

논문 2007-44TC-9-8

교차도파관 방향성결합기의 방향성 성능 개선

(Directivity compensation of crossed waveguide directional coupler)

김 동 현*, 양 두 영**

(Dong-Hyun Kim and Doo-Yeong Yang)

요 약

교차도파관 방향성결합기는 결합도가 증가함에 따라 방향성이 감소하는 특성을 갖고 있다. 본 논문에서는 교차도파관 방향성결합기의 방향성을 향상시킬 수 있도록 X형 슬롯 쌍의 구조 변수를 수정하고, 그에 따른 관계식을 제안하였다. 그리고 K밴드 주파수 대역에서 그 관계식을 토대로 설계된 교차도파관 방향성결합기는 WR42 도파관을 사용하여 제작하였다. 측정된 결과 WR42 주파수 대역인 18GHz ~ 26.5GHz에서 평균 결합도는 21.05dB, 방향성은 최소 23.9dB로 나타났다.

Abstract

The directivity of crossed waveguide directional coupler is generally decreased according as coupling coefficient of it increase. In this paper, the geometrical parameters of crossed slot pair for directivity improvement is modified and the formulas for design of it are proposed. The crossed waveguide directional coupler designed upon the formulas is fabricated with the WR42 waveguide in K-band. The measured results show that the coupling coefficient is 21.5 dB and directivity is minimum 23.9 dB over the operating frequency from 18GHz to 26.5GHz.

Keywords : Directivity, coupling coefficient, crossed waveguide directional coupler, WR42 waveguide, K-band

1. 서 론

교차도파관 방향성결합기(crossed waveguide directional coupler)는 고출력 신호원을 필요로 하는 레이더나 상업용 통신 장비에 주로 사용된다. 이 방향성결합기는 크기가 작고, 구조가 간단하기 때문에 다른 부품과 연결하여 복합 시스템을 구성함에 있어서 매우 편리하다. 대표적인 교차도파관 방향성결합기는 X형 슬롯(crossed slot) 쌍으로 구성된 방향성결합기와 원형 슬롯 쌍으로 구성된 방향성결합기 그리고 세 개의 원형 슬롯을 갖는 방향성결합기 등이 있다.^[1~4]

상업용 교차도파관 방향성결합기는 표준 구형도파관에서 사용되는 전체대역에서 결합도(coupling coefficient)의 변화량이 $\pm 1.0\text{dB}$ 이내이고, 방향성(directivity)은 최소 20dB를 요구한다. 그러나 기존의 제시되어 있는 3가지 방식의 방향성결합기는 결합도가 증가함에 따라 방향성이 최소 20dB 조건을 만족하지 못한다. 표준 구형도파관에서 사용되는 주파수 전 대역에서 결합도 특성을 만족시키면서 방향성을 증가시키는 방법은 표준 구형도파관의 협벽(narrow wall)을 줄임으로써 가능하다.^[2] 그러나 레이더와 같이 순간적으로 높은 전력을 전송시켜야 하는 시스템에 있어서 도파관의 협벽을 줄이면 관내의 아크방전에 따른 절연파괴 현상으로 인하여 부품 손상과 신호 왜곡을 가져올 수 있다. 또한 표준 구형도파관으로 신호가 왜곡 없이 잘 전달되기 위해서는 방향성결합기와 입출력 도파관 사이에 도파관 임피던스 변환기가 필요하게 된다. 따라서 추가적인 부품이 소요됨으로써 구조가 복잡하게 되고, 제조비가 증가하는 단

* 정회원, 제주대학교 통신공학과
(Department of Telecommunication Engineering,
Cheju National University)

** 정회원, 제주대학교 공과대학 첨단기술연구소
(Research Institute of Advanced Technology,
Cheju National University)

접수일자: 2007년4월9일, 수정완료일: 2007년9월6일

점을 갖게 된다.^[5] 큰 결합도를 유지하면서 방향성을 증가시키는 또 다른 방법은 다중 홀(multi-hole)을 교차되는 도파관 벽면에 2열로 나란히 배열하는 것이다. 협벽 다중 홀 방향성결합기(narrow wall multi-hole directional coupler)는 사용 주파수 전대역에서 25dB에서 30dB 정도의 방향성을 가지며, 광벽 다중 홀 방향성결합기(broad wall multi-hole directional coupler)는 35dB에서 40dB 정도의 방향성을 갖는다.^[6] 그러나 이러한 형태의 방향성결합기는 X형 슬롯 쌍으로 구성된 교차도파관 방향성결합기와 비교하여 설계하고 제작하기가 매우 어렵다.

