

구형도파관 슬롯배열 안테나의 최적 설계에 관한 연구

(A Study on the Optimum Design of Rectangular Slotted Waveguide Antenna)

孫 泰 鎬*, 李 相 高*

(Tae Ho Son and Sang Seol Lee)

要 約

Tschebyscheff 배열 방법에 의한 중앙급전식 구형도파관 공진형 슬롯배열 안테나의 설계방법을 제시한다.

도파관슬롯의 어드미턴스는 슬롯간의 상호결합 작용을 고려하여 실험 및 이론적 방법으로 구한다.

주파수 9.4GHz에서 동작하는 길이 1.8피트의 공진형 슬롯배열 안테나를 설계제작하였다. 실험결과는 이득 25.5dB, 부엽준위 최대-22dB 및 반치각 3.6°로서 매우좋은 특성을 나타내었다.

Abstract

The design method of the center-fed resonant type slotted waveguide antenna using the Dolph-Tschebyscheff array is presented. Slot admittances are obtained by empirical and theoretical method since the effect of mutual coupling between slots is included.

We design a slotted waveguide antenna which has 1.8ft. length and operates on 9.4GHz. The experimental results of the antenna show that its gain, maximum sidelobe level and half power beam-width are 25.5dB, -22dB and 3.6 deg., respectively.

I. 서 론

도파관 슬롯배열 안테나는 군사용 탐지레이다 및

일반 선박용 항해레이다등에 주로 사용되고 있는 안테나이다. 안테나는 중단급전식 또는 중앙급전식으로 급전할 수 있으며, 슬롯배열은 공진형 또는 비공진형으로 배열할 수 있다. 안테나의 슬롯은 LS (longitudinal shunt), OTS (offset transverse series), CIS (centered inclined series) 및 IS (inclined shunt) 형으로 할 수 있다.^{1,2)}

도파관 슬롯배열 안테나는 우선 배열방법을 선택하여 슬롯 소자들에 대한 구동계수(excitation coef-

*正會員, 漢陽大學校 電子通信工學科
(Dept. of Telecomm. Hanyang Univ.)

接受日字: 1989年 2月 14日

(※이 논문은 1987년도 문교부 자유공모과제 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었음.)

ficients)를 구하고, 구동계수에 상응하는 슬롯의 어드미턴스를 계산하여 실현된다. 배열방법은 안테나의 사용 목적과 복사패턴의 형태에 따라 선택된다. 그러나 슬롯의 어드미턴스 계산 및 실현 과정에서는 계산하는 방법에 따라 오차가 발생하므로서 안테나 특성에 영향을 주게된다. 슬롯소자들의 구동계수로 부터 어드미턴스를 구하는 방법에 관한 연구는 Watson^[3], Dion^[4] 및 Kaminow와 Stegen^[5] 등에 의해 진행되어 왔었다. Watson은 공진형 슬롯에 대한 슬롯 컨덕턴스 계산법을 연구하였고, Dion은 슬롯 어드미턴스가 작을 경우 구동계수로 부터 간단하게 어드미턴스를 계산하는 방법을 제시하였다. 또한, Kaminow와 Stegen은 슬롯 어드미턴스가 클 경우에도 실측치와 잘 맞는 관계식을 유도하였다.

LS,OTS 및 CIS 슬롯을 실현하는 방법에 관한 연구는 Stevenson^[6], Lyon과 Sangster^[6] 및 Park, S-tern, Elliott^[7] 등에 의해 이루어졌다. Stevenson,^[8] Jasik^[9] 및 Das^[9] 등은 도파관의 전계면(E-plane)에 슬롯을 형성하는 IS슬롯의 어드미턴스 유도식을 제시하였으나, 배열안테나를 실현할 때 이론적 계산값과 차이를 보이고 있다.^[10]

이 연구는 현재 소형선박용 레이더에 가장 널리 사용되고 있는 중앙급전식 공진형 구형도파관 IS슬롯 배열안테나 설계에 관한 연구로서, 배열방법으로는 높은 이득과 빙폭이 좁은 Tschebyscheff 배열방법을 이용한다. 슬롯간의 상호결합이 고려된 슬롯 치수별 공진컨덕턴스를 실험적 방법과 이론적 해석을 통하여 구하고, Tschebyscheff 배열 설계법으로부터 얻은 구동계수를 Kaminow와 Stegen 방법에 의하여 어드미턴스로 환산한다. 각 어드미턴스값에 맞추어 슬롯의 폭과 각도와 절삭깊이를 결정한다.

