

구형도파관의 넓은면에 축방향 슬롯을 배열한 직선편파 특성의 도파관 안테나 설계

신필수*, 고영호*, 고광태**, 백락준***, 이용희***, 태재훈***
 전북대학교 전기공학과*, 호원대학교 전자공학과**, (주)에이스테크놀로지***
 우)561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14
 E-mail : kyh@moak.chonbuk.ac.kr

Design of A Linear Polarized-Slotted Waveguide Antenna Using Longitudinal Slots on the Broad wall of a Rectangular Waveguide

P. S. Shin*, Y. H. Ko*, K. T. Ko**, L. J. Paek***, Y. H. Lee***, J. H. Tae***
 Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.*
 Dept. of Electronic Engineering, Howon Univ.**, Ace Technology***

Abstract

구형도파관의 넓은 면에 축방향 슬롯을 파고 또 각각의 슬롯을 축방향으로 배열하였을 때의 원거리 방사 패턴을 구하는 과정을 보였으며 측정된 결과와 계산결과를 비교하였다. 방사전자계는 슬롯의 표면에 유기되는 등가의 자기전류로부터 계산할 수 있으며 임의의 개수를 가지는 배열안테나의 경우에는 각각의 슬롯이 자기 어드미턴스와 상호결합에 의한 영향을 받기 때문에 원하는 방사패턴을 얻기 위해서는 상호 어드미턴스를 고려하여 슬롯의 길이와 오프셋을 고려하여야 한다. 슬롯에서의 전개분포 해석은 모멘트법(method of moment)을 사용하여 해석하였다. 본 연구에서는 직선편파특성을 가지는 슬롯 배열 안테나의 설계를 위하여 슬롯의 자기 및 상호 어드미턴스를 구하고, 반복적인 수치해석 과정을 통하여 입력임피던스의 최적화 방법에 대하여 논하였다.

I. 서론

정보통신기술의 비약적인 발전에 힘입어 위성방송(DBS), 이동체통신 및 지구공간 무선링크 등의 제 분야에서 무선시스템의 초단용 부품으로서 안테나의 중요성이 증가하고 있으며 경량화, 박형화 및 고효율화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 경량화 및 박형화에 대한 요구에 대응하여서는 마이크로스트립 또는 스트립라인을 이용한 인

쇄회로기판(PCB)형의 안테나가 쓰이고 있으나 유전체 손실 및 누설과 손실이 크고 저효율이라는 단점이 있기 때문에 고효율의 박형 배열 안테나가 요구되고 있다. 도파관을 이용한 안테나의 경우에는 패쇄구조이고, 전송손실이 거의 없으며, 대전력용으로 사용할 수 있고 스트립과 마찬가지로 박형의 구조를 가질 수 있어서 이에 적합하다.

본 연구에서는 단일 슬롯의 전개 분포는 모멘트법을 사용하여 해석하였고, 슬롯수 10개인 도파관 안테나를 설계 제작하여 측정결과와 계산결과를 비교하였다.

II. 모멘트법에 의한 전개 분포 해석

그림 1은 두께 t 인 도파관의 넓은 면에 축방향으로 길이 $2L$, 폭 w 이고, 중심축으로부터 x_0 만큼의 어긋남(offset)을 가지는 축방향 단일슬롯의 구조와 등가의 전송선로 모델이다. 슬롯의 전개 분포는 도파관 내부의 입사자계 $\vec{H}_{inc}^{inc}(\vec{r})$ 와 슬롯으로부터 산란되는 자계 $\vec{H}_{inc}^{scat}(\vec{r})$ 및 무한도체 평면위의 무한 반평면 상의 자계 $\vec{H}^{ext}(\vec{r})$ 에 대하여 접선성분의 연속성을 이용하여 구할 수 있다.

$$\hat{y} \times [\vec{H}_{inc}^{inc}(P) + \vec{H}_{inc}^{scat}(P)] = \hat{y} \times \vec{H}^{ext}(P) \quad (1)$$

단 \hat{y} 는 그림 1(a)의 좌표계에서 단위 방향 벡터이고 점 P 는 슬롯내의 임의의 장점(field point)이다.

