

영상레이더용 이중편파 도파관 슬롯 안테나 설계

Design of Dual-Polarized Waveguide Slot Array Antenna for Synthetic Aperture Radar

이 동 우*

Yi, Dong-Woo

ABSTRACT

In this paper, the waveguide slot array antenna which is capable of wide beam steering and dual polarization is designed for an X band synthetic aperture radar. In order to improve the restriction of beam steering range and to remove the butterfly lobes, a typical waveguide slot array antenna has been modified. To implement dual polarization, rod excited waveguide slot elements and ridge waveguide slot elements are alternately arranged. Location of slots, inclination of rod and offset distance of slots are determined on using array characteristic and conductance constant with radiating power on slots. The designed antenna is manufactured and measured with Near-field measurement method.

주요기술용어(주제어) : 로드 여기식 도파관 슬롯, 릿지 도파관 슬롯, 도파관 슬롯 배열소자, 컨덕턴스, 배열 특성, 근접 전계 측정법, 넓은 면 오프셋 도파관 슬롯, 좁은 면 경사 도파관 슬롯

1. 머리말

도파관 슬롯 배열 안테나는 초고주파 통신 및 레이더용 안테나로 널리 사용된다. 도파관이라는 기구적으로 견고한 구조를 사용하기 때문에 특별한 기계 구조물을 사용하여 안테나를 지지할 필요 없이 안테나 만으로도 좋은 구조물이 되며, 알루미늄과 같은 재질을 사용하여 매우 가볍게 만들 수 있다. 또한 큰 전력 핸들링이 가능하여 취급 전력이 크며 도파관 내부가 공기로 채워지므로 공진형 구조로 구현하면 손실

이 매우 적은 장점이 있다. 이와 같은 장점을 이용해 많은 형태의 도파관 배열 안테나가 설계 및 제작되어 활용되고 있으며 대표적으로는 넓은 면 오프셋 슬롯 도파관 배열 안테나와 좁은 면 경사 슬롯 도파관 배열 안테나가 있다^[1,5].

영상레이더(SAR : Synthetic Aperture Radar)에 사용되는 도파관 형태의 안테나는 좁은 면이나 넓은 면에 슬롯을 가공하여 슬롯들을 복사소자로 이용하는 단일 편파 안테나를 주로 사용하여 왔다^[3].

최근 다양한 정보 수집의 필요성에 의해 이중편파를 통한 정보 수집의 요구가 증가함에 따라 넓은 면 슬롯과 좁은 면 슬롯을 함께 사용하는 방안이 필요하며 다양한 영상모드를 통한 정보 수집을 위해 광역 빔조향 요구가 증가하고 있다. 도파관 슬롯 복사소자

† 2008년 4월 3일 접수~2008년 5월 16일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

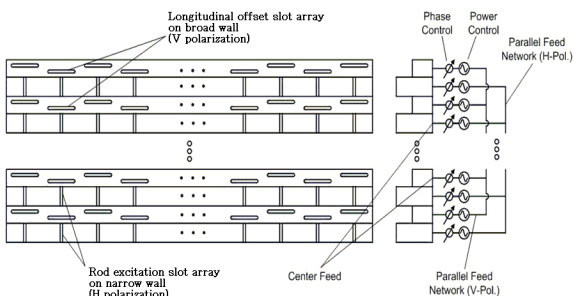
주저자 이메일 : fullace111@paran.com

를 이용한 이중편파에 대한 기능적 구현은 넓은 면 슬롯과 좁은 면 슬롯을 함께 사용하여 구현할 수 있다^[5]. 그러나 좁은 면 경사 슬롯 안테나는 주기적인 경사 슬롯의 기하학적인 요인으로 인한 나비 부엽(Butterfly lobe)로 인해 빔 조향의 범위가 제한적이다^[9]. 또한 이중 편파를 위해 도파관의 넓은 면을 함께 사용할 경우 각 편파 간 소자 간격이 지나치게 커져 빔 조향 범위 내에서 그레이팅 로브가 발생하는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 좁은 면 경사 슬롯 대신 로드 여기식 방법을 사용하여 비 경사 슬롯을 도파관의 좁은 면에 가공을 하였으며, 넓은 면 도파관 슬롯 내부에 릿지를 삽입하여 도파관의 넓은 면을 축소하여 소자 간격을 충분한 빔 조향이 가능하도록 설계하였다^[1].