본 논문에서는 표준 도파관을 사용하는 교차도파관 방향성결합기의 접촉면에 놓여 있는 X형 슬롯 쌍 간의 이격된 길이와 슬롯의 제원을 조정함으로써 방향성 성능을 개선할 수 있는 구조를 제안한다.

본 논문은 II장에서 교차도파관 방향성결합기의 기존 연구 결과에 대하여 간단히 논하고, 방향성을 개선하기 위하여 제안한 구조에 대하여 해석하고, III장에서는 앞 절 해석을 토대로 교차도파관 방향성결합기를 모의시험을 통하여 설계한다. IV장에서는 이에 대한 제작 결과를 살펴보고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 교차도파관 방향성결합기의 해석

그림 1은 교차도파관 방향성결합기의 대표적인 형상을 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 X형 슬롯 쌍을 갖는 방향성결합기를 나타낸 것이며, 일명 Moreno 교차도파관 방향성결합기라 한다. 이러한 형태의 방향성결합기는 도파관의 접촉면에 있는 X형 슬롯의 폭(w_s), 길이(l_s), 슬롯 모서리의 가공 지름(r) 그리고 슬롯 쌍 간의 사선방향 이격거리($\lambda_g/4$)와 같은 구조변수 값에 따라 결합도와 방향성이 결정된다.^[1~3] 여기서 가공 지름은 가공장비의 가공 공구에 의하여 반드시 발생되고, 아크방전을 이용하는 가공법에서는 발생하지 않는다. 방전가공법은 전극 가공공정 이외에 형상가공 공정과정이 추가되므로 제작비용이 증가되어 자주 사용되지 않는다. 그리고 λ_g 는 구형도파관 내의 전파모드에 따른 관내 파장이다. 그림 1(b)는 그림 1(a)의 X형 슬롯 쌍의 위치에 원형 홀 쌍이 대치된 형태의 방향성결합기를 나타낸 것이다. 이 방향성결합기의 원형 홀의 직경은 d_1 이며, 홀 쌍 간의 이격거리는 $\lambda_g/4$ 이다. 방향성결합기의 특성은 홀의 직경과 홀 쌍 간의 이격거리에 의해서

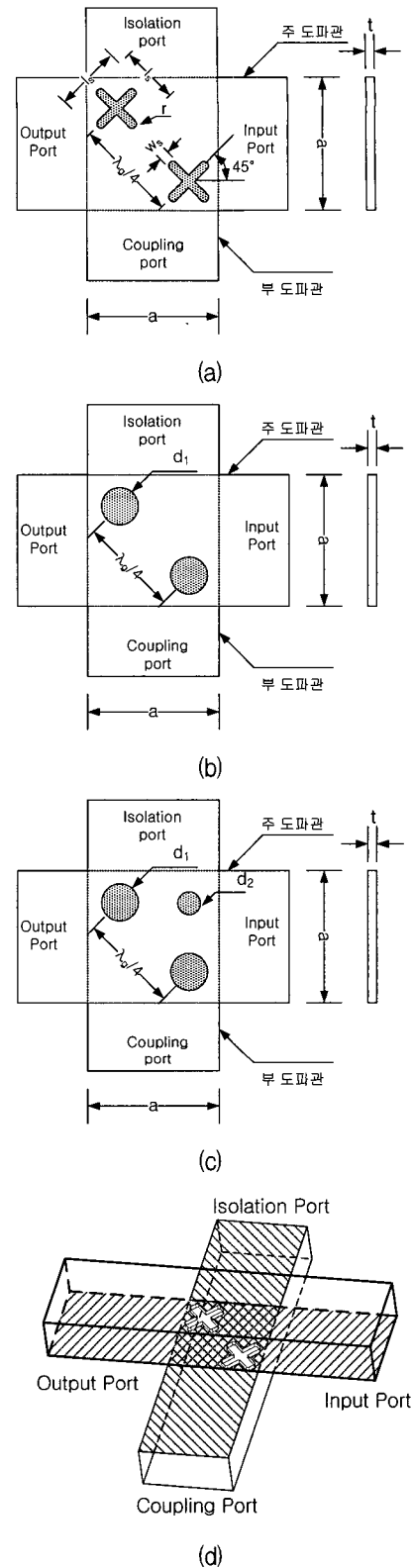





그림 1. 일반적인 교차도파관 방향성결합기
(a) X형 슬롯 쌍 (b) 원형 홀 쌍
(c) 세 개의 원형 홀 (d) 입체도

Fig. 1 Geometry of crossed waveguide directional coupler.
(a) crossed slot pair (b) circular slot pair
(c) three circular slot (d) solid geometry

