

論文93-30A-1-1

## 경사진 배열구조를 갖는 위상배열 안테나의 복사패턴 계산

## (Calculation of Radiation Patterns on Phased Array Antenna of Slant Grid)

河憲兌\*, 金世潤\*

(Huen Tae Ha and Se Yun Kim)

## 要約

본 논문에서는 구형 도파관들이 경사진 격자구조 형태로 배열된 안테나의 복사특성을 조사하였다. 특히 경사각도가 복사패턴에 미치는 영향을 모우드 해석에 입각하여 도파관 단면전계에 대한 적분방정식을 수치계산으로 풀어서 계산하였다. 또한 복사패턴상의 차단현상도 유전체 마개나 덮개를 적절히 첨가함으로써 이동시킬 수 있음을 보였다.

## Abstract

The radiation characteristics of a phased array antenna consisted of rectangular waveguides with a slant grid are investigated here. In particular, the effects of the slant angle on the radiation patterns are calculated by solving numerically the integral equation to the electric field over the waveguide aperture in view of the modal analysis. And it is found that the blindness on the radiation pattern can be moved by inserting a dielectric plug or sheath properly.

## 1. 서론

국내 기술에 의한 위상배열 레이더 시스템을 개발하기 위한 기반 기술 연구로서 위상배열 안테나의 특성연구<sup>(1)</sup>가 수행되고 있다. 이미 선진국에서는 군사적인 목적으로 개발 완료하여 실전에 배치하고 있으나,<sup>(2,3)</sup> 위상배열 안테나의 설계는 매우 복잡한 해석 과정이 필요함이 잘 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 최근 직사각형 배열구조를 갖는 위상배열 안테나의 임피던스 정합특

성과 복사패턴에 관한 이론적인 해석과 수치계산 결과를 발표하였다.<sup>(5,6)</sup> 본 논문에서는 배열구조가 경사진 격자형태인 무한배열 안테나의 복사패턴에 대해 배열 경사 각도가 미치는 영향을 해석하였다.

본 논문에서 살펴보고자 하는 위상배열 안테나는 그림1과 같이 가로  $a$ , 세로  $c$ 인 직사각형 도파관들이  $z$ 축과 나란한 방향으로  $z=0$  지점에서 절단되어  $\xi$ 방향으로  $b$ 간격,  $\zeta$ 방향으로는  $d$  간격으로  $z=0$  인 평면에 무한히 배열되어 있다고 한다. 이 때  $\xi$ 와  $\zeta$ 는 직각좌표인  $x$ 와  $y$ 에 대해 각각  $\xi=x\cos\theta$ 과  $\zeta=y-x\tan\theta$ 의 관계가 있다고 하면,  $\theta$ 가 경사각도를 의미한다. 그리고 그림2와 같이 각각의 직사각형 도파관에 비유전율이  $\epsilon_1$ 이고 깊이가  $f$ 인 유전체로 된 마개가 끼워져 있고, 위상 배열 안테나 전체는 비유전율이  $\epsilon_2$ 이고 두께가  $g$ 인 유전체로 된 덮개가 씌워져 있다고 한다. 그리고

\*正會員, 韓國科學技術研究院 應用電子研究室

(Appl. Electron. Lab., KIST)

(※ 본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 장기 기초 과제 중 세부과제의 일부로 수행되었음을 밝힙니다.)

接受日字: 1992年 10月 2日

$z < -f$  인 도파관 내부나  $z > g$  인 공간 모두 공기로 채워져 있다고 가정하였다. 이 때  $z=0$ 인 평면에서 도파관이 차지하는 면적 이외의 부분은 완전도체로 채워져 있다고 한다. 편의상  $(\xi, \zeta, z)$  좌표의 원점을 임의의 한 도파관 절단면의 중심으로 취하고, 이 도파관으로부터  $\xi$ 축으로  $sb$ ,  $\zeta$ 축으로  $td$  만큼 떨어진 곳에 중심이 있는 단면적  $S_{st}$  내에 있는 도파관을  $(s, t)$ 번째 도파관이라고 한다.

