

共振器 이론에 의한 圓形 마이크로스트립 配列 안테나의 設計

(Design of the Circular Microstrip Array Antenna using the Resonator Conception)

朴斗頌*, 洪義錫**

(Doo Seok Park and Ui Seok Hong)

要 約

원형 공진기의 어드미턴스를 이용하여 마이크로스트립 배열 안테나를 설계한다. 안테나 배열소자의 구동계수로부터 컨덕턴스 값을 구하고, stray filed를 고려한 공진기의 반경에 따른 컨덕턴스 값과 같은 원형 마이크로스트립의 반경을 계산하면 배열 안테나를 설계할 수 있다.

Tschebyscheff 배열법으로 배열 소자수 10개인 안테나를 테프론기판에 제작, 실험한 결과 이득 8.9 dB, 반치각 11.3도 및 최대 부엽준위 -19dB로써 이론치와 거의 일치함을 보였다.

Abstract

We design a circular microstrip array antenna using the admittance of circular resonator.

We can design the array antenna, considering equivalent radius of circular microstrip consistent with conductances which are obtained from excitation coefficients of the array elements.

The antenna with 10 array elements are made on teflon substrate from Tschebyscheff method. Its performance are the gain 8.9dB, half power beam width 11.3dgc, max, side lobe level -19dB, and they are almost in agreement with the theoretical results.

I. 서 론

마이크로스트립 배열안테나는 구조가 간단하고 물체 표면에 정착하기 쉽기 때문에 항공기 및 미사일 등의 안테나로 많이 사용하고 있다. 이 안테나는 마이크로스트립 형태에 따라 구형과 원형으로 구분된다.

마이크로스트립 배열 안테나의 설계는 배열방법을 결정하는 단계와 배열소자의 구동 계수와 일치하는 어드미턴스를 실현하는 단계로 구분된다. 배열 방법에는 균일(uniform) 배열과 비균일(non-uniform) 배열로 크게 나누어지며,^[1] 마이크로스트립 안테나의 경우 거의 대부분 균일 배열을 사용하고 있다.^[2] 그 이유는 동작 주파수에서 각 소자의 어드미턴스를 같도록 해주기 위한 것이나, 결과적으로 부엽 준위가 높아지는 단점을 갖고 있다.

어드미턴스를 실현하는 방법은 마이크로스트립 안테나를 해석하는 방법에 따라 전송 선로 모델, 공진기 모델, edge어드미턴스 모델 및 full wave해석법^[3] 등이 있다.

*正會員, 大谷工業專門大學 事務自動化科
(Dept. of O. A., Daeyeu Technical Jr. College)

**正會員, 光云大學校 電子通信工學科
(Dept. of Telecomm. Eng., Kwangwoon Univ.)
接受日字: 1990年 3月 9日

이 연구에서는 이득이 크며 부엽 준위를 조절할수 있는, 비균일 배열인 Tschebyscheff 배열법을 이용하여 원형 마이크로스트립 배열 안테나를 설계한다. 어드미턴스 실현은 일반 공진기 모델⁽⁴⁾⁽⁵⁾을 개선한 stray field를 고려한 공진기 모델⁽⁶⁾로 실현한다. Tschebyscheff 배열에 의해 구동 계수를 구하며, Kaminow와 Stegen 방법⁽⁷⁾에 의해 배열소자의 컨덕턴스를 계산한다. 또한 원형 공진기를 해석하고 stray field를 고려한 공진기 모델을 이용하여 원형 마이크로스트립의 반경을 구한다. 컨덕턴스 차이에 따라 발생하는 서셉턴스 성분은 배열 안테나 입력측에서 본 서셉턴스로 계산하여 안테나 입력측에 스텝(stub)을 만들어 주므로써 제거한다. 실험을 위하여 두께 0.779mm, 비유전율 2.52를 갖는 테프론 기판에 10개의 배열 인자를 반파장으로 안테나를 제작하고, 실험을 통하여 이론의 타당성을 밝히며 그 결과를 고찰한다.

