

유전체 마개와 덮개가 부착된 구형 도파관의 평면 배열 안테나의 복사패턴 계산

(Calculation of Radiation Patterns of Planar Array Antennas of Rectangular Waveguides Loaded by Dielectric Plug and Sheath)

金世潤*, 河憲兌*

(Se Yun Kim and Huen Tae Ha)

要 約

직사각형 도파관들이 임의의 직교형태로 배열된 안테나의 복사패턴을 소자인자와 배열인자의 곱으로 나타내었다. 도파관내에 여기된 TE_{10} 모드에 대해 계산된 복사패턴에서 E-평면의 특정 방향으로 차단현상이 발생함을 보였다. 도파관 내부에 유전체 마개를 넣거나 전면에 유전체 덮개를 첨가함으로써 이러한 차단 현상을 제거할 수 있음을 보였다.

Abstract

The radiation pattern of a rectangular-grid array antenna consisted of rectangular waveguides is represented by multiplication of its element and array factors. Calculated radiation patterns for excitation of TE_{10} mode inside the waveguides suffer from the blindness at a particular direction on E-plane. Numerical simulations show that the blindness can be removed by inserting dielectric plug inside the waveguides or covering dielectric sheath in front of the waveguides.

I. 서 론

안테나를 하나의 복사체로 구성하지 않고, 여러 개를 배열하여 운용하는 배열 안테나 시스템은 이미 100여년전의 초창기 부터 존재하였는데,^[1] 사용 목적은 주로 당시의 사용 가능한 주파수가 낮아서 하나의 안테나로는 충분한 방향성(directionality)을 얻기 힘들었기 때문이었다. 그러나 1940년대에 초고주파(microwave) 대의 전자파 발생 장치들이 개발됨에 따라 점

차 초창기의 배열 안테나 보다는 적절한 규모의 반사(reflector) 안테나^[2]를 이용하여 매우 강한 방향성을 얻는 방향으로 바뀌었다. 반사 안테나는 지금까지도 위성신호 수신 안테나 등에 널리 사용되고 있다. 그러나 반사 안테나의 방향성은 매우 높지만 탐지하고자 하는 물체의 갯수가 많거나, 움직이는 속도가 빠를 경우에는 기계적인 방법으로 반사 안테나를 구동하는 데 걸리는 최소한의 시간이 길어서 효율가치가 떨어지는 단점이 있다. 특히 군사적인 목적으로 사용될 경우 조기 탐지, 다중 추적등의 문제는 분초를 다투는 일로서 반사 안테나를 실전에 사용하기가 어렵다. 따라서 1960년대 부터 위상 배열 안테나^[3]에 대한 집중적인 연구가 시작되었는데, 이는 전기적인 조절이 가능한

*正會員, 韓國科學技術研究院 應用電子研究室

(Appl. Electron. Lab., KIST)

接受日字: 1991年 12月 14日

위상 변위기(electrically controlled phase shifter)와 스위치(switch)가 개발됨에 따라 더욱 가열 되었다. 또한 1970년대에 들어서 급속한 발전을 본 컴퓨터의 출현에 힘입어 다기능을 갖는 위상 배열 레이다 시스템의 운용이 가능케 되었다. 그러므로 위상 배열 레이다 시스템에 관한 최근 동향은 주로 수행하고 자 하는 업무를 최적 상태로 프로그램화 하는 방향으로 나아가고 있다.^[5]

본논문의 전편 논문 [6]에서는 위상 배열 안테나의 임피던스 정합 특성을 살펴보기 위하여 도파관 절단면상의 점선 성분 전계에 대한 적분 방정식을 수치계산으로 풀어 반사계수를 계산하였다. 본 논문도 국내 기술로 위상 배열 레이다를 개발하기 위한 기초과제의 일환^[7]으로 수행된 연구결과로서 도파관 절단면의 전계로부터 방사된 복사패턴을 이론적으로 해석하고, 여러가지의 구조 변수들에 대한 영향을 수치계산으로 살펴보았다. 특히 유전체 마개를 도파관에 집어 넣거나, 도파관 전면에 유전체 덮개를 씌울 경우 복사패턴상의 변화를 조사 하였다.