본 논문에서 사용한 시간함수는  $e^{i\omega t}$ 로 취하였으며, 도파관내에서 인가되는 전자파는  $z=0$ 인 도파관 절단면에서 충분히 멀리 떨어져 있다고 하여 전원쪽으로 반사되는 파는 재반사되지 않는다고 가정한다. 이때 각 도파관내에 인가하는 전원의 크기는 일정하고, 다만 위상만 달라서  $(s, t)$ 번째 도파관에서는  $(0, 0)$ 번째 도파관에 비해  $e^{i\alpha_s} e^{i\beta_t}$ 와 같은 위상 차이만 있다고 가정한다. 따라서  $(0, 0)$ 번째 도파관의 전자파만 알면  $z=0$ 면의 모든 전자파를 알 수 있다. 그림3은  $(0, 0)$ 번째 도파관에서의 전자파 표현식에 필요한 소영역 정의의 나타낸 것이다.  $S_s$ 와  $S_t$ 는 각각  $(0, 0)$ 번째 도파관을 중심으로 한 직사각형 소영역과 평행사변형 소영역을 의미하며,  $S_w$ 는  $(0, 0)$ 번째 도파관 단면의 면적을 의미한다.

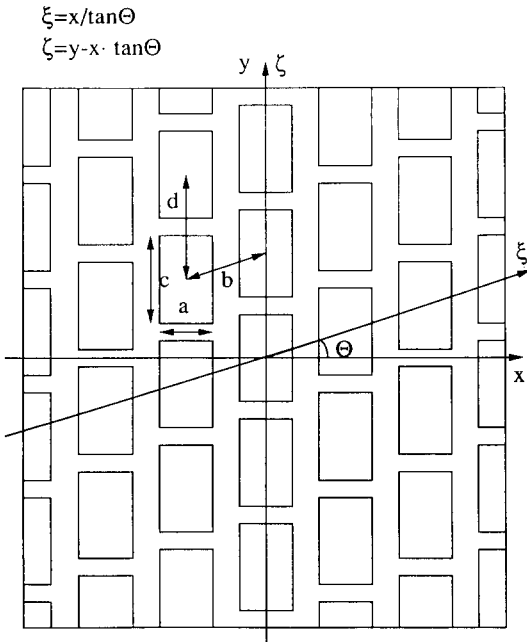


그림 1. 경사진 격자형태로 무한개의 구형도파관들이 분포된 위상배열 안테나

Fig. 1. Phased array antenna consisted of infinite number of rectangular waveguides in slant grid.

II 이론

1. 도파관 내부 단면 전체

그림1에 보인 무한 개의 도파관들은 구조적으로 동일하므로 도파관내의 전자파는 모두 동일한 모우드로 전개할 수 있다. 그리고 각 도파관에 입사되는 입사파가 동일한 크기를 갖고 오직 선형적인 위상차만 가지므로 하나의 도파관에서의 전자파만 알면 다른 도파관에서의 전자파는 알고 있는 위상차만 곱하여 쉽게 구할 수 있다.

Definition: Reflection Coefficient

$$R = E^+ / E^- \text{ at } z = -f$$

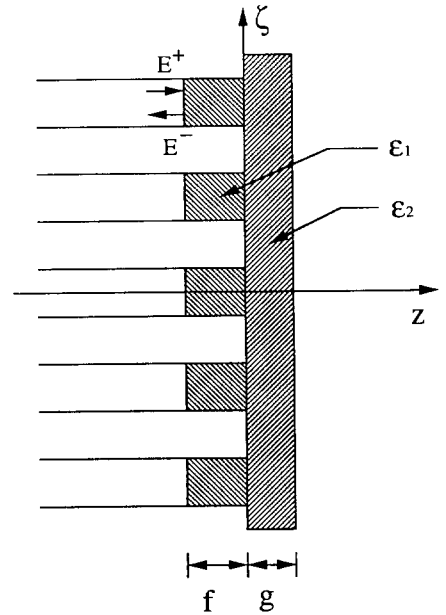


그림 2. 도파관내에 삽입된 유전체 막개와 도파관 전면에 부착된 유전체 덮개

Fig. 2. Dielectric plugs inserted inside waveguides and dielectric sheath covered at the front of waveguides.

