韓國 OA學會 論文誌
第6卷 第1號, 2001. 3.

2001-6-1-3-3

이중 원형 배열 안테나의 성능 분석

이 봉 수* 송 우 영**

Performance Analysis of Double Circular Array Antenna

Bong-Soo Lee* Woo-Young Song**

요 약

본 논문에서는 pencil beam 형성에 적합하며, 특정 방향으로 예리한 지향특성을 갖는 이중 원형 배열 안테나의 성능을 분석하였다. N개의 등방성 점원을 평면상에 정방형, 원형, 이중 원형 구조를 갖도록 등간격으로 배열하여 각 배열 구조에 따른 방사패턴 특성을 비교·분석하였다. 결과적으로 이중 원형 배열 안테나가 지향 특성 또는 SLL과 HPBW의 측면에서 정방형과 원형 배열 구조보다 우수한 특성을 나타내고 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, performance of the double circular array antenna was analyzed, which has sharp directivity with specific direction and is compatible to shape pencil beam. The character of each array geometry which N numbers of isotropic point source is arranged in planar with type of a square, circular and double circular was compared and analyzed. As a result, we fined that double circular geometry was good performance rather than square and circular array geometry in the point of directivity, SLL and HPBW.

* 청주대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료
** 청주대학교 이공대학 첨단공학부 교수
논문 접수 : 2000년 11월 10일 심사 완료 : 2001년 1월 20

Ⅰ. 서론

몇 개의 안테나를 공간적으로 배열하여 사용함으로서 사용 목적에 맞는 지향성, 방사 패턴을 갖는 안테나를 설계할 수 있다. 이렇게 몇 개의 복사소자를 사용해서 전부 또는 일부의 소자를 여진시킨 안테나 전체를 배열 안테나(array antenna)라고 한다. 배열 안테나의 방사패턴은 방사 소자의 형태, 소자 사이의 간격, 여기전류의 진폭, 위상에 의해 결정된다. 그러나 배열 안테나에서는 소자의 수와 배열된 소자로부터 얻어지는 어레이 팩터(array factor)를 방사패턴의 특성을 분석하거나 합성하기 위한 인자로 사용한다. 선형 배열 안테나의 어레이 팩터는 fan beam의 형태가 되며, 평면 배열 안테나의 경우에는 pencil beam의 형태를 이룬다.[1]~[4]

일반적으로 pencil beam 형성에 적합한 평면 배열 안테나로 정방형 구조나 원형 구조가 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 특정한 방향으로의 예리한 지향특성과 pencil beam 형성에 적합한 평면 배열 안테나로 이중 원형 배열 안테나의 성능을 분석하였다. 이를 위하여 임의 분포 평면 배열 안테나의 어레이 팩터의 식을 유도한 후 N개의 등방성 점원을 그림 1과 같이 yz평면상에 정방형, 원형, 이중 원형의 구조로 배열하여 각 배열 구조의 방사패턴을 이론적으로 계산하였다.[5][6] 또한 가시영역에서 그레이팅 로브를 피하기 위해 배열 간격을 한 파장 미만으로 선택하였다. 이를 바탕으로 지향성과 SLL 그리고 HPBW에 대해 정방형 구조와 원형 구조와의 비교·분석을 통해 이중 원형 구조의 성능을 분석하고, 분석된 결과를 토대로 이중 원형 배열 안테나의 우수성을 확인하였다.

Ⅱ. 평면 배열 안테나

1. N×M 평면 배열 안테나

평면 배열 안테나는 어레이 소자들을 평면상에 배열한 안테나를 말하며 개구면(aperture) 안테나와 같이 pencil beam을 형성할 수 있다. 그림 1은 yz평면상에 y방향으로 간격 d_y, z방향으로 간격 d_z로 배열된 N×M 평면 배열 안테나의 기하학적 구조를 나타낸 것이다[1][3].