II. 위상 배열 안테나의 복사전계

본 논문에서 다룬 위상 배열 안테나는 그림1과 같이 가로 a, 세로 c인 직사각형 도파관들이 z축과 나란한 방향으로 z=0 지점에서 절단되어 가로축인 x방향으로 b간격, 세로축인 y방향으로 d간격으로 z=0인 평면에 무한히 배열되어 있다고 한다. 그리고 그림2와 같이 각각의 직사각형 도파관에 비유전율이 ϵ_1 이고 깊이가 h인 유전체로 된 마개가 끼워져 있고, 위상 배열 안테나 전체는 비유전율이 ϵ_2 이고 두께가 g인 유전체로 된 덮개가 씌워져 있다고 한다. 그리고 $z < -h$ 인 도파관 내부나 $z > g$ 인 공간 모두 공기로 채워져 있다고 가정하였다. 직각 좌표의 원점을 임의의 한 도파관 절단면의 중심으로 취하고, 이 도파관으로부터 x축으로 sb, y축으로 td만큼 떨어진 곳에 중심이 있는 단면적 S_n 내에 있는 도파관을 (s, t)번째 도파관이라고 한다. 이때 각 도파관내에 인가하는 전원의 크기는 일정하고, 다만 위상만 달라서 (s, t)번째 도파관에서는 (0, 0)번째 도파관에 비해 $e^{-j(\psi_x + \psi_y)}$ 와 같은 차이가 있다고 가정한다.

1. 도파관 절단면상의 등가전계

먼저 $z=0$ 인 경계면상의 점선 성분 전계 $E_t(x, y, 0^-)$ 는 도파관 모드인 $\Phi_n(x, y)$ 의 합으로서 다음과 주어진다 고 하자.

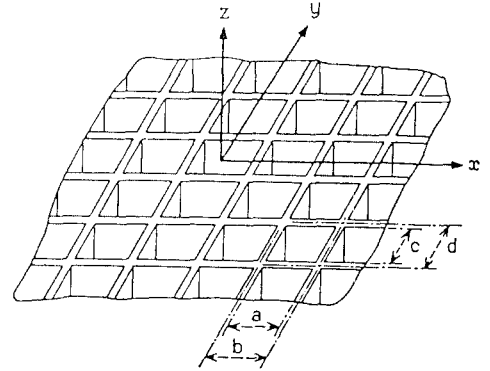


그림 1. 직사각형 도파관의 평면 배열 구조
Fig. 1. A geometry of planar arrays of rectangular waveguides.

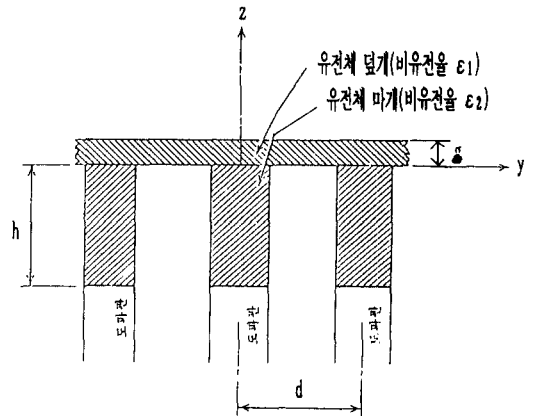


그림 2. 유전체 마개 부착 및 유전체 덮개
Fig. 2. The dielectric plug loading and dielectric sheath covering.

$$E_t(x, y, 0^-) = \sum_{m=1}^M \alpha_m \Phi_m(x, y) \tag{1}$$

이때 α_m 은 단면 전계에 의한 적분 방정식을 수치계산하여 풀 수 있음을 전편 논문 [6]에서 보인 바 있으므로 본 논문에서는 아는 량이라고 둔다. 또한 플로켓 모우드 이론에 따라 $0 \leq z \leq g$ 인 유전체 덮개가 있는 영역에서의 점선방향의 전계 $E_t(x, y, z)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_i(x, y, z) = \sum_{n=-N_1}^{N_1} \Omega_n(x, y) A_{m \in 2} \left[e^{j\Lambda_n z} + R_n e^{j\Lambda_n z} \right], 0 \leq z \leq g \tag{2}$$

여기서 R_1 은 $z=g$ 에서의 반사계수이며, 플로켓 모우드 갯수는 $N=2N_1+1$ 로 제한하였다. 또한 Ω_n 은 n 번째 플로켓 모우드 함수로 이에 대한 유전체 덩개내에서의 z 방향 전파상수가 $\Lambda_n \in \mathbb{R}$ 이다. 이들에 대한 정확한 표현식은 전편 논문 [6]에 상세히 기술하였으므로 여기서는 생략하기로 한다. $z=0$ 면에서 단면 방향 전계는 연속이어야 하므로, 이를 식(1), (2)에 대입하여 정리하면 식(2)의 미지수 A_n 을 수치계산으로 구한 α_m 으로 바꾸어 표현할 수 있다.

