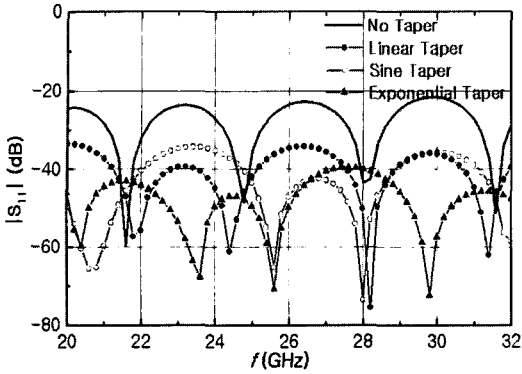


그림 6. 아이리스 테이퍼 형태에 따른 편파기의 반사 계수

Fig. 6. Reflection coefficient of the polarizer versus the type of iris taper.

위의 과정을 통해 Ka-대역 정사각형 아이리스 편파기를 설계하였다. 최종 설계된 아이리스 편파기의 아이리스 개수는 16개이고, 각 설계 치수는 그림 7과 같다. 설계된 편파기를 밀링 가공으로 제작하였다. 일체형 가공이 불가능하여 전체를 4등분(위 아이리스면, 아래 아이리스면, 오른쪽 옆면, 왼쪽 옆면)으로 나누어 제작을 하였다. 측정용 도파관 cal kit은 20.8~31.0 GHz를 모두 커버하는 WR-34를 사용했으며, 10.4×10.4 mm인 편파기 단면을 표준 도파관 WR-34와 연결시켜주는 변환부는 길이 70 mm로 설계하여 두 부분으로 제작했다. 제작된 편파기와 변환부는 그림 8과 같다.

제작된 편파기의 특성을 회로망 분석기를 사용하여 측정하였다. 그 결과는 그림 9와 그림 10에 표시하였다. 이 결과에서 보듯이 반사 계수가 전대역에 걸쳐 -30 dB 이하이며, 원하는 대역에서 투과 위상

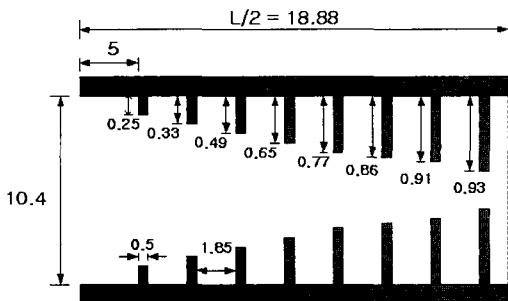


그림 7. 설계된 편파기 치수

Fig. 7. Dimensions of the designed polarizer.

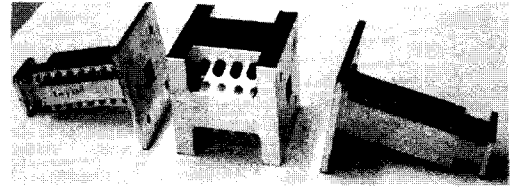
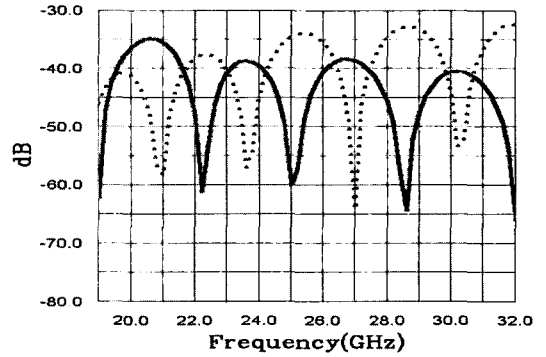
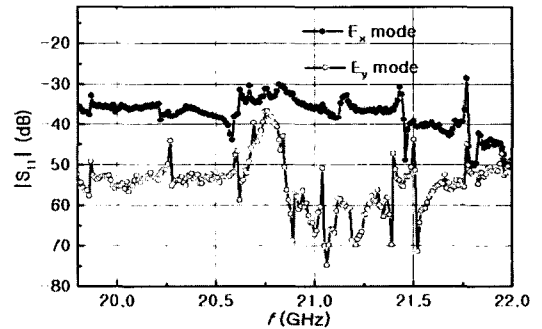


