

화포탐지 레이다용 C-대역 평면형 능동위상배열 안테나 개발

Development of Planar Active Phased Array Antenna for Detecting and Tracking Radar

김기호 · 김현 · 김동윤 · 진형석

Ki-Ho Kim · Hyun Kim · Dong-Yoon Kim · Hyung-Suk Jin

요 약

본 논문에서는 화포탐지 레이다에 사용되기 위해서 개발된 C-대역 평면형 능동위상배열 안테나의 설계 및 제작 그리고 측정 결과를 소개한다. 안테나는 3,000여 개의 반도체 송수신 채널과 복사소자를 삼각배열로 배치하고, DBF(digital beam forming)를 사용하여 수신빔을 형성하기 위한 14개 부배열(12개 주 채널, 2개 SLB 채널)을 구성하여 개발하였다. 개발된 평면형 능동위상 배열 안테나의 성능을 확인하기 위해 근접 전계 시험 시설을 이용하였으며, 송신 패턴 측정을 통해 송신 안테나이득, 부엽 레벨, 수신 패턴 측정을 통해 수신 안테나이득, 부엽레벨, 디지털빔 형성, 빔조향 범위, G/N 을 확인하였다. 송신 수신 패턴 측정 결과, 개발 목표성능을 만족함을 확인하였다.

Abstract

This paper describes the development and measurement results of C-band planar active phase array antenna for detecting and tracking radar(weapon-locating radar). The antenna is designed with 14 sub-arrays(12 main channels and 2 sidelobe blanking channels and approximately 3,000 elements of transmit - receive channel) to generate transmit and digital receive patterns. Using a near-field measurements facility, G/N, transmit patterns, and received patterns are measured. Receive patterns are implemented with digital beamforming by signal processing. The measurement results demonstrate that antenna design specifications were fulfilled.

Key words: Planar Active Phased Array Antenna, Near-Field Measurement, Digital Beam Forming

I. 서 론

최근 레이다는 탐지 공간상을 빠른 속도로 빔 조향하여 탐지, 추적, 유도가 가능한 다기능 레이다(multi-function radar: MFR)로 개발되고 있으며, 레이다의 센서인 안테나는 수동형 안테나에서 능동위상배열안테나로 발전되고 있다^[1]. 능동위상배열안테나 또한 수신 시 아날로그 회로를 통해 빔을 합성하는 방식에서 부배열에서 디지털로

빔을 합성하는 방식으로, 배열을 구성하는 방식은 선배열에서 면배열 형태로 발전하고 있다^[2]. 본 논문에서는 탐지 공간상을 빠르게 이동하는 포탄을 탐지하고 추적하기 위해 개발된 화포탐지 레이다용 C대역 평면형 능동위상 배열 안테나의 설계 과정 및 시뮬레이션을 통한 성능 예측 결과를 소개한다. 또한 개발된 안테나의 성능검증을 위해 근접 전계시설을 사용한 시험 구성을 살펴보고, 송수신 패턴 측정을 통해 개발 요구 성능을 만족함을 확인한다.

LIG넥스원(주) 감시정찰연구소(Radar R&D Laboratory, LIG NEX1)

· Manuscript received September 10, 2018 ; Revised October 31, 2018 ; Accepted December 12, 2018. (ID No. 20180910-096)

· Corresponding Author: Ki-Ho Kim (e-mail: kihokim@lignex1.com)

II. 안테나 시스템 설계 및 결과

개발된 안테나는 작은 RCS(0.01~0.001 m²)를 갖는 표적인 포탄을 탐지/추적하기 위해 2,912개의 반도체 송수신 채널과 복사소자를 배열하여 구성된다. 위상배열안테나는 각 배열 복사소자의 위상을 조절하여 원하는 방향으로 수신 크기가 최대가 되도록 설계하는데, 이는 배열간의 거리(d), 파장(λ)에 따라 달라진다. 또한 원하는 방향 이외에 위상이 2π 의 배수가 되는 방향에서 각 배열의 수신 신호의 합이 최대가 되는데, 이를 그레이팅 로브라고 한다. 빔 조향의 범위가 넓은 능동위상배열안테나의 경우는 공간을 효율적으로 사용하면서 그레이팅 로브를 최소화 하기 위해 복사소자의 배열은 삼각배열을 사용한다^[3]. 그림 1과 같은 삼각배열 구조에서 그레이팅 로브가 발생하는 관계식은 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 dx , dy 는 복사소자 배열 간격이며, θ_0 , ϕ_0 는 방위각과 고각의 조향각이다.

$$u_m = u_0 + m \frac{\lambda}{2dx}, v_n = v_0 + n \frac{\lambda}{2dy}$$

$$m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$u_0 = \sin\theta_0 \cos\phi_0, v_0 = \sin\theta_0 \sin\phi_0 \quad (1)$$

설계된 안테나는 C대역 운용주파수 $F_0 \pm 250$ MHz, 최대 빔조향 방위각 $90^\circ(-45 \sim 45)$, 고각 $40^\circ(-10 \sim 30)$ 범위 내에서 그레이팅 로브가 발생하지 않도록 배열의 간격을 도출하였으며, 삼각배열구조 시뮬레이션을 통해서 예측된 최적 배열 간격은 중심주파수 F_0 기준 dx 는 0.47λ , dy 는 0.3λ 이다. 그림 2는 설계된 배열 간격을 적용하여 예측한

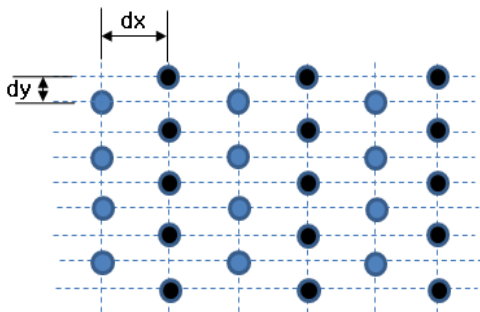


그림 1. 삼각 배열 구조
Fig. 1. Triangular array.

