

단락종단된 동축 슬롯 결합 스트립 배열 안테나

°김중표, 이창원*

한국항공우주연구소, *경북대학교 전자전기공학부

전화 : (042) 860-2034 / 팩스 : (042) 860-2007

Short-Ended Coaxial Slot-Coupled Strip Array Antenna

°Joong-Pyo Kim, Chang-Won Lee*

Korea Aerospace Research Institute, *School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.

E-mail : jpkim@kari.re.kr

ABSTRACT

A new type of collinear antenna called short-ended coaxial slot-coupled strip array antenna is investigated theoretically. The antenna has an advantage of structural simplicity. The integral equations are derived for the proposed structure by use of the Fourier transform and mode expansion, and the simultaneous linear equations are obtained. The slot electric field and strip current are then obtained by solving the simultaneous linear equation. The effects of slot and strip number on the radiation efficiency, beamwidth and directivity gain are also presented.

I. 서론

동축 collinear 안테나는 급전 구조가 간단하여 2차원 다이폴 어레이를 대체하는 어레이 요소들로 여겨져 왔다[1]-[3]. [4]에서는 동축 collinear 안테나의 단순한 형태인 Snyder 다이폴이 해석되어졌는데 저비용과 구조적 단순한 때문에 개인휴대통신을 위한 기지국 안테나로 고려되어졌다. 그것은 몇 개의 반파장 동축 선로로 구성되어 있으며 한 선로의 내부 도체가 이웃하는 선로의 외부 도체에 전기적으로 연결되어 있는데 이는 동축 선로의 외부 표면에 동위상의 전류 분포가 유도되도록 모든 슬롯을 가로질러 여기 전압이 동위상 및 같은 크기를 가지도록 하여 브로드 사이드로 높은 이득을 얻게 하였다.

최근에 기존의 동축 collinear 안테나와 슬롯 동축 안테나 구조에 대한 등가선로 해석을 통해 PCS 용 기지국 안테나로서의 가능성을 제시하였고[5]. 또한 급전 동축선로의 외부 도체의 환형 슬롯에 의해 전자기적으로 급전되어지는 반파장 도체 원형 파이프프로 구성된 전자기 결합 동축 다이폴 어레이 안테나를 제시하고 Wiener-Hopf 해석과 등가선로 해석을 통해 안테나 특성을 해석하였다[6]. 유전체로 코팅된 유한한 두께의 주기적인 슬롯을 통한 유한한 스트립 격자에 전자기적 결합을 통한 어레이 특성을 조사하였다[7].

본 논문에서는 수평면에 전방향성 패턴을 갖는 새로운 형태의 collinear 안테나가 제안되어진다. 기존의 구조[7]에 단락종단된 동축 슬롯을 통한 전자기적으로 결합된 스트립 어레이 안테나 구조이다. 본 구조는 동축도파관의 단락종단을 통해 투과파를 없애고 단락종단의 길이를 최적화하여 슬롯을 통한 스트립과의 전자기적 결합을 통해 복사효율을 극대화 하였다.

해석 절차는 각 슬롯 영역의 전자장은 방사형 도파관의 TM 모드의 합으로 전개하였고 그 이외의 각 영역에서의 산란 전자장은 역푸리에 변환을 이용하여 스펙트럼 영역에서 표현하였다. 위에서 전개한 각 영역의 전자장 표현식과 경계조건을 부가하여 선형 연립 방정식을 유도하였다. 슬롯 및 스트립의 개수를 높여가며 각각에 대한 공간파 복사효율, 빔폭, 안테나 지향성 이득을 비교하였다.

