

X-대역 진행파 슬롯 배열 안테나 설계

유상길*, 이석곤*, 최재현**, 안병철*
* 충북대학교 대학원 전파공학과, ** 국방과학연구소
전화 : (043) 261-3194 / 핸드폰 : 016-495-5760

Design of An X-Band Traveling-Wave Slot Array

*Sang-Gil Yu, *Seok-Gon Lee, **Jae-Hyun Choi, *Bierng-Chearl Ahn
* Radio Engineering Dept., Graduate School, Chungbuk National University,** Agency for Defense Development
E-mail : yu_sang_gil@hotmail.com

Abstract

Design methods are presented for an X-band traveling-wave slot array realized on a rectangular waveguide. An array of 21 longitudinal slots is realized on the broad wall of a rectangular waveguide. The squint of the antenna main beam is adjusted using the element spacing and the waveguide broad wall dimension. The excitation of the array is controlled by the slot offset from the waveguide center line. Multiple E-plane steps are placed around last slot elements so that the second-order beam due to the reflected wave is minimized. A waveguide-to-coaxial adapter is designed for feeding the array antenna from a coaxial system. Results of the design show an outstanding performance of the antenna: 17.1 dB gain, 36° beam tilt, and -21 dB maximum sidelobe level.

I. 서 론

1946년 H. G. Booker에 의해 Babinet의 원리를 적용하여 슬롯이 다이폴과 상보적인(complementary) 특성을 가진다는 사실이 입증되었다. W. H. Waston과 A. F. Stevenson은 구형 도파관 면에 슬롯을 만들어 고주파를 방사시키는 안테나로 사용하였다. 이후 여러 가지 형태를 가진 슬롯 안테나의 이론적 해석이 등장하였다

[1],[2].

슬롯 안테나에 사용되는 슬롯의 형태로는 6~10λ의 길이를 갖는 긴 슬롯, 반파장 공진형 슬롯, 슬롯 양 끝 모서리를 반원 모양으로 변형시킨 아령형 슬롯 등이 있다. 또한 슬롯 안테나를 구형 도파관이 아닌 원형 도파관상에 구현하거나 도파관 내부에 유전체를 삽입함으로써 안테나의 크기를 줄이기도 한다[3],[4].

경량화 및 박형화를 위해 마이크로스트립 또는 스트립라인을 이용한 인쇄형의 안테나가 사용되고 있으나 유전체 손실 및 누설과 손실이 크고 저효율이라는 단점이 있다. 이에 반해 도파관을 이용한 안테나는 폐쇄구조이고 전송손실이 매우 작으며, 대전력용으로 사용할 수 있고 박형 구조를 가진다는 특징이 있다.

본 논문에서는 주 빔이 경사진 도파관 슬롯 안테나의 설계기법을 제시한다. 복사패턴상의 부엽을 낮추기 위한 슬롯 배열 방법, 주 빔을 경사지게 하기 위한 도파관 크기와 소자간의 간격 결정 방법, 슬롯배열 종단으로부터의 반사에 의한 2차 빔을 제거하는 방법, 급전을 위한 도파관-동축선 어댑터 설계 방법 등을 제시한다.

II. 안테나 설계

그림 1은 본 연구에서 설계한 도파관 슬롯 배열 안테나의 구조이다. 슬롯 배열 안테나 설계의 첫 단계는 도파관의 폭(a)과 높이(b)를 결정하는 일이다. 도파관

폭은 도파관 내에서 TE₁₀ 모드만 전파되며 원하는 방향으로 주 빔이 기울어지는 값으로 하였다.

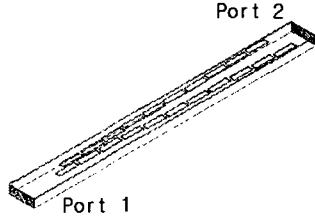


그림 1. 도파관 슬롯 배열 안테나.

주 빔이 기울어진 각도는 슬롯 간격과 도파관 폭에 의해 결정된다. 우선 도파관 폭은 표준 도파관 WR-90의 폭인 22.8 mm와 가까운 25.6 mm 하였다. 그림 2와 같은 선형 배열 안테나에서 주 빔의 위치가 126°가 되기 위한 슬롯 간격을

$$\beta_0 d \cos \theta_0 + \alpha = 0 \quad (1)$$

$$\alpha = -\beta_k d \cos \theta_0 + 2\pi \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 $\beta_0, d, \theta_0, \beta_k$ 는 각각 자유공간의 위상정수, 슬롯 간격, 주 빔 위치 및 도파관 내부에서의 위상정수이다. 위 식으로부터 주 빔이 $\theta_0 = 126^\circ$ 에 위치하기 위한 $f = 10$ GHz에서의 슬롯 간격을 구하면

$$d = \left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{\cos \theta_0}{\lambda_0} \right)^{-1} = 21.45 \text{ mm} \quad (3)$$

여기서 λ_g, λ_0 는 각각 도파관 내부와 자유공간에서의 파장이다.