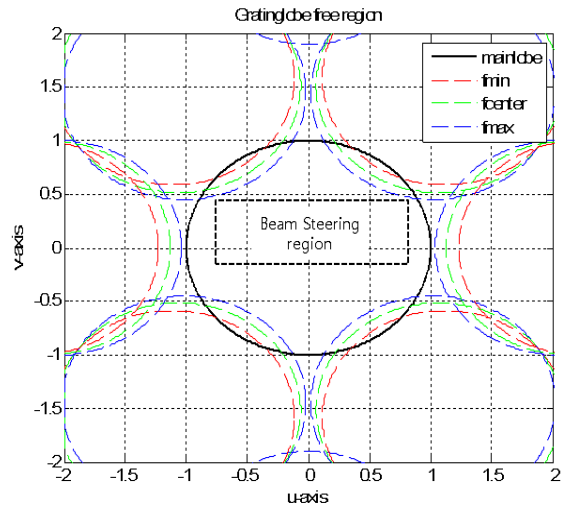


그림 2. 그레이팅 로브 발생영역(삼각배열, $dx=0.47\lambda$, $dy=0.3\lambda$)
Fig. 2. Grating lobe region(triangular array, $dx=0.47\lambda$, $dy=0.3\lambda$).

그레이팅 로브 발생영역으로 빔 조향각 내에서 그레이팅 로브가 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 예측된 배열 간격을 적용하여 패턴이 최적화되도록 안테나의 형상을 설계 하였다. 송신출력을 만족하는 개수의 반도체 송수신채널을 사용해서 그림 3과 같이 2가지 형상(형상 1 tapered 구조 반도체 송수신채널 2,896개, 형상 2 직사각형 구조 반도체 송수신채널 2,944개)을 검토하였다. 균일분포를 적용하여 성능 예측 결과, 안테나 설계 목표인 송신 이득 38 dB 이상, 부엽레벨 -20 dB 이상을 만족하며, 상대적으로 적은 반도체 송수신채널을 사용하고 공간 활용 측면에서 장점을 갖는 1번 형상을 선택하였다. 그림 4는 2가지 형상에 대한 송신 패턴(방위각)의 예측 결과로 1, 2번 형상 모두 송신이득은 설계 목표를 만족하나 부엽레벨이 목표를 만족하는 형상은 1번임을 확인할 수 있다. 그림 5는 형상 1을 적용하여 방위각/고각에 대한 송신 패턴의 예측 결과로 이득은 38.5 dB, 부엽레벨 -22 dB 이상, 방위각/고각 빔폭 $2.38^\circ/1.26^\circ$ 로 확인하여 안테나 설계 목표를 만족함을 확인하였다.

선택된 안테나 형상을 적용하여 DBF를 사용한 수신 디지털 빔 형성을 위한 부배열 구조를 설계하였다. 설계된 안테나는 각 부배열의 위상중심(phase center)이 array 구

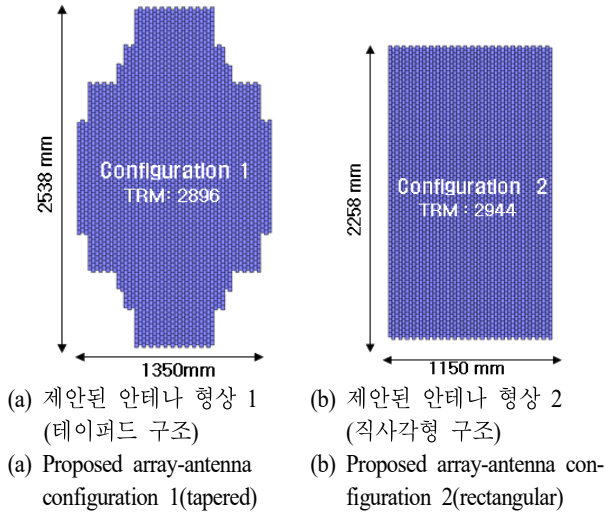
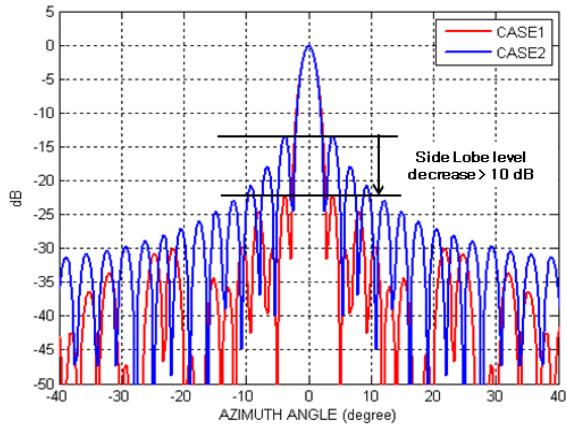


그림 3. 제안된 안테나 형상
Fig. 3. Proposed array-antenna configuration.