그림 8. 제작된 편파기와 도파관 변환부

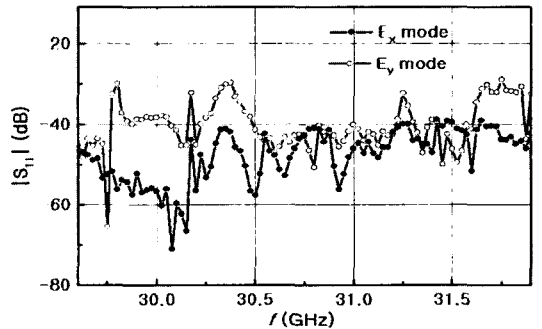
Fig. 8. Fabricated polarizer and waveguide transition.



(a)



(b)



(c)

그림 9. 제작된 편파기의 반사계수 (a) 이론치, (b)와 (c) 측정치

Fig. 9. Reflection coefficient of the fabricated polarizer. (a) simulation, (b) and (c) measurements.

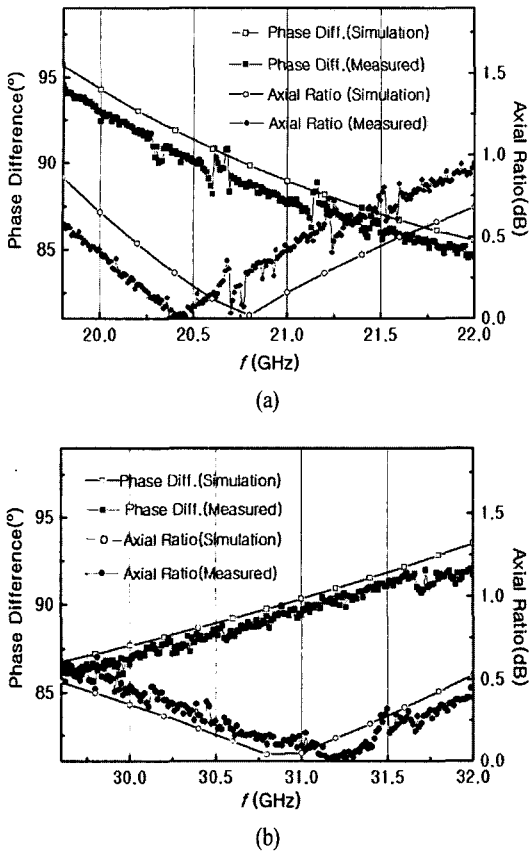


그림 10. 제작된 편파기의 위상차와 축비
Fig. 10. Phase difference and axial ratio of the fabricated polarizer.

차가 정확히 90°가 됨을 알 수 있다.
측정결과 위상차는 중심주파수인 21 GHz와 30.8 GHz 에서 약 2도 정도 오차가 있으며 축비는 원하는 대역에서 0.3 dB 이내이며, 반사손실은 30 dB 이하로 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이중 대역 안테나 피드용 정사각형 도파관 아이리스 편파기의 체계적인 설계기법을 제시하였다. 두 주파수 대역에서 편파기가 최적의 축비 특성을 가지도록 아이리스의 두께, 간격, 높이를 정하였다. 또한 편파기의 반사계수를 작게 하기 위해 아이리스의 높이를 지수함수 형태로 테이퍼지게 하였다. 설계 예로서 Ka-대역(20.8~21.2 GHz, 30.6~31 GHz)에서 0.3 dB 이하의 축비를 가지며 전