II. 본론

단락종단된 동축 도파관에 유전체 코팅된 L 개의 주기적인 슬롯을 통해 전자기적으로 결합되어지는 K 개의 주기적인 스트립 배열 안테나 구조를 그림 1에 나타내었다. 동축 도파관에 TEM 모드만이 입사된다고 가정하면 입사파는 다음 식과 같이 표현된다.

$$H_{\phi}^{(I)}(\rho, z) = \frac{Vk_1}{\omega\mu_0 \ln(b/a)\rho} e^{-jk_1 z}, \quad (1)$$

$\rho=a$ 에서 경계조건을 만족하는 영역 (I)의 산란 자계는 역푸리에 코사인 변환에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$H_{\phi}^{(I)}(\rho, z) = \frac{2}{\pi} \int_{\zeta}^{\infty} \tilde{H}_{\phi}^{(I)}(\zeta) \left[\frac{H_1^{(2)}(k_{\rho 1}\rho) \cdot H_0^{(2)}(k_{\rho 1}a)}{H_0^{(1)}(k_{\rho 1}a)} H_1^{(1)}(k_{\rho 1}\rho) \right] e^{-j\zeta z} d\zeta \quad (2)$$

여기서 $k_{\rho 1} = \sqrt{k_1^2 - \zeta^2}$ 이다.

영역 (II)에서 자계는 다음식과 같이 표현되어진다.

$$H_{\phi}^{(II)}(\rho, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{\zeta}^{\infty} \tilde{H}_{\phi}^{(II)}(\zeta) H_1^{(2)}(k_{\rho 2}\rho) e^{-j\zeta z} d\zeta, \quad (3)$$

여기서 $k_{\rho 2} = \sqrt{k_2^2 - \zeta^2}$ 이다.

영역 (III)에서 자계는 다음식과 같이 표현되어진다.

$$H_{\phi}^{(III)}(\rho, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{\zeta}^{\infty} [\tilde{H}_{\phi}^{(III)*}(\zeta) H_1^{(2)}(k_{\rho 2}\rho) + \tilde{H}_{\phi}^{(III)*}(\zeta) H_1^{(1)}(k_{\rho 2}\rho)] e^{-j\zeta z} d\zeta, \quad (4)$$

여기서 $k_{\rho 3} = \sqrt{k_3^2 - \zeta^2}$ 이다.

1번째 슬롯 영역 (IV)의 자계는 방사형 도파관의 모드의 합으로 표현되어지며 다음식과 같다.

$$H_{\phi}^{(IV)}(\rho, z) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n^l \cos \omega_n^l (z - z_{cl} + w_l) \times \left[B_n^l \frac{H_1^{(1)}(k'_{\rho 4m}\rho)}{H_1^{(1)}(k'_{\rho 4m}c)} + C_n^l \frac{H_1^{(2)}(k'_{\rho 4m}\rho)}{H_1^{(2)}(k'_{\rho 4m}b)} \right], \quad (5)$$

여기서 $k'_{\rho 4m} = \sqrt{k_4^2 - \omega_n^{l2}}$, $\omega_n^l = m\pi/2w_l$ 이다.

미지의 계수를 얻기 위해 부가되는 경계조건들은 다음과 같다.

$$E_z^{(I)}(b, z) = \begin{cases} E_z^{(IV)}(b, z), & |z - z_{cl}| \leq w_l, l=1,2,\dots,L \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

$$H_{\phi}^{(I)}(b, z) + H_{\phi}^{(IV)}(b, z) = H_{\phi}^{(IV)}(b, z), \quad |z - z_{cl}| \leq w_l, \quad (7)$$

$$E_z^{(III)}(d, z) = E_z^{(III)}(d, z), \quad |z| \leq \infty \quad (8)$$

$$H_{\phi}^{(III)}(d, z) - H_{\phi}^{(III)}(d, z) = \begin{cases} J_z^k(z), & |z - z_{sk}| \leq s_k, k=1,2,\dots,K \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (9)$$

$$E_z^{(III)}(d, z) = 0, \quad |z - z_{sk}| \leq s_k, k=1,2,\dots,K \quad (10)$$

$$E_z^{(III)}(c, z) = \begin{cases} E_z^{(IV)}(c, z), & |z - z_{cl}| \leq w_l \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

$$H_{\phi}^{(III)}(c, z) = H_{\phi}^{(IV)}(c, z), \quad |z - z_{cl}| \leq w_l, l=1,2,\dots,L. \quad (12)$$

여기서 k 번째 스트립 전류 $J_z^k(z)$ 는 스트립 가장자리에서 0이 되도록 사인함수 시리즈의 합으로 전개하면 다음식으로 표현되어 진다.

$$J_z^k(z) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m^k \sin a_m^k (z - z_{sk} + s_k) \quad (13)$$