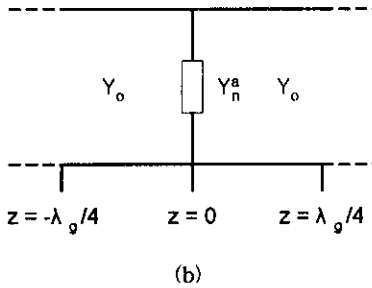
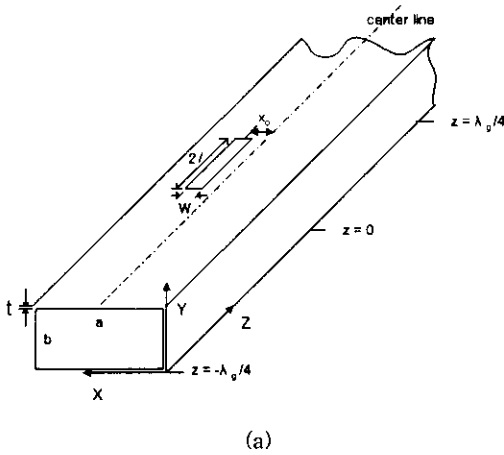


그림 1. 축방향 단일 슬롯의 구조 및 동가의 전송선로 모델

본 연구에서는 모델의 간략화를 위하여 ①도파관은 기본모드인 TE₁₀모드로 구동되고 있으며, ②판벽의 두께는 무시할 수 있고(즉, t=0), ③폭이 좁은 슬롯의 개구면에서는 Z-방향의 전계는 무시할 수 있다(즉, E_z=0)고 가정하였다.

따라서 위와같은 조건에 대하여, 파동방정식 및 그린 함수를 이용하면

$$\int \int_{\text{slot}} G_{zx}(P, P') E_x(P') dx' dz' = j A_{10} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-j\beta_{10}z} \quad (2)$$

을 얻을 수 있다.
여기서

$$G_{zx}(P, P') = \frac{1}{2\pi j \omega \mu_0} \left(\frac{\partial^2}{\partial z'^2} + k_0^2 \right) e^{-jk_0 R} + j \frac{2}{\omega \mu_0 a b} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\epsilon_{mn}^2}{\Gamma_{mn}} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \left(\frac{\partial^2}{\partial z'^2} + k^2 \right) e^{-\gamma_{mn}|z-z'|} \quad (3)$$

$\beta_{10} = \{k_0^2 + (\pi/a)^2\}^{1/2}$, $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$. A₁₀은 TE₁₀ 모드 전자계의 진폭이고, P'는 슬롯내의 임의의 source point 이며 $R = \overline{PP'}$, $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon$ 및

$$\Gamma_{mn} = \left\{ \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 - k^2 \right\}^{1/2} \epsilon_{mn} \quad \epsilon_{00}^2 = 1/4, \epsilon_{0n}^2 = \epsilon_{m0}^2 = 1/2, \epsilon_{mn}^2 = 1 \text{이다.}$$

모멘트법중 Galerkin법을 사용하여 기저함수와 가중 함수를 동일한 형태를 사용하였다.

$$e_p(z) = \sin \frac{\beta\pi}{2L} (L+z) \quad (4)$$

$$w_s(z) = \sin \frac{5\pi}{2L} (L+z) \quad (5)$$

식 (2)에 기저함수와 가중 함수를 이용하여 내적을 취하여 계산하면 미지의 E_x의 값을 알 수 있다. 슬롯의 길이를 변화시켰을때 슬롯의 개구면 전계분포 |E_x|는 그림 2와 같이 나타난다.⁽²⁾

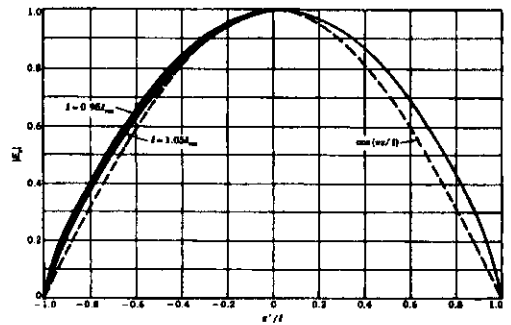


그림 2. 정규화된 슬롯전계의 분포 (a=22.86mm, b=10.16mm), 주파수=9.375GHz

III. 단일 슬롯의 어드미턴스

+Z방향 입사파의 진폭을 A₁₀ⁿ, 반사파의 진폭을 B₁₀ⁿ 및 -Z방향입사파의 진폭을 D₁₀ⁿ, 반사파의 진폭을 C₁₀ⁿ이라하면, 전송선 이론과 그림 1-(b)의 동가회로⁽⁴⁾로부터

$$B_{10}^n = C_{10}^n = -k_1 f(x_n, l_n) V_n^s \quad (6)$$

및

$$B_n = C_n = -\frac{1}{2} \frac{Y_n^a}{G_o} V_n \quad (7)$$

을 구할 수 있다.