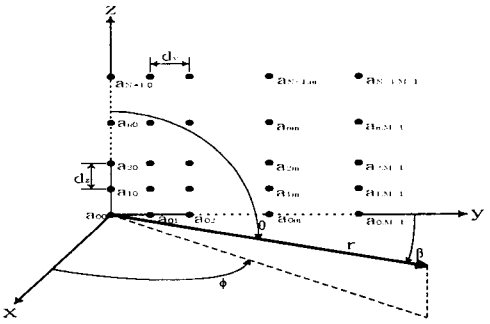

그림 1. N×M 평면 배열 안테나의 구조
Fig 1. Geometry of N×M planar array antenna

그림 1의 평면 배열 안테나의 어레이 팩터는

$$AF(\theta,\beta) = \sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1} a_{nm}\exp[-jk(nd_z\cos\theta + md_y\cos\beta)] \quad (1)$$

이고, $d_y = d_z = d$인 경우 어레이 팩터는 식 (1)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$AF(\theta,\beta) = \sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1} a_{nm}\exp[jkd(n\cos\theta + m\cos\beta)] \quad (2)$$

y축과 z축 방향으로 progressive 위상차 Ψ_y와 Ψ_z가 존재한다고 가정하면,

$$a_{nm} = A_{nm}e^{-j(m\Psi_y + n\Psi_z)} \quad (3)$$

이 되어, (2)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$AF(\theta,\beta) = \sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1} A_{nm}\exp\{jk[n(d\cos\theta - \Psi_z) + m(d\cos\beta - \Psi_y)]\} \quad (4)$$

이때 $A_{nm} = 1$인 균일한 배열 안테나의 경우 식 (4)은

$$AF(\theta,\beta) = \sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1} \exp\{jk[n(d\cos\theta - \Psi_x) + m(d\sin\theta\sin\phi - \Psi_y)]\} \quad (5)$$

쓸 수 있다.

2. 임의 평면 배열 안테나의 어레이 팩터

원점에 위치한 점원으로부터 방사되는 전계는[5]

$$I_o \frac{\exp(jkr)}{4\pi r} \quad (6)$$

에 비례한다. 여기서 I_o는 점원의 전류의 세기이며, k는 자유공간의 전파상수, r은 원점으로부터 측정점까지의 거리를 나타낸다.

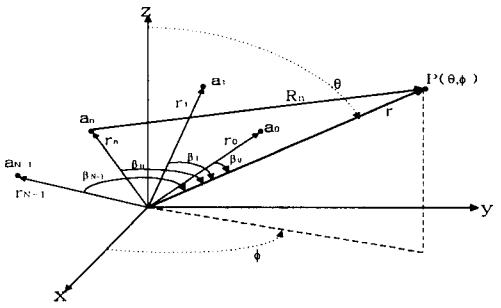

그림 2. 임의 분포 평면 배열 안테나의 구조
Fig. 2. Geometry of arbitrary distributed planar array antenna

따라서 그림 2와 같이 N개의 안테나가 yz평면상에 임의로 분포되어 있는 경우 어레이 팩터(AF)는

$$AF(\theta,\phi) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\exp(jkR_n)}{4\pi R_n} \quad (7)$$

으로 쓰여지고, far-field인 경우, $R_n \cong r - r_n\cos\beta_n$이고, (7)식은

$$AF(\theta,\phi) \approx \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\exp[jk(r - r_n\cos\beta_n)]}{4\pi r} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\exp(jkr)}{4\pi r} \exp(-jkr_n\cos\beta_n) \quad (8)$$

쓰여진다. 여기서 r_n는 n번째 안테나까지의 거리를 나타낸다.

$$\cos\beta_n = a_r \cdot a_{r_n} = \frac{y_n\sin\theta\sin\phi + z_n\cos\theta}{\sqrt{y_n^2 + z_n^2}}$$

그러므로 N개의 안테나가 임의로 분포된 경우 어레이 팩터는 다음과 같이 쓰여진다.

$$AF(\theta,\phi) = \frac{\exp(jkr)}{4\pi r} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-jk(y_n\sin\theta\sin\phi + z_n\cos\theta)] \quad (9)$$

3. 임의 분포 평면 배열 안테나의 구조

3-1. 정방형 분포 구조

그림 3은 N개의 등방성 점원이 yz평면상에 간격 d인 정방형 배열 안테나를 나타낸 것이다.