II. Tschebyscheff 配列法에 의한 어드미턴스 計算

1. Tschebyscheff 배열법

안테나 배열법중의 하나인 Tschebyscheff 배열은 빔폭이 좁고 이득이 클뿐만 아니라 부엽준위(side lobe level)를 임의로 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Tschebyscheff 다항식에 대한 반복공식(recursion formula) $T_m(Z)$ 와 배열소자의 간격이 d 인 $2M$ 개의 배열 소자수에 대한 배열 인자(array factor) AF 식은 다음과 같다.¹

$$T_m(Z) = 2Z \cdot T_{m-1}(Z) - T_{m-2}(Z) \quad (1)$$

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

여기서

$$T_m(Z) = \cos[m \cos^{-1}(Z)] \quad -1 < Z < +1$$

$$\cosh[m \cosh^{-1}(Z)] \quad Z < -1, Z > +1$$

$$Z = Z_0 \cos\left(\frac{kd}{2} \cos\theta\right) = Z_0 \cos(u)$$

$$Z_0 = \cosh\left[\frac{1}{n-1} \cosh^{-1}(R_0)\right]$$

A_n 은 n 번째의 구동계수이다.

2. 어드미턴스 계산

Tschebyscheff 배열 안테나의 각 배열 소자들에 대한 구동 계수에 알맞는 소자의 어드미턴스를 구하기 위하여 Kaminow와 Stegen 방법⁽⁷⁾을 이용한다.

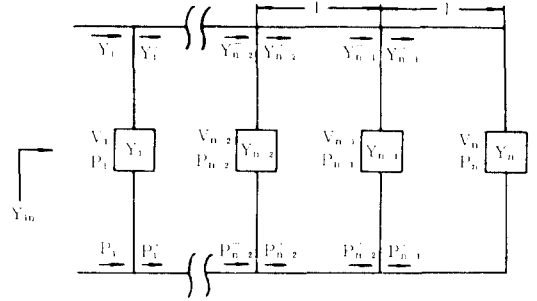


그림 1. 배열 안테나의 병렬 어드미턴스의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of parallel admittance for array antenna.

표 1. 정규화된 구동 계수와 컨덕턴스

Table 1. Normalized excitation coefficients vs conductances.

배열No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
구동계수	.524	.557	.755	.913	1	1	.913	.755	.557	.524
컨덕턴스	.046	.0519	.095	.139	.167	.167	.139	.095	.0519	.046

그림 1은 배열 안테나를 등가회로로 놓은 그림이며 여기서 ℓ 은 배열소자간의 간격 Y_n, Y_n 은 어드미턴스이며 V 및 P_n 은 각소자에 인가되는 전압 및 소모 전력이다. 복사소자간계 E_{n1} , 등가회로에 의한 구동 계수 A_n , 정규화된 병렬소자의 부하 어드미턴스 Y_n , 전력 P_n 및 전압 V_n 에 대한 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$|E_{n1}|^2 - P_n^2 = A_n \quad (3)$$

$$P_{n-1} = P_n [\exp(\gamma\ell)] \quad (4)$$

$$Y_{n-1} = \frac{Y_n + \tanh(\gamma\ell)}{1 + Y_n \tanh(\gamma\ell)} \quad (5)$$

$$Y_{n-1} = Y_{n-1} \frac{P_{n-1}}{P_{n-1}} \quad (6)$$

여기서 $\gamma = \alpha + j\beta$ 이며 α 는 감쇄정수, β 는 위상정수이다.

식 (3), (4), (5), (6)으로 부터 배열계수 10개인 Tschebyscheff 배열 안테나의 정규화된 컨덕턴스와 구동계수를 계산하면 표 1과 같다.