여기서 Y_n^a/G_o 는 n-번째 슬롯의 active admittance이고, V_n 은 도파관에 각 슬롯에 인가되는 모드전위이다. 식 (6), (7)로부터 active admittance는

$$\frac{Y_n^a}{G_o} = j \left[\frac{8}{\pi^2 \eta G_o} \frac{a/b}{\beta_{10}/k} \right]^{1/2} \cdot f_n \cdot \sin(kl_n) \frac{V_n^s}{V_n^a} \quad (8)$$

와 같고, 여기에서 x_n 및 l_n 은 각각 오프셋과 슬롯 길이의 1/2이고 f_n 은 다음과 같다.

$$f_n = \frac{\cos(\beta_{10}l_n) - \cos(kl_n)}{\sin(kl_n)} \cdot \sin\left(\frac{\pi x_n}{a}\right) \quad (9)$$

여기서 V_n^s 는 슬롯의 개구면 전위이다.

상호 임피던스는 슬롯이 폭이 좁으므로 등가의 다이폴로 근사화하여 n-번째 슬롯의 active admittance를 구하면 식 (10)과 같다.

$$\frac{Y_n^a}{G_o} = \frac{-2B_{10}^n}{A_{10}^n + D_{10}^n + B_{10}^n} = \frac{292(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)} \cdot \frac{f_n^2}{Z_n^a} \quad (10)$$

Z_n^a 는 n-번째 슬롯의 active impedance로서

$$Z_n^a = \frac{292(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)} \cdot \frac{f_n^2}{(Y_n/G_o)} + \sum_{m=1}^N \left(\frac{V_m^s}{V_n^s} \right) \left(\frac{\sin kl_m}{\sin kl_n} \right) Z_{mn} \quad (11)$$

이다. 식 (11)에서 $\frac{Y_n}{G_o}$ 는 슬롯이 독립적으로 존재할 때의 자기 어드미턴스이며 Z_{mn} 은 m과 n-번째 슬롯의 상호 임피던스이다. 또, $\sum_{m=1}^N$ 은 $m=n$ 인 경우를 제외한 모든 상호 결합의 합을 의미한다.

IV. 배열안테나 설계

슬롯을 축방향으로 배열할 경우 원거리 방사패턴은 원하는 모양에 따라 슬롯전위 V_n^s 를 달리함으로써 결정할 수 있다. 슬롯수 $N=10$ 이고 주엽과 부엽의 비를 26dB으로 할 경우 Dolp-Tschebyscheff 배열에 따른 V_n^s 의 분포는 다음과 같다.^[3]

$$V_1^s : V_2^s : V_3^s : V_4^s : V_5^s : \\ = 1 : 1.357 : 1.974 : 2.496 : 2.798 \quad (12)$$

V_6^s 부터 V_{10}^s 의 관계는 식(12)의 관계의 역과 같다.

슬롯배열 안테나를 설계하기 위해서는 자기 어드미턴스와 슬롯 상호간의 결합에 의한 상호임피던스를 알아야 한다. 자기 어드미턴스는 오프셋과 슬롯길이에 의존하고 있으므로 식 (12)의 분포를 가지는 급진계수를 구하기 위해서는 상호임피던스를 고려하여 반복적인 계산 과정을 거쳐야 한다.

최적화는 입력단에서 임피던스 정합을 의미하므로, N개의 슬롯에 대하여

$$\frac{Y_{in}}{G_o} = \sum_{n=1}^N \left(\frac{Y_n^a}{G_o} \right) = 1 \quad (13)$$

이다.

식 (8), 식 (10), 식 (13)을 이용하면 원하는 방사패턴을 가지는 슬롯안테나의 offset과 길이를 구할 수 있다.

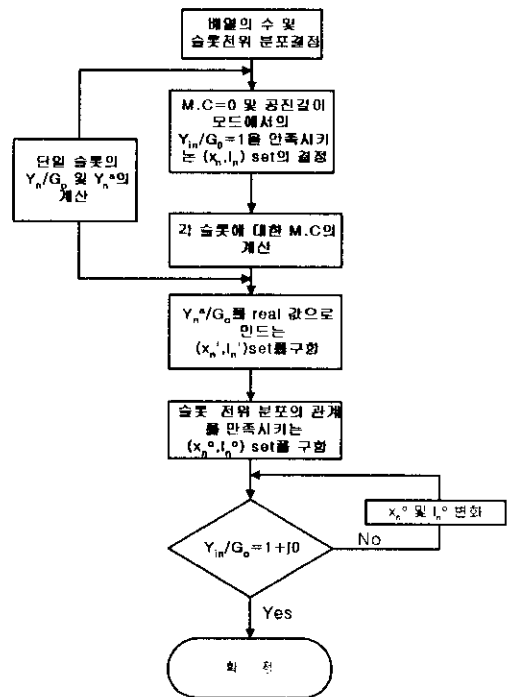


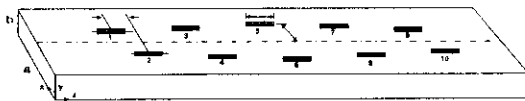
그림 3. 도파관모드 슬롯 배열 안테나의 설계순서도

그림 3은 슬롯 배열 안테나의 설계시 임피던스 정합을 위하여 슬롯의 길이와 오프셋을 결정하기 위한 최적화 방법의 흐름도이다.