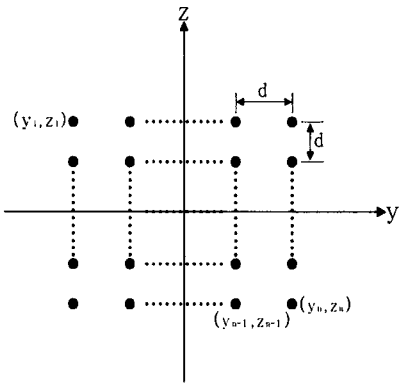

그림 3. 정방형 분포 평면 배열 안테나의 구조
Fig. 3. Geometry of a square distributed planar array antenna

이때 y_n과 z_n는

$$y_n = N_y d + (n-1)d, \quad n = 1,2,\cdots,\sqrt{N}$$
$$z_n = N_z d + (n-1)d, \quad n = 1,2,\cdots,\sqrt{N}$$

이고, 어레이 팩터는

$$AF(\theta,\phi) = \frac{\exp(jkr)}{4\pi r} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-jk((N_y + (n-1))d\sin\theta\sin\phi + (N_z - (n-1))d\cos\theta)] \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다. 이때 각 N에 대하여 $N_y = N_z = \frac{-\sqrt{N}+1}{2}$ 이고, N = 16인 경우 $n = 1\sim4$, N = 25인 경우, $n = 1\sim5$, N = 36일 경우 $n = 1\sim6$, N = 49일 때 $n = 1\sim7$이다.

3-2. 원형 분포 구조

그림 4는 N개의 등방성 점원이 yz평면상에 반지름

r인 원주를 따라 간격 d로 배열된 원형 배열 안테나를 나타낸 것이다. α_n는 안테나의 개수 N이 주어지면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_n = \frac{2\pi n}{N}, \quad n = 1, 2, \cdots, N \quad [\text{radian}]$$

이때, 원의 반경 r은

$$r = \frac{d\cos(\alpha/2)}{\sin\alpha} \tag{11}$$

로 구해진다. 따라서 주어진 N과 d에 의해서 α_n와 r이 결정된다. 그러므로 y_n과 z_n는

$$y_n = r\cos\alpha_n, \quad n = 1, 2, \ldots, N$$

$$z_n = r\sin\alpha_n, \quad n = 1, 2, \ldots, N$$

로 주어지며, 어레이 팩터는 다음과 같이 쓰여진다.

$$AF(\theta,\phi) = \frac{\exp(jkr)}{4\pi r}\sum_{n=0}^{N-1} \exp[-jk(r\cos\alpha_n\sin\theta\sin\phi + r\sin\alpha_n\cos\theta)] \tag{12}$$

3-3. 이중 원형 분포 구조

그림 5는 yz평면상에 N개의 등방성 점원중 반지름이 r_i인 내부 원에 n_i개, 반지름이 r_o인 외부 원을 따라 $n_o(=N-n_i)$개를 배열한 이중 원형 분포 평면 배열 안테나의 구조를 나타낸 것이다. 이때 내부 원과 외부 원의 각은 다음과 같이 구해진다.