III. 원형 공진기의 어드미턴스 해석

공진기 모델에 있어서 반경 a 인 원형 마이크로스트립으로 부터 원거리 영역에 있는 P점에서의 전계 $E\theta$ 와 E_r 는 다음과 같다.

$$E_{\theta} = j \frac{h E_0 J_0(\kappa a) a \kappa_0}{2} \frac{e^{-j\kappa_0 r}}{r} \cos n \phi [J_{n+1}(\kappa_0 a \sin \theta) - J_{n-1}(\kappa_0 a \sin \theta)] \quad (7)$$

$$E_{\phi} = j \frac{h E_0 J_n(\kappa a) a \kappa_0}{2} \frac{e^{-j\kappa_0 r}}{r} \cos \theta \sin n \phi [J_{n+1}(\kappa_0 a \sin \theta) + J_{n-1}(\kappa_0 a \sin \theta)] \quad (8)$$

식 (7), (8)로 부터 원거리 영역에서 복사된 복사전력 P_r 과 원형 마이크로스트립에서 손실되는 도체손실 P_c 및 유전체 손실 P_d 은 다음식으로부터 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{1}{2} \{ R_e \int \int_s (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{S} \} \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{120\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi (|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2) r^2 \sin \theta \, d\theta \, d\phi \\ &= \frac{1}{1920} (h E_0 J_n(\kappa a) a \kappa_0)^2 I_1 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_c &= 2 \frac{R_s}{2} \iint_s (\mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^*) \, ds \\ &= R_s \int_0^a \int_0^{2\pi} (K_\rho^2 + K_\phi^2) \rho \, d\phi \, d\rho \\ &= \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \frac{\pi E_0^2}{(\omega \mu)^2} \left[\frac{1}{2} J_n^2(\kappa a) \{ (\kappa a)^2 - n^2 \} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{K} 는 원형 복사소자의 표면 전류로 $\mathbf{K} = \mathbf{n} \times \mathbf{H}$ 이고, R_s 는 도체의 표면 저항이다.

$$\begin{aligned} P_d &= \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta}{2} \iiint_v \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \, dV \\ &= \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta}{2} E_0^2 \int_0^h \int_0^a \int_0^{2\pi} J_n^2(\kappa \rho) \cos^2 n \phi \, \rho \, d\phi \, d\rho \, dZ \\ &= \frac{h \tan \delta}{8\mu f} E_0^2 J_n^2(\kappa a) \{ (\kappa a)^2 - n^2 \} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $I_1 = \int_0^\pi \{ [J_{n+1}(\kappa_0 a \sin \theta) - J_{n-1}(\kappa_0 a \sin \theta)]^2 + \cos^2 \theta [J_{n+1}(\kappa_0 a \sin \theta) + J_{n-1}(\kappa_0 a \sin \theta)]^2 \} \sin \theta \, d\theta$ 이다.

원형 마이크로스트립에 대한 총전력 P_t 는

$$P_t = P_r + P_c + P_d \quad (12)$$

이므로 식 (9)-(11)으로부터 구해진다.

그림 2는 굽전된 원형 마이크로 스트립 안테나를 나타낸 그림이다. 여기서 δ_a, ρ 및 ϕ 는 안테나 중심 굽전선 중심이 이루는 각도, 반경 및 굽전과 반경이 이루는 각도이다. 이때 굽전점에서의 전계, 전압 및 전류식은 다음과 같이 나타낸다.^{[3][4]}

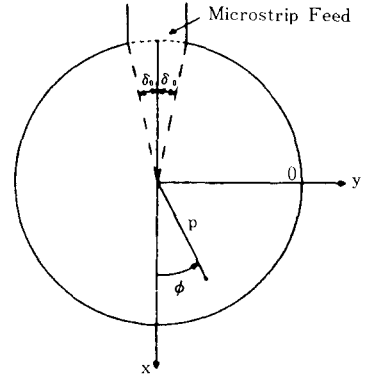


그림 2. 원형 마이크로스트립
Fig. 2. Circular microstrip antenna.

