

논문 2012-50-6-5

접힌 다이폴 구조를 적용한 L-Band 원통형 능동 위상배열 안테나 설계

(Design of L-Band Cylindrical Active Phase Array Antenna Using
Bent Dipoles)

이 만 규*, 권 익 진*

(Man-Gyu Lee[©] and Ickjin Kwon)

요 약

본 논문에서는 원통형태의 배열구조에서 수평면(H-plane), 수직면(E-Plane) 빔조향 특성을 갖는 원통형 능동위상배열 안테나를 제안하였다. 상호결합특성이 우수한 접힌 다이폴 안테나를 원통의 배열구조에 적합하도록 설계하고, 수직과 수평으로 8x8 원통 배열구조를 갖는 지향성 배열안테나와 전력 분배를 위한 결합분배기를 설계 및 제작하였다. 원통배열 안테나의 복사소자 배열 간격은 반전력 빔폭과 빔 조향 시 그레이팅로브가 발생하지 않도록 결정하였다. 안테나의 빔 조향은 송수신장치 내부의 6비트 위상변위기를 이용하여 구현하였으며, 안테나 빔조향 시 수평면으로 -24도 ~ 24도, 수직면 기준으로 0도 ~ 36도의 빔조향 특성을 갖도록 고안되었다.

Abstract

In this paper, we propose a cylindrical active phased array antenna of Beam Steering Characteristics in the horizontal plane(H-plane) and vertical plane(E-Plane) on the cylinder form array structure. We design the bent dipole antenna of the cylindrical array structure adapted excellent mutual-coupling characteristics, designed and manufactured the cylindrical array antennas and power combiner/divider unit for power dividing and combining on the antenna. The radiating elements array spacing of Cylindrical array antenna were determined to avoid grating lobes at half power beam steering. Beam steering of the antenna was implemented with 6-bit phase shifter in the transceiver and have been designed based on the characteristics the antenna beam steering at -24 degrees to 24 degrees horizontal, vertical 0 degrees to 36 degrees beam steering. A cylindrical active phased array antenna that produced for verification the performance of the antenna are measured radiation characteristics in accordance with beam steering at L-Band.

Keywords : Cylindrical Array Antenna, Phased Array Antenna, Bent Dipole

* 정회원, 삼성탈레스 PGM 센터
(PGM Center, Samsung Thales)

** 정회원, 아주대학교 전자공학과
(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

※ 이 연구는 민군겸용기술과제 연구비의 지원으로 연구되었음.

© Corresponding Author(E-mail: mangyu.lee@samsung.com)

접수일자 2012년11월8일, 수정완료일 2013년5월20일

I. 서 론

레이다 시스템 (Radar System)의 구성품인 안테나는 지향성 복사패턴을 이용하여 표적의 신호를 획득 한다. 지향성 복사패턴은 전기적으로 빔폭을 좁게하여, 표적의 방위각 분해능을 높이며, 높은 지향성으로 인하여 안테나 이득의 증가시켜 레이다 시스템의 송신출력을 감소시키는 역할을 한다.

레이다 안테나는 안테나의 개구면적을 물리적으로 증가시켜 지향성 복사패턴을 구현한다. 일반적으로 안테나는 반사판 안테나(Reflector Antenna)구조 또는 복사소자를 배열한 배열 안테나(Array Antenna)구조로 개구 면적을 증가시킨다.

배열소자를 이용한 배열안테나의 경우 배열된 소자에 신호를 공급하기 위한 전송선로 구현이 어렵지만, 신호의 위상 및 크기를 조절하여 복사패턴의 형상 및 빔조향 복사패턴의 구현이 전기적으로 가능하다. 복사소자의 배열 개수에 따라 빔폭 및 이득을 결정하며, 배열된 복사소자의 위상을 조절하여 요구하는 방향으로 주빔을 조향 할 수 있다. 이러한 기능을 갖는 배열안테나 중 복사소자에 흐르는 전류의 진폭 과 위상차의 조합에 의해 빔 형상과 방향을 결정짓는 안테나를 위상배열 안테나(Phased Array Antenna)라고 한다.^[1~3] 현재 대부분의 위상배열안테나는 평면배열 구조형태로 많은 연구와 개발이 이루어져 있으며^[4~11], 3차원 구조를 갖는 원통형 위상배열안테나에 관해서는 2006년 N. C. Athanasopoulos^[12]가 원통구조를 일부 적용시킨 컨포멀 형태의 안테나를 연구하였고, 2000년 Tomohiro SEKI^[13]와 2006년 D. Mastela^[14]가 스위치를 이용한 빔 조향 장치로 원통배열 안테나의 빔 조향 특성을 연구하였다. 본 논문에서는 경로 조정에 의한 빔 조향특성 아닌 실제 복사소자의 위상을 조정하여 빔 조향 특성을 갖는 3차원 배열구조의 원통형 능동 위상배열 안테나를 제안하고자 한다. 복사소자로서는 소자 상호간의 상호결합 특성 및 정재파 특성이 우수한 접힌 다이폴 안테나를 평판형 다이폴 안테나와 비교하여 제시하고, 위상변위기 및 반도체 증폭기로 구성되어 있는 송수신 장치를 제시한다. 또한 원통형 능동 위상배열 안테나의 전력분배를 위한 결합분배기를 제시한다.

II. 원통 위상배열 안테나 동작원리

1. 위상배열안테나 동작원리

일반적인 위상배열 안테나는 그림 1과 같은 원리도 동작한다. 배열 안테나는 전력분배기를 통하여 각각의 배열소자로 분배된 전력을 공급하고, 공급된 신호를 위상변위기를 이용하여 위상량을 조정하면 각각의 복사소자에서 방사되는 전자파의 위상의 제어가 가능해진다. 배열안테나를 구성하는 복사소자의 위상제어는 배열안테나의 동위상면의 제어를 가능하게 하므로, 동위상면을 제어하여 동위상면의 법선방향으로 결정되는 복사방향을 복사소자의 위상제어로 빔 조향을 할 수 있다.

인접 기본 복사소자간의 위상차(ϕ)와 복사방향(θ)과의 관계는 식 (1)과 같다.^[1,15]

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \tag{1}$$

여기서 λ 는 파장이고 d 는 복사소자간의 배열간격을 나타낸다. 배열간격은 일정하므로 파장에 의하여 원하는 복사방향으로 주빔이 향하도록 인접한 복사소자간의 위상차(ϕ)를 계산할 수 있다. 식 (1)에서 파장이 분모에 포함되어 있으므로 원하는 방향으로 주빔이 향하도록 각 위상변위기의 위상을 입력했다라도 주파수가 변한 상태에서는 복사방향이 다소 바뀌게 된다.

식 (2)는 최대 빔조향각(θ_m)(maximum scan angle)과 복사소자 배열간격(d)의 관계를 나타낸다.^[1,2]

$$d = \frac{\lambda}{1 + |\sin\theta_m|} \tag{2}$$

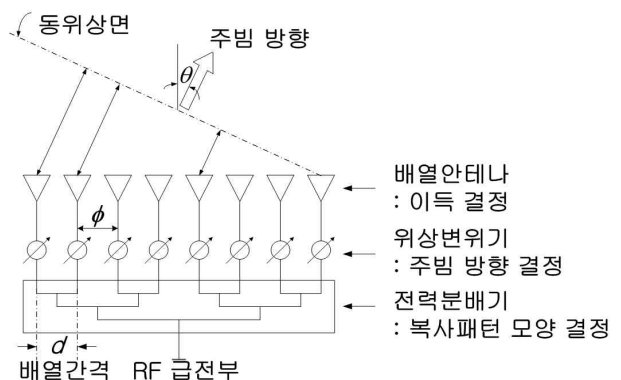


그림 1. 위상배열 안테나 시스템의 동작원리
Fig. 1. Principle of the phased array antenna system.