여기서 $a_m^k = m\pi/2s_k$ 이다. 위에서 정의된 경계조건을 적용하면 다음과 같은 식들을 얻게 된다.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_{r2} k_{\rho 4m}}{2\pi \varepsilon_{r4}} N_m^l(b) [H_{nm}^l + E_{nm}^l] - \left[B_n^r \frac{H_1^{(1)}(k'_{\rho 4n}b)}{H_1^{(1)}(k'_{\rho 4n}c)} + C_n^r \right] \alpha_n w_r = \frac{-Vk_1}{k_0 \eta_0 \ln(b/a)b} [P_n^r(k_1) + P_n^r(-k_1)] \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{\infty} A_m^k a_m^k \frac{-1}{2\pi} J_{nm}^{jk} + \sum_{l=1}^L \sum_{m=0}^{\infty} \frac{k'_{\rho 4m}}{2\pi \varepsilon_{r4}} N_m^l(c) J_{nm}^l = 0, \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{\infty} A_m^k a_m^k \frac{-1}{2\pi} J_{nm}^{rk} + \sum_{l=1}^L \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_{r3} k'_{\rho 4m}}{2\pi \varepsilon_{r4}} N_m^l(c) K_{nm}^l - \left[B_n^r + C_n^r \frac{H_1^{(2)}(k'_{\rho 4n}c)}{H_1^{(2)}(k'_{\rho 4n}b)} \right] \alpha_n w_r = 0, \quad (16)$$

여기서, α_n 은 $n=0$ 이면 2, $n \neq 0$ 이면 1.

$$N_m^l(\rho) = B_m^l \frac{H_0^{(1)}(k'_{\rho 4m}\rho)}{H_1^{(1)}(k'_{\rho 4m}c)} + C_m^l \frac{H_0^{(2)}(k'_{\rho 4m}\rho)}{H_1^{(2)}(k'_{\rho 4m}b)},$$

$$E_{nm}^l = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{M_h(\zeta)}{k_{\rho 3} M_c(\zeta)} P_m^l(\zeta) P_n^r(\zeta) d\zeta, \quad \text{그리고 } P_n^l(\zeta).$$

$H_{nm}^l, I_{nm}^k, J_{nm}^l, J_{nm}^k, K_{nm}^l$ 의 표현식은 참고문헌[7]에 소개되어 있다. 식(14)-(16)은 다음과 같은 선형 동차 연립방정식의 형태로 만들어 진다.

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 & \Psi_2 & \Psi_3 \\ \Psi_4 & \Psi_5 & \Psi_6 \\ \Psi_7 & \Psi_8 & \Psi_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (17)$$

일단 식(17)을 풀어 미지의 모드 계수들 A'_m , B'_m 와 C'_m 이 얻어지면 $\tilde{H}_\phi^{(I)}$, $\tilde{H}_\phi^{(II)}$, $\tilde{H}_\phi^{(III)+}$ 와 $\tilde{H}_\phi^{(III)-}$ 이 계산되어지므로 각 영역의 전자계들을 계산할 수 있다. 슬롯을 통해 복사되는 파는 2 가지 형태의 파로 나뉘는데, 하나는 영역 (II)로 복사되는 공간파(space wave)이며, 다른 하나는 유전체 층에 갇혀 $\pm z$ 방향으로 전파되어 가는 표면파(surface wave)이다. 영역 (II)로 복사되는 원거리(far-zone) 자계와 각 영역 내의 표면파는 saddle-point 방법을 이용한 근사적 계산과 식 (3)과 (4)의 역푸리에 변환식에 표면파 극점에서의 유수를 구하여 계산할 수 있다. 입사전력(P_{inc})은 단락중단된 슬롯을 통해 복사되는 전력(P_{rad})과 슬롯 격자에 의해 반사되는 반사전력(P_r)으로 나누어진다. 그리고 복사전력(P_{rad})은 다시 공간파전력(P_{space})과 표면파전력(P_{surf})으로 나누어진다.