그런데 도파관 절단면인 $z=0$ 대신 $z=g$ 평면으로 취하면 복사패턴 계산상의 불편함이 있다. 따라서 유전체 두께가 있는 $0 \leq z \leq g$ 영역을 공기로 바꾸어, 이때의 $z=0$ 에서의 등가 전계 $E_i^{eq}(x, y, z)$ 를 계산하면 다음과 같이 표현된다.

$$E_i^{eq}(x, y, z) = \sum_{n=-N_1}^{N_1} B_n \Omega_n(x, y) \left[\sum_{m=1}^M \alpha_m \iint_{\Sigma_0} dx dy \Phi_m(x, y) \cdot \Omega_n^*(x, y) \right] \tag{3}$$

여기서

$$B_m = \frac{e^{j\Lambda_n z} + R_n e^{j\Lambda_n z}}{1 + R_n} e^{j\Lambda_n z} \tag{4}$$

으로 Λ_n 은 공기중에서의 n 번째 플로켓 모우드의 z 방향 전파상수를 나타낸다.

2. 접근해

그림1과 같은 배열 안테나에서 (s, t) 번째 도파관내의 입사파의 위상이 $(0, 0)$ 번째에 비해 $s\psi_x + t\psi_y$ 만큼 앞선다고 한다면 $z=0$ 인 평면에서의 전계 $E_i(x, y, 0)$ 도 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$E_i(x+sb, y+td, 0) = E_i(x, y, 0) e^{j(s\psi_x + t\psi_y)} \tag{5}$$

$z>0$ 인 공간에서의 전계 $E(x, y, z)$ 는 $+z$ 방향으로 진행하는 파만 존재하므로 다음과 같은 평면파의 적분으로 표시할 수 있다.

$$E(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} dk_x dk_y F(k_x, k_y) e^{j(k_x x + k_y y + k_z z)} \tag{6}$$

이때 F 는 식(6)의 양변에 $z=0$ 를 대입한 후, k_x 와 k_y 에 대한 역푸리에(Fourier) 변환을 취하면

$$E(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} dx dy E(x, y, 0) e^{j(k_x x + k_y y)} \tag{7}$$

으로 $z=0$ 의 전계값이 주어지면 구할 수 있다. 식(6)의 우변에서 직교좌표인 (x, y, z) 을 구좌표인 (r, θ, ϕ) 로 표현하면 다음과 같다.

$$E(r, \theta, \phi) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} dk_x dk_y F(k_x, k_y) e^{j r k_r} e^{j k_x x + j k_y y} \tag{8}$$

여기서 $g(k_x, k_y)$ 는 다음과 같다.

$$g(k_x, k_y) = (\sin\theta \cos\phi) k_x + (\sin\theta \sin\phi) k_y + \cos\theta \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \tag{9}$$

일반적으로 안테나 복사패턴은 원거리(far-field) 영역에서 구하므로, 식(8)에서 E 를 $r \rightarrow \infty$ 일 경우에 대해 계산하기로 한다. 이 경우 식(8)의 우변을 점근적분(asymptotic integral)을 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E(r, \theta, \phi) = \frac{j e^{-jk_r r}}{2\pi r} F(k_x, k_y) k \cos\theta \tag{10}$$

여기서 k_x 와 k_y 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_x = k \sin\theta \cos\phi = k T_x, \quad k_y = k \sin\theta \sin\phi = k T_y \tag{11}$$

$z \geq g$ 인 공간에서는 $\nabla \cdot E = 0$ 이다. 따라서 이를 식(6)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$F(k_x, k_y) \cdot k = 0 \tag{12}$$

이때 F 를 단면성분 F_1 와 z 방향 성분 F_2 로 나누면, F_2 는 식(12)의 관계로 F_1 로 표현될 수 있으므로 F 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = F_1 + Z_0 \left[-\frac{F_1 \cdot k_z}{k_2} \right] \tag{13}$$