좌우된다. 그러나 이 방향성결합기는 홀 결합구조의 특성으로 인하여 X형 슬롯 쌍으로 구성된 방향성결합기보다 결합도와 방향성이 떨어진다. 그림 1(c)에 나타낸 세 개의 원형 홀로 구성된 방향성결합기는 그림 1(b)의 구조에 직경 d_2 를 갖는 작은 원형 홀이 모서리 방향에 하나 더 위치해 있다.^[4] 즉 큰 원형 홀 쌍의 위치한 선상에서 시계방향으로 90도 회전한 위치에 직경 $d_2 = 2d_1/3$ 을 갖는 작은 홀 하나가 더 구성된 형태이며, 이 홀의 구조변수 값으로부터 결합기 특성이 결정된다.^[1] 그림 1(d)는 X형 슬롯 쌍을 갖는 교차도파관 방향성결합기의 입체도를 나타낸 것이다. 빗금 은 입출력 단자를 갖는 주도파관의 바닥면을 나타내고, 빗금 은 결합 단자와 아이솔레이션 단자를 갖는 부도파관의 윗면을 나타낸다. 또한 빗금 은 주도파관(main-waveguide)의 바닥면과 부도파관(sub-waveguide) 윗면이 접한 접촉면을 나타낸다. 상기에서 언급한 슬롯은 주도파관과 부도파관이 접촉면에 형성되며, 두개의 도파관 간의 에너지 결합은 슬롯 쌍을 통해 이루어진다. WR42 도파관 규격 내에서 결합도가 20dB인 일반적인 교차도파관 방향성결합기의 주파수 범위는 18GHz ~ 26.5GHz이다. 기존의 20dB 교차도파관 방향성결합기는 다음의 설계 식으로부터 얻는다.^[1]

$$\frac{w_s}{a} = 0.072 \tag{1}$$

$$\frac{t}{a} = 0.04 \tag{2}$$

$$\frac{l_s}{a} = 0.4515 \tag{3}$$

식 (1)~(3)은 표준 구형도파관 구조에서 20 dB 결합도를 만족하는 방향성결합기를 설계하기 위하여 공식화된 수식이며, 이 설계 공식을 이용하면 44% 범위의 사용주파수 대역에서 결합도 특성이 만족된다.^{[1][2]} 또한 설계된 방향성결합기는 결합도 변화량이 최대 ± 1.0 dB 값을 갖는다. 그리고 슬롯 쌍 간의 거리를 조정함으로써 구형도파관이 사용 가능한 주파수 전 대역에서 상기 조건을 만족할 수 있으나, 방향성 성능은 13dB 이하로 감소한다.

그림 2는 결합도와 방향성을 크게 개선하기 위해 본 논문에서 제안한 교차도파관 방향성결합기의 구조를 나타낸 것이다. 여기서 우향사선(/)은 왼쪽 아래에서 오른쪽 위로 향하는 대각선을 가리키며, 좌향사선(\)은 왼쪽

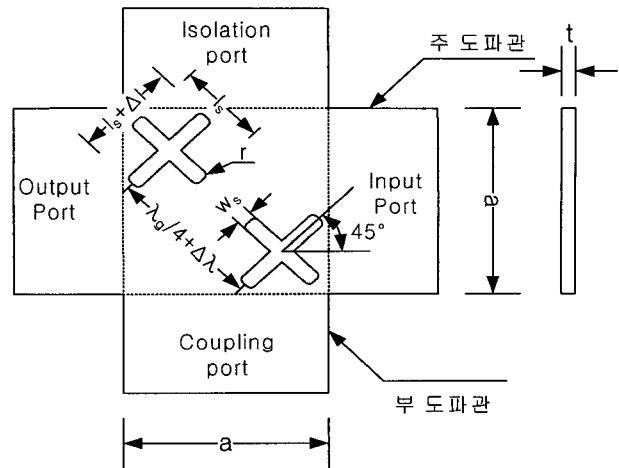


그림 2. 제안한 방향성결합기의 슬롯 구조
Fig. 2. Slot geometry of proposed directional coupler.