그림2를 보면 도파관 내부는 공기로 채워진  $z < -f$  영역과 유전체로 채워진  $-f < z < 0$  영역으로 나눌 수 있다. 각 영역에서의 전자파 성분은 각각 도파관 단면  $S_w$ 에서 단위직교하는 모우드 함수  $\Phi_n(x, y)$ 의 합으로 표현한 후  $z=-f$ 에서의 경계조건을 만족시킴으로서 도파관 내부구조의 특성을 표현하는  $-f < z < 0$ 에서의 전자파 표현식을 구할 수 있다. 도파관 모우드 함수에 관한 표현식은 이미 발표된 논문<sup>[5]</sup>에 자세히 기술되

어 있으므로 여기서는 생략한다. 다음 모우드 함수가 단위직교한다는 성질을 이용하여  $z=0$  면의 접선 성분 자체  $-\mathbf{z}_0 \times \mathbf{H}(x, y, 0^+)$  를 면의 접선 성분 전체  $z=0$   $E_t(x, y)$  와 모우드 함수  $\Phi(x, y)$  의  $S_w$  에 대한 내적의 합으로 표현할 수 있다.<sup>[1]</sup>

2. 도파관 외부 자체

그림1의 구조는  $\xi$ 와  $\zeta$ 축에 따라 도파관 배열과 입사 파가 주기적인 특성을 가지므로  $\xi$ 와  $\zeta$ 축에 대한 플로켓 이론을 적용할 수 있다. 플로켓 이론으로부터 구한  $S_p$ 에서 단위직교하는 단면 모우드 함수  $\Omega_j(\xi, \zeta)$ 의 합 형태로 유전체가 채워진  $0 < z < g$  영역과 공기로 채워진  $z > g$  영역의 전자파를 기술한다. 다음  $z=g$  면의 경계조건을 부과하면 도파관 외부의 구조적인 특성을 포함한  $0 < z < g$  영역의 전자파 표현식을 구할 수 있다. 마지막으로 모우드 함수가 단위직교한다는 성질을 이용하여  $z=0$ 면의 접선성분 자체  $-\mathbf{z}_0 \times \mathbf{H}(x, y, 0^+)$ 를  $z=0$ 면의 접선 성분 전체  $E_t(\xi, \zeta)$ 와 모우드 함수  $\Omega_j(\xi, \zeta)$ 의  $S_p$ 에 대한 내적의 합으로 표현할 수 있다. 이때  $-\mathbf{z}_0 \times \mathbf{H}(x, y, 0^+)$ 의 표현식은 다음과 같다.

$$-\mathbf{z}_0 \times \mathbf{H}(\xi, \zeta, 0^+) = \iint_{S_p} \cos\theta d\xi' d\zeta' \sum_{j=-\infty}^{\infty} W_j \Omega_j(\xi, \zeta) [\mathbf{Q}_j^*(\xi', \zeta') \cdot \mathbf{E}_t(\xi', \zeta')] \quad (1)$$

이 때 \*는 공액 복소수를 나타낸다. 식(1)의  $j$ 는  $qr$ 에 관계없이 플로켓 모우드 구분을 위해 붙인 편의상의 기호이다. 그리고 식(1)의  $W_j$ 는 각 모우드 함수에 대한 도파관 바깥의 구조적인 특성에 대한 정보를 갖는 상수로서 그 형태는 이미 직사각형 격자구조를 다룬 논문<sup>[5]</sup>에서 자세히 기술하였으므로 여기서는 생략하기로 한다. 그리고  $\Omega_j(\xi, \zeta)$ 는 다음과 같다.

i)  $k_q \neq 0$  또는  $k_r \neq 0$

$$\Omega_{qr}(\xi, \zeta) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{bd \cos\theta}} \frac{-x_0 k_r + y_0 (k_q / \cos\theta - k_z \tan\theta) \exp[j(k_q \xi + k_r \zeta)]}{\sqrt{(k_q / \cos\theta - k_z \tan\theta)^2 + k_r^2}} TE \\ \frac{1}{\sqrt{bd \cos\theta}} \frac{x_0 (k_q / \cos\theta - k_z \tan\theta) + y_0 k_r \exp[j(k_q \xi + k_r \zeta)]}{\sqrt{(k_q / \cos\theta - k_z \tan\theta)^2 + k_r^2}} TM \end{cases} \quad (2a)$$

ii)  $k_r = 0$  또는  $k_q = 0$

$$\Omega_{qr}(\xi, \zeta) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{bd \cos\theta}} (-x_0) TE \\ \frac{1}{\sqrt{bd \cos\theta}} (-y_0) TM \end{cases} \quad (2b)$$

이때  $k_q$ 와  $k_r$ 는 각각 다음과 같다.