식 (2)는 주빔이 θ_m 방향으로 향해 있을 때 $-\theta_m$ 방향에서 그레이팅로브가 나타나지 않는 것을 기준으로 한 것이다. 식 (2)에서 빔 조향각이 넓어질수록 기본 복사소자 배열간격은 좁아진다는 것을 알 수 있다. 극단적으로 $\theta_m = 90^\circ$ 일 때 기본 복사소자 배열간격은 반파장이 된다. 따라서 일반적으로는 복사소자 배열간격을 $0.6 \sim 0.8 \lambda$ 범위로 한다.

위상배열 안테나에서는 주빔의 빔 조향 방향이 복사소자 배열축의 법선방향에서부터 멀어질수록 주빔의 반전력 빔폭이 넓어진다. 그 이유는 빔 조향 방향에서 본 안테나의 유효길이 또는 면적이 다르기 때문이다. 식 (3)은 빔조향각에 따른 반전력 빔폭의 관계를 나타낸다^[1,2].

$$BW(\theta) = \frac{BW(0)}{\cos\theta} \quad (3)$$

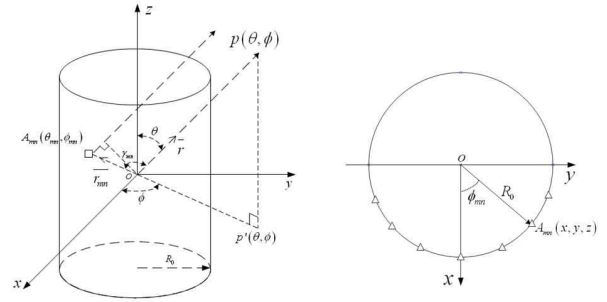
여기서 $BW(\theta)$ 은 주빔이 θ 방향을 향했을 때의 반전력 빔폭이고 $BW(0)$ 은 주빔이 배열 축과 법선방향을 향했을 때의 반전력 빔폭이므로 $BW(0)$ 는 배열크기 즉, 기본 복사소자 배열간격, 소자 수와 안테나 배열 축에 따른 전류분포가 주어지면 계산할 수 있다. 식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 빔 조향각이 배열 축 방향 즉, 90° 에 가까워지면서 반전력 빔폭은 급격히 커져서 안테나의 역할로서 부적합하게 된다. 공학적 의미에서 최대 스캔각(θ_m) 은 $\pm 60^\circ$ 까지 할 수 있으나 반전력 빔폭이 커지면 안테나 이득이 감소하는 것을 감수해야 하므로 최대 빔 조향각은 $\pm 45^\circ$ 로 사용된다.

2. 원통배열이론

안테나 소자들을 일직선상에 배열하는 선형배열 이외에 복사 소자들을 원통좌표계상의 배열하는 원통 배열(Cylindrical Array)이 있다. 원통배열은 3차원 배열로서 공간 상의 임의의 방향으로 빔을 조향할 수 있으며, 레이더 시스템 및 통신 등에 활용이 가능하다. 그림 3-1은 원통배열을 나타낸다. 그림 3-1과 같이 원통좌표계의 $M \times N$ 구조로 배열된 배열계수(AF : Array Factor)는 식(3-1)과 같이^[13]

$$AF = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} f_{mn}(\theta, \phi) e^{[j(kR_{mn} \cos\gamma_{mn} + \rho_{mn})]} \quad (4)$$

로 쓸수 있으며, I_{mn} 은 각 소자에 급전된 전류의 크기,



(a) 원통배열 (b) 수직으로 바라본 원통배열구조
(a) Cylindrical Array (b) Top-view of Cylindrical Array

그림 2. 원통배열 구조

Fig. 2. Cylindrical Array geometry.

ρ_{mn} 는 전류의 위상, $f(\theta, \phi)$ 배열된 소자의 위치 A_{mn} 에서의 단일 복사패턴, R_{mn} 은 원통좌표계의 원점과 배열된 소자의 위치 A_{mn} 사이의 거리를 나타낸다.

그림 2에서 \hat{r} , \hat{r}_{mn} 은^[16]

$$\hat{r} = \hat{x} \sin\theta \cos\phi_{mn} + \hat{y} \sin\theta \sin\phi_{mn} + \hat{z} \cos\theta \quad (5)$$

$$\hat{r}_{mn} = \hat{x} \sin\theta_{mn} \cos\phi_{mn} + \hat{y} \sin\theta_{mn} \sin\phi_{mn} + \hat{z} \cos\theta_{mn} \quad (6)$$

이다. 여기서 $\cos\gamma_{mn}$ 은^[16]

$$\begin{aligned} \cos\gamma_{mn} &= \hat{r} \cdot \hat{r}_{mn} \\ &= \sin\theta \sin\theta_{mn} \cos\phi \cos\phi_{mn} \\ &\quad + \sin\theta \sin\theta_{mn} \sin\phi \sin\phi_{mn} + \cos\theta \cos\theta_{mn} \end{aligned} \quad (7)$$

$$= \cos^2\left(\frac{\phi - \phi_{mn}}{2}\right) \cos(\theta - \theta_{mn})$$

$$+ \sin^2\left(\frac{\phi - \phi_{mn}}{2}\right) \cos(\theta + \theta_{mn})$$

정리할 수 있다. 또한 \vec{r}_{mn} 은^[16]

$$\vec{r}_{mn} = \hat{x} A_{mn}(x) + \hat{y} A_{mn}(y) + \hat{z} A_{mn}(z) \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. $R_{mn} \cos\gamma_{mn}$, ρ_{mn} 은^[13]

$$\begin{aligned} R_{mn} \cos\gamma_{mn} &= \vec{r}_{mn} \cdot \hat{r} \\ &= A_{mn}(x) \sin\theta \cos\phi \\ &\quad + A_{mn}(y) \sin\theta \sin\phi + A_{mn}(z) \cos\theta \end{aligned} \quad (9)$$

$$\rho_{mn} = -k[A_{mn}(x)\sin\theta_0\cos\phi_0 + A_{mn}(y)\sin\theta_0\sin\phi_0 + A_{mn}(z)\cos\theta_0] \quad (10)$$

이다. 여기서 (θ_0, ϕ_0) 은 빔 조향 각을 의미한다. 그림 2의 (b)의 구조를 이용하여 배열된 소자들의 좌표계를 원통좌표계에서 직교 좌표계로 변환 할 수 있다. 배열된 소자들을 직교 좌표계의 축으로 변환하였을 때 $A_{mn}(x, y, z)$ 은^[16]

$$A_{mn}(x) = R_0\cos\phi_{mn} \quad (11)$$

$$A_{mn}(y) = R_0\sin\phi_{mn} \quad (12)$$

$$A_{mn}(z) = \frac{(M+1-2m) \cdot d}{2} \quad (13)$$

으로 변환된다. 방위각 방향으로 배열된 소자의 배열 각도 ϕ_{mn} 는^[16]

$$\phi_{mn} = \frac{(2n-1-N) \cdot \Delta\phi}{2} \quad (14)$$

로 표현된다. 위 식을 식 4에 대입하여 정리하면

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} f_{mn}(\theta, \phi) \cdot e^{jk[A_{mn}(x)\sin\theta\cos\phi + A_{mn}(y)\sin\theta\sin\phi + A_{mn}(z)\cos\theta] + \rho_{mn}} \quad (15)$$

로 정리 할 수 있다.