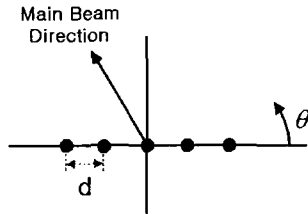


그림 2. 선형 배열 안테나.

구형 도파관의 축방향(longitudinal) 슬롯의 컨덕턴스는

$$\frac{G}{G_0} = 2.09 \frac{(a/b)}{(\beta_k l / \beta)} (\cos \beta_k l - \cos \beta l)^2 \cos^2 \frac{\pi x_1}{a} \quad (4)$$

로 주어진다[1]. 여기서 G, G_0, l, x_1 은 각각 슬롯의 컨덕턴스, 도파관의 특성 어드미턴스, 슬롯의 길이, 슬롯의 x 방향 위치이다. 위 식에 의하면 도파관 높이가 감소하면 G 가 증가하여 슬롯에 의한 복사전력이 증가

하게 된다. 따라서 도파관 높이를 조정하여 슬롯 배열 전체에 의해 복사되는 전력이 적당한 값이 되게 할 수 있다. 본 논문에서는 도파관의 높이를 표준 도파관 WR-90의 높이인 10.18 mm에서 8.0 mm로 감소시켜 슬롯 전체에서 약 95 %의 전력이 복사 되도록 하였다. 이 경우 그림 1에서 S_{21} 이 약 -12.5 dB가 된다.

다음 단계로 슬롯의 길이와 폭을 정한다. 슬롯의 길이는 도파관 관내 파장(37.02 mm @ 10 GHz)의 1/2에 가까운 19.2 mm로 하였다. 슬롯 폭은 슬롯 길이의 약 1/5로 하였다.

슬롯의 크기와 간격이 결정되면 슬롯의 x 방향 위치를 조절하여 각 슬롯에서 복사되는 전력이 적절한 값이 되도록 설계한다. 식 (4)로부터 슬롯의 위치가 $a/2$, 즉 도파관의 중심선상에 있으면 복사전력이 0이며 중심선에서 멀어질수록 복사전력이 증가한다.

각 슬롯에서 복사되는 전력이 균일한 분포에서 양 끝 소자의 복사전력을 감소시킴으로써 부엽의 크기를 감소시킨다. 그림 3은 슬롯이 배열된 도파관의 등가회로를 보인 것이다[5]. 여기서 위첨자 +, - 는 각각 슬롯의 입사 및 반사면 방향, l_i 는 슬롯 간의 간격, P_i 는 i 번째 슬롯에 의한 복사 전력, y_i^+ 와 y_i^- 는 i 번째 슬롯의 좌·우면 위의 배열 부하값을 바라보는 정규화된 어드미턴스를 나타낸다.

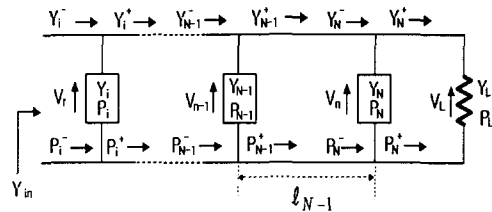


그림 3. 슬롯 배열 안테나의 등가회로.

위의 등가회로로부터 슬롯 배열의 다음과 같은 설계식을 구할 수 있다.

$$g_i = g_i^+ P_i / P_i^+ \quad (5)$$

$$P_i = P_{i+1}^- [e^{2\alpha l_i} + 2|\Gamma_{i+1}|^2 + \sin(2\alpha l_i)] / (1 - |\Gamma_{i+1}|^2) \quad (6)$$

$$y_i^+ = g_i^+ + j b_i^+ = \frac{y_{i+1}^+ \cosh \gamma l_i + \sinh \gamma l_i}{\cosh \gamma l_i + y_{i+1}^+ \sinh \gamma l_i} \quad (7)$$

$$y_i^- = y_i^+ + y_i^-, \quad |\Gamma_i| = |(1 - y_i^-) / (1 + y_i^-)| \quad (8)$$