주파수 9.4GHz에서 동작하는 길이 1.8피치트 공진형 슬롯배열 안테나를 설계제작하여 안테나이득, 부엽준위, 반치각 및 입력 반사계수 등을 측정하고 Taylor선소(line-source)법에 의해 개발된 안테나의 성능^[11]과 비교 평가한다.

II. Tschebyscheff 배열

안테나 배열방법중 Tschebyscheff 배열은 빙폭이 좁고 이득이 클 뿐 아니라 부엽준위(sidelobe level)를 임의로 조정하여 설계할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 탐지레이더 등과 같은 장비에 사용되는 안테나는 빙폭이 방위분해능 특성을 결정하기 때문에 Fourier 변환법, Woodward 및 Taylor 선소 등과 같은 패턴합성(pattern synthesis) 방법^[12]보다 빙폭이 좁은 Tschebyscheff 배열방법을 이용하여 설계하는

것이 유리하다.

Tschebyscheff 다항식 $T_m(z)$ 는 변수 z 에 대해 다음식으로 정의된다.

$$T_m(z) = \cos[m \cos^{-1}(z)], \quad |z| \leq 1 \quad (1)$$

$$= \cosh[m \cosh^{-1}(z)], \quad |z| > 1 \quad (2)$$

여기서 $m=0, 1, 2, \dots, N-1$ 이고, Tschebyscheff 배열에서 N 은 배열소자(array elements) 수이며, 다항식 사이에는 아래의 관계가 성립한다.

$$T_m(z) = 2zT_{m-1}(z) - T_{m-2}(z) \quad (3)$$

사용주파수의 파장을 λ , 배열소자들간의 간격을 d 및 배열축과 복사되는 빙이 이루는 각도를 θ 라 하면 안테나 배열인자(array factor)는 배열소자수가 $2M$ (짝수)개 일 때

$$AF = \sum_{n=1}^M a_n \cos[(2n-1)u] \quad (4)$$

이고 $2M+1$ (홀수)개 일 때는

$$AF = \sum_{n=1}^{M+1} a_n \cos[(2n-1)u] \quad (5)$$

이다. 여기서 $u = \pi d \cos \theta / \lambda$ 이고 a_n 은 소자들의 구동계수이다. 부엽준위를 R 이라 하면 (2)식을 이용하여 부엽준위에 상응하는 z 값을 구하여 z_0 로 놓는다. 변수 z 와 z_0 의 관계를

$$z/z_0 = \cos(u) \quad (6)$$

로 놓고 배열소자에 따라 (4) 또는 (5)에 대입하여 Tschebyscheff 다항식을 이용하면 각 소자들의 구동계수를 구할 수 있다. 구동계수를 정규화 시킨뒤 (4) 혹은 (5)식에 대입하므로서 이론적인 복사특성을 얻는다.

안테나 이득과 반치각(half-power beamwidth) 계산에 있어서 빙 스캔(scan)을 크게 할 경우나 부엽준위를 $-20 \sim -60$ dB로 할 경우, 다음과 같은 빙 확대인자(broadening factor) B 를 고려해야 한다.^[12]

$$B = 1 + 0.636 \left\{ \frac{2}{R} \cosh \left[\sqrt{(\cosh^{-1} R)^2 - \pi^2} \right] \right\}^2 \quad (7)$$

그러므로 반치각 θ 와 이득 D 는 아래의 식으로 계산할 수 있다.^[12]

$$\theta = \left[\cos^{-1} \left(\cos \theta_0 - 0.443 \frac{\lambda}{(L+d)} \right) - \cos^{-1} \left(\cos \theta_0 + 0.443 \frac{\lambda}{(L+d)} \right) \right] \times B \quad (8)$$

$$D = \frac{2R^2}{1 + (R^2 - 1) \cdot B \cdot \frac{\lambda}{(L+d)}} \quad (9)$$

여기서 L은 배열길이, θ_0 는 스퀀트 각도(squint angle)이다.