III. 원통형 능동 위상배열 안테나 설계

1. 원통형 능동 위상배열 안테나 구성

그림 3은 본 논문에서 설계된 원통형 능동 위상배열 안테나 시스템의 구성을 나타낸다. 본 논문에서 설계된 원통형 능동 위상배열 안테나 시스템의 구성은 배열 안테나와 송수신장치, 결합분배기로 나눌 수 있다. 배열 안테나는 상호결합특성 및 정재파 특성이 우수한 접힌 다이폴 형태를 제안하고 이를 기본 복사소자로 한다. 또한 수직면, 수평면에서 지향성 복사패턴을 위해 제안한 접힌 다이폴 안테나를 1개의 복사면 당 8×8로 배열한다. 수직배열 8소자에 전력공급 및 위상변위를 위한

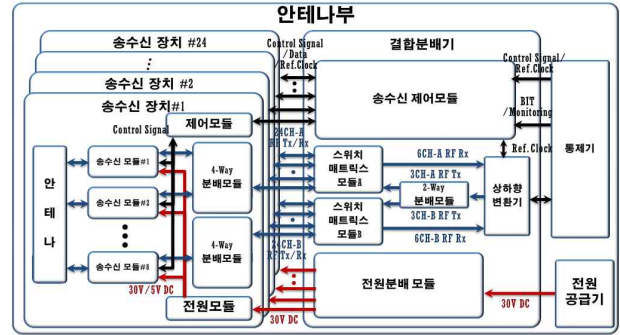


그림 3. 위상배열 안테나 시스템의 구성도
Fig. 3. Block diagram of the cylindrical active phased array antenna system.

송수신장치는 반도체 증폭기와 위상변위기로 구성한다. 수평 8개의 배열에 전력공급을 위한 수평방향의 전력분배는 결합분배기를 통하여 구성한다. 반도체 송수신기는 빔 조향 범위(수평:-24°~24°, 수직:0°~36°)로 빔 조향이 가능하도록 6비트 위상변위기와 소자당 10Watt 출력으로 증폭시키는 반도체증폭기, 위상변위기와 반도체증폭기를 제어하는 제어모듈로 구성하였다.

표 1은 원통형 능동 위상배열 안테나 시스템 설계 목표를 나타낸다. 동작주파수 대역은 L-Band 주파수 대역(1.3GHz~1.4GHz)으로 하였으며, 복사소자의 능동 정재파비는 소자간 상호결합 특성을 고려해 주파수 전 대역에서 2.0 : 1 이하로 하였다. 이득의 경우 지향성 복사 특성을 위해 19 dBi이상으로 하였다. 수직면 반전력 빔폭의 경우 역시 고이득 특성을 만족시키기 위해 11° 이상으로 하였으며, 수평면 반전력 빔폭 또한 고이득 특성을 만족시키기 위해 12°로 결정하였다. 사이드로브 레벨은 -13 dB이하로, 수평 빔 조향 범위는 -24°~24°, 수직 빔 조향 범위는 0°~36°로 결정하였다.

표 1. 원통형 능동 위상배열 안테나의 설계 목표
Table 1. Design goals of the cylindrical active phased array antenna.

구분	설계 목표
주파수	1.xGHz~1.xGHz
능동 정재파비	1.0 : 1 이하
이득	19 dBi이상
수직면 반전력 빔폭	11° 이상
수평면 반전력 빔폭	12° 이상
사이드로브 레벨	-13 dB 이하
수평 빔조향 범위	-24° ~ 24°
수직 빔조향 범위	0° ~ 36°

2. 복사소자 제안 및 설계

본 논문에서는 원통형 능동 위상배열안테나에 적합한 복사소자를 제안한다. 복사소자는 일반 다이폴 안테나를 변형시킨 접힌 다이폴 안테나를 원통배열에 적합하게 설계하여 제안한다.

접힌 다이폴 안테나는 다이폴 안테나를 반사판방향으로 접어서 일반 다이폴의 이득을 유지하면서 주파수 특성 및 배열간 상호결합특성을 개선시킨 안테나이다. 위상배열안테나에 사용되어지는 복사소자는 빔 조향 특성을 개선하기 위하여 배열 간격을 $0.5\lambda \sim 0.6\lambda$ 로 결정한다. 결정된 복사소자의 배열간격에 의하여 복사소자 상호간의 상호결합특성에 의하여 정재파 특성이 저하된다. 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 평판형 다이폴 안테나와 접힌 다이폴 안테나의 주파수 특성 및 상호결합특성을 비교하여, 원통형 능동 위상배열 안테나에 적합한 복사소자를 제안토록 한다.

2.1 다이폴 안테나 특성 분석

본 절에서는 제안된 형태의 접힌 다이폴 안테나와 일반적인 다이폴 안테나의 특성을 비교 분석한다. 그림 4는 접힌 다이폴 안테나의 구조를 나타낸다. 그림 5는 평판형 다이폴 안테나의 구조를 나타낸다.

두 가지 형태의 다이폴 안테나는 일반적인 다이폴 등가회로로 표현이 가능하며, 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

등가회로는 다이폴 안테나의 한 소자가 점퍼를 통해 급전선에 연결되므로 다이폴 안테나의 임피던스 Z_i , 점퍼 리액턴스 Z_j , 급전선 임피던스 Z_f 모두 직렬 연결된 것으로 나타낼 수 있다. 또한, 급전된 다이폴 안테나의 한 소자와 단락스터브가 연결되므로 이는 다이폴

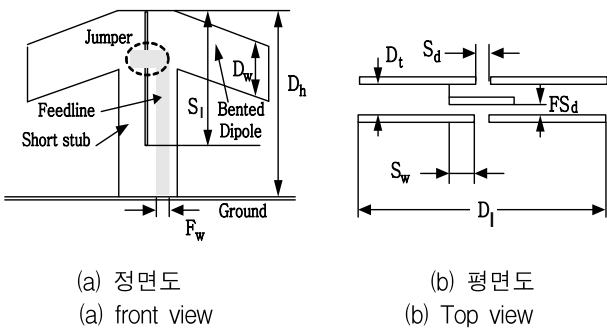


그림 4. 접힌 다이폴 안테나 구조
Fig. 4. Structure of a bent dipole antenna.

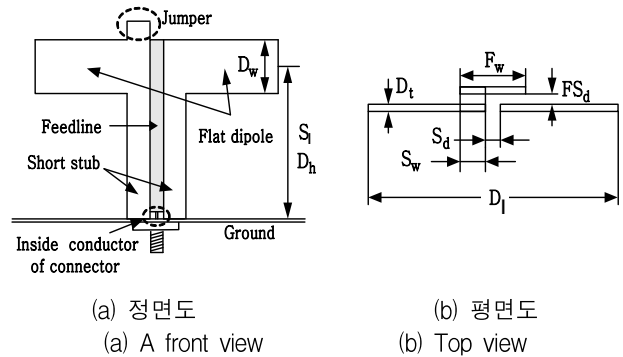


그림 5. 평판 다이폴 안테나 구조
Fig. 5. Structure of a flat dipole antenna.

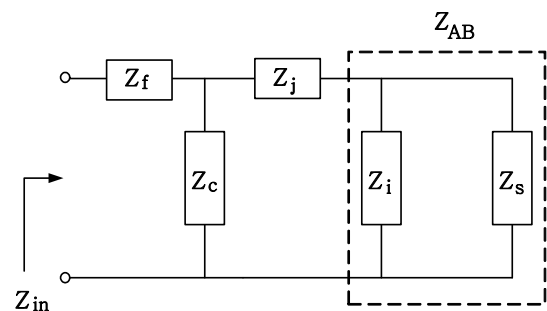


그림 6. 다이폴 안테나의 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit of the dipole antenna.