쪽 위에서 오른쪽 아래로 향하는 대각선을 가리킨다. 교차도파관 방향성결합기는 일반적으로 결합도가 증가함에 따라 방향성은 감소한다. 그림 2에서 교차도파관의 접촉면 중심을 기준으로 주도파관의 방향과 반시계 방향으로 45도 기울어진 대각선상에 X형 슬롯 쌍이 놓여 있으며, 슬롯 쌍 간의 거리는 $\lambda_g/4 + \Delta\lambda$ 이다. 그리고 X형 슬롯의 두께는 t , X형 슬롯을 형성하는 좌향 사선슬롯의 길이는 l_s 이고, 우향 사선슬롯의 길이는 $l_s + \Delta l$ 이다. 여기서 $\Delta\lambda$ 와 Δl 는 방향성결합기의 결합도와 방향성을 개선하기 위하여 설정한 변수이다. 표 1은 본 논문에서 방향성 성능 개선을 위하여 구조의 변수를 간략히 설명한 것이다.

그림 3은 유한적분법(FIM)을 사용하는 Microwave Studio를 사용하여 슬롯 쌍 간의 이격거리를 $\lambda_g/4 + \Delta\lambda$ 값으로 보정한 후, X형 슬롯의 우향 사선슬롯 길이 ($l_s + \Delta l$) 변화를 해석하고, 그에 따라 결합도와 아이솔레이션 및 방향성 특성을 나타낸 것이다. 동일한 사선슬롯 길이를 갖는 X형 슬롯과 비교하였을 때, 우향 사선슬롯 길이가 좌향 사선슬롯 길이보다 짧아지는 경우에는 방향성이 개선되지 않으며, 길어지는 경우에는 방향성이 개선되다가 특정 값 이후부터는 다시 감소된다. 따라서 방향성결합기의 방향성은 좌향 사선슬롯의 길이가 고정되어 있고, 우향 사선슬롯의 길이가 특정한 $\Delta\lambda$ 만큼 증가하였을 때 개선된다.

그림 3의 결과를 토대로 교차도파관 방향성결합기의 설계 조건식을 표준 도파관 사용 대역에 적합하도록 정의하면 다음과 같다.