$$\begin{aligned} E_z &= j\omega \mu J \left[\frac{2\delta_0}{\kappa^2 \pi a} + \sum_{m=2}^{\infty} \frac{2\delta_0}{(\kappa^2 - \kappa_{am}^2)} \frac{J_0(\kappa_{om}\rho)}{\pi a J_0(\kappa_{om}a)} \right] \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4a \sin n\delta_0 \cos n(\phi - \pi) J_n(\kappa_{nm}\rho)}{(\kappa^2 - \kappa_{nm}^2) [a^2 - (n^2/\kappa_{nm}^2)] \pi n J_n(\kappa_{nm}a)} \end{aligned} \quad (13)$$

$$V = \frac{h}{2\delta_0} \int_{\pi-\delta_0}^{\pi+\delta_0} E_z(a, \phi) \, d\phi \quad (14)$$

$$I = -J(2\delta_0 a) \quad (15)$$

식 (12)~(15)로 부터 마이크로스트립 안테나의 입력 어드미턴스 중 컨덕턴스 G_i 는

$$G_i = \frac{2P_r}{|V|^2} \quad (16)$$

로 부터, 서셉턴스 성분 X_i 는

$$jX_i = \frac{I}{V} \quad (17)$$

관계로 부터 구하면 입력 어드미턴스 Y_{in} 은 다음식으로부터 계산된다.

$$Y_{in} = G_i + jX_i \quad (18)$$

IV. 반경에 따른 안테나 어드미턴스 계산

배열인자 식(2)에서 구한 10개의 병렬 소자별 어드미턴스 값과 9.4GHz에서 공진되는 원형 마이크로스트립 안테나의 어드미턴스 값이 일치하는 반경 a 를 III 장의 계산식을 이용하여 계산한다. 보다 정확한 반경을 구하기 위하여 stray field가 고려된 dynamic 비유전 상수^[6]를 적용하고 실효반경을 구한 후 이로부터 실제 반경 a 와 이에 대한 정규화된 입력 어드미턴스는 다음 표 2와 같이 계산된다.

표 2. 반경에 대한 입력 어드미턴스
Table 2. Radius vs input admittance.

배 열	반경 a(mm)	입력어드미턴스	
		컨덕턴스	서셉턴스
1	5.8445	0.046	7.445
2	5.8455	0.05198	7.474
3	5.8495	0.095	5.213
4	5.8515	0.139	2.765
5	5.85225	0.167	1.953
6	5.85225	0.167	1.963
7	5.8515	0.139	2.765
8	5.8495	0.095	5.213
9	5.8455	0.05198	7.474
10	5.8445	0.046	7.445

V. 설계 및 측정결과

표 2의 제원으로 복사소자의 간격을 반파장 ($\lambda_0/2$) 배열한 뒤 안테나의 입력 어드미턴스를 계산하면 서셉턴스 성분이 남게된다. 이러한 불필요한 서셉턴스 성분을 제거하고 임피던스 정합을 하기 위하여 입력단에 개방 스템을 달아 주었다.

급전선은 마이크로스트립 선로를 사용하였고 특성 임피던스는 50 ohm이다. 실험을 위하여 사용된 기판은 비유전율 2.52, 두께 0.779mm 및 loss $\tan\delta$ 최대 0.0019인 테프론 기판을 사용하였다.

동작주파수 9.4 GHz에서 계산된 반경 a값인 표 2와 표 3의 설계자료에 의해 배열 안테나를 제작하고 실험한다.

그림 3은 예칭하기 위한 배열 안테나의 필름의 layout이고 그림 4는 제작된 안테나이다.

그림 5와 같이 측정할 원형 마이크로스트립 안테나의 입력정재파 특성을 알기 위해 주파수별 반사계수 $|S_{11}|$ 을 측정할 결과는 그림 6이다. 반사손실은

표 3. 설계자료
Table 3. Design data.