안테나의 임피던스 Z_i 와 단락스터브 임피던스 Z_s 의 병렬연결로 볼 수 있다. 마지막으로, 급전선과 접힌 다이폴을 지지하는 단락스터브 사이에 리액턴스 성분 Z_c 가 발생하므로 이는 급전선 임피던스와 나머지 임피던스들 사이에 병렬연결된 것으로 나타낼 수 있다. 따라서 급전 커넥터에서 들여다 본 입력임피던스를 계산하면 식 (16)와 같고, Z_{AB} 는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (16)에서와 같이 다이폴 안테나의 입력임피던스는 다이폴 안테나의 임피던스와 단락스터브 임피던스, 급전선과 점퍼 임피던스에 따라 변화한다. 또한 각 구조의 크기가 정해졌을 때, 급전선과 단락스터브 사이에서 발생하는 리액턴스 성분과 점퍼의 리액턴스 성분을 변화시켜 정합할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Z_{in} &= \frac{Z_f}{\frac{1}{Z_{AB} + Z_j} + \frac{1}{Z_c}} \\
 &= \frac{R_f + jX_f}{\frac{1}{R_{AB} + j(\omega L_0 + X_{AB})} + j\omega C_0}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$Z_{AB} = \frac{1}{\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_i}} = R_{AB} + jX_{AB} \quad (17)$$

여기서

$Z_i = R_i + jX_i$: 접힌 다이폴 임피던스

$Z_s = jZ_0 \tan \theta$: 단락스터브 임피던스

Z_0 : 단락스터브의 특성임피던스

θ : 단락스터브의 전기적 길이

$Z_j = j\omega L_0$: 접과 리액턴스

$Z_f = R_f + jX_f$: 급전선 임피던스

$Z_c = \frac{1}{j\omega C_0}$: 급전선과 단락스터브 사이의 리액턴스

를 나타낸다.

표 2와 3은 접힌 다이폴 안테나와 평판 다이폴 안테나의 설계 치수를 나타낸다.

표 2. 접힌 다이폴 안테나의 설계 치수

Table 2. The design parameters for the bent dipole antenna.

구 분	치 수(@f _c)
접힌 다이폴 길이(D_l)	0.45λ
접힌 다이폴 폭(D_w)	0.045λ
접힌 다이폴 두께(D_t)	0.02λ
접힌 다이폴 높이(D_h)	0.39λ
급전선 폭(F_w)	0.02λ
단락스터브 길이(S_l)	0.16λ
단락스터브 폭(S_w)	0.045λ
단락스터브 사이간격(S_d)	0.009λ
급전선과 단락스터브 사이간격(FS_d)	0.009λ

표 3. 평판 다이폴 안테나의 설계값

Table 3. The design parameters for the flat dipole antenna.

구 분	치 수(@f _c)
평판 다이폴 길이(D_l)	0.41λ
평판 다이폴 폭(D_w)	0.068λ
평판 다이폴 두께(D_t)	0.011λ
평판 다이폴 높이(D_h)	0.25λ
급전선 폭(F_w)	0.079λ
단락스터브 길이(S_l)	0.25λ
단락스터브 폭(S_w)	0.034λ
단락스터브 사이간격(S_d)	0.02λ
급전선과 단락스터브 사이간격(FS_d)	0.0136λ

그림 7과 8은 설계된 접힌 다이폴 안테나와 평판 다이폴 안테나의 해석을 위한 배열되어진 소자의 시뮬레이션 형상을 나타낸다. 특성 해석은 상용 EM 해석툴인 HFSS를 사용하였다.

접힌 다이폴안테나와 평판 다이폴 안테나의 시뮬레이션 결과 능동 반사손실특성은 접힌 다이폴 안테나의 경우 그림 9에서 사용 주파수 대역 내 -12dB 이하를 만족하는 특성을 얻었으나, 평판 다이폴의 경우 그림 10에서 사용 주파수 대역 내 -10dB 이하를 만족하는

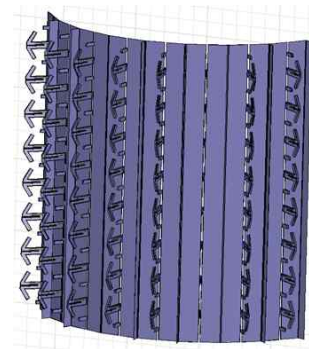


그림 7. 접힌 다이폴 안테나의 시뮬레이션 형상
Fig. 7. Simulation structure of bent dipole antenna.

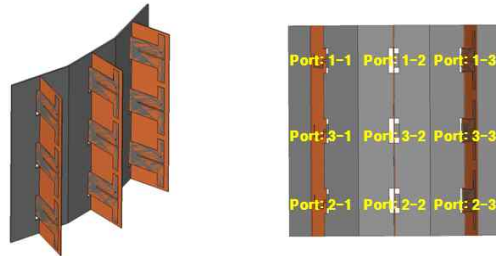


그림 8. 평판 다이폴 안테나의 시뮬레이션 형상
Fig. 8. Simulation structure of flat dipole antenna.

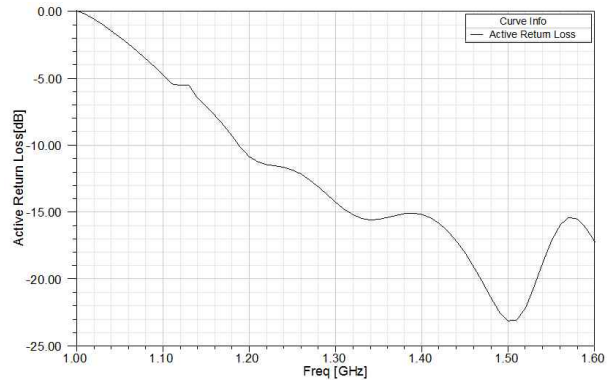


그림 9. 접힌 다이폴 안테나의 능동 반사손실 특성
Fig. 9. Active return loss characteristics of the bent dipole antenna.

특성을 확인하였다.

또한 상호결합특성 시뮬레이션 결과 접힌 다이폴 안테나의 경우 그림 11에서 사용주파수 대역 내 -12dB 이하의 결과를 얻었으며, 평판 다이폴 안테나의 경우 그림 12에서 사용주파수 대역 내 -9dB 이하의 결과를

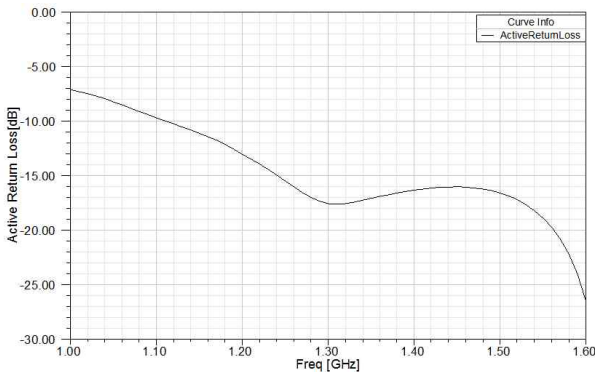


그림 10. 평판 다이폴 안테나의 능동 반사손실 특성
Fig. 10. Active return loss characteristics of the flat dipole antenna.

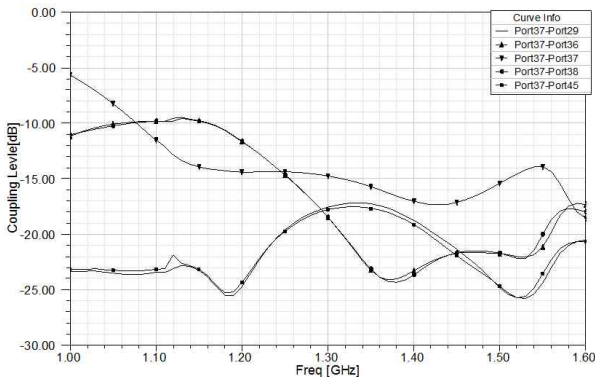


그림 11. 접힌 다이폴 안테나의 상호결합 특성
Fig. 11. Mutual coupling characteristics of the bent dipole antenna.