조상에서 주기적 분포를 갖지 않아 저부엽의 수신 패턴을 형성할 수 있는 *irregular* 부배열을 적용하였다^[4]. 2,912 개의 반도체 송수신채널은 송수신 신호 연결을 위해 분배기로 구성된 18개 행의 급전모듈과 연결된다. *Irregular* 로 부배열을 구성하기 위해서 급전모듈의 분배기를 부배열의 형상에 맞춰 분산형으로 설계하고 적용하여 그림 6과 같이 12개의 수신 부배열과 2개의 SLB 배열(반도체 송수신채널 16개)을 구성하였다. 그림 6은 설계된 부배열을

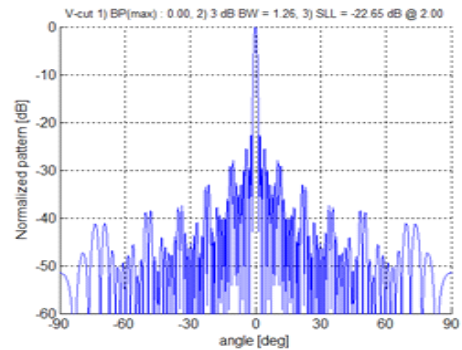
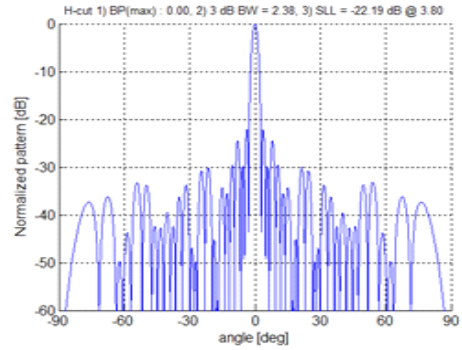
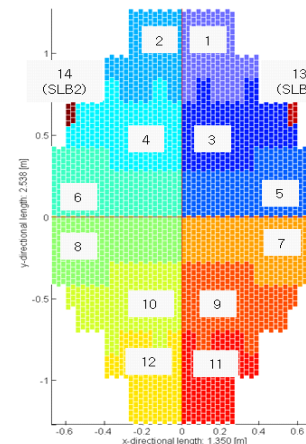
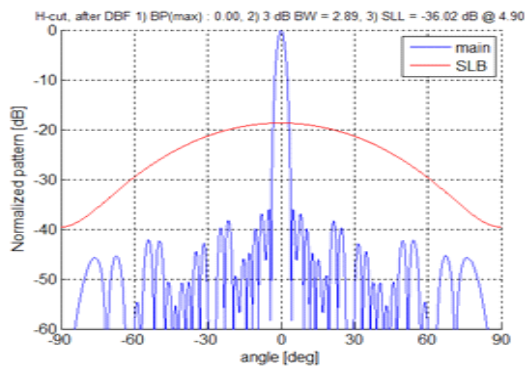


그림 5. 안테나 형상 1을 적용한 송신 패턴 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation result of transmit pattern applied with antenna configuration 1(tapered).

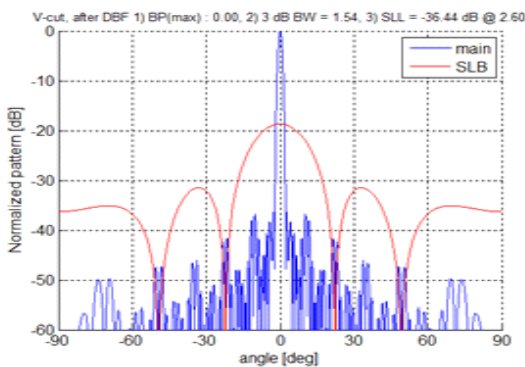


나타내었으며, irregular로 12개의 부배열과 안테나 상면 좌우측 2개의 SLB 배열을 확인할 수 있다. 35 dB 테일러 분포를 적용하여 설계된 안테나의 수신 패턴을 예측한 결과, 중심주파수, 빔조향 안테나 정면 조건에서 수신이득 37.4 dB, 부엽레벨 -36 dB 이하, 방위각/고각 빔폭 2.89°/1.54°의 수신 패턴이 형성됨을 확인하였다. SLB 패턴은 설계 목표인 조향된 주빔에서 방위각 -60~60°, 고각 -20~20° 범위를 만족함을 확인하였다. 그림 7은 설계된 부배열을 적용하여 예측한 고각 방위각 수신 및 SLB 패턴이며 설계 목표를 만족함을 확인할 수 있다.

화포탐지 레이더용 평면형 능동위상배열 안테나 설계 결과, 그레이팅 로브가 발생하지 않는 복사소자의 최적 배열 간격($d_x=2.5$ cm, $d_y=1.75$ cm)을 설정하였으며, 설정된



(a) 수신 패턴 시뮬레이션 결과(방위각)
(a) Simulation result of receive pattern(azimuth)



(b) 수신 패턴 시뮬레이션 결과(고각)
(b) Simulation result of receive pattern(elevation)

그림 7. 안테나 수신 패턴 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation result of receive pattern.

표 1. 안테나 설계 및 시뮬레이션 결과
Table 1. Design and simulation results of antenna.