III. 슬롯 어드미턴스 결정

Tschebyscheff 배열안테나의 각 배열소자들에 대한 구동계수에 알맞는 IS슬롯 어드미턴스를 구하기 위하여 이 연구에서는 kaminow와 Stegen의 방법⁽²⁾을 이용한다.

그림 1은 IS슬롯 배열을 선트소자(shunt element)로 놓은 등가회로이다. Y_L 은 정규화된 부하 어드미턴스이며, Y_1, Y_n 은 첫번째 및 n번째 슬롯의 정규화된 어드미턴스이다. 또한 V_1, V_n, V_L 및 P_1, P_n, P_L 은 해당소자에 공급되는 전압 및 전력이다.

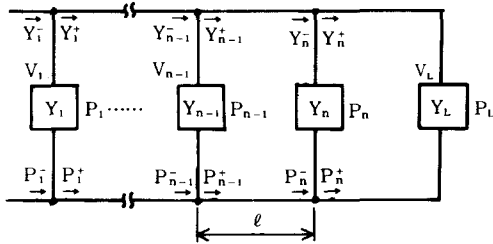


그림 1. IS슬롯배열 안테나의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of the IS slotted array antenna.

n번째 슬롯의 전계 크기와 위상은

$$|E_n| = (P_n)^{\frac{1}{2}} = a_n \quad (10)$$

$$\arg(E_n) = \arg(j Y_n V_n) \quad (11)$$

의 관계가 있다. 여기서 a_n 은 슬롯의 구동계수이다. 그림 1에서

$$Y_n^- = Y_n + Y_n^+ \quad (12)$$

$$P_n^- = P_n + P_n^+ \quad (13)$$

로 쓸 수 있으며 n-1번째 슬롯의 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{n-1} = V_n [\cosh(\gamma\ell) + Y_n^- \sinh(\gamma\ell)] \quad (14)$$

여기서 γ 는 전파상수로서 $\alpha + j\beta$ 이다. 또한 n-1번째

슬롯에서 부하쪽으로 본 어드미턴스 Y_{n-1}^+ 는

$$Y_{n-1}^+ = \frac{Y_n + \tanh(\gamma\ell)}{1 + Y_n^- \tanh(\gamma\ell)} \quad (15)$$

이 된다. 도파관의 감쇄를 고려한 전력 P_{n-1}^+ 는

$$P_{n-1}^+ = P_n^- \left[\exp(2\alpha\ell) + \frac{2|Y_n^-|^2 \sinh(2\alpha\ell)}{1 - |Y_n^-|^2} \right] \quad (16)$$

이다.⁽²⁾ 여기서 Γ_n 은 n번째 슬롯에서 부하쪽의 반사계수이고 α 는 감쇄정수이다. 따라서 n-1번째 슬롯의 어드미턴스는 다음식으로 구할 수 있다.

$$Y_{n-1} = Y_{n-1}^+ \frac{P_{n-1}}{P_{n-1}^+} \quad (17)$$

IV. IS슬롯치수와 어드미턴스

주어진 어드미턴스값을 갖는 슬롯의 치수를 계산하는 문제에 관한 연구는 오래전부터 진행되었으나, 아직 정확한 계산식이 제시되지 않고 있다. Stevenson⁽⁵⁾은 도파관의 두께를 무시하고 무한평면 위에 슬롯이 있을 경우에 대하여 연구하였고, Jasik⁽⁶⁾과 Das⁽⁶⁾는 슬롯치수에 따른 공진컨덕턴스값을 계산하였으나 슬롯간의 상호결합 작용을 고려하지 않았기 때문에 실측치와 맞지 않는다.⁽¹⁰⁾ 또한 전송선의 분포정수 개념을 도입하여 연구된 결과⁽¹¹⁾도 있으나 슬롯의 각도가 클 경우 오차가 발생된다.

이 연구에서는 실측을 통하여 슬롯의 각도, 폭 및 절삭깊이에 따른 어드미턴스를 구한다. 그림 2와 같이 일정한 각도 θ , 폭 w 및 깊이 d를 갖는 슬롯을 n개 배열하여 전송계수를 측정하므로써 단일슬롯에 대한 어드미턴스를 구한다.