여기서 k 도 k_1 와 $z_0 k_2$ 로 표현하였다. 이 때 $z=0$ 의 단면 전계를 식(3)의 등가전계로 나타내면 F_1 는 식(11)의 관계를 이용하여 T_x 와 T_y 에 대해 다음과 같이 주어진다.

$$F_1(T_x, T_y) = \sum_{x=-x}^x \sum_{y=-y}^y e^{j s (T_x k_x b + \psi_x) + j t (T_y k_y d + \psi_y)} \times \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} ds dy E_i^{eq}(x, y, 0) e^{j k T_x x + j k T_y y} \tag{14}$$

식(13)과 (14)를 식(10)에 대입하여 정리하면 $r \rightarrow \infty$ 일 때 E를 T_x 와 T_y 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(T_x, T_y) = f(T_x, T_y)S_0(T_x, T_y) \quad (15)$$

여기서 $f(T_x, T_y)$ 와 $S_0(T_x, T_y)$ 는 다음과 같다.

IV. 수치계산 결과 및 검토

1. 기본 구조의 복사 패턴

그림1에서 $a=c=0.6305\lambda$, $b=d=0.6729\lambda$, $\epsilon_1=\epsilon_2=1.0$, $g=h=0.0\lambda$ 인 경우를 기본 구조의 위상 배열 안테나로 취하여, 이에 대한 복사 패턴을 계산하였다. 이때 배열 소자 개수를 19×19 인 경우를 택하였으며, 이론적으로 무한 개의 도파관 모우드 갯수 M 과 플로켓 모우드 갯수 N 을 수치계산을 위해 유한 개로 제한하여야 한다. 먼저 그림3은 플로켓 모우드 갯수 $N=40$ 개로 두고 도파관 모우드 갯수 M 을 점차 증가시켰을 경우 주빔의 E-평면 복사 패턴을 나타낸 것으로, $M=6$ 개일 때와 기본 갯수로 취한 $M=14$ 개일 때와는 차단 현상이 일어나는 θ 의 위치가 다르며 복사량도 다를 수 있다. 그러나 $M=23$ 개로 기본 갯수보다 더 많이 취하더라도 E-평면 복사 패턴에는 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 도파관 모우드 갯수를 $M=14$ 개로 제한하더라도 큰 오차가 없으므로 이후의 수치계산상의 편

의를 위해서 복사 패턴 계산시 $M=14$ 개를 도파관 모우드의 기본 갯수로 취하기로 한다.

다음 그림4는 도파관 모우드 갯수 $M=14$ 개로 두고 플로켓 모우드의 갯수 N 을 점차 증가시켰을 경우 주빔의 E-평면 복사 패턴을 나타낸 것으로 $N=10$ 개일 경우와 기본 갯수로 취한 $N=40$ 개일 경우는 E-평면 복사 패턴간의 차이가 심함을 알 수 있다. 이는 플로켓 모우드가 10개일 경우는 고주파 성분이 충분하지 못하여 복사 패턴중 $\theta=50^\circ$ 근방에서의 급한 변화와 같은 결과를 보여준다. 그러나 $N=40$ 개와 60개의 결과는 거의 차이를 구분할 수 없을 정도로 서로 일치한다. 그런데 수치계산시 모우드 갯수가 적을수록 계산 시간이 줄므로 여기서는 플로켓 모우드 갯수 N 을 40개로 취하여 이를 기본 값으로 삼아 이후의 계산에 사용하기로 한다.

그림5는 ψ_x 와 ψ_y 를 바꾸어 가면서 T_x, T_y 로 구성된 2차원 공간의 제 1상환에서의 19×19 로 배열된 위상 배열 안테나의 정규화된 복사 패턴을 그린 것이다. H-평면인 $T_x=0$ 인 곳에서는 복사 강도가 거의 0dBm으로 일정하며 T_x 가 0.8 이상에서 조금씩 줄다가 0.95 이상 부터 급속히 줄어드는 정도이다. E-평면인 $T_x=0$ 인 곳에서도 $T_y=0.46$ 지점에서의 급격한 감쇄이외에는 H-평면과 유사함을 볼 수 있다. E-평면에서의 급격한 복사 감쇄는 도파관간의 상호 결합에 의한 완전 반사로 차단(blindness) 현상이 일어나기 때문이다.