		Design results		
Frequency		$F_0 \pm 250$ MHz		
Array distance		$d_x=0.47 \lambda$, $d_y=0.3 \lambda$ (@ F_0)		
Size		2,538×1,350 mm		
TRM		2,912 EA		
Sub-array		Main sub-array 12 EA/ SLB 2 EA		
Simulation results		Specification	Simulation	Uniform
	Tx gain	>38 dB	38.5 dB	
	Tx side lobe	<-20 dB	-22 dB	
	Tx beamwidth	Az 2.4° EL 1.3°	Az 2.38° El 1.26°	
	Rx gain	>37 dB	37.4 dB	Taylor (35 dB)
	Rx side lobe	<-30 dB	-36 dB	
	Rx beamwidth	Az 3.0° El 1.6°	Az 2.89° El 1.54°	

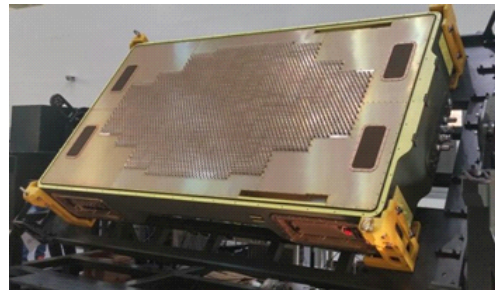


그림 8. 제작된 평면형 능동위상배열 안테나 형상
Fig. 8. Manufactured planar active phased array antenna.

배열 간격으로 송신/수신 최적 패턴을 형성하기 위한 안테나 형상 및 부배열(주 부배열 12개, SLB 2개)을 설계하였다. 성능 예측 결과를 표 1에 요약하여 나타내었으며, 설계 목표를 모두 만족함을 확인할 수 있었다. 제작된 평면형 능동위상배열안테나는 주파수 및 파형생성기, 디지털 수신기, 안테나 통제 및 빔 형성 제어기를 내장하고 있으며, 형상은 그림 8과 같다.

III. 근접전계 시험 구성

본 논문에서는 설계, 제작된 평면형 능동위상배열 안

테나의 빔 조향범위를 고려하여 가로 4 m, 세로 5 m 스캔이 가능한 근접전계 시험장에 설치하여 송신 수신 성능 시험을 수행하였다. 제작된 안테나의 측정에 사용된 송신과 수신 근접전계 시험 구성에 대해 알아본다.

3-1 송신 근접전계 시험 구성

안테나는 고출력의 펄스 RF 신호를 송신함으로 가장 큰 고출력이 방사되는 전면 중앙부에 고출력 흡수체인 HFX-36-HC를 설치한 근접전계 시험시설을 이용해 측정하였다. 안테나는 시험 시설 내 스캔 프로브가 움직이는 근접전계 스캔면과 평행하게 설치하였다. 근접전계 시험 시설을 이용하여 송신 패턴 측정을 위해 안테나 내부의 파형 발생기와 주파수 생성기를 사용하지 않고, PNA-X를 사용하여 안테나를 구동한다. PNA-X의 최대 출력레벨은 15 dBm으로 안테나와의 연결 케이블 길이에 따른 감쇄로 인해 안테나의 구동 조건인 17 dBm을 만족할 수 없어 안테나 구동 증폭기를 설치하였다. 또한 PNA-X를 손상시키지 않는 범위의 입력 조건 만족을 위해 측정 프로브와 PNA-X 사이에 고출력 감쇄기를 추가하여 PNA-X 입력 크기를 조절하였다. 근접전계 시험장 제어기는 GPIB를 사용하여 PNA-X를 제어하고, 측정 데이터를 저장한다. 스캐너 컨트롤러와 LAN을 연결하여 근접전계 시험장의 측정 기준 타이밍 신호인 트리거 신호를 생성하며, 측정 프로브의 위치를 제어한다. 안테나시스템 제어기는 근접전계 시험 설비의 스캐너 컨트롤러에서 트리거 신호를 입력받아 주파수 정보, 빔조향 정보 등을 생성하여 안테나를 제어/운용한다. 근접전계 시험을 위한 연속운용 중 안테나의 방열을 위해 안테나 환경제어기를 설치하였다. 환경제어기는 안테나로 냉각수를 공급하여 연속 운용 간 일정 온도를 유지하여 안정적 동작이 가능하도록 한다. 그림 9에서 송신 패턴측정을 위한 시험 구성을 나타내었다.

3-2 수신 근접전계 시험 구성

안테나의 수신 패턴 확인을 위해서 송신과 다르게 PNA-X를 사용하지 않고 시험 구성을 하였다. 복사소자를 통해서 입력되는 수신신호는 디지털 수신기를 통해 하향변환된 후 ADC와 DDC를 거쳐 디지털 I/Q 데이터로 변환된다. 디지털 처리된 수신 I/Q 근접전계 데이터는 외부 광

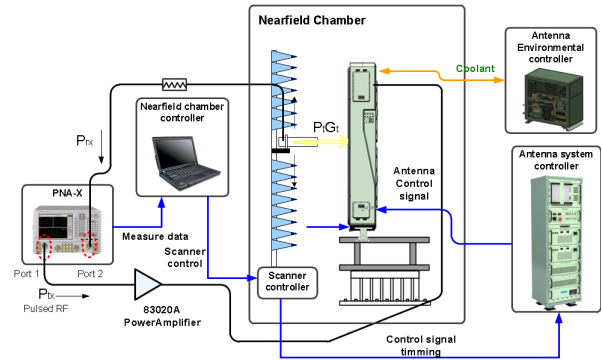


그림 9. 근접전계 시험장 구성(송신)

Fig. 9. Test-configuration for near field measurement(transmit).