본 논문에서는 복사소자들의 배열 특성과 복사소자에서 복사되어야 할 에너지에 따른 컨덕턴스 값을 이용하여 로드 여기식 도파관과 릿지 도파관의 슬롯 위치, 로드의 기울기와 슬롯의 오프셋 간격을 구하여 X-대역 영상레이더용 이중편파 위상 배열 안테나의 배열소자를 설계하였다.

2. 본 론

그림 1은 본 논문에서 제안한 고각 방향으로 광역 빔 조향이 가능한 이중편파 도파관 슬롯 배열 안테나의 구성이다.

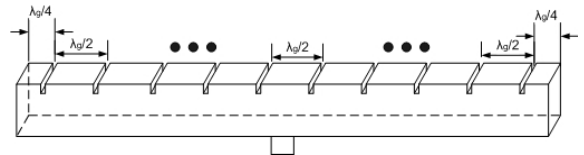


[그림 1] 이중편파 도파관 슬롯 배열 안테나 구성

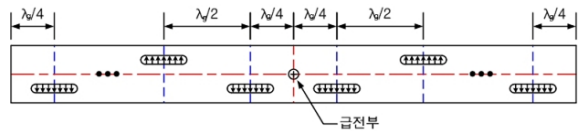
릿지를 사용한 넓은 면 오프셋 도파관 배열소자는 수직 편파를 지원하며 로드 여기를 이용해 비경사 슬

롯을 사용한 좁은 면 도파관 배열소자는 수평 편파를 지원한다. 급전부는 수동 복사소자의 고각 방향 빔 조향을 위한 개념적인 구성을 보여주며 중앙 급전 방식을 사용하였다.

그림 2는 설계된 로드 여기식 도파관 슬롯 배열소자와 릿지 도파관 슬롯 배열 소자의 구조를 나타낸다.



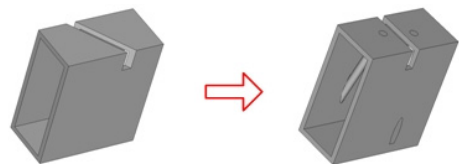
(a) 로드 여기식 도파관 슬롯 배열소자



(b) 릿지 도파관 슬롯 배열소자

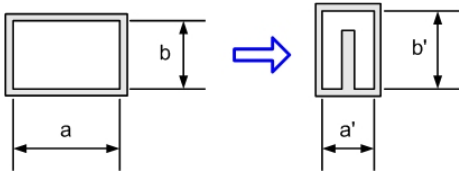
[그림 2] 슬롯 배열소자의 구조

그림 2 (a)에서 나타낸 로드 여기식 도파관 슬롯의 각 슬롯은 그림 3과 같이 통상적인 좁은 면 경사 슬롯을 슬롯 양 옆에 로드를 삽입하는 구조를 사용하여 비경사 슬롯이 되도록 설계하였다. 그림 2 (b)는 넓은 면 오프셋 슬롯과 구조가 동일하나 그림 4와 같이 도파관의 넓은 면을 릿지 형태의 도파관을 사용하여 도파관의 넓은 면의 길이를 줄임으로써 빔 조향 범위의 제한을 제거하였다.



[그림 3] 로드 여기식 슬롯 구조

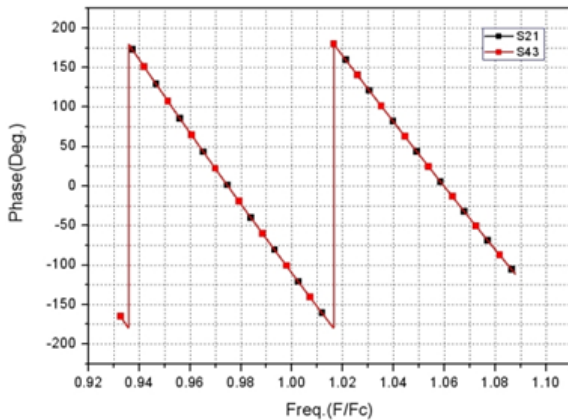
이중 편파 구현을 위해 로드 여기식 배열소자와 릿지 도파관 배열소자를 교차로 구성할 경우 안테나 배열 간격은 빔 조향 범위를 고려해야 하며 배열 간격은 식 (1)을 이용하였다.