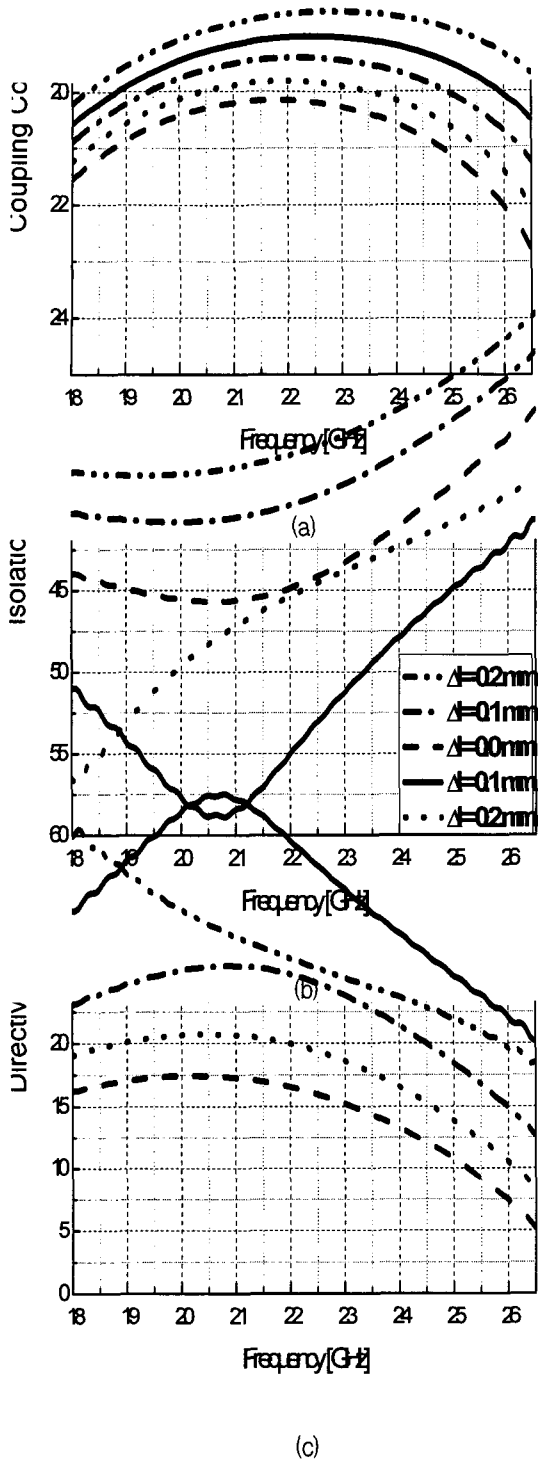


그림 3. MWS를 사용하여 Δl 의 변화에 따른 K밴드 방향성결합기 해석; (a) 결합도, (b) 아이슬레이션, (c) 방향성

Fig. 3. The simulation results about K-band directional coupler related to Δl ; (a) coupling coefficient, (b) isolation, (c) directivity.

$$\frac{w_s}{a} = 0.1072 \tag{4}$$

$$\frac{t}{a} = 0.04 \tag{5}$$

표 1. 교차도파관 방향성결합기의 구조 변수
Table 1. Geometric parameters of crossed waveguide directional coupler.

a	구형도파관의 폭
b	구형도파관의 높이
l_s	슬롯의 길이
Δl	슬롯 길이의 변화량
w_s	슬롯의 폭
t	슬롯의 두께
λ	관내 파장
$\Delta \lambda$	결합도 보정 거리

$$\frac{\Delta l}{a} = 0.0087 \tag{6}$$

$$\frac{l_s}{a} = 0.4462 \tag{7}$$

$$\frac{r}{a} = 0.0234 \tag{8}$$

식 (6)과 (7)은 20dB 방향성결합기에 최적화되어 있다. 식(7)에서 $l_s/a > 0.4724$ 인 경우, 표준 구형도파관에서 사용 가능한 주파수 대역 중 상측 부분의 대역에서 공진이 발생하여 제반특성이 급격히 나빠지는 변화가 발생된다. 따라서 표준 구형도파관에서 사용 가능한 전체 대역을 포함하도록 교차도파관 방향성결합기를 설계하기 위해서는 X형 슬롯의 길이 l_s/a 를 0.4724 보다 작은 조건에서 고려하여야 한다. 상기의 결과는 통상적인 방법에서 방향성이 최소 20dB가 나오지 않을 때 사용할 수 있으며, 결합도가 20dB 이상 큰 경우에 적용한다.

III. 교차도파관 방향성결합기 설계

표 2의 결과는 WR42 표준 구형도파관을 가지고, 제안된 관계식 (4)~(8)을 적용하여 교차도파관 방향성결합기를 설계한 것이다. 설계에 사용된 WR42 도파관은 내부 치수가 폭 10.668mm 이고, 높이가 4.318mm 이다. 계산된 교차도파관 방향성결합기의 설계 제원들은 식 (4)~(8)로부터 얻은 근사 값이며, X형 슬롯의 두께는 0.5mm 이다. X형 슬롯의 두께와 관련하여 결합도에 미치는 영향은 두께가 증가하면 결합도가 감소하며, 두께가 감소하면 결합도는 증가한다. X형 슬롯의 폭은 1.15mm이며, 짧은 방향으로 놓인 좌향 사선슬롯의 길

표 2. 교차도파관 방향성결합기의 설계 치수

Table 2. The design dimension of crossed waveguide directional coupler.

[unit : mm]

	X형 슬롯 보상 전	X형 슬롯 보상 후
a	10.668	10.668
b	4.318	4.318
l_s	4.7	4.7
Δl	0	0.1
w_s	1.15	1.15
r	0.25	0.25
t	0.5	0.5
$\lambda_g/4$	4.344	4.344
$\Delta\lambda$	-0.427	-0.427

이는 4.7mm이고, 긴 방향으로 놓인 우향 사선슬롯의 길이는 4.8mm이다. 교차도파관 방향성결합기를 구성하는 주도파관과 부도파관의 전체 길이는 60mm로 선정한다. X형 슬롯의 가변길이 Δl 값이 0.1mm일 때, 설계된 방향성결합기의 사용 주파수 전 대역에서 결합도는 20dB 이상이고, 결합도 변화량은 ± 0.8 dB, 방향성은 20dB임을 알 수 있다.