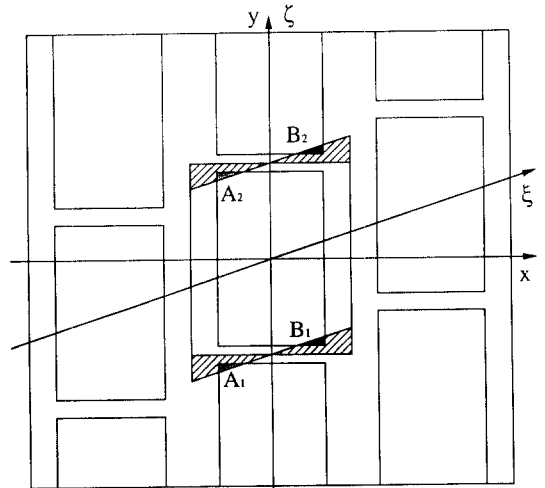
$$k_q = (2\pi q)/b \quad (3a)$$

$$k_r = (2\pi r)/d \quad (3b)$$

아래 첨자  $q, r$ 은 각각  $\xi$ 와  $\zeta$ 방향으로의 모우드 순서를 나타내는 것이다.

3. 적분 방정식

이제는  $(0, 0)$ 번째 도파관에서 구한 도파관 내부와 외부의 접선 성분 자체를  $z=0$ 면의 경계조건으로 소거시켜 수치계산에 필요한 적분 방정식을 만드는 일반 남았다. 수치계산을 하여 얻고자 하는 물리량은 적분식의 피적분 함수인  $z=0$ 면의 접선 성분전계이다. 따라서  $z=0$ 면의 접선 성분 전체를 변수로 취하여야 하는데 도파관 내부와 외부의 소영역  $S_w$ 와  $S_p$ 가 서로 일부만을 겹치고 있어 같은 양으로 둘 수 없다. 하지만 다행히 도파관 외부 자체 표현식에 있어 그림3의 빗금친 면적  $A_1, B_2$ 에 대한 적분 값이  $A_2, B_1$ 에 대한 적분 값과 같아서 적분 구간이  $S_p$ 에서  $S_w$ 로 바뀔 수 있다.<sup>[1]</sup>



Rectangular Cell :  $S_w^{(0,0)}$   
Parallelogram Cell :  $S_p^{(0,0)}$   
Waveguide Cross Section :  $S_w^{(0,0)}$

그림 3. 경사진 격자구조의 단위 소영역의 적분  
Fig. 3. Integration over unit element area in slant grid.

도파관 내부와 외부의 전자파에  $z=0$  면의 경계조건, 즉 도파관 개구면의 접선 성분 전자파가 연속이며 도체판의 접선 성분 전계가 0이라는 조건을 부과하여 적분방정식을 얻을 수 있다. 이 때 도파관 외부 전자파 표현식은 적분 구간이  $S_w$ 로 바뀔 때 따라  $(\xi, \zeta)$ 와  $(x, y)$ 의 관계식을 이용하여 직각 좌표계로 표현하였다. 편의상 도파관내의 입사파는  $i=1$ 인 하나의 도파관 모우드만으로 되어져 있다고 가정하였다.

$$U_i \Phi_i(x, y) = \iint_{S_w} \left[ \sum_{j=1}^{\infty} V_j \Phi_j(x, y) \Phi_j(x', y') + \sum_{j=1}^{\infty} W_j \Omega_j(x, y) \Omega_j^*(x', y') \right] \cdot \mathbf{E}_t(x', y') dx' dy' \quad (4)$$

이 때  $\Omega_i(x, y)$ 는 식(2)에  $\xi$ 와  $x, y$ 의 관계식을 대입하여 얻은 것이며,  $U_i$ 과  $V_i$ 는 도파관 내부 특성을 포함한 상수로서, 이미 발표한 논문<sup>[5]</sup>에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

4. 복사패턴

식(4)의 적분 방정식에서 알고자 하는 물리량인  $z=0$  면의 접선 성분 전계를 구하기 위해  $E_t$ 를 알고 있는 기저 함수의 유한한 급수전개로 표현하여야 한다. 이 때 기저함수는 수직계산상의 오차를 줄이기 위해 해석적인 적분이 가능하며,  $E_t$ 와 같은 경계조건을 갖는 것으로 취하는 것이 유리하다. 본 논문에서는 이러한 특성을 만족하는 기저함수로 도파관 모우드 함수인  $\Phi_m$ 로 취하였다. 이를 식(4) 적용하고, 양변에  $\Phi_l$ 를 내적하여 정리하면 식(4)는 다음과 같은 선형 방정식으로 표현된다.