III. 수치계산 결과 및 검토

본 연구에서 수치적인 결과의 정확성은 전력보존의 법칙($P_{inc} = P_r + P_t + P_{rad}$, $P_{rad} = P_{space} + P_{surf}$)에 의해 보장되어진다. 또한 슬롯 및 스트립이 한 개가 있고 중단되지 않은 경우에 대한 등가회로를 구하고 단락중단에 대한 등가선로 해석법을 통해 반사전력을 구한 후 제안한 해석법의 결과와 비교하여 정확히 일치함을 확인하므로써 해석결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 아래의 모든 예들에 대하여 슬롯 주기는 T_c , 스트립 격자 주기는 T_s 로 두었다.

그림 2 는 $T_c=1.0\lambda_1$, $a=0.05\lambda$, $b=a+0.1\lambda$, $c=b+0.01\lambda$, $d=c+0.1\lambda$, $w=0.032T_c$, $T_s=1.0\lambda_1$, $s=0.27T_s$, $\epsilon_{r1}=2.5$, $\epsilon_{r2}=1.0$, $\epsilon_{r3}=\epsilon_{r4}=2.0$, $O_s=0.53$ 이고 슬롯과 스트립이 각각 1 개 (Nslot=Nstrip=1)일 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. 여기서 λ_1 은 영역 (I)에서 파장이며, λ 는 자유공간의 파장이다. 복사전력(P_{rad})은 99.9%, 반사전력(P_r)은 0.00416%. 공간파전력(P_{space})과 표면파전력(P_{surf})은 각각 79.8%, 20.2%를 차지하였다. 그 때의 정규화된 입력 임피던스는 거의 1에 가까운 1.04의 값이었다. 이는 임피던스가 정합되어서 슬롯을 통한 외부로의 결합이

입사전력의 대부분에 해당된다. 여기서 등가선로 해석을 통해 얻은 반사전력 비율은 각각 0.00416%로 제안된 Full-wave 해석의 결과와 거의 같은 결과를 얻었다. 그림 2(a)에서 슬롯 전개 크기는 슬롯의 에지에서 무한대가 되는 경계조건을 만족시킴을 알 수 있고, 그림 2(b)에서 스트립의 전류 크기는 스트립의 에지에서 0이 되는 경계조건을 잘 만족함을 알 수 있다. 그림 2(c)는 복사패턴으로 복사각도는 90°, 빔폭 81.7°. 지향성 이득은 1 dBi 이었다.

그림 3 은 $T_c=1.0\lambda_1$, $a=0.05\lambda$, $b=a+0.1\lambda$, $c=b+0.01\lambda$, $d=c+0.1\lambda$, $w=0.25T_c$, $T_s=1.0\lambda_1$, $s=0.19T_s$, $\epsilon_{r1}=2.5$, $\epsilon_{r2}=1.0$, $\epsilon_{r3}=\epsilon_{r4}=2.0$, $O_s=0.5$ 이고 슬롯 및 스트립이 각각 5 개 (Nslot=Nstrip=5)일 경우에 대한 결과들로 슬롯의 폭이 상당히 넓은 경우이다. 복사전력(P_{rad})은 99.9%, 공간파전력(P_{space})과 표면파전력(P_{surf})은 각각 94.4%, 5.6%를 차지하였다. 슬롯 및 스트립의 개수가 증가하면 복사전력의 대부분이 공간파전력으로 변환됨을 알 수 있다. 그림 3(a) 및 (b)는 슬롯 전개 및 스트립 전류의 크기와 위상을 나타낸 것이며 그림 3(c)는 빔폭은 17.22°, 지향성 이득은 7.67dBi 를 갖고 90°로 복사되는 복사 패턴이다.

그림 4 는 $T_c=1.0\lambda_1$, $a=0.05\lambda$, $b=a+0.1\lambda$, $c=b+0.01\lambda$, $d=c+0.1\lambda$, $w=0.025T_c$, $T_s=1.0\lambda_1$, $s=0.175T_s$, $\epsilon_{r1}=2.5$, $\epsilon_{r2}=1.0$, $\epsilon_{r3}=\epsilon_{r4}=2.0$, $O_s=0.68$ 이고 슬롯 및 스트립이 각각 10 개 (Nslot=Nstrip=10)일 경우에 대한 복사패턴으로 슬롯 폭이 좁은 경우이다. 복사전력(P_{rad})은 99.7%, 공간파전력(P_{space})과 표면파전력(P_{surf})은 각각 96.4%, 3.6%를 차지하였다. 빔폭은 8.04°, 지향성 이득은 10.84dBi 이었다.