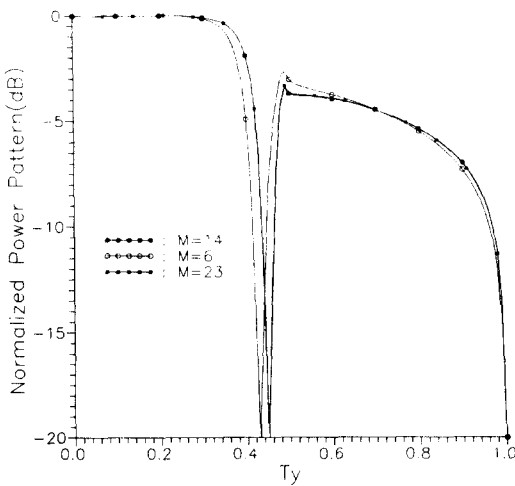


그림 3. 도파관 모우드 갯수의 영향
Fig. 3. Effects of the number of waveguide modes.

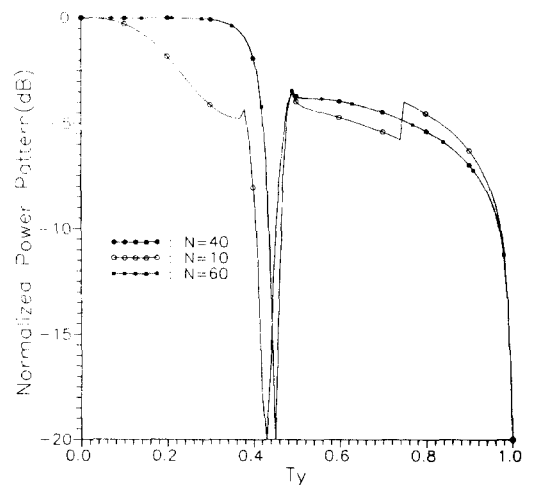


그림 4. 플로켓 모우드 갯수의 영향
Fig. 4. Effects of the number of Floquet modes.

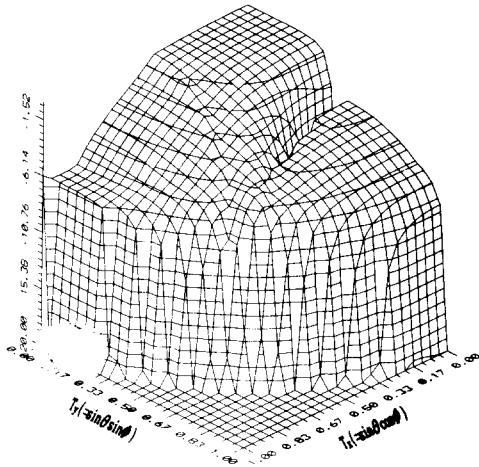


그림 5. 기본 구조의 위상 배열 안테나의 3차원 복사패턴
 Fig. 5. 3-dimensional radiation pattern of the canonical structure of phased array antennas.

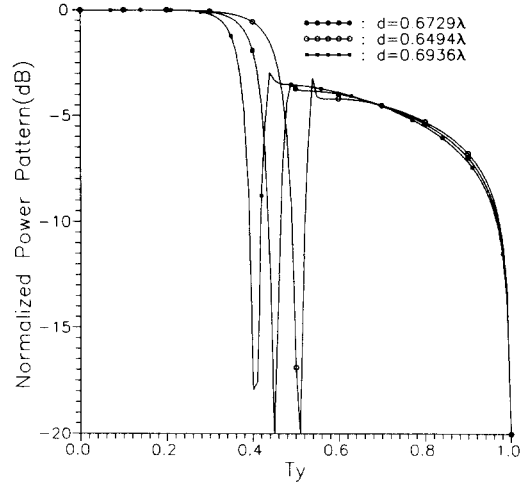


그림 6. y방향 배열간격의 영향
 Fig. 6. Effects of y-directional array interval.