$$U_i \delta_{i*} = \sum_{m=1}^M \left[ V_m \delta_{im} + \sum_{l=1}^L W_l P_{li} \right] \alpha_m \tag{5}$$

여기서  $M$ 은  $E_t$ 를 근사하기 위한 모우드 함수의 갯수이며,  $L$ 은 적당한 오차 범위를 유지하도록 하기 위해 근사한 플로켓 모우드의 갯수이다.  $P_{lm}$ 은 1번째 플로켓 모우드 함수와  $m$ 번째 도파관 모우드 함수 사이의 내적을 의미하며, \*는 공액 복소수를 의미한다.  $\delta_{mn}$ 은 Kronecker delta 함수이다. 마지막으로  $\alpha_m$ 은  $E_t$ 를 근사한  $m$ 번째 모우드 함수의 전개 계수이다.

식(5)의 선형 방정식으로부터  $\alpha_m$ 을 구하면, 도파관 내의 공기와 유전체 매개의 경계면인  $z=f$ 에서의 각 모우드의 크기를 쉽게 구할 수 있다. 여기서  $\alpha_m$ 은  $z=0$  면의 접선 성분 전자파의 크기를 나타낸다. 이렇게 구한 접선성분 전자파로부터 도파관 외부의 유전체 덮개의 영향을 고려한  $z=0$  면의 등가 전계를 얻을 수 있으며, 이 경우 도파관 외부는 공기로 채워진 구조로 대체된다. 원거리 전개분포가  $z=0$  면의 등가 전계의 스펙트럼 성분과 푸리에(Fourier) 관계에 있음을 이용하여, 측정거리가 충분히 멀리 떨어져 있다고 하면 점근적분으로부터 복사패턴을 구할 수 있다.<sup>[6]</sup> 일반적으로 복사패턴은 안테나를 원점으로부터 멀리 떨어진 구면상에서의 임의의 점에서 수신전력을 최대 전력값으로 나눈 것을 그린 것인데, 구좌표 대신  $T_x = \sin\theta \cos\phi$ ,  $T_y = \sin\theta \sin\phi$ 를 써서 구면상의 위치를 표시한다.

III 수치계산 및 검토

본 논문에서의 복사패턴들은 무한배열이 아니고, 전편 논문<sup>[6]</sup>에서 다룬 것과 마찬가지로  $19 \times 19$ 개의

구형 도파관들로 구성된 위상배열 안테나에 대해 계산하였다. 먼저 그림1에서  $a=c=0.6305\lambda$ ,  $d=0.6729\lambda$ 인 기본 구조에서  $b=0.9516\lambda$ ,  $\theta=45^\circ$ 인 배열 안테나의  $\phi=90^\circ$  즉  $T_x=0$ 인 평면에서의 복사패턴을 계산하였다. 이 경우는  $b=d=0.6729\lambda$ ,  $\theta=0^\circ$ 인 정사각형 격자 구조와 같은데, 실제 전편 논문 [6]에서 기술한 방법으로 계산한 복사패턴과 일치함을 그림4에 보임으로서 본 논문의 경사진 격자 구조를 갖는 배열 안테나의 복사패턴 계산 프로그램의 타당성을 입증하였다.

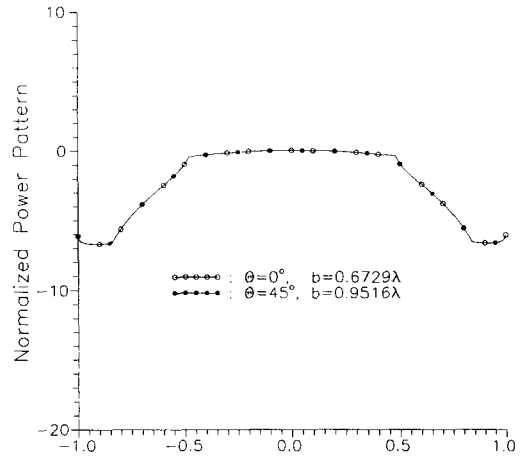


그림 4. 경사진 격자 배열에 대해 계산된 복사패턴의 유용성

Fig. 4 Validity of the radiation pattern calculated for the slant-grid array.