IV. 측정 및 결과

알루미늄 재를 사용하여 표준 구형도파관 규격인 WR42 도파관 크기를 상측 부품용 각재와 하측 부품용 각재에 각각 가공을 하고 위치 고정용 가이드 핀 홀 및 조립을 위한 홀 및 탭 가공을 한다. 결합벽 가공을 위해 0.5mm 두께의 판재에 십자홀과 가이드 핀 홀 및 고정용 홀을 가공한다. 가공이 종료된 후, 가공물에 대한 기구검사와 조립성 검사를 하고, 5 μ m 두께로 은도금을 한다.

그림 4는 제작된 방향성결합기의 사진을 나타낸 것

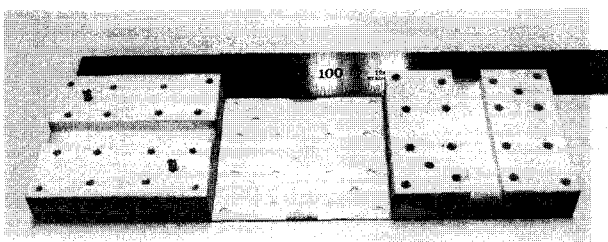


그림 4. 제작된 교차도파관 방향성결합기
Fig. 4. The fabrication result of crossed waveguide directional coupler.

표 3. 교차도파관 방향성결합기의 제작 치수

Table 3. The fabrication dimension of crossed waveguide directional coupler.

[unit : mm]

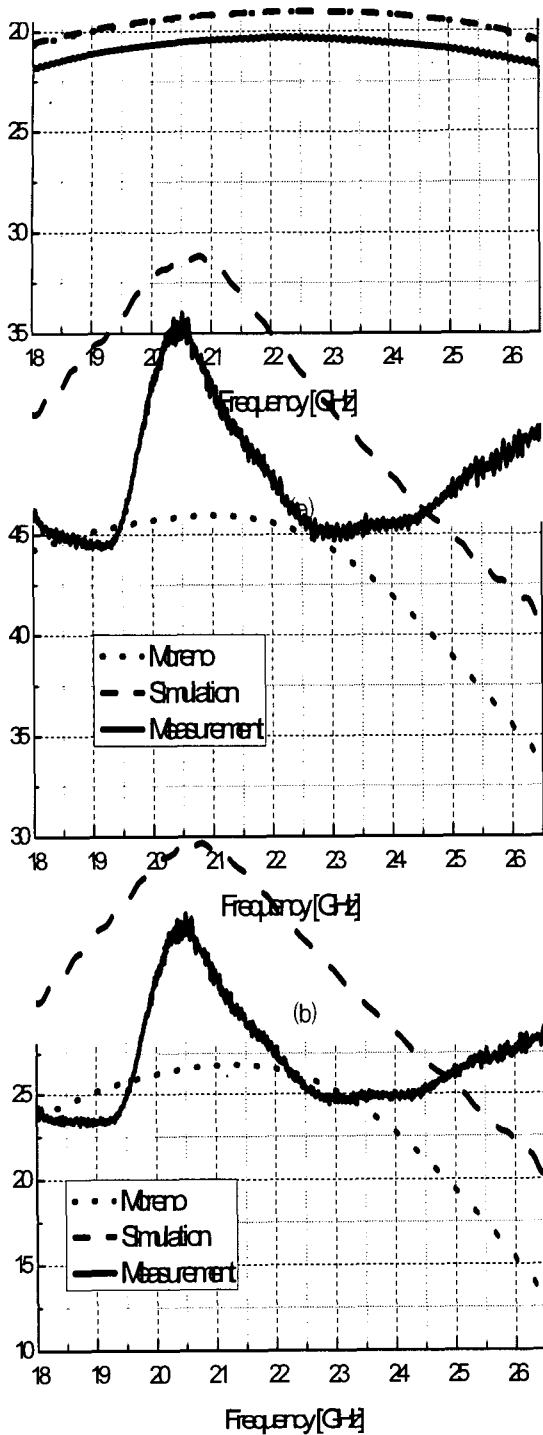
	제작 도면 치수	제작 후 치수
a	10.668	10.67
b	4.318	4.32
l_s	4.7	4.67
$l_s + \Delta l$	4.8	4.79
w_s	1.15	1.16
r	0.25	0.26
t	0.5	0.52
$\lambda_g/4 + \Delta\lambda$	3.917	3.91

이다. 제작된 방향성결합기의 전체 크기는 60mm×60mm×25mm이다. 제작과정에서 가공에 대한 최대 허용 오차는 ± 0.03 mm이다. 그리고 표 3은 가공 후 기구구조 측정 결과이다.