[그림 4] 릿지 도파관 구조

$$d < \frac{\lambda_{\min}}{1 + \sin\theta_{\max}} \quad (1)$$

여기서 d 는 배열간격, λ_{\min} 은 주파수 대역폭 내 최소 파장, θ_{\max} 는 최대 빔 조향 범위이다. 도파관의 최소 파장에 의해 도파관의 크기가 결정이 되며 최대 빔조향 범위를 만족하기 위한 슬롯의 간격을 구할 수 있다. 로드 여기식 도파관과 릿지 도파관을 교차로 배열하여 쌍으로 사용하며 영상레이더에서 편파 차이를 통한 정보획득을 위해서는 동일한 안테나 성능과 각 편파 간 위상 일치가 요구되므로 두 도파관의 관내 파장을 동일하게 맞추어야 한다.

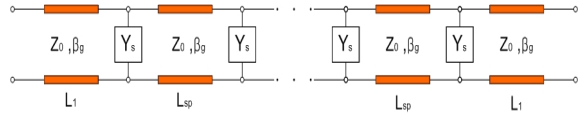


[그림 5] 관내 파장 위상 비교

그림 5는 두 도파관의 관내 파장을 비교한 것이다. S_{21} 은 릿지 도파관의 S-파라미터 특성이며, S_{43} 은 로드 여기식 도파관의 S-파라미터 특성이다.

두 도파관의 관내파장을 일치시키기 위해 로드 여기식 도파관의 도파관 넓은 면 폭과 릿지 도파관의 배열소자의 도파관의 높이 및 릿지 높이를 조정하면서 두 도파관이 동일한 위상을 갖도록 하였다. 두 슬

롯 배열소자의 슬롯 위치는 복사량이 최대가 되도록 정재파의 최대 위치가 되는 지점이며 슬롯 사이의 간격은 관내 파장의 반이 되도록 하여 각 슬롯의 위상이 동위상이 되도록 하였다.



[그림 6] 슬롯 배열소자의 등가회로

슬롯 배열소자는 그림 6과 같이 병렬 공진회로로 표현할 수 있다. 여기서 Z_0 는 도파관의 특성 임피던스이며, β_g 는 도파관 내 전파상수, Y 는 슬롯의 등가 어드미턴스, L 은 슬롯 사이의 간격, 첨자 sp 는 슬롯의 개수를 나타낸다^[2,4,6-8].

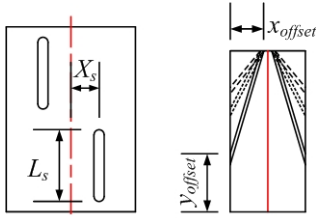
$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_g l_1 + j\frac{Y_s}{Y_0} & j\frac{1}{Y_0}\sin\beta_g l_1 \\ Y_s \cos\beta_g l_1 + jY_0 \sin\beta_g l_1 & \cos\beta_g l_1 \end{bmatrix} \dots \dots \begin{bmatrix} \cos\beta_g l_{sp} + j\frac{Y_s}{Y_0} & j\frac{1}{Y_0}\sin\beta_g l_{sp} \\ Y_s \cos\beta_g l_{sp} + jY_0 \sin\beta_g l_{sp} & \cos\beta_g l_{sp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_g l_1 & j\frac{1}{Y_0}\sin\beta_g l_1 \\ jY_0 \sin\beta_g l_1 & \cos\beta_g l_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = \frac{2}{A+B+C+D} = \frac{2}{A+Y_0 B+Z_0 C+D} \quad (3)$$

식 (2)는 그림 6의 슬롯 배열소자의 등가회로를 표현한 수식이다. 식 (2)의 ABCD 행렬은 슬롯의 개수에 해당하는 차수의 다차 복소 방정식 형태로 주어지며 식 (3)에 대입하여 풀면 등가 어드미턴스를 구할 수 있다. 여기서 T 는 S-파라미터 중에서 복소 전달 계수 (S_{21})을 의미한다. 그러나 로드 여기식 도파관의 슬롯 배열소자와 릿지 도파관의 슬롯 배열소자가 쌍으로 이루어진 구조에서는 상호결합 현상에 의해 독립 슬롯 소자와 특성이 다르므로 배열 상에서의 등가회로 상수를 추출해야 한다. 슬롯의 등가 특성은 상용 전자파 해석 S/W인 CST사의 MWS를 이용하여

S-파라미터를 추출하고 슬롯 등가 어드미턴스와의 상관관계에 의해 슬롯 등가회로 상수를 구하였다.