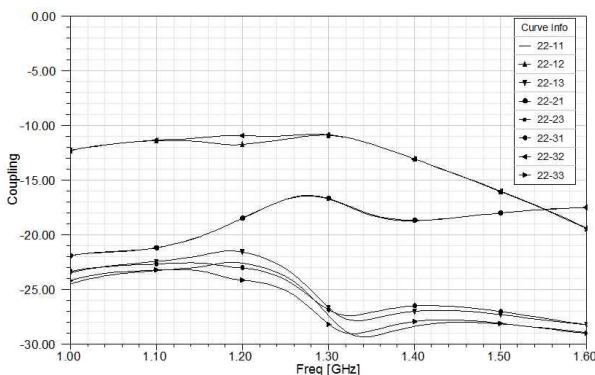


그림 12. 평판 다이폴 안테나의 상호결합 특성
Fig. 12. Mutual coupling characteristics of the flat dipole antenna.

확인하였다.

접힌 다이폴 안테나와 평판 다이폴 안테나의 시뮬레이션 결과 접힌 다이폴 안테나가 능동 정재파비 특성의 경우 약 2dB 이상, 상호 결합특성의 경우 약 2dB 이상 우수한 것으로 확인 되었다.

본 절에서는 원통형 위상배열 안테나의 복사소자로서 접힌다이폴 안테나의 특성을 확인 하였고, 복사소자로서 적용이 가능하다고 판단된다.

2.2 복사특성 분석

본 절에서는 제안된 형태의 접힌 다이폴 안테나를 복사소자로 사용하여 배열안테나 구성 시 나타나는 복사 특성을 분석 하였다.

복사특성 시뮬레이션 결과 수평빔폭 12.2°, 수직빔폭 11.9°를 갖는 지향성 복사패턴을 확인 하였다.

그림 13은 8×8 구조로 배열된 배열안테나의 복사특성의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

그림 14는 8×8 구조로 배열된 배열안테나의 수평 빔 조향 복사패턴을 나타낸다. 안테나의 주빔이 빔 조향

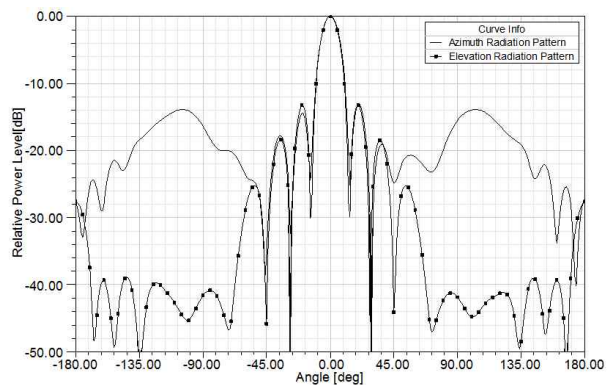


그림 13. 8×8 배열안테나 복사패턴 특성 (@f_c)
Fig. 13. Radiation characteristics of 8×8 array antenna. (@f_c).

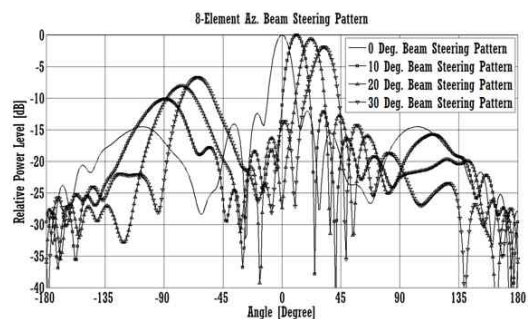


그림 14. 빔 조향별 수평 복사패턴 (@f_c)
Fig. 14. Azimuth beam steering Radiation pattern (@f_c).

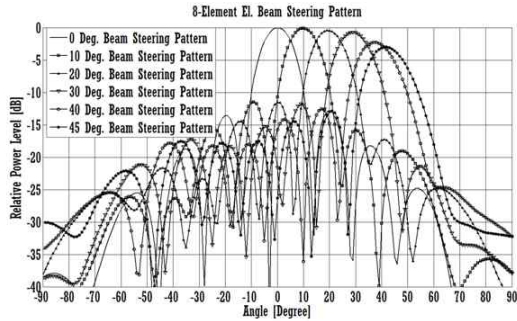


그림 15. 빔 조향 복사패턴 (@ f_c)
Fig. 15. Elevation beam steering Radiation pattern (@ f_c).

10°간격으로 빔 조향각 0°부터 +30°까지 변화함을 확인하였다.

그림 15는 8×8 구조로 배열된 배열안테나의 수직 빔 조향 복사패턴을 나타낸다. 안테나의 주빔이 빔 조향 5°간격으로 빔 조향각 0°부터 +45°까지 변화함을 확인하였다.

복사패턴 분석결과 원통형 능동 위상배열안테나는 설계값에 근접한 시뮬레이션 결과를 확인하였다.

3. 송수신 장치 설계

배열 안테나에는 배열된 복사소자들을 연결하고 전력과 위상을 공급할 수 있는 급전선로가 반드시 필요하다. 이와 같은 급전선로를 급전회로망(feed network)이라 한다. 그러나 본 논문에서는 위상변위기와 반도체 증폭기와 같은 능동소자로 구성된 송수신 장치를 제작하였다. 송수신 장치는 레이더 시스템에 사용하기 적합하도록 송수신을 전자제어 스위치를 통하여 제어하는 구조를 갖는다. 그림 16은 송수신 장치의 구성도, 표4는 송수신 장치의 설계 치수를 나타낸다.

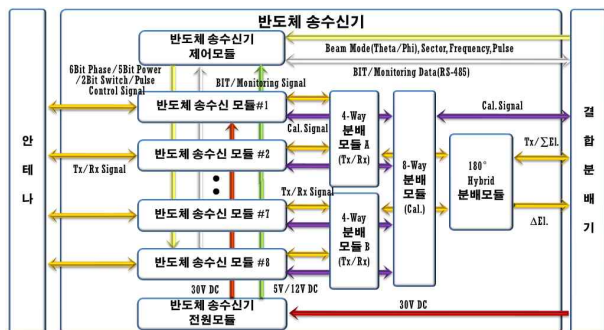


그림 16. 송수신 장치 구성도
Fig. 16. T/R Unit block diagram.

표 4. 송수신장치 설계 치수

Table 4. The design parameters for the T/R Unit.

구분	설계값	
주파수	1.XX ~ 1.XX GHz	
위상 조절	360°, 5.625° Step	
위상 조절 오차	< RMS 6°	
이득 조절	31 dB, 0.5 dB Step	
이득 조절 오차	< RMS 0.7 dB	
부배열 단위 모듈	1 X 4 (Quad-Pack)	
Impedance	50 Ω	
VSWR	< 1.5:1	
송신	송신 출력	40 dBm (10 W)
	Pulse Duty Factor	15 % Max.
	Amplitude Droop	< 0.5 dB Across 10 us Pulse
	송신기 이득	40 dB ± 2 dB
	Harmonics	< -50 dBc
수신	수신 이득	40 dB ± 2 dB
	출력 P1dBm	> +0 dBm
	이득 차이	< ±0.5 dB
	위상 차이	< ±5 °

송수신 장치는 2개의 쿼드팩과 1개의 제어모듈로 구성되어 있으며, 쿼드팩은 4개의 송수신 모듈로 구성되어 있다. 쿼드팩은 2개를 묶어 하나의 제어회로로 제어를 하도록 되어 있다.

송수신 모듈의 구조는 안테나의 빔 조향을 위한 위상 변위기 및 가변감쇠기를 송수신 시 스위치를 절체하여 공용으로 사용하는 구조이다. 위상변위기는 6 Bit 디지털 제어 형태이며, 최소 위상변위량은 5.625°가 된다. 가변감쇠기는 6 Bit 디지털 제어 형태의 가변 증폭기를 사용했으며, 시리얼 제어 인터페이스로 되어 있다. 이득은 약 17.5 dB 정도이며 31.5 dB의 감쇠도를 가지고 연속적으로 가변시킬 수 있다. 송신 및 수신 경로의 선택은 SPDT (Single Pole Double Throw) 스위치에 의하여 결정되며, 손실이 적은 PIN 다이오드로 제작된 MMIC switch를 사용하였다.