여기서 g_i 는 슬롯 안테나의 공진 컨덕턴스, γ 는 도파관의 복소 전파상수이다. 위 식을 이용하려면 설계 프로그램 작성해야 한다. 그러나 본 연구에서는 식 (4)이 개념에 입각하여 도파관 구조물 해석 소프트웨어인 HFSS를 이용하여 경험적인 방법으로 슬롯의 x 방향

위치를 구하였다. 그림 1의 슬롯 배열에서 급전점으로 부터 멀어질수록 슬롯이 도파관 중심선으로부터 멀어져 입사전력 대 복사전력 비가 증가되게 하였다. 이렇게 함으로써 양 끝 소자에서 복사가 감소한 테이퍼 분포를 얻을 수 있었다.

위와 같이 설계한 슬롯 배열 안테나의 복사패턴은 그림 4와 같다. 도파관의 종단을 단락시킬 경우 2차 빔에 의해 부엽이 11. dB 까지 증가한다. 도파관 종단을 정합시킬 경우 2차 빔은 형성되지 않게 되므로 양호한 부엽 특성을 얻을 수 있다. 표 1은 설계된 안테나의 여러 가지 특성을 보인 것이다.

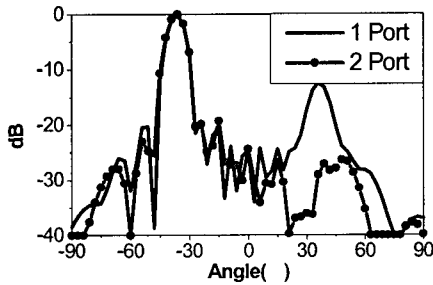


그림 4. 슬롯 배열 안테나의 복사 패턴. 실선: 종단이 단락된 경우, 실선+점: 종단이 정합된 경우.

표 1. 종단단락시(1)와 종단정합시(2)의 안테나 특성.

| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|---|--|
| | | | | | | | I | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

도파관 종단에 정합부하를 연결하는 것이 바람직하나 이 경우 페라이트 등의 흡수체를 이용한 긴 구조를 사용해야 하므로 안테나의 부피가 증가하게 된다. 본 연구에서는 도파관의 부피의 변화가 없을 뿐만 아니라 종단에 정합부하를 연결하지 않고도 2차 빔 생성을 억제할 수 있는 방법을 고안하였다.



그림 5. 도파관 종단부.

그림 5는 도파관 종단 부분의 높이를 여러 단계에

걸쳐 감소시킴으로써 종단에서의 반사신호가 서로 다른 위상을 가지게 하여 상쇄되도록 하였다.

그림 6은 도파관 종단의 계단 구조가 있을 경우와 없을 경우의 복사패턴을 비교한 것이다. 이로부터 계단형 종단부의 사용으로 2차 빔이 크게 감소함을 알 수 있다. 표 2는 종단에 계단구조를 사용한 경우의 안테나 특성을 요약한 것이다.

안테나 구현에 표준 도파관을 사용하지 않았으므로 안테나를 급전하기 위한 동축선-도파관 변환기(어댑터)의 설계가 요구된다.

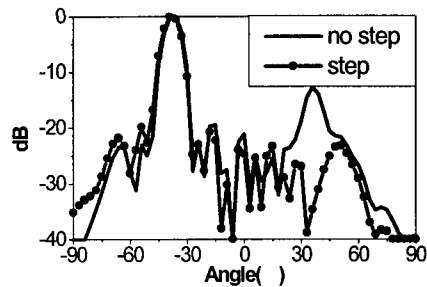


그림 6. 도파관 종단부의 계단 구조에 의한 2차 빔 감소. 실선: 종단이 단락된 경우, 실선+점: 종단에 계단구조가 사용된 경우.

표 2. 종단에 계단구조를 사용할 경우의 안테나 특성.

| | | | | | |
|--|--|--|--|-----|--|
| | | | | III | |
| | | | | | |
| | | | | | |

어댑터는 그림 7과 같이 안테나와는 별도로 설계한 후 안테나에 연결한다.

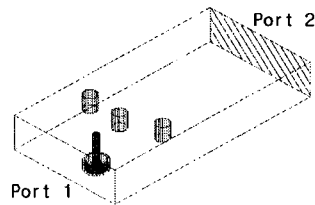


그림 7. 도파관-동축선 어댑터.