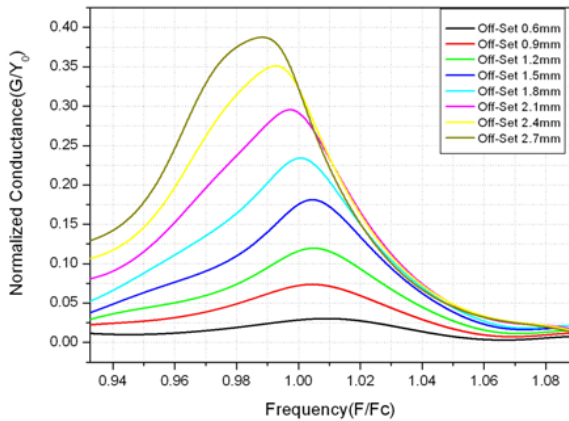
개구면 분포에 의해 각 슬롯에서 복사되어야 할 에너지를 결정하고 각 슬롯이 원하는 에너지를 복사할



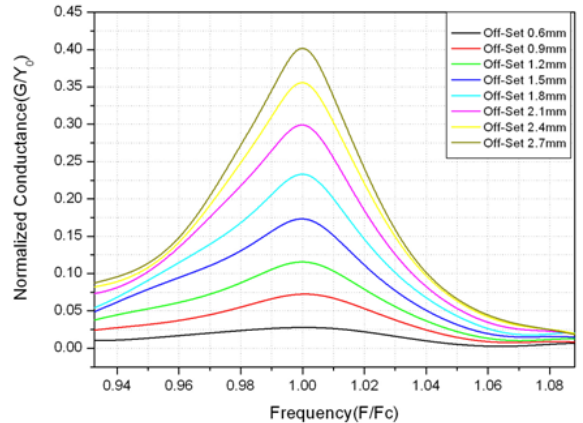
[그림 7] 컨덕턴스 값을 구하기 위한 슬롯 변수

수 있는 컨덕턴스(g) 값을 가지도록 그림 7과 같이 릿지 도파관 슬롯에서는 슬롯의 오프셋 간격 (X_s)를 로드 여기식 도파관 슬롯에서는 로드의 기울기를 조절한다. 로드 여기식 도파관의 경우 x_{offset} 을 고정하고 y_{offset} 길이를 조절함으로써 로드의 기울기를 제어하였다. 슬롯 도파관 안테나는 직렬 급전 방식이므로 같은 에너지를 복사하는 소자라도 슬롯이 놓여있는 위치에 따라 컨덕턴스 값이 달라지므로 컨덕턴스 값을 알면 릿지 도파관의 슬롯 오프셋 간격과 로드 여기식 도파관의 로드 기울기를 결정할 수 있다.

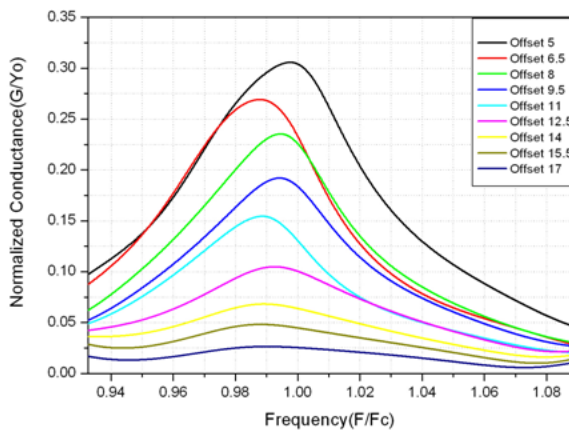
그림 8은 슬롯 오프셋 간격(X_s)과 로드 기울기 (y_{offset})를 변화에 따른 공진 컨덕턴스 변화를 나타낸