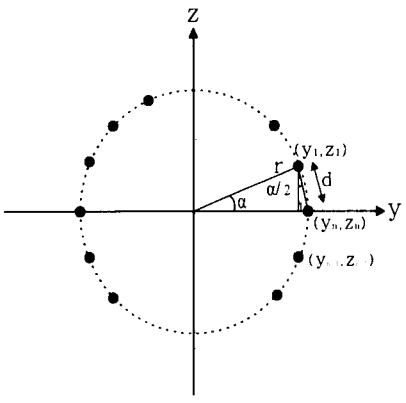

그림 4. 원형 분포 평면 배열 안테나의 구조
Fig. 4. Geometry of circular array antenna

$$\alpha_{n_i} = \frac{2\pi n}{n_i}, \quad n = 1, 2, \cdots, n_i$$

$$\alpha_{n_o} = \frac{2\pi(n-n_i)}{n_o}, \quad n = n_i+1, \cdots, N$$

따라서 소자사이의 간격을 d로 배열한 내부 원의 반지름은

$$r_i = \frac{d\cos(\alpha/2)}{\sin\alpha} \tag{13}$$

로 구해지고, 이때 외부 원의 반지름 r_o는

$$r_o = \delta r_i, \quad \delta = 1.5, 1.55, \cdots, 3 \tag{14a}$$

$$r_o = r_i(1+\Delta d), \quad \Delta d = 0.5, 0.55, \cdots, 1 \tag{14b}$$

로 선택하였다. 여기서 Δd는 내부 원과 외부 원 사이의 거리이다.

따라서 y_n과 z_n는

$$y_n = \begin{cases} r_i\cos\alpha_{n_i}, & n = 1, \ldots, n_i \\ r_o\cos\alpha_{n_o}, & n = n_i+1, \ldots, N \end{cases}$$

$$z_n = \begin{cases} r_i\sin\alpha_{n_i}, & n = 1, \ldots, n_i \\ r_o\sin\alpha_{n_o}, & n = n_i+1, \ldots, N \end{cases}$$

으로 결정되고, 어레이 팩터는 다음과 같다.

$$AF(\theta,\phi) = \frac{\exp(jkr)}{4\pi r}\left(\sum_{n=0}^{n_i-1} \exp[-jk(r_i\cos\alpha_n\sin\theta\sin\phi + r_i\sin\alpha_n\cos\theta)] + \sum_{m=n_i+1}^{N} \exp[-jk(r_o\cos\alpha_m\sin\theta\sin\phi + r_o\sin\alpha_m\cos\theta)]\right) \tag{15}$$

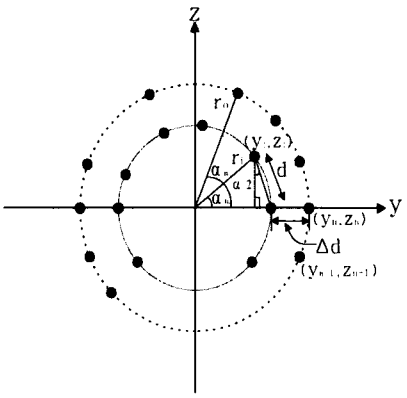

그림 5. 이중 원형 분포 평면 배열 안테나의 구조
Fig. 5. Geometry of double circular array antenna

Ⅲ. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 등방성 점원을 N = 16, 25, 36, 49로 선택하고 yz평면상에 정방형, 원형 및 이중 원형 구조로 배열한 후 각 배열 구조의 지향성 그리고 SLL와 HPBW[5]을 이론적으로 구하여 각 배열 구조의 특성을 비교하였다. 이때 그레이팅 로브를 피하기 위해 소자 사이의 간격을 1λ이하에서 결정하였다.