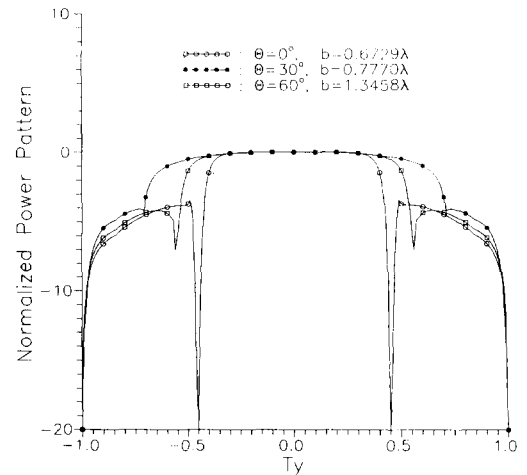


그림 5. 경사구조의 경사각의 영향

Fig. 5. Effects of the induced angle in slant grid.

그림 5는 기본구조의 위상배열 안테나에서  $\Theta$ 를  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ 로 바꿀 경우  $T_x=0$ 인 평면에서의 복사 패턴을 나타낸다. 수치계산시 도파관 모우드를 32개, 플로켓 모우드를 80개 취하였으며 이 후 복사패턴 계산에도 동일하게 적용하였다. 이 때  $b=0.6729\lambda$ ,  $0.7770\lambda$ ,  $1.3458\lambda$ 로 각각 주어지는데, 그림5에서 보듯이  $\Theta=30^\circ$ 일 경우에 가장 넓은 영역의  $T_y$ 까지 복사 전력이 감쇄하지 않는다. 일반적으로  $\Theta=30^\circ$ 일 경우의 배열구조가 가장 효율적인 복사패턴을 형성하는 사실<sup>[7]</sup>과 그림5의 결과는 잘 일치함을 알 수 있다.

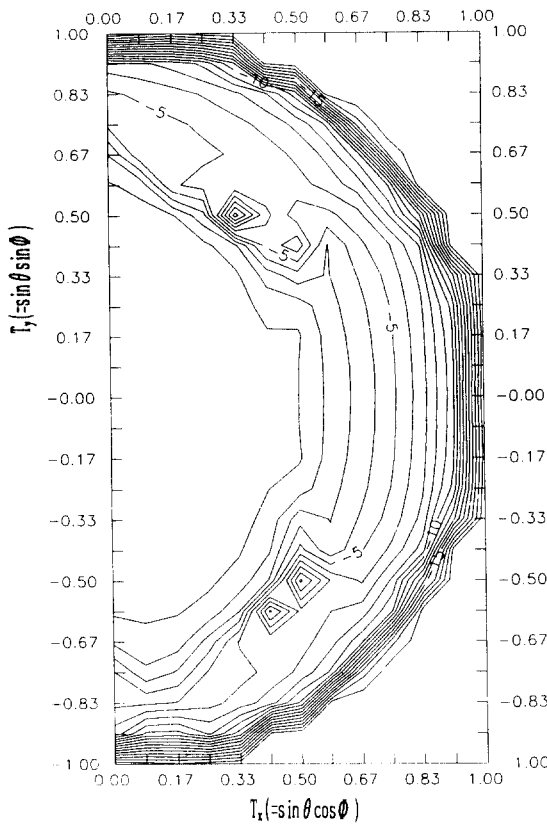


그림 6. 기본 구조의 3차원 복사패턴.  
Fig. 6. 3-dimensional radiation pattern of the canonical structure.

따라서 그림1에서  $a=c=0.6305\lambda$ ,  $b=0.7770\lambda$ ,  $d=0.6729\lambda$ .  $\Theta=30^\circ$ 를 기본구조의 위상배열 안테나로 삼아 ( $T_x$ ,  $T_y$ )의 전 평면에서의 복사전력을 등고선 형태로 나타낸 것이 그림6이다. 그림6에서  $\theta$ 가  $90^\circ$ 에 접근할 수록 복사전력이 줄어들음을 알 수 있다. 그런데  $\phi=56^\circ$ ,  $\theta=36^\circ$ 와  $\phi=45^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  및  $\phi=55^\circ$ ,  $\theta=46^\circ$ 의 3지점에서 강한 복사전력의 감쇄가 발생함을 볼 수