대역에서 -30 dB 이하의 반사계수를 가지는 양호한 특성의 편파기를 설계·제작·측정하여 설계기법의 타당성을 확인하였다. 본 논문의 결과는 위성 통신에 있어서 중요한 부품 중의 하나인 도파관 편파기 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. J. Simmons, "Phase shift by periodic loading of waveguide and its application to broad-band circular polarization", *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 3, no. 6, pp. 18-21, Dec. 1955.
- [2] R. W. Gruner, "Design procedure for a distributed reactance waveguide polarizer", *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, pp. 635-638, Jun. 1985.
- [3] J. M. Rebollar, J. de Frutos, "Dual-band compact square waveguide corrugated polarizer", *IEE 8th Int. Symp. on Antennas Propagat. Dig.*, vol. 2, pp. 962-965, Jul. 1999.
- [4] B. M. Park, P. Ramanujam, F. Boldissar, and C. Shin, "Sensitivity analysis of square waveguide iris polarizers", *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 1058-1061, Jun. 1994.
- [5] K. K. Chan, H. Ekström, "Dual band/wide band waveguide polarizer", *IEEE Asia-Pacific Microwave Conf. Dig.*, pp. 66-69, Dec. 2000.
- [6] U. Tucholke, F. Arndt, "Field theory design of square waveguide iris polarizers", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-34, no. 1, pp. 156-159, Jan. 1986.
- [7] J. M. Rebollar, "Broad-band corrugated polarisers using different kinds of corrugations", *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, pp. 639-642, Jun. 1985.
- [8] J. Bornemann, R. Vahldieck, "TE-to-x mode analysis of corrugated waveguide circular polarizers", *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, pp. 492-495, May 1990.
- [9] J. Bornemann, R. Vahldieck, "Characterization of a class of waveguide discontinuities using a modified TE_{mn}^x mode approach", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-38, no. 12, pp. 1816-1822,

Dec. 1990.

[10] G. A. E. Crone, N. Adatia, B. K. Watson, and N. Dang, "Corrugated waveguide polarizers for high performance feed systems", *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, pp. 224-227, Jun. 1980.

[11] J. Uher, J. Bornemann, and U. Rosenberg, *Waveguide Components for Antenna Feed Systems : Theory and CAD*, Boston: Artech House, 1993.

[12] T. Kitsuregawa, *Satellite Communication Antennas*, Boston: Artech House, 1990.

황 순 미



2001년 2월: 충북대학교 전파공학과 (공학사)
 2003년 2월: 충북대학교 전파공학과 (공학석사)
 2003년 2월~현재: 충북대학교 전파공학과 박사과정
 2003년 6월~현재: 전자부품연구원

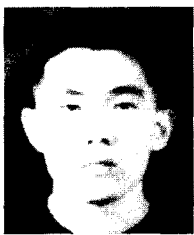
신뢰성평가센터 연구원
 [주 관심분야] RF 부품 및 안테나 설계, RF 부품 신뢰성, EMC 이론 및 신뢰성

윤 소 현



2000년: 충북대학교 전파공학과 (공학석사)
 2000년~현재: ETRI 통신위성개발센터 연구원
 [주 관심분야] 위성안테나, M/W

고 한 응



2004년 2월: 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부 (공학사)
 2004년 2월~현재: 충북대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나, 초고주파 회로

엄 만 석



1989년: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년~현재: ETRI 위성 RF 부품팀 선임연구원
 [주 관심분야] 위성안테나, RF 부품

박 동 희



1985년 2월: 청주대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
 1987년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 8월: 중앙대학교 전자공학과 (공학박사)
 1996년 12월~1998년 1월: Pennsylvania 주립대학교 전기공학과 Post Doc.

1992년 4월~현재: 충주대학교 전기전자정보공학부 교수
 [주 관심분야] 안테나 및 전자파 산란, EMI/EMC, 전자파 흡수

안 병 철



1981년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1983년 2월: 한국과학기술원 전기 전자공학과 (공학석사)
 1992년 12월: University of Mississippi, 전기전자공학과 (공학박사)

1983년~1986년: (주) 금성정밀 주임연구원
 1992년~1994년: 국방과학연구소 선임연구원
 1995년~현재: 충북대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] 전자파 응용, 안테나