저장장치를 통해서 저장된다. 광 저장된 I/Q 데이터는 스케일 계수(scale factor)를 사용하여 전력 크기에 해당하는 단위로 변환한다. 스캔 프로브로 입력되는 신호의 전력은 계측기를 통해서 측정하고, I/Q 데이터에 반영하여 근접전계 데이터는 프로브의 입력신호 대비 디지털신호의 출력 신호의 비가 되도록 한다. 여기서 스케일 계수는 디지털 수신기 ADC/DDC 보드에서 사전 측정하여 확인된 I/Q 신호 대비 입력신호의 전력의 크기 차이를 보정하는 계수이다. 주파수 하향변환 및 ADC/DDC에 사용되는 LO 신호, DDC 동기 신호의 주파수 및 위상이 다르다면 시간에 따라 저장되고 변환된 디지털 데이터가 변하는 오류가 발생한다. 따라서 송신 구성과는 다르게 외부 장비를 사용하지 않고 근접전계 시험시설 프로브를 통해 출력되는 수신 신호를 안테나 내부의 주파수발생기에서 생성되는 신호를 사용한다. 또한 송신 시험 구성과 동일하게 스캐너 컨트롤러에서 생성한 트리거 신호를 기준으로 안테나 시스템 제어기는 주파수, 파형, 빔조향, 빔형성과 같은 제어신호를 생성해 안테나 시스템을 제어한다. 그림 10에서 수신 빔 패턴 측정을 위한 시험 구성을 나타내었다.

3-3 근접전계 시험 타이밍

안테나 송수신 패턴 측정을 위한 근접전계 시험은 스캔 프로브의 이동과 안테나 동작은 동일한 타이밍에 따라 연동되어야 한다. 측정을 위한 스캔 범위는 안테나의 빔 조향각을 고려하여 400×500 cm로 설정하였으며, 스캔 샘플은 안테나 동작 최대 주파수의 반과장보다 작은 2.5

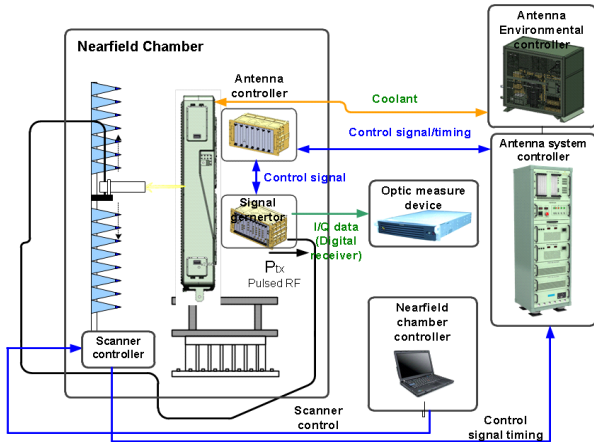


그림 10. 근접전계 시험장 구성(수신)
Fig. 10. Test configuration for near field measurement(receive).

cm로 설정하였다. 측정을 위한 스캔 프로브의 이동 속도를 10 cm/s로 설정하여 스캐너 컨트롤러에서 생성되는 TRIG-A 신호 간격을 250 ms로 결정하였다. TRIG-A 신호는 측정 스캔면의 샘플링된 특정 위치에 스캔 프로브가 도달하면 스캐너 컨트롤러에서 생성되는 근접전계 시험장의 측정 기준신호이다. 근접전계 시험은 그림 11과 같이 Trig-A를 기준으로 생성되는 타이밍에 따라 수행된다. 안테나시스템 제어기는 스캐너 컨트롤러로부터 TRIG-A 신호를 입력받아 안테나 운용데이터(주파수, 파형, 빔 조향, 빔 형성

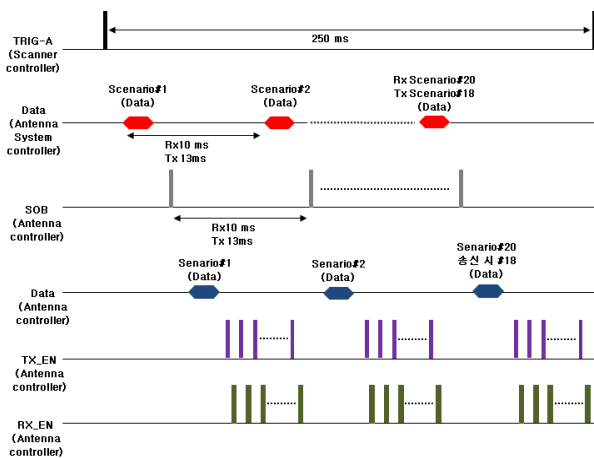


그림 11. 근접전계 시험 타이밍도
Fig. 11. Timing diagram for near field measurement.