1. 방사패턴

배열 간격을 $d = 0.5\lambda, \ldots, 1\lambda$로 조절하면서 특성을 계산하였다. 그레이팅 로브의 성분이 나타나지 않도록 하면서 우수한 지향성과 SLL과 HPBW의 특성을 얻을 수 있도록 배열 간격으로 0.5λ를 결정하였다. 또한 이중 원형 구조의 경우 내부 원에 배열된 소자의 간격을 $d = 0.5\lambda$로 결정하고, 표 1과 같이 내부 원과 외부 원에 배열된 소자의 수를 선택하였다. 또 외부 원의 반지름을 결정하기 위해 식(15)의 어레이 팩터에 외부 원의 반지름에 대한 식(14a)와 식(14b)를 사용하여 SLL과 지향성 및 HPBW을 계산하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 (a)와 (b)와 (c)는 식(14a)에서 $\delta = 1.5, 1.55, \cdots, 3$일 때 각 특성을 계산한 것이고, (d)와 (e)와 (f)는 식 (14b)에서 $\Delta d = 0.5, 0.55, \cdots, 1$일 때 각 특성을 계산하여 얻은 것이다. 그림 6에 나타낸 것처럼 식(14a)이 외부 반지름으로 사용된 경우 $\delta = 2$일 때 최적화된 SLL와 지향성을 얻을 수 있었고, $2.1 \le \delta \le 3$인 경우는 그레이팅 로브의 영향으로 SLL과 지향성 특성이 감소되어 나타났다. 또한 외부 반지름으로 식(14b)이 사용된 경우 $0.7 \le \Delta d \le 1$일 때 그레이팅 로브의 영향으로 지향성과 SLL가 감소하는 특성이 나타났으며, $\Delta d = 0.65$일 때 최적화된 SLL와 지향성 특성을 얻을 수 있었다. 또한 N이 증가할수록 HPBW는 두 경우 모두 감소하는 특성을 얻을 수 있었다.

소자의 수 / 내경과 외경	N=16	N=25	N=36	N=49
n_i	8	9	16	20
n_o	8	16	20	29

표 1. 이중 원형 구조에서 내부와 외부 원의 소자의 수
Table 1. Number of element on inner and outer circle in double circular structure

따라서 식(14a)에서 $\delta = 2$일 때와 식(14b)에서 $\Delta d = 0.65$일 때를 비교하면, 지향성 측면에서는 식(14b)식을 사용한 경우 약 0.1dB 정도 좋은 특성을 가졌지만, SLL과 HPBW 측면에서 식(14a)을 사용한 경우가 보다 최적화된 특성을 얻을 수 있었다. 따라서 이중 원형 구조의 외부 반지름을 $r_o = 2\,r_i$로 결정하였다.

이제, 각 구조의 방사패턴을 계산하여 얻은 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타낸 것처럼 이중 원형 구조의 경우 N이 증가할수록 외부 원에 배열된 소자사이의 간격이 작아지기 때문에 SLL이 조금씩 증가하고, 빔폭이 예리해지는 특성을 나타내었다. 원형 구조의 경우 N이 증가할수록 사이드로브 수의 증가로 빔폭이 예리해지는 특성이 나타났으며, SLL는 변화가 없었다. 또 정방형 구조는 N이 증가할수록 SLL이 조금씩 감소하였고, 빔폭이 예리해지는 특성을 나타내었다. 따라서 이중 원형 구조는 정방형 구조보다는 빔폭과 SLL, 원형