사용 주파수	9.4 GHz
유전체 기판	Teflon $\epsilon_r=2.52$, $\epsilon_{eff}=2.0352$ $\epsilon_{dyn}=1.912$ $h=0.779mm$, $t=0.036mm$ Loss $\tan\delta=0.0019$
소자치수	ro=표 5-2 참조 $d=\lambda_0/2=15.9mm$ $w=2.1833mm$ (feed line 폭) $stud=6.744mm$ b
급전선 임피던스	50 ohm

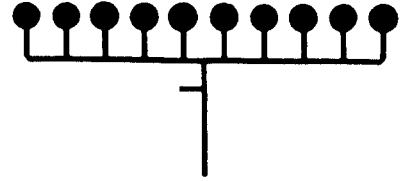


그림 3. 배열 안테나의 layout
Fig. 3. Layout of array antenna.

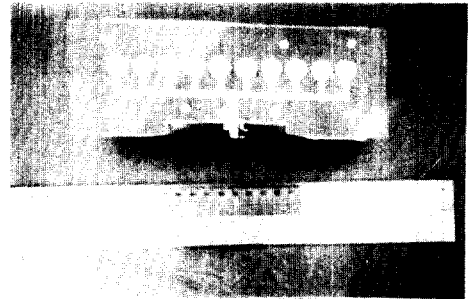


그림 4. 제작된 안테나
Fig. 4. Fabricated antenna.

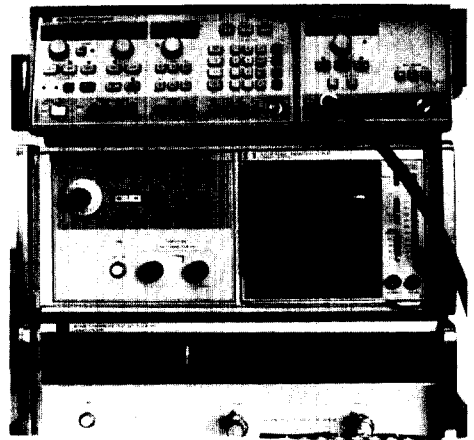


그림 5. 입력 정재파 특성 측정을 위한 장치
Fig. 5. Measurement for input V. S. W. R.

-14dB 정도로 비교적 정합이 잘되고 있으며 9.383 GHz에서 공진이 일어남은 설계치와 거의 일치하였다. 여기서 점선은 이론치이며 실선은 측정치이다.

그림 7은 안테나의 복사패턴과 이득을 측정하기 위한 측정장치를 나타낸 것이며, 송신은 제작한 안테나로 수신은 표준 혼 안테나를 이용하였으며 또한

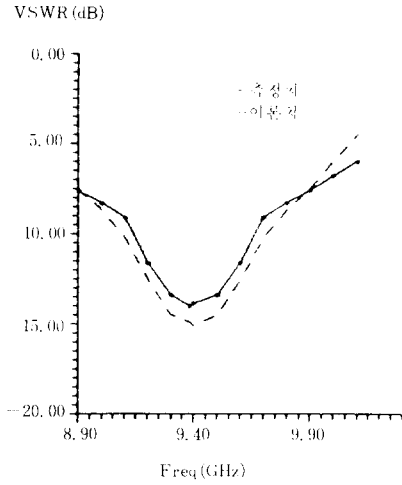


그림 6. 입력 정재파 특성
Fig. 6. Characteristics of input V. S. W. R.

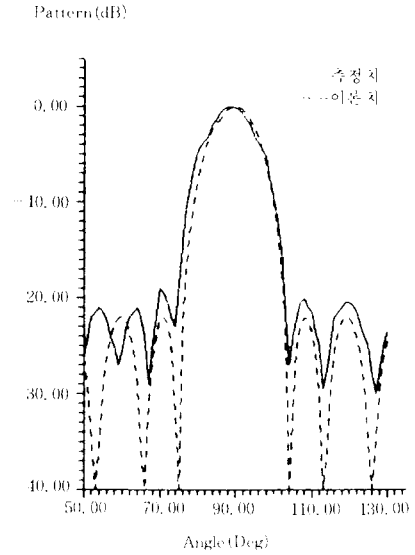


그림 8. 복사패턴
Fig. 8. Radiation pattern.