정보)를 안테나 제어기로 운용 dwell인 10 ms 주기로 전달한다. 안테나제어기는 데이터를 입력받아 안테나 동작 기준신호인 SOB 신호와 안테나 내부 구성품 동작을 위한 주파수 생성, 파형생성, 빔 조향 설정, 빔 형성 설정 데이터 및 TX_EN, RX_EN 타이밍을 생성한다. 안테나 운용을 위한 dwell은 10 ms로 타이밍 상 TRIG-A 신호 구간 동안 최대 25개의 운용 시나리오를 변경하여 측정이 가능하나 수신의 경우 측정의 안정성을 위해 20개의 시나리오를 사용하였다. 송신의 경우 패턴측정을 위한 신호 발생 및 송신 신호 측정을 위해서 PNA-X를 사용한다.

송신 측정 시 PNA-X에서 측정 및 데이터 저장에 필요한 최소 요구 시간이 13 ms로 안테나 시스템 제어기에서 생성되는 제어 데이터의 생성 타이밍을 10 ms에서 13 ms로 변경하여 18개의 시나리오를 사용하여 측정하였다.

IV. 안테나 근접전계 시험

4-1 안테나 송수신 정렬

안테나시스템은 2,912개의 반도체송수신채널과 복사소자로 구성되며, 송신 시 2,896개 채널, 수신 시 2,912개 채널이 동작하면서 송신과 수신 패턴을 형성한다. 채널들을 구성하는 능동/수동 소자들은 모두 동일한 특성을 갖지 않아 각각의 채널들은 송신/수신 특성의 차이가 존재한다. 따라서 송수신 패턴 측정 수행 전 각 채널의 크기, 위상 오차를 최소화할 필요가 있다. 본 논문에서는 반도체 송수신채널과 복사소자의 정렬을 위해 스캔 프로브를 각 채널의 복사소자 정면으로 위치시켜 PNA-X를 통해 송/수신 크기 위상 데이터를 확인하여 채널 간의 크기 위상 오차를 최소화할 수 있는 정렬 파라미터를 추출하였다. 각각의 채널에 정렬 파라미터를 적용하여 가변 위상기와 감쇄기를 조절해 채널 송수신 정렬을 수행하였다. 송신 정렬은 반도체 송수신채널이 포화영역에서 동작하므로 크기 정렬은 하지 않고 위상정렬만 수행하였고, 수신 정렬의 경우는 크기와 위상 정렬을 수행하였다. 송신 위상 정렬 수행 결과, 180° 이내에서 분포하던 채널 간 위상분포가 10° 이내로 정렬되었다. 수신의 경우, 채널 간 크기 편차가 5 dB 이내로 분포하였으나, 정렬 수행 후 1 dB 편차 이내로 정렬되었으며, 위상의 경우 180° 이내에서 분포하던 위상 분포

가 10° 이내로 정렬되었다.

송신과 수신 크기 위상 정렬 결과를 확인하기 위해서 시간이 오래 걸리는 근접전계 측정 대신 안테나 보정경로를 사용하여 정상 적용되었는지를 확인하였다. 그림 12에서는 정렬 파라미터를 사용한 송신 위상 정렬 전/후의 채널 간 위상분포를 비교하였다. 위상 정렬 전 반도체 송수신채널의 특성과 부배열 구성을 위한 급전모듈의 특성으로 인해 채널 간 180° 범위에서 위상이 분포함을 알 수 있으나, 정렬 파라미터를 적용하여 채널의 위상 변위기를 조절해 모든 채널의 위상 편차가 10° 이내로 정렬됨을 확인할 수 있다. 그림 13과 14에서는 정렬 파라미터를 사용한 수신 크기 위상 정렬의 전후를 비교하였다. 송신과 같이 정렬 전에는 안테나를 구성하는 구성품의 특성이 반영되어 채널 간의 크기 편차와 위상 편차가 발생됨을 확인할 수 있으나, 정렬 파라미터를 적용하여 정렬을 수행하면 크기 편차 1 dB, 위상 편차 10° 이내로 정렬됨을 확인할 수 있다.

4-2 송신 빔 패턴 측정

개발된 안테나는 고각/방위각 방향으로 송신 펜슬빔을 형성한다. 위상 정렬을 통해 얻은 송신 위상 정렬값과 유니폼 분포를 적용하여 근접전계 시험을 통해 송신 패턴을 측정하였다. 측정 결과, 중심주파수, 빔 조향 안테나 정면 조건에서 이득 38.5 dB, 부엽레벨 -22 dB 이하, 빔 폭 방위각 2.39° , 고각 1.28° 로 측정되었다. 시나리오를 변경하여 고각과 방위각 빔 조향 시 송신 패턴을 확인하였으며, 빔 조향 오차는 0.03° 였다. 측정을 통해 얻은 데이터를 사용해 안테나 개구면에서 전계와 위상을 계산하여 안테나

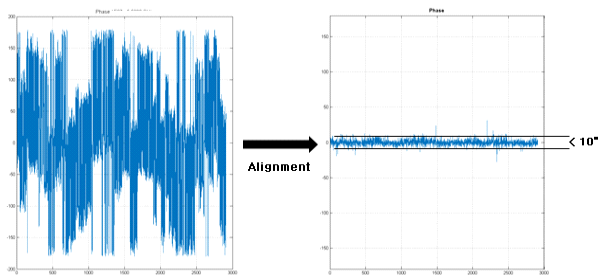


그림 12. 송신 위상 정렬 결과
Fig. 12. Result of transmit channel phase alignment.