수신경로는 이득이 40 dB가 되도록 부품을 선정하였다. 이 때 송수신 공통 채널인 위상변위기와 가변감쇠기의 손실전력을 고려하였다. 송신경로는 L-Band 1.3GHz~1.4GHz 에서 40 dBm 이상 출력하도록 부품을 선정하였으며, 송수신 공통 경로의 감쇠를 고려하였다. 출력증폭기는 10W 이상의 출력을 갖는 것을 선택하였다.

서큘레이터(circulator)는 송신 출력 10W에 견딜 수

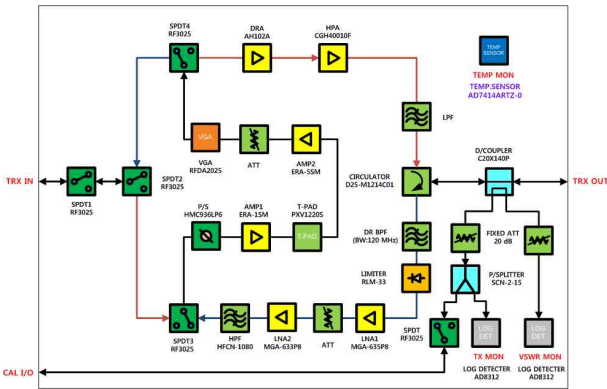


그림 17. 송수신모듈 RF부 구성도
Fig. 17. RF part block diagram of T/R module.

표 5. 송수신 모듈 송신경로 RF 버짓 계산
Table 5. RF Tx path budget calculation of T/R module.

구성품	이득	전력	이득합	P1dB
	(dB)	(dBm)	(dB)	(dBm)
TX IN		0.0		
Attenuator	-4.0	-4.0	-4.0	
4-WAY P/D	-8.0	-12.0	-12.0	
SPDT1	-1.0	-13.0	-13.0	
SPDT2	-1.0	-14.0	-14.0	
SPDT3	-1.0	-15.0	-15.0	
Phase Shifter	-5.0	-20.0	-20.0	
AMP1	12.0	-8.0	-8.0	12.0
T-PAD	-6.0	-14.0	-14.0	
AMP2	18.0	4.0	4.0	18.0
ATT	-6.0	-2.0	-2.0	
VGA	18.0	16.0	16.0	25.0
SPDT4	-1.0	15.0	15.0	
DRA	14.0	29.0	29.0	27.0
HPF	-1.0	28.0	28.0	
HPA	19.0	42.0	47.0	41.0
LPF	-0.5	41.5	46.5	
CIRCULATOR	-0.5	41.0	46.0	
D/COUPLER	-0.5	40.5	45.5	
TX OUT		40.5	45.5	

있는 것을 선정하였으며, 수신부의 보호를 위하여 LNA(Low Noise Amplifier) 전단에 BPF(Band Pass Filter)와 리미터를 적용 하였다.

그림 17은 송수신 모듈의 RF부의 세부 구성도를 나타낸다. 표 5와 표 6은 RF 송수신경로 특성을 분석하였다.

송수신 제어모듈은 결합분배기에서 제공받은 빔 조

표 6. 송수신 모듈 수신경로 RF 버짓 계산
Table 6. RF Rx path budget calculation of T/R module.

구성품	이득	이득합	잡음 지수	잡음 지수합
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
RX IN				
D/COUPLER	-0.5	-0.5	0.5	0.5
CIRCULATOR	-0.5	-1.0	0.5	1.0
LIMITER	-0.5	-1.5	0.5	1.5
DR BPF	-1.0	-2.5	1.0	2.5
LNA1	18.0	15.5	0.6	3.1
ATT	-6.0	9.5	6.0	3.3
LNA2	18.0	27.5	0.6	3.3
HPF	-1.5	26.0	1.5	3.3
SPDT3	-1.0	25.0	1.0	3.3
P/S	-5.0	20.0	5.0	3.3
AMP1	12.0	32.0	5.0	3.4
T-PAD	-6.0	26.0	6.0	3.4
AMP2	18.0	44.0	3.5	3.4
ATT	-6.0	38.0	6.0	3.4
VGA	18.0	56.0	-18.0	3.4
SPDT4	-1.0	55.0	1.0	3.4
ATT	0.0	55.0	0.0	3.4
SPDT2	-1.0	54.0	1.0	3.4
SPDT1	-1.0	53.0	1.0	3.4
4-WAY P/D	-8.0	45.0	8.0	3.4
ATT	-5.0	40.0	5.0	3.4
RX OUT		40.0		3.4

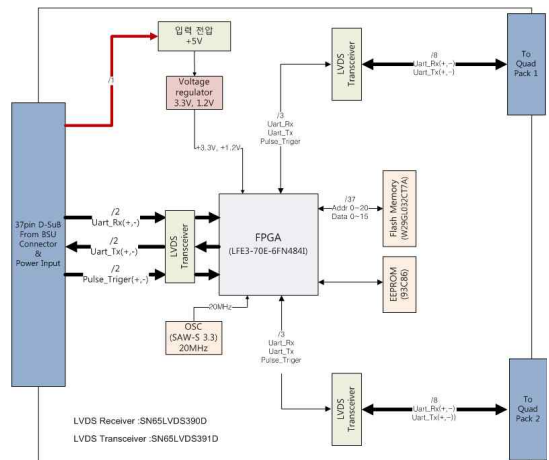


그림 18. 송수신 제어모듈 구성도
Fig. 18. block diagram of T/R unit control module.

향 데이터와 연동 신호를 입력 받아 2개의 쿼드팩을 제어 하도록 구성되어 있다. 그림 18은 송수신 제어모듈의 구성도를 나타낸다.

IV. 제작 및 측정

1. 원통형 능동 위상배열 안테나 제작

표 7은 실제 제작한 24×8 원통형 능동 위상배열 안테나의 설계값을 나타낸다.

표 7. 원통형 능동 위상배열 안테나의 주요 설계값
Table 7. Design parameters for cylindrical active phase array antenna.

구 분	치 수 (@f _c)
배열 간격	수평 : 15°, 수직 : 0.54λ
배열개수	8×8 (수평×수직)
송수신 장치 출력	10Watt (Peak)
최소 위상 변위량	5.625° (6Bit)
안테나 직경	5.28λ
안테나 높이	4.3λ

2. 원통형 능동 위상배열 안테나 측정

2. 1. 반사손실 및 상호결합 특성 측정

측정 주파수 대역은 1.3GHz~1.4GHz으로 하였다. 반사손실 측정 계측기는 Agilent사의 회로망 분석기(Network Analyzer, Model : PNA N5230)를 사용하였으며, 외부의 전파를 차단시킨 공간(Shield Room)에서 측정하였다. 그림 19는 설계, 제작된 복사소자의 반사손실 측정구성도를 나타낸다. 그림 21은 반사손실 측정결과를 보여주고 있으며, 사용 주파수 대역에서 반사손실 특성이 -15dB 이하를 만족하는 결과를 확인 하였다. 그

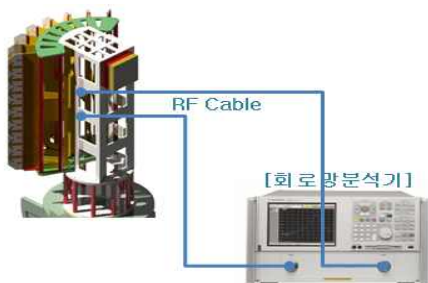


그림 19. 반사손실 및 상호결합특성 측정 구성도
Fig. 19. RL & Mutual Coupling Measurement Setup.