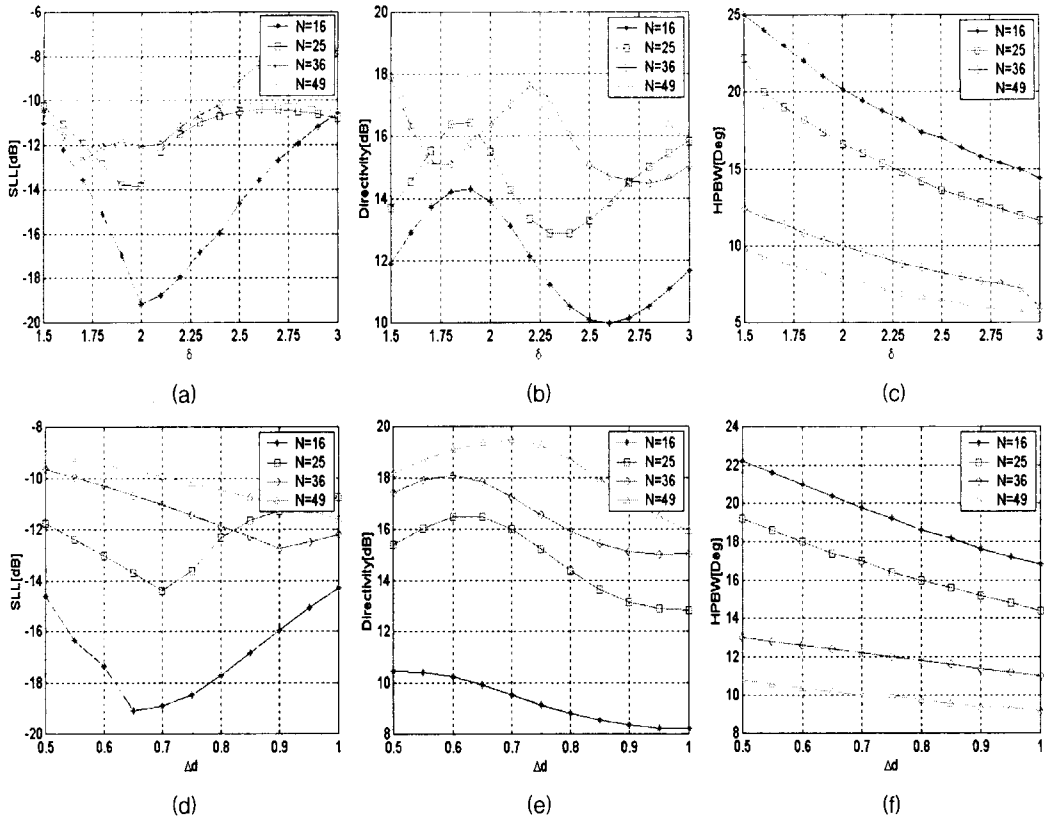

그림 6. 이중 원형 배열 안테나의 특성
(a) (b) (c) : SLL, 지향성, HPBW,(d) (e) (f) : SLL, 지향성, HPBW
Fig. 6. Characteristic of double circular array antenna
(a) (b) (c) : SLL, Directivity, HPBW,(d) (e) (f) : SLL, Directivity, HPBW

구조보다는 SLL과 지향성 측면에서 우수한 특성을 나타내었다. 그림 8은 N = 16이고 $d = 0.5\lambda$일 때 각 배열 구조의 등고선도를 나타낸 것이다. 그림 8에 나타낸 것처럼 각 배열 구조의 방사 패턴 모양은 배열 구조와 유사한 형태를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

2. 지향성과 SLL 및 HPBW

위의 결과로부터 N = 16, 25, 36, 49일 때 각 배열 구조의 지향성과 SLL, HPBW을 이론적으로 계산하여 표 2에 나타내었다. 표 2에서 이중 원형 구조는 각각의 N에 대해 정방형 구조보다 지향성은 3.04%, 8.91%, 0.3%, 3.82%, HPBW는 23.08%, 17%,

표 2. 각 배열 구조의 SLL과 HPBW
Table 2. SLL and HPBW of each array structure

배열구조 \ 안테나 수		N=16	N=25	N=36	N=49
정방형	D	13.5	15.27	17.15	18.38
	SLL	-11.30	-12.04	-12.42	-12.65
	HPBW	26°	20.6°	17.4°	14.8°
이중 원형	D	13.91	16.4	17.6	19.24
	SLL	-19.19	-14.82	-12.05	-12.18
	HPBW	20°	16.6°	9°	7.8°
원형	D	11.72	14.55	15.95	17.37
	SLL	-7.91	-7.89	-7.89	-7.89
	HPBW	16°	10.2°	7.2°	5.2°