2. 배열간격 및 유전체 구조물의 영향

다음 그림6은 y축 방향의 배열 간격 d 를 기본 값 보다 늘이거나 줄였을 때 E-평면 복사 패턴 변화를 보여 준다. 기본 값인 $d=0.6729\lambda$ 에서 부터 d 가 더 커지면, 차단 현상이 발생하는 θ 가 0° 측으로 이동하며, 반대로 d 가 줄어들면 90° 측으로 이동함을 볼 수 있다. 배열 간격 d 에 의한 차단 현상이 생기는 θ 의 위치 변화는 입사 파가 TE_{10} 모우드로서 y방향 성분만을 갖고 있어 ψ_x 변화에 대한 E-평면의 복사 패턴에서 계산하면 많은 변화가 생기게 된다. 특히 차단 현상이 일어나는 θ 의 위치는 기본 구조에 비해 y방향의 간격 d 가 늘어나면 인접 도파관간의 구조적인 위상차가 커지므로 전원측에 가해지는 위상차 ψ_x 는 도리어 줄어든 곳에서 유사한 상호 결합에 의한 도파관 단면에서의 완전 반사가 생기게 된다. 그러므로 d 가 커지면 완전 반사를 일으키는 ψ_x 가 줄어, 실제 차단 현상이 일어나는 θ 의 위치도 0° 쪽으로 이동하게 된다.

그림2에서 보인 바와 같이 위상 배열 안테나에 쓰이는 유전체 구조물로는 도파관 내부에 넣는 마개 형태와 안테나 전면에 씌우는 덮개가 있다. 먼저 유전체 마개의 영향에 대해 살펴 보기로 한다. 그림7은 마개의 길이 $f=0.1\lambda$ 일 경우 마개의 비유전율 ϵ_1 이 1.0에서 4.0까지 점차 늘어날 경우의 E-평면의 복사 패턴을 그린 것으로, 실제 비유전율이 1.0이라는 것은 유전체 마개

가 없는 것과 마찬가지로 기본 구조에서의 E-평면 복사 패턴과 같다. 유전체 마개의 비유전율이 커지면 도파관 내에서의 반사가 많이 일어나 외부로 복사되는 양이 줄어들게 되는데, 그림7에서 볼 수 있듯이 ϵ_1 이 커질수록 전반적으로 복사 세력이 줄어들음을 볼 수 있다. 그런데 흥미로운 점은 유전체 마개가 없을 경우 θ 가 약 27° 인 근방에서 차단 현상이 발생하는데 반하여, $\epsilon_1=2.0$ 이상인 유전체 마개가 있으면 그러한 차단 현상이 사라진다는 점이다.

또 다른 유전체 구조물인 유전체 덮개의 영향에 대해서도 살펴보았다. 먼저 유전체 덮개의 두께인 g 가 0.1λ 일 경우 덮개의 비유전율 ϵ_2 가 1.0에서 4.0까지 증가할 때의 E-평면상의 복사 패턴 변화를 그림8에 그렸다. 유전체 덮개의 비유전율이 커지면 복사 세기가 줄어들음을 볼 수 있는데, 이는 그림7의 도파관 마개의 비유전율이 커질 때와 마찬가지로 유전체 구조물에서의 반사에 의해 투과되어 외부로 복사되는 전자파의 크기가 줄어들기 때문이다. 특히 ϵ_2 가 2.0이나 3.0일 때에는 본 구조의 복사 패턴중 θ 가 약 27° 근방에서의 차단 현상은 사라지게 되나, $\epsilon_2=4.0$ 일 경우는 유전체 덮개내의 자체 공진에 의한 표면파의 형성으로 θ 가 약 24° 일 때 강한 감쇄가 발생하며 또한 $\theta=45^\circ$ 근방에서도 약 하지만 감쇄가 발생한다.

그림7과 8로부터 유전체 마개와 덮개의 역할을 잘 파악할 수 있을 것이다. 즉, 도파관들간의 상호 결합에 의해 특정한 선형 위상을 가했을 때 도파관 절단면에

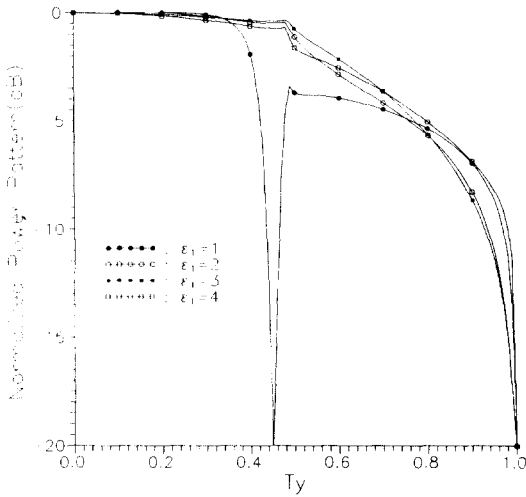


그림 7. 유전체 마개의 영향
Fig. 7. Effects of dielectric plug loading.