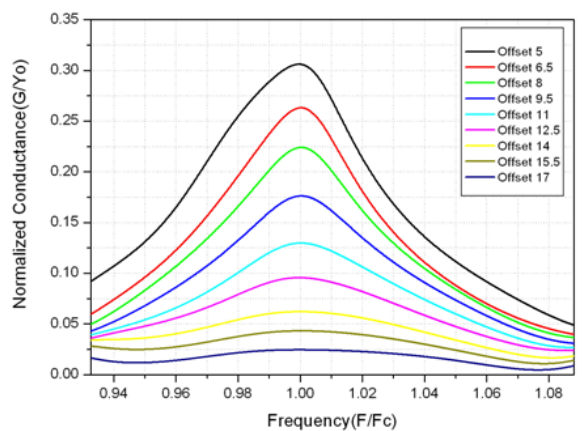
(a) 릿지 도파관 슬롯 오프셋 간격(X_s) 변화



(a) 릿지 도파관 슬롯 공진 주파수 조정



(b) 로드 여기식 도파관 슬롯 로드 기울기(y_{offset}) 변화



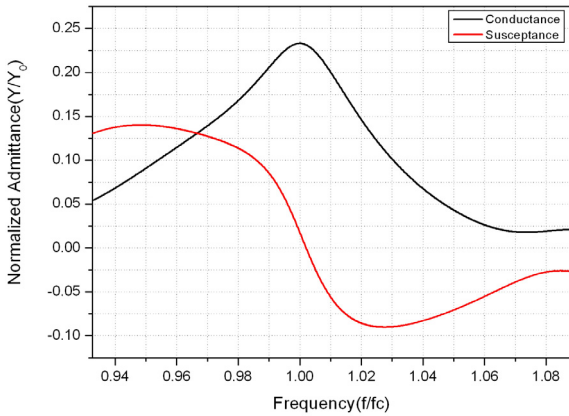
(b) 로드 여기식 도파관 슬롯 공진 주파수 조정

[그림 8] 슬롯 변수 변화에 따른 공진 컨덕턴스 변화

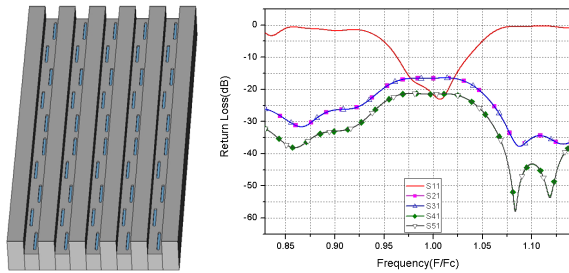
[그림 9] 슬롯 변수 변화에 대한 공진주파수 조정

다. 공진 컨덕턴스 데이터가 슬롯 변수 값이 바뀌에 따라 공진 컨덕턴스가 최대가 되는 주파수가 변하는 것을 볼 수 있다. 공진 컨덕턴스 값이 중심주파수에서 최대값을 가지도록 하기 위해서 슬롯 길이 조절을 한 결과를 그림 9에 나타내었다.

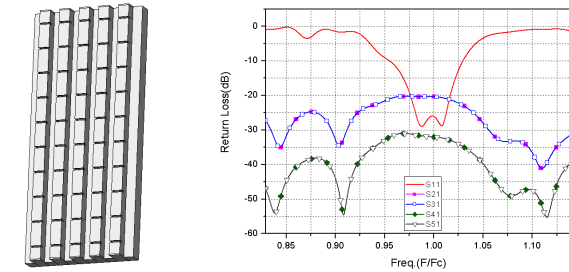
위상 지연이 문제가 되는 공진형 도파관 슬롯 배열에서 컨덕턴스의 최대값과 서셉턴스의 zero를 일치



[그림 10] 슬롯 어드미턴스(슬롯 개수 : 8)



(a) 릿지 도파관 슬롯 배열



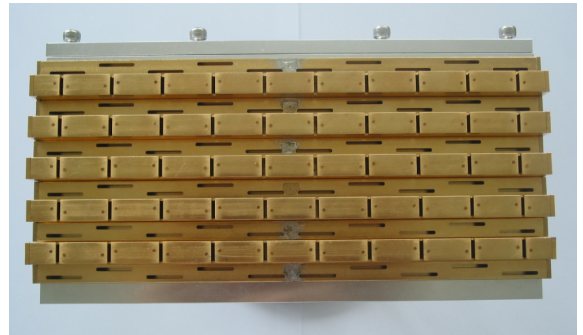
(b) 로드 여기식 도파관 배열

[그림 11] 반사손실 특성 시뮬레이션 결과

시키는 것이 중요하다, 그림 10은 슬롯 개수 8개인 경우 컨덕턴스와 서셉턴스를 나타낸 시뮬레이션 결과이다.