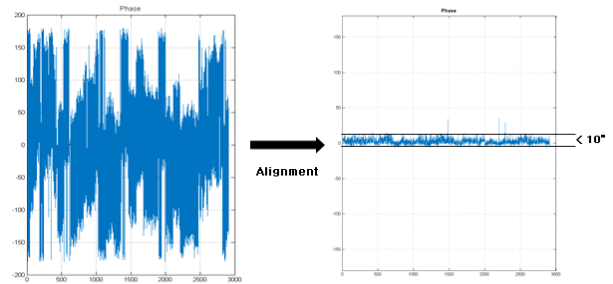


그림 13. 수신 위상 정렬 결과
Fig. 13. Result of receive channel phase alignment.

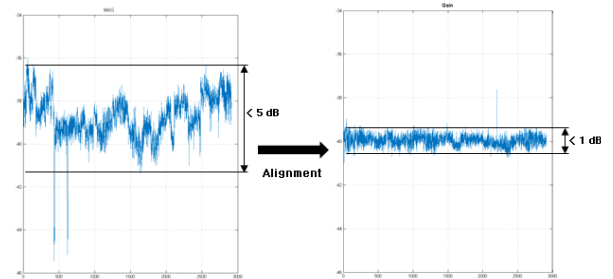


그림 14. 수신 크기 정렬 전/후 비교
Fig. 14. Result of receive channel magnitude alignment.

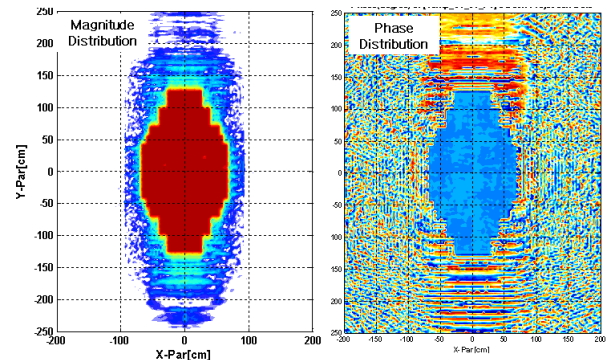
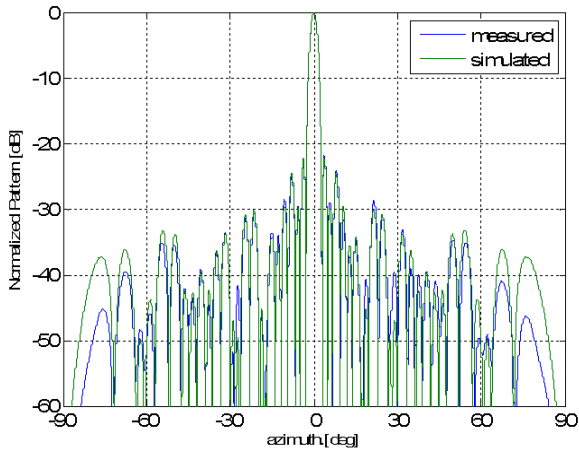
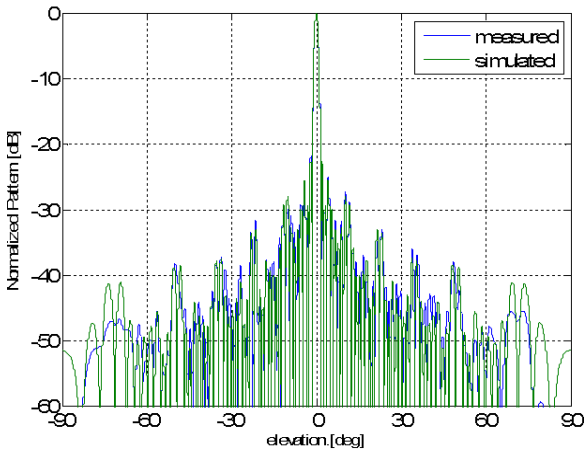


그림 15. 안테나 개구면 전계 분포(송신)
Fig. 15. E-field distribution on the antenna aperture(transmit).

정렬 상태를 검증할 수 있다. 그림 15는 백프로젝션 기법^[5]을 사용하여 확인한 안테나 개구면의 크기 위상 분포로 동일한 크기, 위상으로 정렬이 올바르게 적용됨을 확인하였다. 그림 16은 중심주파수, 안테나 정면 조건에서 측정된 고각/방위각 패턴으로 예측 결과와 비교하였으며, 서로



(a) 송신 패턴 측정 결과(방위각)
(a) Measurement result of transmit 1-D pattern(azimuth).



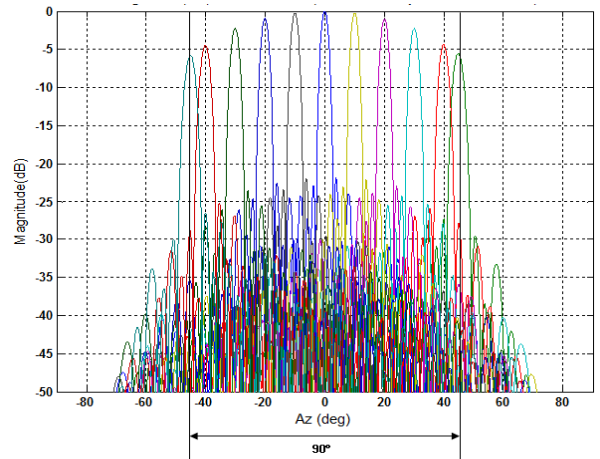
(b) 송신 패턴 측정 결과(고각)
(b) Measurement result of transmit 1-D pattern(elevation).