있다. 이러한 부분적인 세력 감쇄는 안테나간의 상호 결합에 의한 차단 현상(blindness)으로 잘 알려져 있다.<sup>[8,9]</sup>

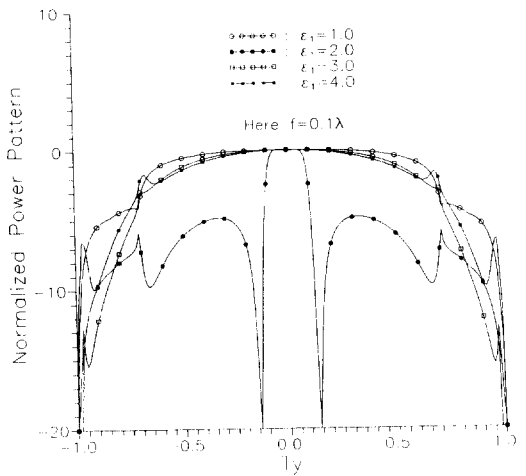


그림 7. 길이 0.1-인 유전체 막개의 비유전율에 의한 영향  
Fig. 7. Effects of the relative permittivity of the dielectric plug with the length 0.1-.

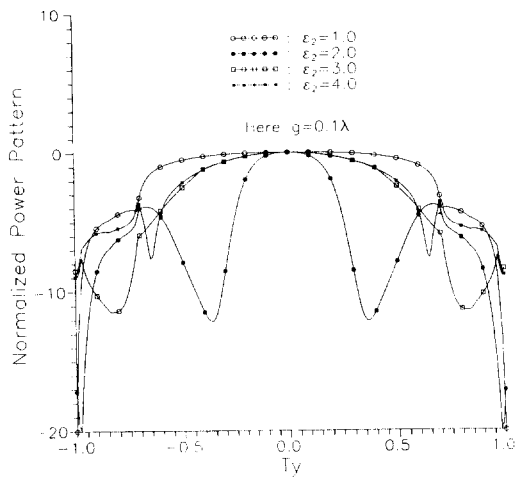


그림 8. 0.1λ인 유전체 덮개의 비유전율에 의한 영향.  
Fig. 8. Effects of the relative permittivity of the dielectric cover with the width 0.1λ.

위상배열 안테나를 구성하는 구형 도파관내의 이물질이 들어가는 것을 막기 위해, 도파관내의 유전체 막개를 씌우거나 도파관 전면에 유전체 덮개를 씌워

야 한다. 이러한 유전체 구조물들이 복사패턴에 미치는 영향을 조사해 보기로 한다. 먼저 그림7은  $0.1\lambda$ 의 두께를 갖는 유전체 마개를 기본구조의 도파관내 삽입시 유전체의 비유전율값을 바꿀 때  $T_x=0$ 인 평면에서의 복사패턴 변화를 나타낸다. 이 때 비유전율  $\epsilon_r=1.0$ 은 실제 유전체 마개가 없을 때 나타내는데, 이에 비해  $\epsilon_r=2.0$ 인 경우  $T_x=0.15$ 와  $-0.15$  근방에서 강한 세력 감쇄가 나타난다. 그러나  $\epsilon_r$ 을 3.0이상 증가시키면 이러한 세력 감쇄는 사라진다. 실제  $\epsilon_r=2.0$ 일 때의 세력 감쇄는 일종의 차단 현상(blindness)이다. 그림8은 도파관 전면에  $0.1\lambda$  두께의 유전체 덮개를 씌웠을 때의 복사패턴으로 유전체의 비유전율  $\epsilon_r=2.0$ 일 때  $T_y=0.35$ 와  $-0.425$  근방에서 세력 감쇄가 나타난다. 이러한 세력 감쇄는 그림7의 경우와는 달리 유전체 덮개로 전파되는 표면파(surface wave) 존재에 의한 자체 공진 현상때문으로 볼 수 있다.