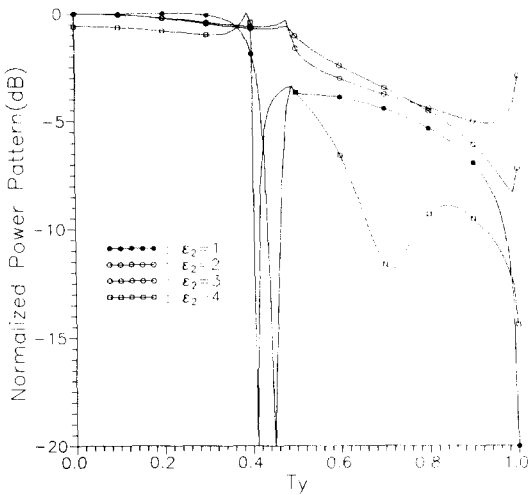


그림 8. 유전체 덮개의 영향
Fig. 8. Effects of dielectric sheath covering.

서 완전 반사가 일어나 복사 패턴상에 차단 현상이 일어나기도 하는데, 이 때 적절한 유전체 마개나 덮개를 이용하면 이러한 차단 현상을 막을 수 있다. 그러나 유전체 마개나 덮개가 없어도 위상 배열 안테나의 단면 크기, 배열 간격등이 달라지면 이러한 차단 현상이 없는 구조도 있을 수 있으며, 이 경우는 유전체 구조물에 의해 도리어 이러한 차단 현상을 유발할 수 있다. 따라서 단순히 외부의 불순물들이 도파관 내부로 들어가는

것을 막기 위해 유전체 구조물을 사용할 경우 이들의 영향이 복사 패턴에 차단 현상을 없애주는지 또는 유발시키는지를 충분히 검토한 다음에 사용하여야 한다.

V. 결 론

본 논문에서는 직사각형 도파관들이 직교 형태로 평면 배열된 안테나의 복사패턴을 전편 논문 [6]에서 구한 도파관 절단면상의 점선 성분의 전개 값으로부터 점근적으로 구할 수 있음을 보였다. 실제 복사패턴은 하나의 도파관의 복사특성을 나타내는 소자인자와 배열구조 특성에 따른 영향을 나타내는 배열 인자의 곱으로 표현하였다. 수치계산 결과 복사패턴상에서 특정 방향으로 전자파가 복사되지 않는 차단 현상(blindness)이 존재함을 볼 수 있었으며, 격자 간격을 조정함으로써 이러한 차단 방향을 이동시킬 수 있음을 보였다. 특히 도파관 내부에 유전체 마개를 넣거나 도파관 전면에 유전체 덮개를 씌우면 이러한 차단 현상을 제거할 수 있음을 확인하였다. 그러나 유전체 마개나 덮개의 두께와 유전율을 적절히 선정하지 않으면, 유전체내의 공진현상에 의해 특정 방향으로의 신호 감쇄가 발생할 수 있음을 보였다.

參 考 文 獻

- [1] S. G. Brown, British Patent No. 14449, 1899.
- [2] A. W. Love, Ed., *Reflector Antennas*. New York : IEEE Press, 1978.
- [3] R. C. Hansen, Ed., *Microwave Scanning Antennas*. vols. I, II, and III, New York : Academic Press, 1964.
- [4] Special Issue on Electronic Scanning, *Proc. IEEE*, vol. 56, no. 11, 1968.
- [5] S. S. Blackman, *Multiple-Target Tracking with Radar Application*. Dedham, MA : Artech House, 1986.
- [6] 하헌태, 김세윤, "위상 배열 안테나의 임피던스 정합에 관한 연구," 전자공학회 논문지, 29-A권, 2호, pp. 24-32, 1992.
- [7] 김세윤, 하헌태, "위상 배열 안테나의 해석에 관한 연구," 한국과학기술연구원 수탁과제 보고서, 1991년 12월.

著 者 紹 介

金 世 潤(正會員) 第25卷 第8號 參照
현재 한국과학기술연구원
응용전자연구실 선임 연구원

河 憲 兌(正會員) 第28卷 A編 第1號 參照
현재 한국과학기술연구원
응용전자연구실 연구원