제작된 교차도파관 방향성결합기의 WR42 도파관의 내부 크기는 10.67mm×4.32mm이다. X형 슬롯의 폭은 1.12mm이며, X형 슬롯의 길이 l_s 는 4.67mm, Δl 은 0.12mm이다. X형 슬롯 끝부분의 곡면지름은 0.25mm, X형 슬롯의 두께는 0.52mm이다. X형 슬롯 간의 이격거리인 $\lambda_g/4$ 는 4.34mm, $\Delta\lambda$ 는 -0.43mm이다.

그림 5는 방향성결합기의 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림 5에서 점선은 기존의 Moreno 방향성결합기의 특성이고, 분선은 제안된 방향성결합기의 모의시험 결과 그리고 실선은 제작된 방향성결합기의 측정결과를 나타낸 것이다. 제작물의 제작공차를 측정하기 위하여 DUKIN사의 3차원 구조 측정기기인 ASTRO-543C를 사용하였고, 전기적 성능 측정은 Agilent사의 PNA-L 벡터 회로망 분석기를 사용하였으며, 도파관 캘리브레이션(calibration) 키트는 Flann사의 20703을 사용하였다.

캘리브레이션 완료 후, 방향성 결합기에 대한 측정 순서는 3단계로 나누어 진행된다. 먼저 삽입손실과 반사손실을 측정하기 위하여 아이솔레이션 단자와 결합단자는 도파관 종단기를 사용하여 종단을 시킨 후, 입력단자와 출력단자를 계측기에 연결하여 측정한다. 두 번째 단계에서는 결합도를 측정하기 위하여 출력단자와 아이솔레이션 단자를 종단시키고 입력단자와 결합단자를 계측기에 연결하여 측정한다. 마지막 단계에서는 아이솔레이션을 측정하기 위하여 결합도 측정과 반대로 결합단자와 출력단자를 종단시키고, 입력단자와 아이솔



(c)

그림 5. 교차도파관 방향성결합기의 측정결과
(a) 결합도, (b) 아이솔레이션, (c) 방향성

Fig. 5. The test results of crossed waveguide directional coupler (a) coupling coefficient, (b) isolation, (c) directivity.

레이션 단자를 계측기에 연결하여 측정한다. 결합도는 아이솔레이션 값에서 결합도를 제한 값이다.

그림 5의 특성을 살펴보면, 설계된 방향성결합기의 결합도는 22.59GHz에서 최대가 되고, 그 때의 결합도는 19.06dB이다. 그리고 방향성이 최대가 되는 주파수는 20.8GHz이고, 방향성은 39.6dB이다. 그러나 제작된 방향성결합기의 결합도는 22.25GHz에서 최대가 되고, 그 때의 결합도는 20.3dB이다. 또한 방향성이 최대가 되는 주파수는 20.51GHz이고, 방향성은 35.5dB이다. 제작 오차에 의하여 결합도가 낮은 주파수 방향으로 0.34GHz 이동하였으며, 방향성 또한 낮은 주파수 방향으로 0.29 GHz 이동하였다. 그림 5의 모의시험 결과와 측정결과가 차이가 발생한 것은 제작과정에서 오류가 일부 포함되었기 때문이다. 가장 큰 문제는 0.5t의 판재, 상측 자재와 하측 자재에 대한 가공시 버(burr)와 면 평탄도에 의한 것이다. 버는 가공시에 가공물의 모서리에서 나타나며 가공공구에 발생하는 것으로 버 없이 가공하는 것은 불가능하다. 그리고 면 평탄도의 문제는 자재를 잡아주는 바이스(vise)에 의하여 나타난다. 즉 자재의 양 측면에 압력을 받게 되면서 이 압력에 의해서 자재에 배울림 현상이 나타나게 되고, 이로 인해 면이 판재와 접합되는 부분에서 아래로 볼록하거나 위로 볼록한 면이 생성되어 틈이 생긴다. 이 틈으로 인하여 방향성 결합기의 전파가 지나가는 경로에서 원하지 않는 분포형 서셉턴스(susceptance)가 나타난다. 결국 이 서셉턴스에 의하여 설계결과와 측정결과가 차이를 갖게 되었다. 그러므로 이러한 버를 최소화 하고, 배울림 현상을 줄이기 위해서는 가공장비와 작업자의 숙련도가 밀접한 관련이 있으므로 작업자와 지속적인 교류를 통해 개선해 나가야 한다.