그림 2에서 슬롯을 교차 배열하므로써 전계분포를 동위상으로 해주었다. 슬롯간격을 ℓ , 입력측에서 첫

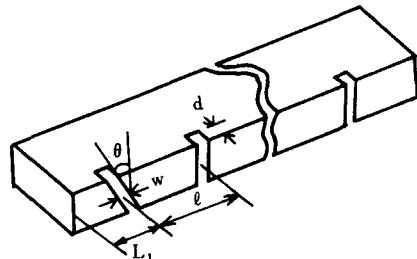


그림 2. 같은 치수의 슬롯이 배열된 도파관
Fig. 2. The waveguide arrayed by same slots.

번째 슬롯까지 길이를 L_1 이라 하고 도파관의 정규화된 특성 어드미턴스를 Y_0 및 슬롯의 어드미턴스를 Y_s 로 놓는다. 이 때 입력 어드미턴스는 식(15)와 같은 형태로 반복계산하므로써 구해질 수 있다. 입력 어드미턴스를 Y_{in} 이라 하면 전송계수는 다음식으로 계산된다.

$$T = \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_{in}} \quad (18)$$

또한 같은 길이 및 재질의 도파관 전송계수를 측정하여 T_0 로 놓으면 $T - T_0$ (dB)를 취하므로써 관내 손실항이 무시되어 쉽게 Y_s 값을 구할 수 있다. 이 연구에서는 공진형 배열인 l 을 반파장으로 하고 $W =$

1.6mm로 하였다. 슬롯각도를 5° 간격으로 $5^\circ \sim 25^\circ$ 에 대해 각각 절삭깊이 2.7~3.5mm, 0.2mm 간격으로 총 25개 슬롯도파관을 제작하여 슬롯어드미턴스값을 구하였다. 슬롯절삭깊이에 따른 각도별 복소어드미턴스로 부터 공진점을 찾아서 공진되는 절삭깊이와 공진점에서의 컨덕턴스를 만든다. 그림 3, 4는 주파수 9.4GHz에서의 슬롯각도별 정규화된 컨덕턴스 및 공진절삭깊이 이다.

V. 설계 및 실험

이 연구에서는 주파수 9.4GHz 안테나길이 1.8ft., 부엽준위 -25dB인 공진형 배열안테나를 설계하였다. 이는 소형선박용 레이다 안테나로 널리 사용되

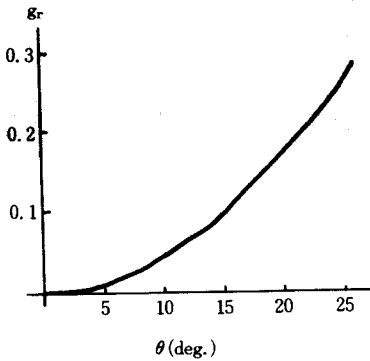


그림 3. 슬롯각도에 따른 컨덕턴스 변화
Fig. 3. Conductance variation vs slot angle.

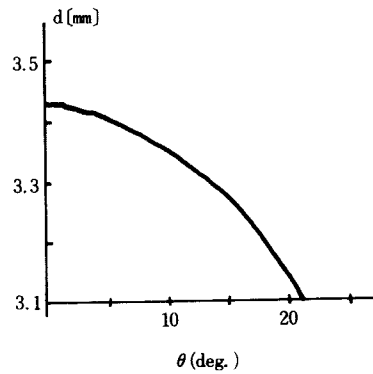


그림 4. 슬롯각도별 공진절삭깊이
Fig. 4. Depth of cut vs slot angle.

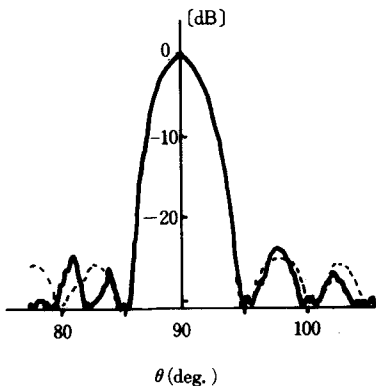


그림 5. 복사특성
Fig. 5. Radiation pattern.