위 과정을 통해서 슬롯의 크기와 위치 및 제작에 필요한 파라미터를 추출하고 이를 이용하여 배열 설계를 하였다. 도파관 배열 안테나의 대역폭은 반사손실 10dB이하에서 $\pm 200\text{MHz}$ 이며 대역폭 만족을 위해 방위각 방향으로 10개의 슬롯을 배열하였으며 안테나 표면 분포는 균일 분포이다. 그림 11은 배열 설계를 위해 각 도파관의 반사손실 특성의 시뮬레이션 결과이다^[10,11].

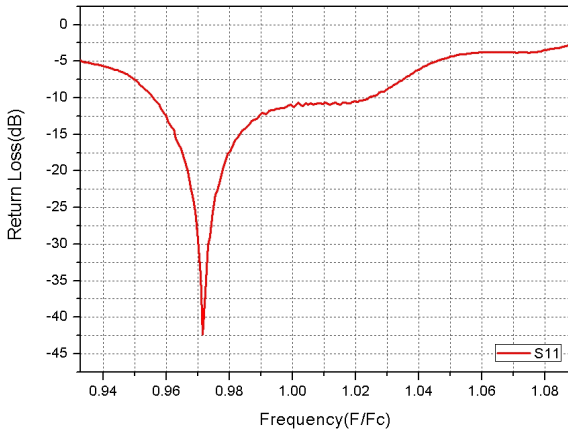
시뮬레이션을 통해 공진 주파수에서 최대 컨덕턴스 값을 가지는 슬롯 변수 데이터와 배열 설계를 바탕으로 제작한 로드 여기식 도파관과 릿지 도파관을 교차로 배열한 안테나를 그림 12에 나타내었다. 로드 여기식 도파관 5개와 릿지 도파관 6개를 교차로 고각 방향으로 배열하여 조립하였다.



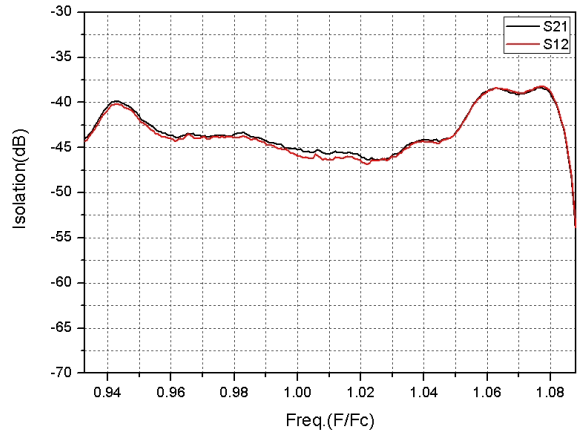
[그림 12] 제작한 도파관 슬롯 안테나 형상

그림 13은 제작한 도파관 슬롯 안테나의 반사손실을 나타내었다. 고각 방향으로 가운데 위치한 소자에 입력을 넣고 나머지 소자는 중단 정합을 시키고 측정 한 결과이다. 두 편파의 공진주파수가 이동한 이유는 제작 상의 오차로써 슬롯의 길이를 조금 더 작게 제작하면 해결이 가능하다.

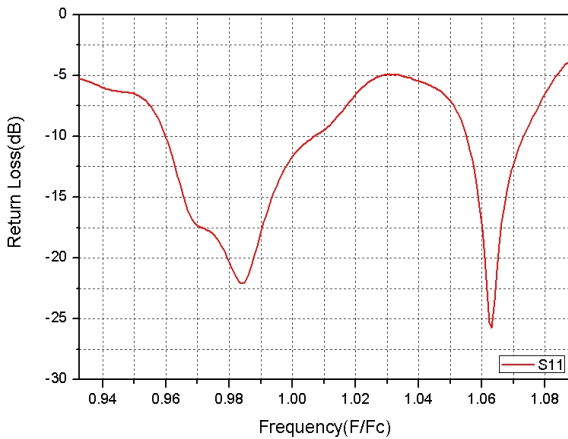
그림 14는 제작한 슬롯 배열소자의 격리도 특성이다. 중앙의 로드 여기식 도파관 슬롯 배열소자와 릿지 도파관 슬롯 배열소자에 포트 1과 포트 2를 연결하고 회로망 분석기로 S_{21} 과 S_{12} 를 측정 한 결과이다. 관심 대역에서 -35dB 이하의 격리도 특성을 보여주