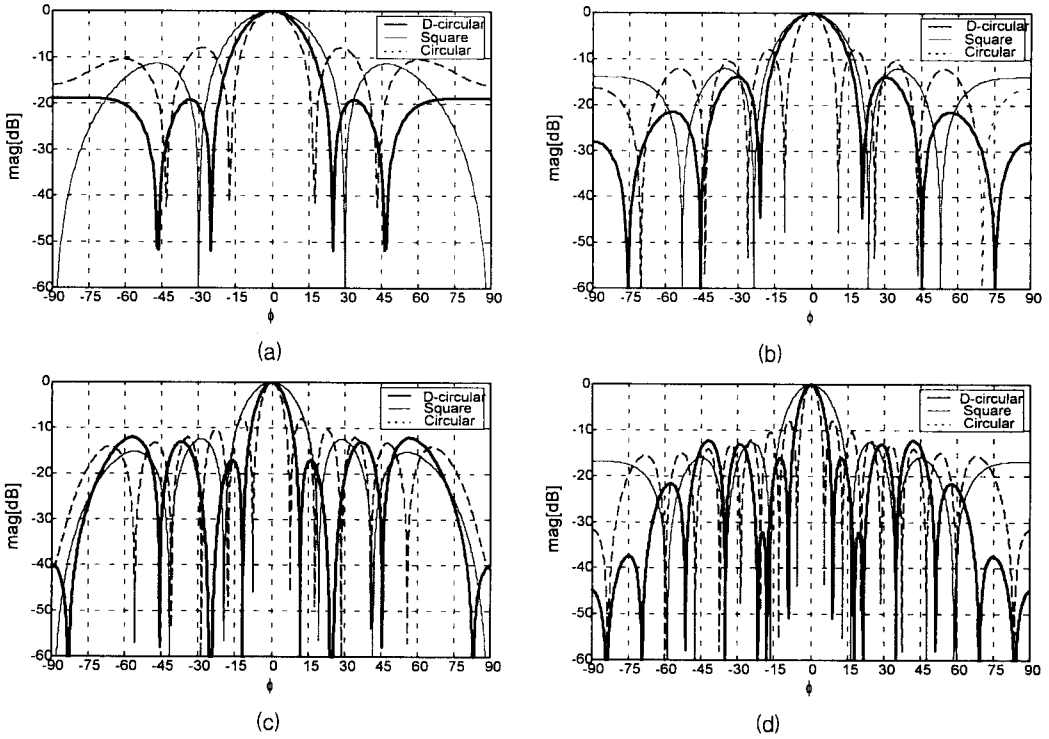

그림 7. 각 배열 구조의 방사패턴
(a) N = 16 (b) N = 25 (c) N = 36 (d) N = 49
Fig. 7. Radiation pattern of each array structure
(a) N = 16 (b) N = 25 (c) N = 36 (d) N = 49

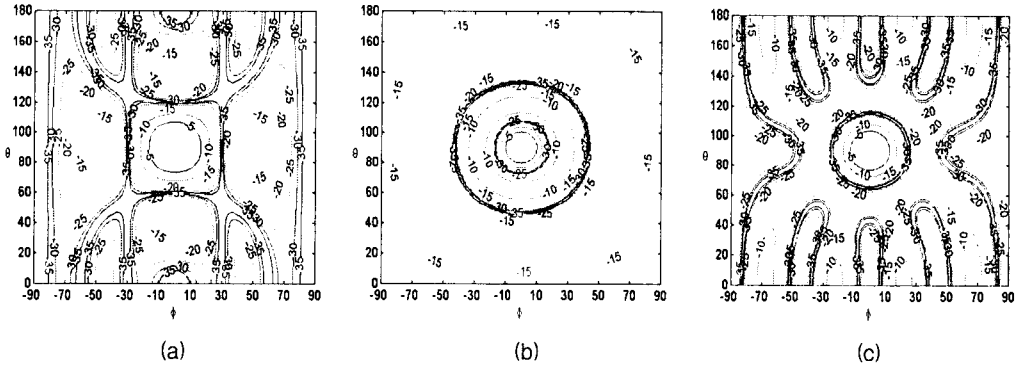

그림 8. 각 배열 구조의 등고선도(N = 16)
(a) 정방형 구조, (b) 원형 구조, (c) 이중 원형 구조
Fig. 8. Contour map of each array structure(N = 16)
(a) Square structure (b) Circular structure (c) Double circular structure