IV. 결론

단락중단된 동축 슬롯을 통한 전자기적으로 결합된 스트립 어레이 안테나를 해석하는 방법을 제시하였다. 동축도파관의 단락중단을 통해 투과파를 없애고 단락중단의 길이를 최적화하여 슬롯을 통한 스트립에 대한 전자기적 결합을 이용하여 복사효율을 극대화 하였다. 슬롯 및 스트립의 개수를 높여가며 각각에 대한 공간파 복사효율, 빔폭, 안테나 지향성 이득을 비교하

였고 개수가 증가할수록 공간과 복사효율이 증가하며, 빔폭은 좁아지며 안테나 이득은 증가하였다.

참고문헌

[1] B. B. Basley and W. L. Ecklund, "A portable coaxial collinear antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 20, pp. 513-516, July 1972.

[2] T. J. Judasz, W. L. Ecklund and B. B. Balsley, "The coaxial colliner antenna: Current distribution from the cylindrical antenna equation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 35, pp. 327-331 Mar. 1987.

[3] T. J. Judasz and B. B. Balsley, "Improved theoretical and experimental models for the coaxial collinear antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 37, pp. 289-296 Mar. 1989.

[4] R. C. Hansen. "Evaluation of the Synder dipole," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 35, pp. 207-210, Feb. 1987.

[5] J. F. Kiang. "Analysis of linear coaxial antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, no. 5, pp. 636-642, May 1998.

[6] H. Miyashita, H. Ohmine, K. Nishizawa, S. Makino and S. Urasaki. "Electromagnetically coupled coaxial dipole array antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 11, pp. 1716-1726, Nov. 1999.

[7] 김종표, 이창원, 손현. "유전체로 코팅된 유한한 두께의 주기적인 슬롯을 갖고 유한한 스트립 격자로 로딩된 유전체 코팅된 동축도파관의 복사 특성", 추계 마이크로파 및 전파전자 학술대회 논문집 9월 1999.

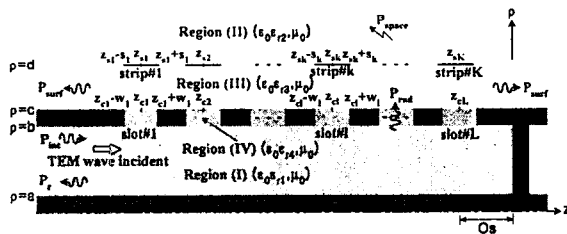
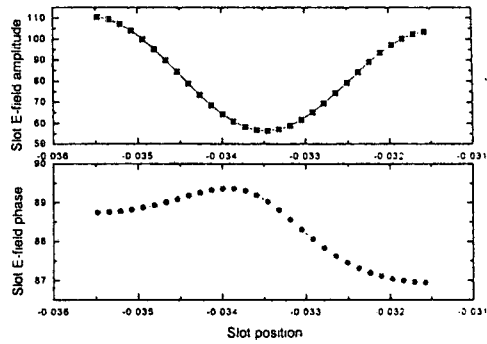
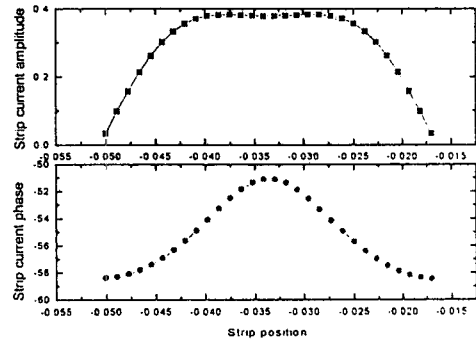


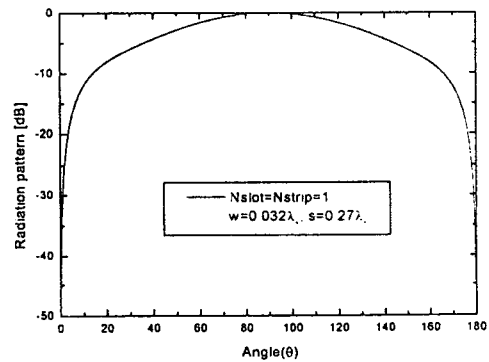
그림 1. 제안된 구조



(a)