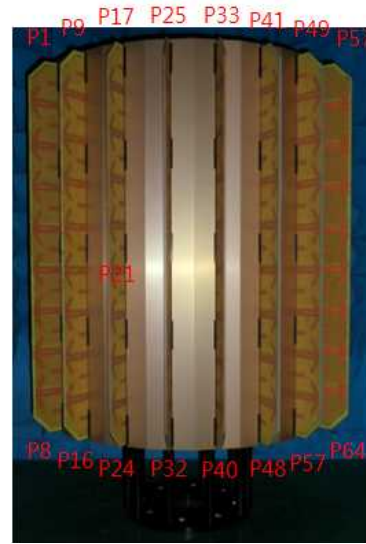


그림 20. 반사손실 및 상호결합특성 측정
Fig. 20. RL & Mutual Coupling Measurement.

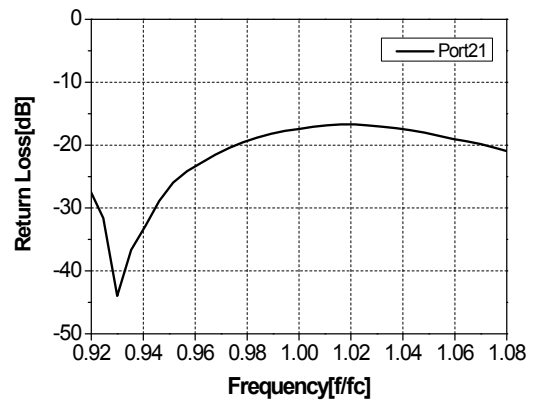


그림 21. 반사손실 측정결과
Fig. 21. Return loss measurement result.

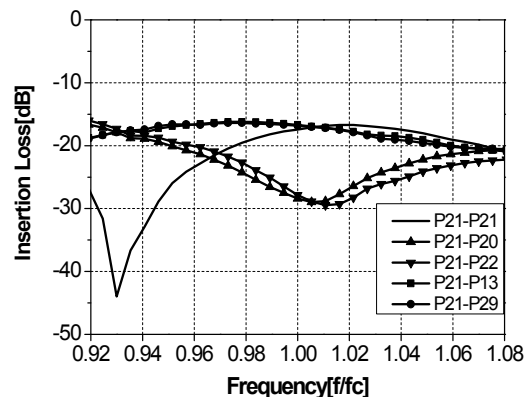


그림 22. 상호결합 특성 측정결과
Fig. 22. Mutual coupling measurement result.

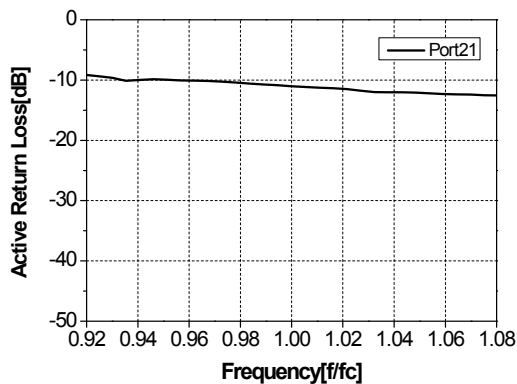


그림 23. 능동반사손실 측정결과
Fig. 23. Active return loss measurement result.

림 22는 상호결합 특성 측정 결과를 보여주고 있으며, 복사소자간 상호결합 특성도가 -15dB 이하를 만족하였다. 복사소자간 상호결합특성을 고려하여 능동반사손실을 계산한 결과 그림 23과 같은 결과를 얻었다. 복사소자 설계값과 비교하여 양호한 결과를 획득하였으며, 원통배열안테나의 복사소자로서 사용이 적합하다고 판단된다.

2. 2. 복사패턴 측정 및 고찰

그림 24는 원통형 능동 위상배열 안테나의 복사패턴을 측정하기 위한 원통형 근접전계 측정환경을 나타낸다. 근접전계 측정 시 프루브는 표준 대수주기 다이폴 안테나(SLPDA : Standard Log-Periodic Dipole Antenna)를 사용하며, 수직면 방향으로 스캔(scan)한다. 안테나와 프루브 사이거리는 근접전계영역을 고려하여 L-Band 주파수 대역의 중심주파수인 $1.xx\text{GHz}$ 를 기준으로 3λ 로 이격한다. 근접전계 스캔범위는 수직면 방향

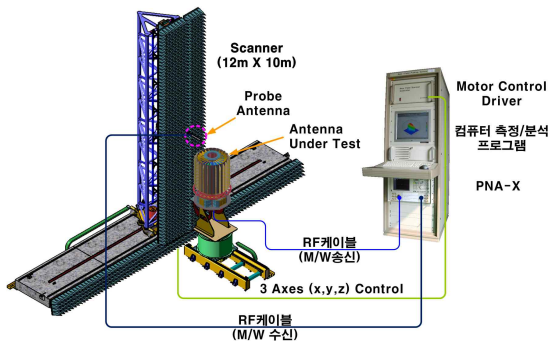


그림 24. 복사패턴 측정구성도
Fig. 24. Radiation pattern measurement setup.

의 경우 배열 안테나의 높이를 고려하여 배열 안테나의 중심을 기준으로 $\pm 150\text{cm}$ 로 하며, 수평면 방향의 경우 원통형 능동 위상배열 안테나의 중심을 기준으로 360° 로 전방위 측정한다. 스캔간격은 해상도를 고려하여 수직면 10cm , 수평면 4° 로 고정한다.

그림 26은 주파수 1.35GHz 에서 측정된 근접전계 (near field)를 푸리에 변환(Fourier Transformation)을 한 원전계(far field) 수평면 복사패턴을 나타낸다. 수평면 반전력 빔폭은 12° 로 나타남을 확인할 수 있다. 사이드로브 레벨의 경우 계산결과와 유사하게 최대 -13dB 로 설계목표에는 거의 근접하게 볼 수 있다. 계산결과와의 차이는 제작 및 조립시에 발생하는 제작, 조립공차에 기인한다고 판단된다.

그림 27은 $1.xx\text{GHz}$ 에서 측정된 수직면 복사패턴을 나타낸다. 그림 28은 원전계 3D 복사패턴을 나타낸다.

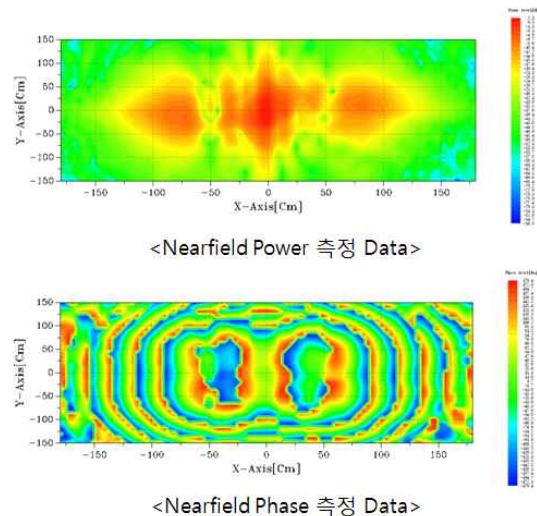


그림 25. 근접전계 측정데이터
Fig. 25. Measured near field data.

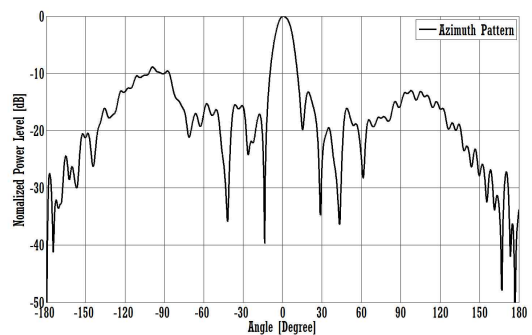


그림 26. 수평복사패턴
Fig. 26. Measured horizontal radiation pattern.