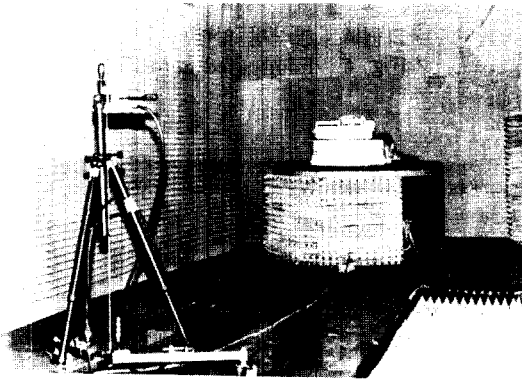


그림 7. 복사패턴 측정장치
Fig. 7. Measurement equipment for measuring the radiation patterns.

주의의 반사파의 영향을 최소화 하기 위해 무반사실에서 실험하였다.

그림 8은 제작한 원형 마이크로스트립 배열안테나의 복사패턴의 측정결과를 나타낸 것이다.

그림 6, 8의 이론적 특성은 최소 입력 정재파비가 1.43:1, 이득 9.78dB, 반전력 빔폭 10.43도 및 최대 부엽준위 -22dB이고, 측정치는 1.5:1, 8.9dB, 11.3도, -19dB로 나타났다. 입력정재파 및 반전력 빔폭 특성은 측정치와 이론치가 잘 일치하고 있으나 이득 및 부엽준위 특성은 다소 차이를 보이고 있다. 이는 공진기의 반경을 정확히 실현하지 못하여 발생된 오

차와 기관과 커넥터 사이에 발생하는 불연속에 의해 나타난 결과로 추정된다. 그러므로 공진기 제작시 충분히 확대하여 설계된 반경을 실현하고 제작 오차를 줄이며, 또한 완벽한 커넥션이 되도록 하면 상당히 오차를 줄일 수 있으리라 생각된다.

VI. 결 론

Stray field가 고려된 반경을 갖는 원형마이크로스트립 배열 안테나를 설계, 제작하였다. 배열은 비균일 배열 방법인 Tscheycheff 배열법을 사용하고 일 반적인 공진기 모델과 마이크로스트립 가장 자리에 발생하는 stray field를 고려하여 안테나의 반경을 계산하였다.

테프론 기관에 배열 소자를 10개 배열하여 동작주파수 9.4 GHz에서 특성을 실험한 결과 만족한 결과를 얻음으로써 이 연구의 타당성에 밝혀졌다.

앞으로 안테나 기관 제작 및 급전부 연결 부위를 개선하면 이론적인 결과에 더욱 수렴할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

- [1] C.A. Balais, "Antenna theory," Harper and Row publishers Inc., pp. 245-257, 1982.
- [2] I.J. Bahl, P. Bhartia, "Microstrip antenna," Artech House, pp. 85-138, 1980.
- [3] K.C. Gupta, A. Benalla, "Microstrip antenna

design," Artech House, *IEEE paper press*, pp. 98-125, 1988.

[4] K.C. Gupta, R. Garg, R. Chadha, "Computer-aided Design of Microwave Circuits," Artech House, pp. 242-251, 1981 .

[5] Y.T. Lo, D. Solomon and W.F. Richard, "Theory and Experiments on microstrip antenna," *IEEE Trans. Antenna and propagation*, vol. AP-27, pp. 137-145, 1979.

[6] 박두석, 홍의석, "stray field를 고려한 원형마이크로스트립 공진기 해석," 대한전자공학회제 26권 12호 pp.39-44, 1989.

[7] P. Kaminow, R.J. Stegen, "Waveguide slot array design," Tm no. 3 48, Hughes Aircraft co. pp.37-44, 1954.

著 者 紹 介

朴 斗 碩 (正會員) 第26卷 第12號 參照
 현재 대우공업전문대학 사무
 자동화과 교수

洪 義 錫 (正會員) 第26卷 第12號 參照
 현재 광운대학교 전자통신공
 학과 교수