그림 5의 결과를 토대로 기존에 발표된 Moreno 방향성결합기와 논문에서 제안한 방향성결합기의 특성을 비교하면 결합도는 크게 달라지지 않지만 방향성은 7dB 이상 향상된다. 따라서 제안된 방향성결합기는 기존의 방식보다 결합도와 방향성 측면에서 모두 양호하다.

V. 결 론

본 논문에서는 결합도가 크면 방향성이 감소되는 특성을 개선한 교차도파관 방향성결합기의 슬롯 구조를 제안하였다. 제작된 방향성결합기는 가공 오차에 의해 결합도는 다소 낮아졌으나 방향성은 개선된 결과를 확인할 수 있다. 이를 구성하는 X형 슬롯 쌍의 설계제원을 보정함으로써 기존의 방향성결합기보다 방향성을 7dB 이상 개선되었다. WR42 표준 구형도파관을 사용

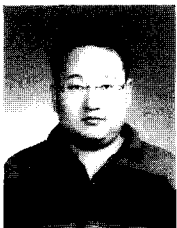
하여 제작된 교차도파관 방향성결합기는 사용 가능한 주파수 대역이 18GHz~26.5GHz 범위이고, 광대역에 걸쳐 양호한 결합도와 방향성을 갖는다. 제작결과 통과대역 내에서 평균 결합도는 21.05dB이고, 방향성은 최소 23.9dB 이상을 유지한다.

본 논문에서 제안한 방향성결합기는 방향성결합기를 구성하는 슬롯의 일부 형상을 바꿔 줌으로써 결합도와 방향성을 크게 향상시킬 수 있었으며, 제작과정은 어렵지만 제반특성이 양호한 다중 슬롯 도파관 방향성결합기를 대체할 품목으로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T. S. Saad, R. C. Hansen and G. J. Wheeler, *Microwave Engineer's Handbook*, Artech House, 1971.
- [2] J. A. R. Ball and T. M. Sulda, "Small aperture crossed waveguide broad-wall directional couplers," *IEE Proceeding of Microwave Antenna Propagation*, vol. 147, no. 4, pp. 249-254, August 2000.
- [3] P. Meyer and J. C. Kruger, "Wideband crossed guide waveguide directional couplers," *IEEE Microwave Symposium Digest*, vol 1, pp. 253-256, Jun 1998.
- [4] 강광희, "도파관용 방향성결합기," 공개특허 10-2000-0029005.
- [5] R. Z. Gerlack, "10dB XL cross guide coupler," *IEEE Transaction on Microwave Theory & Techniques*, vol. 9, no. 6, pp. 571, May 1961.
- [6] S. B. Cohn, R. Levy, "History of microwave passive components with particular attention to directional couplers," *IEEE Transaction on Microwave Theory & Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1046-1054, Sep 1984.

저 자 소 개



김 동 현(정회원)
 1997년 제주대학교
 통신공학과 학사 졸업.
 1999년 제주대학교
 통신공학과 석사 졸업.
 2006년 제주대학교
 통신공학과 박사 수료.

1999년 ~ 2007년 (주)엑티페이스 선임연구원
 <주관심분야 : RF&Microwave 회로, 수치해석, Clustering Computing>



양 두 영(정회원)
 1984년 제주대학교
 통신공학과 학사졸업.
 1989년 한양대학교
 전자통신공학과 석사졸업.
 1992년 한양대학교
 전자통신공학과 박사졸업.

1992년~현재 제주대학교 통신컴퓨터공학부
 통신공학전공 교수
 <주관심분야 : RF 회로 및 RFID, 이동통신, 위성 통신>