48.28%, 47.29% 정도 향상된 특성을 얻을 수 있었다. 원형 구조보다는 18.68%, 14.3%, 7.83%, 9.84% 지향성이 향상되었고, SLL은 142%, 87.83%, 52.73%, 54.37%정도 향상된 특성을 얻을 수 있었다. 따라서 이중 원형 구조를 사용하면 분포 면적이 정방형 분포보다 다소 크더라도 지향성과 SLL을 향상시킬 수 있으며, 보다 예리한 빔폭 특성을 얻을 수 있었다. 전체적인 특성 분석 결과 원형 분포보다는 지향성과 SLL, 정방형 구조보다는 지향성과 SLL 또는 HPBW측면에서 이중 원형 구조가 우수한 특성을 갖는다는 것을 확인하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 평면 배열 안테나를 사용함으로서 pencil beam에 적합하며, 특정한 방향으로의 예리한 지향특성을 갖는 배열 구조로 이중 원형 배열 구조가 적합하다는 것을 정방형 구조와 원형 구조와의 비교·분석을 통해 확인하였다. 소자의 수는 정방형 구조가 되도록 선택하였으며, 이중 원형 구조의 내부 원과 외부 원의 소자의 개수와 간격 및 외부 원의 반경을 조절함으로서 최적화된 특성을 얻을 수 있었다. 이때 정방형 구조와 원형 구조에서 소자사이의 간격은 그레이팅 로브를 피하기 위해 0.5λ로 결정하였으며, 이중 원형 구조의 경우 내부 원에 배열된 소자의 간격을 0.5λ로 하였다. 결과적으로 내부 원에 배열된 소자의 간격이 0.5λ이고, 외부 원의 반경 $r_o = 2r_i$인 이중 원형 구조가 표 2에 나타낸 것처럼 원형 분포 구조보다는 지향성과 SLL측면에서 우수한 특성을 나타내었고, 정방형 구조보다는 지향성과 SLL 또는 HPBW측면에서 우수한 결과를 얻었다. 또한 배열 형태와 유사한 형태의 방사패턴 모양을 가지고 있음을 확인할 수 있었고, 분포면적이 다소 크더라도 이중 원형 구조를 사용하면 정방형 구조 또는 원형 구조보다 빔폭과 지향성을 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

[1] Edward A. Wolff, Antenna Analysis, Wiley, 1965, Chapter 6, pp.241-282.

[2] M. T. Ma, Theory and Application of Antenna Arrays, Wiley, 1974, Chapter 3, pp.191-202.

[3] Robert S. Elliott, Antenna Theory And Design, Prentice-Hall, 1981, Chapter6, pp.196-212.

[4] T. B. Vu, "On Null Steering in Rectangular Planar Arrays", IEEE Trans. Antennas Propagation., vol. 40, no.8, pp995-997, Aug. 1992.

[5] WARREN L. STUTZMAN, GRAY A. THIELE, Antenna Theory and Design, John Wiley & Sons, Inc. 1983

[6] R. S. Elliott, "Beamwidth and Directivity of Large Scanning Arrays," Last of Two Parts, The Microwave Journal. 1964, pp.321-322.

[7] E. Botha and D. A. McNamara, "A Contoured Beam Synthesis Technique For Planar Antenna Arrays With Quadrantal And Centro-Symmetry", IEEE Trans. Antennas Propagation., vol. 41, no. 3, pp.1222-1231, Sept. 1993.

저 자 소 개

이 봉 수

1994년 청주대학교 전자공학과 졸업
1996년 청주대학교 일반대학원 전자공학과 졸업
2000년 청주대학교 일반대학원 전자공학과 박사과정 수료
현재 청주대학교 첨단공학부 시간강사
관심분야 : RF 회로 설계 및 안테나

송 우 영

1997년 연세대학교 전자공학과 졸업
1982년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
1988년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학박사)
현재 청주대학교 전자공학과 교수
관심분야 : RF 회로 설계 및 전자파 해석