동축선 프로브는 $x=a/2$ 위치에 설치하고 단락된 종단으로부터의 거리와 프로브 높이를 조정하여 임피던스가 정합 되게 한다. 프로브의 직경이 1.3 mm일 경우 프로브 길이가 6 mm이며 단락면과의 거리가 8 mm일 경우에 최적 특성으로 $S_{11} = -11$ dB를 얻었다. 프로브

자체만으로는 반사계수가 충분히 작지 않으므로 그림 7에서와 같이 프로브로부터 가까운 위치에 3 개의 급속봉을 사용하여 임피던스를 튜닝하였다. 1 개의 급속봉을 사용할 경우보다 3 개의 급속봉을 사용하면 임피던스의 정합범위가 증가하므로 임피던스 튜닝이 보다 용이하다. 그림 8은 설계된 어댑터의 반사계수 특성을 보인 것이다.

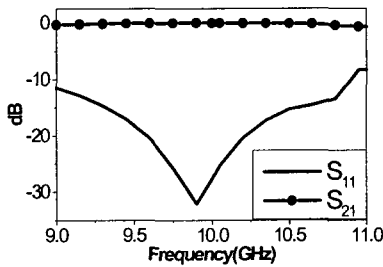


그림 8. 설계된 어댑터의 반사계수 특성.

그림 9는 어댑터와 접지판이 연결된 안테나의 모습을 보인 것이다. 그림 10은 이 구조에 있어서 접지판의 유무에 따른 복사패턴 변화를 보인 것이다. 표 3은 최종적으로 설계된 안테나의 특성을 요약한 것이다. 이로부터 설계된 안테나는 양호한 특성을 가짐을 알 수 있다.

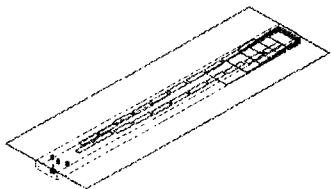


그림 9. 설계된 슬롯 안테나 구조.

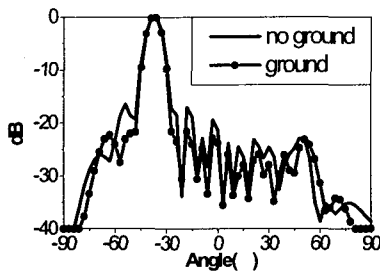


그림 10. 설계된 안테나의 복사패턴. 실선: 접지판 무, 실선+점: 접지판 유.

표 3. 설계된 안테나의 특성.

| 항목 | HPBW | | 단위 |
|------|------|-----|----|
| | 전계면 | 자계면 | |
| HPBW | 9° | 80° | |

III. 결 론

본 논문에서는 X-대역에서 구형 도파관의 넓은 면에 축방향으로 반파장 직사각형 슬롯을 21개를 배열한 안테나의 설계기법과 설계결과를 제시하였다. 슬롯에 전력을 분배하기 위해 슬롯을 도파관 축에서 대칭적으로 이격 시켰다. 이 간격은 슬롯 배열에서 급전점으로부터 멀어질수록 슬롯이 도파관 중심선으로부터 멀어져 입사전력 대 복사전력 비가 증가되게 하였다. 또한 도파관 종단을 계단 구조로 설계하여 부엽을 감소시켰다. 설계 결과를 정리하면 이득 17.1dB, 반사계수 -31.5dB, 전계면과 자계면의 HPBW가 각각 9° 및 80°이며 주 빔의 경사는 -36°의 특성을 갖게 되었다.

참고 문헌

- [1] A. A. Oliner, "The impedance properties of narrow radiating slots in the broad face of rectangular waveguide part I -Theory", *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 5, January.1957, pp. 4-11.
- [2] Frank L. Whetten and A. Balanis, "Meandering long slot leaky-wave waveguide antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no 11, November. 1991, pp. 1553-1560.
- [3] L. B. Felsen, "Analysis of a terminated-waveguide slot antenna by equivalent circuit method", *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 4, January. 1956, pp. 16-26.
- [4] Jong-Ig Lee, Ung-Hee Cho and Young-Ki Cho, "Analysis for a dielectrically filled parallel-plate waveguide with finite number of periodic slots in its upper wall as a leaky-wave antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 4, April. 1999, pp. 701 - 706.
- [5] Richard C. Johnson, "Antenna Engineering Handbook", *McGraw-Hill Book Company*, 2th Edition, chapter 9, 1984.