표 8은 소자간 위상차에 따른 수평면 반전력 빔폭 계산치와 측정치를 각각 나타낸다. 그림 26, 27에서 L-Band 주파수 대역에 대한 수평면 반전력 빔폭은 수평 12.5°, 수직 11.1° 이고, 계산치는 수평 12°수직 11°로 측정치가 계산치에 비해 약 0.1° ~ 0.5° 넓게 나타남을 알 수 있으며, 사이드로브 레벨의 경우 수평면에서 최대 -9dB로 설계목표와 다소 차이를 보였다. 이는 제작

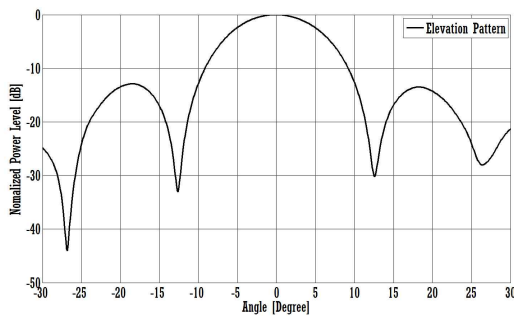


그림 27. 수직복사패턴
Fig. 27. Measured elevation radiation pattern.

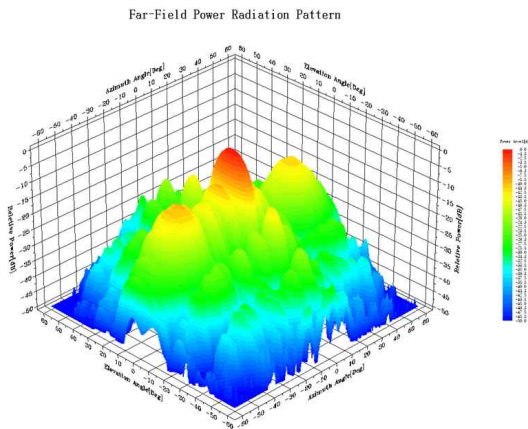


그림 28. 3D 복사패턴
Fig. 28. Measured 3D contour radiation pattern.

표 8. 원통형 능동 위상배열 안테나 측정결과
Table 8 Measurement result of the cylindrical active phased array antenna.

구분	설계	측정결과	
주파수	1.xGHz~1.xGHz	1.xGHz~1.xGHz	
능동 정재파비	2.0 : 1 이하	2.0 : 1 이하	
이득	20 dBi 이상	20.2 dBi	
반전력 빔폭	수직	11° 이상	11.1°
	수평	12° 이상	12.5°
사이드로브 레벨	-13 dB 이하	-9.3 dB 이하	

및 원통배열 안테나의 측후방 방사특성에 기인한 것으로 판단된다.

V. 결론

현재 평면배열형 위상배열안테나는 많은 연구를 통하여 개발되어왔다. 하지만 단순한 평면배열 구조가 아닌 곡면 또는 다른 형상을 요구하는 컨포멀 형태의 안테나를 필요로 하는 곳이 증가 하고 있다. 항공기 또는 차량의 형상면에 위치하는 안테나, 곡선을 사용하는 형상에 적용하기 위한 안테나 등 형상에 맞추어 안테나를 개발하여야 한다.

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 평판 다이폴 구조의 상호결합 특성을 개선한 접힌 다이폴 구조를 적용하여 L-Band 원통형 능동 위상배열안테나를 설계, 제작, 측정하였다. 상호결합 특성 및 능동 정재파비 특성이 우수한 접힌 다이폴을 적용하여, 제작/측정결과 복사소자간 상호결합 -15dB 이하, 능동 정재파비 2.0:1 이하의 특성을 얻었다.

접힌 다이폴을 적용한 원통배열 구조의 복사특성의 경우 8×8형태로 구성된 복사면의 복사특성은 수평빔폭 12°이상, 수직 빔폭 11°이상의 결과를 얻었으며, 사이드로브 레벨은 수평 -9.3dB, 수직 -12.7dB의 측정 결과를 얻었다. 안테나의 이득은 20.2 dBi로 측정되어, 안테나 복사특성이 설계값과 유사하게 측정되었다.

그러나 위상변위를 이용한 원통배열 빔조향 특성에 관한 연구결과는 위상변위 시 각각의 복사소자와 능동 소자의 특성 변화에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

- [1] R. C. Johnson, H. Jasik, Antenna Engineering Handbook, McGraw-Hill, ch. 20, 1961.
- [2] R. J. Mailloux, Phased Array Antenna Handbook, Artech House, 1994.
- [3] R. C. HANSEN, Phased array antennas, John wiley & Sons, Inc., 1998.
- [4] Orest G. Vendik, Yuri V. Yegorov "The first phased-array antennas in Russia: 1955-1960," IEEE Antennas Propagat. Mag., Vol. 42, pp. 46-52, August 2000.
- [5] Harrington R. F., "Sidelobe reduction by nonuniform element spacing," IRE Trans.

Antennas Propag. pp. 187-192, March 1961.

- [6] Hodjat F. and Hovanessian S. A. "Nonuniformly spaced linear and planar array antennas for sidelobe reduction," IEEE Trans. Antennas Propag. AP-26(2), pp. 198-204, March 1978.
- [7] Fletcher P. N. and Dean M., "Application of retrodirective beams to achieve low sidelobe levels in small phased arrays," Electron. Lett. 32(6), pp. 506-508, March 1996.
- [8] Ivor L. Morrow, Peter S. Hall, Jim R. James "Measurement and modeling of a microwave active-patch phased array for wide-angle scanning," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 45, pp. 297-304, February 1997.
- [9] Keizer W. P. M. N. "New active phased array configurations," Conf. Proc. Mil. Microwaves 1990, pp. 564, 1990.
- [10] Hemmi C. "Bandwidth of the array factor for phased-steered arrays," in 'Hal Schrank's Antenna Designer's Notebook' IEEE Antennas & Propagat. Mag. AP-35(1), pp. 72, 1993.
- [11] Min Joon Lee, Ickho Song, Seokho Yoon, So Ryoung Park "Evaluation of directivity for planar antenna arrays," IEEE Antennas & Propagat. Mag., Vol. 42, pp. 64-67, June 2000.
- [12] N. C. Athanasopoulos, N. K. Uzunoglu, J. D. Kanellopoulos, "Development of A 10GHz Phased Array Cylindrical Antenna System Incorporating If Phase Processing", PIER59, 17-38, 2006.
- [13] Tomohiro SEKI, Toshikazu HORI, "Cylindrical Multi-Sector Antenna With Self-Selecting Switching Circuit", Proceeding Of ISAP2000, 2000.
- [14] D.Mastela, L.Rein^o, T.Zander, L. Wiebking, M. Kawalkiewicz, "Multipath Mitigation Through Cylindrical Microstrip Phased Array Antenna", University of Freiburg, Department of Microsystems Engineering 2006.
- [15] 遠藤敬二, "TV・FM 放送 アンテナ", 日本放送出版協會, 1966.
- [16] Z.Xu, H.Li, Q.Z.Liu, "Pattern Synthesis of Conformal Antenna Array by The Hybrid Genetic Algorithm", PIER79, 75-90, 2008.

저 자 소 개



이 만 규(정회원)

1991년 2월 영남대학교
전자공학과 (공학사)

1991년 3월~1994년 10월 포스코
ICT 연구원

1994년 11월~2000년 1월 삼성전
자(주) 전문연구원

2000년 2월~현재 삼성탈레스(주) ISR·PGM 연
구소 수석연구원

2013년 3월 아주대학교 전자공학과 (공학석사)

<주관심분야 : 위상배열 레이더시스템, 안테나
및 송수신기 설계>



권 익 진(정회원)

1998년 2월 KAIST 전기 및 전자
공학과 (공학사)

2000년 2월 KAIST 전기 및 전자
공학과 (공학석사)

2004년 8월 KAIST 전기 및 전자
공학과 (공학박사)

2004년 8월~2008년 2월 삼성종합기술원 전문연
구원

2006년 7월~2006년 10월 미국 UCLA, 방문연구
원

2008년 2월~현재 아주대학교 전자공학부 부교수
<주관심분야 : RF/Analog 회로 설계>