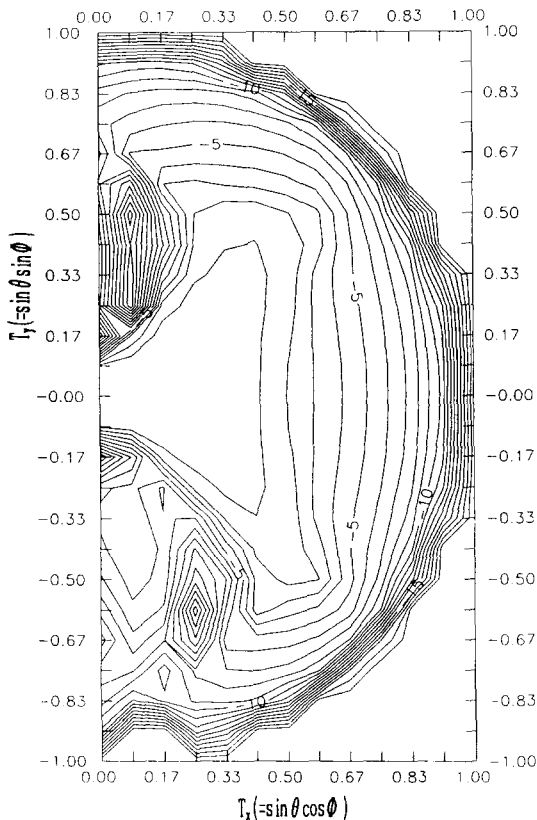


그림 9. 비유전율이 2.0, 길이  $0.1\lambda$ 인 유전체 마개가 삽입된 기본 구조의 3차원 복사패턴

Fig. 9. 3-dimensional radiation patterns of the canonical structure with the dielectric plug of  $\epsilon_r=2.0$  and  $f=0.1\lambda$ .

그림 7에서  $\epsilon_r=2.0$ 인 경우에 대해 임의의 입사방향에 대한 3차원 복사패턴을 계산한 것이 그림9이다. 유전체 마개가 없는 경우의 복사패턴인 그림6에 비해 그림10에서는 강한 세력 감쇄가  $T_x=0$  즉  $\phi \pm 90^\circ$  쪽으로 이동되었음을 알 수 있다. 특히 길이가  $0.1\lambda$ 이고 비유전율이 2.0인 유전체 마개를 도파관에 삽입시에는 전반적으로 세력 감쇄가 심함을 볼 수 있다. 따라서 유전체 마개나 덮개를 위상배열 안테나에 부착시 유전체 구조물의 길이 및 비유전율을 잘 선정하여야만 함을 알 수 있다.

#### IV 결론

본 논문에서는 구형 도파관들이 경사진 격자 형태로 배열된 위상배열 안테나의 복사패턴을 계산하였다. 이론적으로 경사진 격자구조의 경사각이  $30^\circ$ 일 때 가장 효율적이라고 알려져 있는데, 실제 수치계산으로 구한 복사패턴으로 이를 확인하였다. 유전체 마개나 덮개를 사용하면 복사패턴상의 세력감쇄가 발생하기도 하는데, 특정 비유전율과 길이를 갖는 유전체 마개를 도파관내에 삽입시 차단현상이 일어나는 방향이 이동함을 볼 수 있다. 따라서 유전체 구조물을 위상배열 안테나에 부착시 3차원 복사패턴상에서의 전체적인 효율을 고려해야만 함을 알 수 있었다.

#### 參考文獻

- [1] 김세운, 하헌태, "위상 배열 안테나의 해석에 관한 연구" 한국과학기술연구원 수탁과제 보고서, 1991년 12월.
- [2] E.Brookner, Ed., Radar Technology. Dedham, MA : Artech House, 1977.
- [3] E.Brookner, Ed., Aspects of Modern Radar. Dedham, MA : Artech House, 1988.
- [4] N.Amitay, V.Galindo, and C.P.Wu, Theory and Analysis of Phased Array Antennas. New York : Wiley Interscience, 1972.
- [5] 하헌태, 김세운, "위상배열 안테나의 임피던스 정합에 관한 연구," 전자공학회논문지, 29-A권, 2호, pp.83-91, 1992.
- [6] 김세운, 하헌태, "유전체 마개와 덮개가 부착된 구형 도파관의 평면 배열 안테나의 복사패턴 계산," 전자공학회논문지, 29-A권.9호, pp.

- 728-733, 1992.
- [7] E.C.DuFort, "Finite scattering matrix for an infinite antenna array," *Radio Sci.*, vol.2, no.1, pp.19-27, 1967
- [8] I.W.Lechtreck, "Effect of coupling accumulation in antenna arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.AP-16, no.1, pp31-37, 1968.
- [9] G.H.Knittel, A.Hessel, and A.A. Oliner, "Element pattern null in phased arrays and their relation to guided waves," *Proc. IEEE*, vol.56, no.11, pp. 1822-1836, 1968.

---

— 著 者 紹 介 —

河 憲 兌(正會員) 第 28卷 A編 第 9號 參照  
현재 한국과학기술연구원 응용전자연  
구실 연구원

金 世 潤(正會員) 第 28卷 A編 第 9號 參照  
현재 한국과학기술연구원 응용전자  
연구실 선임 연구원