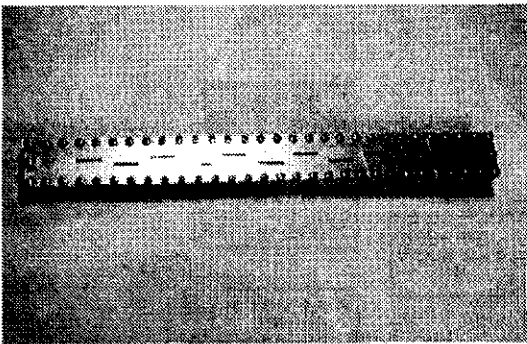
그림 3의 최적화 방법을 통하여 얻어진 슬롯 배열 안테나의 오프셋과 슬롯 길이는 표 1과 같다.

중심주파수	9.375 GHz	슬롯	offset	length
주엽 : 부엽	26 dB	1,10	1.0684mm	15.5720mm
a	22.86 mm	2, 9	-1.5597mm	15.7077mm
b	10.16 mm	3, 8	2.0913mm	15.7429mm
t	1.27 mm	4, 7	-2.7348mm	15.8393mm
W	1.58 mm	5, 6	3.044 mm	15.8993mm
슬롯전위 = 1 : 1.357 : 1.974 : 2.496 : 2.798				

표 1 슬롯배열 안테나의 인자



(a)



(b)

그림 4 슬롯배열 안테나의 설계도 및 실물사진

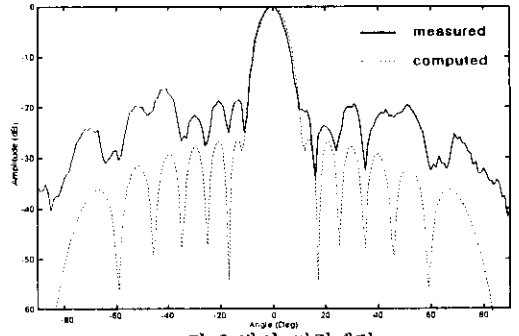


그림 6 방사 전력패턴

그림 4(a)는 N=10인 슬롯 배열 안테나의 설계도이며 (b)와 같이 실제 제작하여 특성을 측정된 결과는 그림 5와 6과 같다.

V. 결론

본 연구에서는 구형도파관이 넓은면의 축방향 슬롯에 대한 offset과 길이에 따른 슬롯 전개 분포를 모멘트 방법을 이용하여 구하였다. 또한 슬롯의 전위 즉 급전계수가 Dolph-Tschebyscheff 분포를 가지고, 주엽과 부엽의 비가 26dB인 슬롯배열 도파관 안테나를 설계 제작하였다.

제작된 안테나의 방사특성은 제 1부엽이 -20dB정도의 결과를 얻었으며 전체적인 방사특성은 실험치와 이론치가 잘 일치함을 확인하였다. 제작된 부엽의 크기가 전체적으로 약 5dB정도 상승한 것은 구형도파관의 상판을 장착하기 위한 나사에 너무커서 이들로부터의 문제가 있어 반사파에 기인하는 것으로 보이며, 또한 임피던스 측정 결과가 약 300MHz 정도 어긋나는 것도 역시 상판과 도파관의 정합문제에 의한 것으로 사료된다.

※ 참고문헌

- [1] A. A. Oliner, "The impedance properties of narrow radiating slots in the broad face of rectangular waveguide", *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-5, pp. 4-20, Jan. 1957.
- [2] R. F. Harrington, "Field Commutation by Moment Metho" London, Collier-Macmillan Limited, 1968
- [3] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, John Wiley & Sons. Inc.
- [4] R. S. Elliot, "An Improved Design Procedure for small Arrays of Shunt Slots" *IEEE Trans. Anetnnas Propagat.*, Vol. AP-31. No. 1. Jan. 1983, pp. 48 - 53.

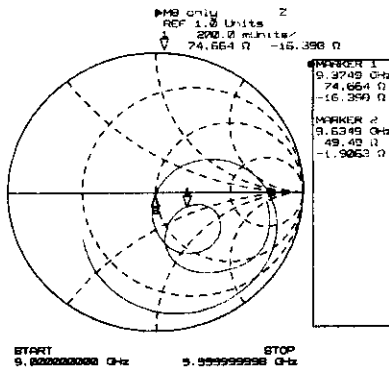


그림 5 입력 임피던스