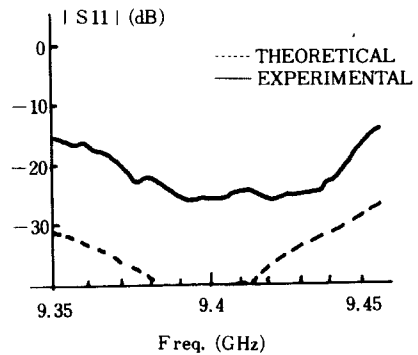


그림 6. 입력정재파 특성
Fig. 6. Characteristics of input VSWR.

고 있는 제원이다. 안테나길이 1.8ft를 반파장으로 배열할 때 소자수 N은 24가 되며 위의 제원을 이용하여 구동계수를 계산한다.

그림 5는 설계제작된 안테나 복사패턴의 이론치와 실험치를 비교한 것이다. 빔 확대인자를 고려한 반치각과 손실을 무시하였을 때의 이득은 각각 3.22° 및 29.58dB로 계산되었다.

슬롯안테나의 양단에 마지막 슬롯으로 부터 1/4파장 떨어진 점에 단락판을 부착하였을 때 각 슬롯의 정규화된 컨덕턴스는 표 1 과 같다.

표 1. 슬롯 컨덕턴스
Table 1. Slot conductance.

No. of slot	conductance
1	0.0112
2	0.0033
3	0.0051
4	0.0073
5	0.0099
6	0.0129
7	0.0168
8	0.0236
9	0.0389
10	0.0725
11	0.1263
12	0.1705
13	0.1705
14	0.1263
15	0.0725
16	0.0389
17	0.0236
18	0.0168
19	0.0129
20	0.0099
21	0.0073
22	0.0051
23	0.0033
24	0.0112

안테나는 WR-90, Al재질의 구형도파관을 이용하여 NC (numerical controlled) 선반으로 5개를 제작하였다. 제작된 안테나는 사진 1 과 같고 사진 2는 레이다 시스템에 적용하기 위해 조립된 것이다.

제작된 5개의 안테나는 각각 약간의 가공오차를 갖고 있었으나 안테나 특성의 실험결과는 거의 일치하고 있다. 실험결과는 이득 25.5dB, 반치각 3.6° 및 최대 부엽준위 -22dB로 매우 양호한 결과를 보이고 있다. 그림 5는 측정된 복사특성이며 그림 6은 입력 정재파 특성이다. 여기서 점선은 이론치이며 실선은



사진 1. 슬롯배열 안테나
Photo 1. Slotted array antenna.

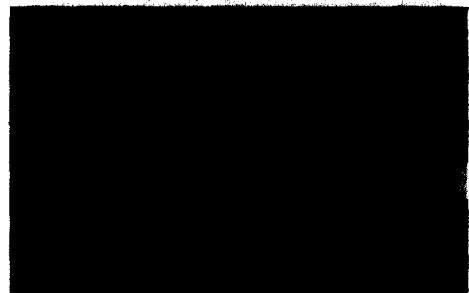


사진 2. 조립된 레이더용 안테나
Photo 2. Assembled radar antenna.

측정치이다. 그림 7은 상품화된 Taylor선소법에 의한 배열안테나(점선)와 이 연구결과(실선)의 복사특성을 비교한 것이다. 그림 7에서 보듯이 이 연구결과는 Taylor방법보다 이득이 0.8dB정도 높고, 반치각은 0.4° 좁은 특성을 보인다.

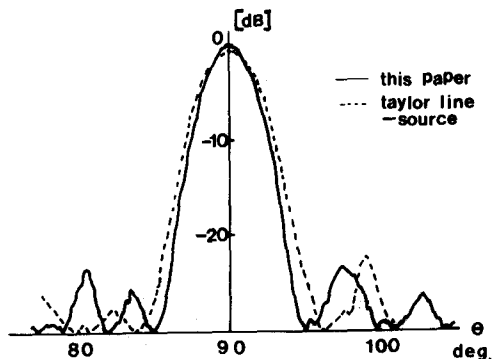


그림 7. 테일러선소법 결과와의 복사특성 비교
Fig. 7. Radiation pattern comparison with Taylor line source.