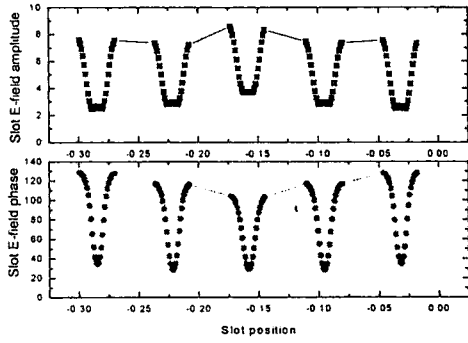
(b)



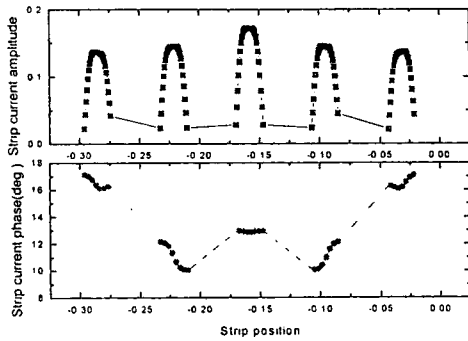
(c)

그림 2. (a) 슬롯 전계의 크기와 위상 (b) 스트립 전류의 크기와 위상 (c) 복사패턴 : $\Gamma_c=1.0\lambda_1$, $a=0.05\lambda$, $b=a+0.1\lambda$, $c=b+0.01\lambda$, $d=c-0.1\lambda$.

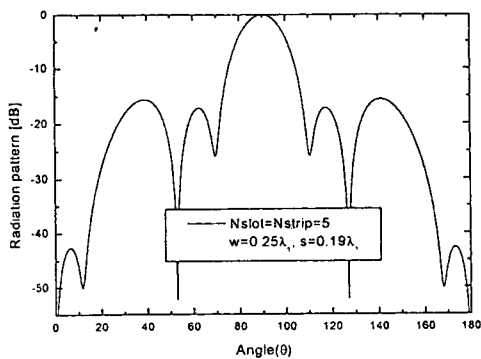
$w=0.032T_c$, $T_s=1.0\lambda_1$, $s=0.27T_s$, $\epsilon_{r1}=2.5$, $\epsilon_{r2}=1.0$,
 $\epsilon_{r3}=\epsilon_{r4}=2.0$, $O_s=0.53$



(a)



(b)



(c)

그림 3. (a) 슬롯 전계의 크기와 위상 (b) 스트립 전류

의 크기와 위상 (c) 복사패턴 : $T_c=1.0\lambda_1$,
 $a=0.05\lambda$, $b=a+0.1\lambda$, $c=b+0.01\lambda$, $d=c+0.1\lambda$,
 $w=0.25T_c$, $T_s=1.0\lambda_1$, $s=0.19T_s$, $\epsilon_{r1}=2.5$, $\epsilon_{r2}=1.0$,
 $\epsilon_{r3}=\epsilon_{r4}=2.0$, $O_s=0.5$

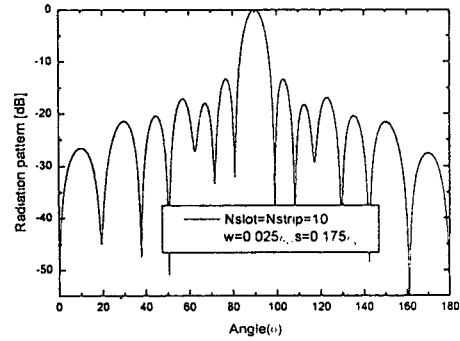


그림 4. 복사패턴 : $T_c=1.0\lambda_1$, $a=0.05\lambda$, $b=a+0.1\lambda$,
 $c=b+0.01\lambda$, $d=c+0.1\lambda$, $w=0.025T_c$, $T_s=1.0\lambda_1$,
 $s=0.175T_s$, $\epsilon_{r1}=2.5$, $\epsilon_{r2}=1.0$, $\epsilon_{r3}=\epsilon_{r4}=2.0$, $O_s=0.68$