(a) 로드 여기식 도파관 슬롯의 S_{11} 특성

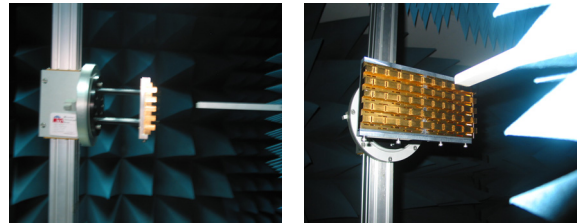


[그림 14] 제작한 안테나의 격리도 특성

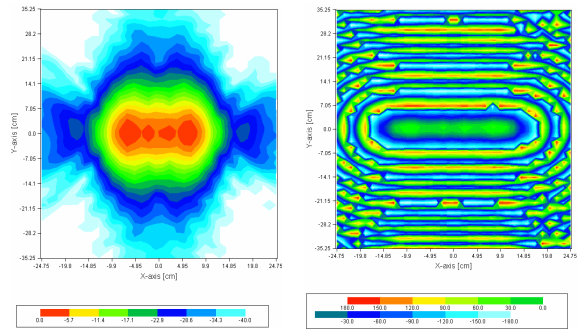


(b) 릿지 도파관 슬롯의 S_{11} 특성

[그림 13] 제작한 안테나의 S_{11} 특성



[그림 15] 근접전계 측정 셋업



(a) 진폭 분포

(b) 위상 분포

[그림 16] 로드 여기식 도파관 안테나의 근접전계 분포

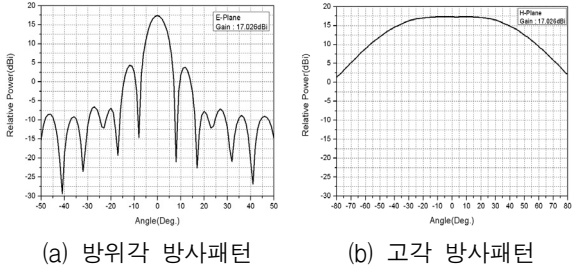
고 있다.

그림 15는 제작한 안테나의 근접전계 측정 셋업을 나타낸다. 측정 장비는 애질런트사의 E8362B PNA (10MHz~20GHz)를 사용하였다. 측정 시 프로브와 안테나 사이의 거리는 수 파장 떨어진 거리로써 유효 복사 근접전계(effective radiating near-field) 영역에서 측정되었다.

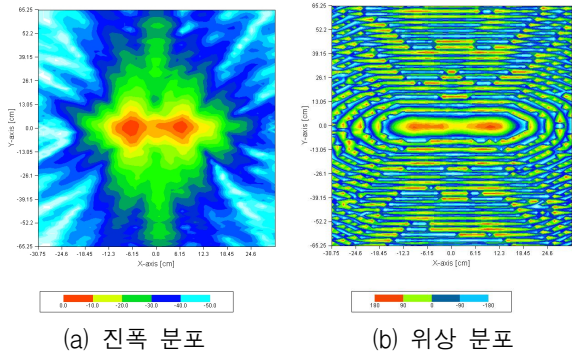
그림 16과 그림 18은 근접전계 측정을 통해 획득한 두 도파관의 진폭과 위상의 분포를 2D로 나타내었다. 진폭 분포를 보면 안테나의 물리적인 개구면 크기를 벗어나면서 진폭 값이 낮아지고 위상 분포는

동 위상으로 고르게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 근접전계 측정 결과를 각각 그림 17과 그림 19에 나타내었다. 각 도파관의 고각 방향 빔 패턴에서 확인할 수 있듯이 고각 방향으로 설계치인 $\pm 20^\circ$ 의 빔 조향 범위를 만족하는 것을 볼 수 있으며 로드 여

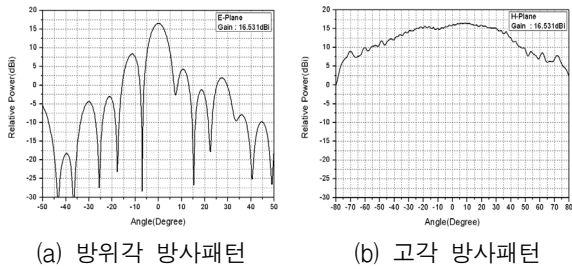
기식 도파관 슬롯 안테나의 이득은 17.0dB이며, 릿지 도파관 슬롯 안테나의 이득은 16.5dB이다.