특히, Taylor선소법에 의한 안테나는 길이가 길어 질수록 가공오차가 누적되어 첫 부엽이 주엽에 침투되므로 -20dB 빔폭 특성이 악화되는데 반해 이 연구에서 제시된 방법에서는 가공오차가 복사특성에 미치는 영향이 적어 슬롯수가 많은 안테나 설계에서 특히 유리하다.

VI. 결 론

Tschebyscheff 배열을 이용하여 공진형 IS슬롯배열 안테나를 설계제작하였다.

배열소자 구동계수로 부터 슬롯의 어드미턴스값을 구하고 실측과 간단한 계산을 통하여 슬롯간의 상호결합이 고려된 슬롯의 치수를 결정함으로써 안테나를 설계할 수 있다.

24개의 슬롯소자수를 갖는 1.8ft. 공진형 슬롯배열 안테나를 설계하여 실험한 결과는 사용주파수 9.4G-Hz에서 이득 25.5dB, 반치각 3.6° 및 최대 부엽준위 -22dB 의 양호한 특성을 보이므로써 상품화된 기존 안테나보다 우수한 성능을 나타내고 있다.

참 고 문 헌

- [1] R.E. Collin, "Antenna theory," part 1, McGraw-Hill Inc., ch 5-7, 14, 1969.
- [2] I.P. Kaminow, R.J. Stegen, "Waveguide slot array design," T.M. No. 348, Hughes Aircraft Co., pp. 37-44, 1954.
- [3] W.A. Watson, "Resonant slots," J. Inst. Elec. Eng., Part 3A93, pp. 747-778, 1946.
- [4] A. Dion, "Nonresonant slotted arrays," IRE Trans. Antenna and Propagation, vol. AP-6,

pp. 360-365, Oct., 1958.

- [5] A.F. Stevenson, "Theory of slots in rectangular waveguides," *J. App. Phys.*, vol. 19, no. 1, pp. 24-38, Jan. 1948.
- [6] R.W. Lyon, A.J. Sangster, "Efficient moment method analysis of radiating slots in a thick-walled rectangular waveguide," *IEEE Proc.*, vol. 128, pt. H, no. 4, pp. 197-205, Aug. 1981.
- [7] P.K. Park, G.J. Stern, R.S. Elliot, "An improved technique for the evaluation of transverse slot discontinuities in rectangular waveguide," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. AP-31, no. 1, Jan., 1983.
- [8] H. Jasik, "Antenna engineering handbook," 2nd Ed., McGraw-Hill, ch 9, 1984.
- [9] B.N. Das, "Resonant conductance of inclined slots in the narrow wall of rectangular waveguide," *IEEE Trans., Antenna and propagation* vol. AP-32, no. 7, July, 1984.
- [10] 안병철, 손태호, "도파관 슬롯배열 안테나 개발 보고서," 금성정밀 연구소 보고서, 1983.
- [11] 안병철, 손태호외, "미니레이다용 마이크로웨이브 부품 및 관련기술 개발에 관한 연구," 과학기술처 보고서, 금성정밀 연구소, pp. 20-48, 1984.
- [12] C.A. Balanis, "Antenna theory," Harper & Row, ch 6, 1982.
- [13] 신재준, 손태호, 이상설, "주기적으로 배열된 구형 슬롯도파관의 어드미턴스 측정법에 관한 연구," 한국통신학회 춘계학술 발표회 논문집, pp. 221-223, 1988. *

著 者 紹 介



孫 泰 鎭 (正會員)

1956年 2月 25日生. 1979年 2月
한양대학교 전자통신공학과 졸업.
1986年 8月 한양대학교 대학원 전
자통신공학과 공학석사학위 취득.
1987年 3月~현재 한양대학교 대
학원 전자통신공학과 박사과정
1978年 10月~1987年 2月 금성정밀(주) 중앙연
구소 선임연구원. 주관심분야는 전자파이론 및 안테
나공학.

李 相 高 (正會員) 第25卷 第2號 參照

현재 한양대학교 전자통신공
학과 교수