(a) 방위각 방사패턴 (b) 고각 방사패턴
[그림 17] 로드 여기식 도파관 안테나의 방사패턴



(a) 진폭 분포 (b) 위상 분포
[그림 18] 릿지 도파관 안테나의 근접전계 분포



(a) 방위각 방사패턴 (b) 고각 방사패턴
[그림 19] 릿지 도파관 안테나의 방사패턴

3. 맺음말

본 논문에서는 고해상도 영상을 얻기 위한 X 대역 영상레이더(SAR) 위상 배열 안테나로써 광역 빔 조향이 가능하고 이중편파를 지원하는 도파관 슬롯 배열 안테나를 설계하였다. 수평 편파는 로드 여기식

도파관 슬롯 안테나를 사용하여 구현하였으며, 비경사 슬롯을 사용함으로써 나비부엽(Butterfly Lobe)을 제거하였다. 수직 편파는 릿지 도파관 슬롯 안테나를 사용하였으며 릿지를 도파관 내에 구현함으로써 도파관의 넓은 면을 사용하면서 소자 간의 간격을 줄여 광역의 빔 조향이 가능하도록 하였다. 각 슬롯에서 복사되어야 할 에너지에 따른 컨덕턴스 값을 CST사의 MWS 상용 툴을 이용해 시뮬레이션 함으로써 로드의 기울기와 슬롯의 오프셋 간격을 결정하였다.

설계한 데이터를 바탕으로 제작한 로드 여기식 도파관 슬롯의 배열소자와 릿지 도파관 슬롯의 배열소자의 S₁₁ 특성은 설계와 다르게 주파수 이동이 발생하였으나 이는 제작과 시뮬레이션 사이의 오차로 슬롯 길이를 조정함으로써 원하는 S₁₁ 특성을 얻을 수 있다. 격리도는 관심 대역에서 -35dB 이하로 두 도파관 사이의 간섭이 거의 생기지 않기 때문에 이중편파 안테나로 사용이 충분히 가능하다고 판단된다. 마지막으로 근접전계 측정 결과 로드 여기식 도파관 안테나의 경우 17dB, 릿지 도파관 안테나의 경우 16.5 dB의 이득을 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] A. F. Stevenson, "Theory of Slots in Rectangular Waveguides", J. Appl. Phys., Vol. 19, pp. 24~38, Jan. 1948.
- [2] Arthur A. Oliner, "The Impedance Properties of Narrow Radiating Slots in the Broad Face of Rectangular Waveguide, Part I - Theory, Part II - Comparison with Measurement", IRE Trans. Antenna Propag., Vol. AP-5, pp. 4~20, Jan. 1957.
- [3] John H. Hilburn, Ralph A. Kinney, R. W. Emmett and F. H. Prestwood, "Frequency-Scanned X-Band Waveguide Array", IEEE Trans. Antenna Propag., Vol. AP-19, pp. 506~509, July 1972.
- [4] HUNG Y. YEE, "Impedance of a Narrow Longitudinal Shunt Slot in a Slotted Waveguide

- Array”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 589~592, July, 1974.
- [5] James S. Ajioka, Dick M. Joe, Raymond Tang and Nam San Wong, “Arbitrary Polarized Slot Radiators in Bifurcated Waveguide Arrays”, IEEE Trans. Antenna Propag., Vol. AP-22, pp. 196~200, Mar. 1974.
- [6] Robert S. Elliott, “An Improved Design Procedure for Small Arrays of Shunt Slots”, IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. AP-31, pp. 48~53, Jan., 1983.
- [7] B. N. Das. Janaswamy Ramakrishna and B. K. Sarap, “Resonant Conductance of Inclined Slots in the Narrow Wall of a Rectanular Waveguide”, IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. AP-32, pp. 759~761, July 1984.
- [8] George J. Stern, Robert S. Elliot, “Resonant Length of Longitudinal Slots and Validity of Circuit Representation : Theory and Experiment”, IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. AP-33, pp. 1264~1271, Nov., 1985.
- [9] Anders A. Derneryd, “Butterfly Lobes in Slotted Waveguide Antennas”, IEEE Ant. Society Int. Symp. Dig., 15 June 1987.
- [10] Cheng-Geng Jan, Powen Hsu and Ruey-Beei Wu, “Corner Effects on the Mutual Impedance between Edge Slots”, IEEE Trans. Antenna Propag., Vol. AP-41, pp. 488-492, Apr. 1993.
- [11] David M. Pozar, “The Active Element Pattern”, IEEE Trans. Antenna Propag., Vol. AP-42, pp. 1176~1178, Aug. 1994.