그림 16. 송신 패턴 측정 결과
Fig. 16. Measurement results of transmit 1-D pattern.

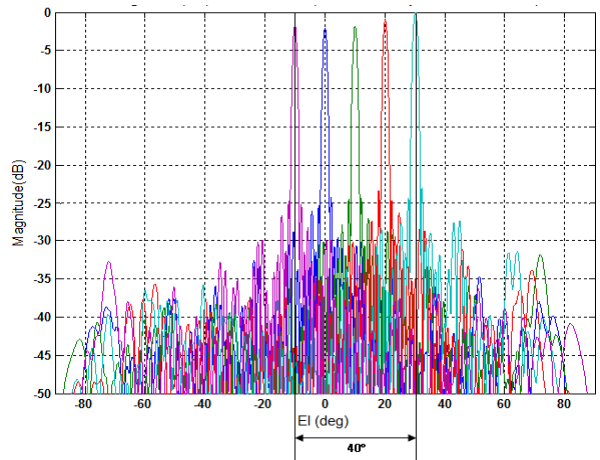
일치함을 확인하였다. 그림 17은 송신 빔 조향 결과로 고각 $-10^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 방위각 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 로 제어하여 정상적으로 송신 패턴이 조향됨을 확인하였다. 표 2에서는 송신 패턴 측정 결과를 설계 목표와 비교하였으며, 모든 측정 결과가 설계 목표를 만족함을 확인하였다.

4.3 수신 빔 패턴 측정

개발된 안테나는 수신 시 반도체 송수신채널에서 아날로그 빔 조향 후 DBF 계수를 적용하며, 디지털 멀티빔을



(a) 송신 패턴 조향 측정 결과(방위각)
(a) Measurement result of transmit 1-D agile pattern(azimuth)



(b) 송신 패턴 조향 측정 결과(고각)
(b) Measurement result of transmit 1-D agile pattern(elevation)

그림 17. 송신 패턴 조향 측정 결과
Fig. 17. Measurement results of transmit 1-D agile pattern.

표 2. 안테나 송신 패턴 측정 결과
Table 2. Measurement results of transmit pattern.

	Specification	Measurement	
Gain	38 dB	38.5 dB	
Beam width	Az 2.4° El 1.3°	Az 2.39° El 1.28°	
Beam steering	Az > 90° El > 40°	Az $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ El $-10^{\circ} \sim 30^{\circ}$	
Side lobe	< -20 dB	< -22 dB	

형성한다. 수신 신호 처리과정은 복사소자를 통해 입력된 신호가 반도체 송수신채널에서 저잡음 증폭된 후 급전모듈로 이뤄진 부배열 형성기를 통해서 디지털 수신기로 입력된다. 수신신호는 디지털 수신기를 통해 하향 변환된 후 ADC와 DDC 과정을 거쳐 디지털 I/Q 신호로 변환된다. 디지털 I/Q 신호를 합성하여 빔 패턴을 형성하며 이때 적용하는 DBF 계수에 따라 빔의 형태가 결정된다. 최종 합성되는 수신 빔은 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$S_{out} = \sum_{n=1}^N c_n S_n(\theta, \phi) \quad (2)$$

여기서 N 은 부배열의 개수이며 c_n 은 n 번째 부배열의 수신기 및 수신기와 안테나를 연결하는 경로 차이에 따른 차이를 보정한 DBF 계수, $S_n(\theta, \phi)$ 는 정렬 파라미터가 반영된 n 번째 부배열의 수신 신호이다. DBF 계수 c_n 은 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$c_n = \frac{\sum_{m=1}^M w_{n,m}}{F_n(0,0)} \quad (3)$$

여기서 M 은 n 번째 부배열의 채널 수이며 $w_{n,m}$ 은 n 부배열의 m 번째 채널의 가중치이다. $F_n(0,0)$ 은 n 번째 부배열 안테나정면(bore-sight) 방향의 원전계(far-field)값이다. 계산된 DBF 계수는 식 (4)와 같이 정규화되어야 한다.

$$\sum_{n=1}^N |c_n|^2 = 1 \quad (4)$$

능동위상배열 안테나는 일반적인 수동 안테나와는 다르게 안테나와 수신기를 분리하여 측정할 수 없으므로 수신 안테나의 이득과 시스템 잡음을 사용하여 안테나의 특성을 확인할 수 있다.^[6] 이러한 성능지표가 이득 대비 노이즈의 비를 나타내는 G/N 이다. G/N 은 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{G}{N} = E \left[\left| \frac{S_{out}}{n_{out}} \right|^2 \right] = \frac{G_t}{N_t} \quad (5)$$

여기서 S_{out} 은 안테나의 수신신호, n_{out} 은 안테나의 출력

잡음으로 근접전계에서 시험으로 측정 가능하다. 따라서 G/N 은 근접전계 시험 통해 측정된 수신 신호로 확인한 복사소자로부터 디지털 수신신호로 변환될 때까지의 이득과 잡음 신호의 비로 구할 수 있다.

수신 빔 패턴을 측정하기 위해서 테일러분포(35 dB)를 적용하였으며, DBF를 적용하여 고각/ 방위각 모노펄스 빔을 형성하였다. 수신 패턴 측정 결과, 중심 주파수, 빔 조향 안테나 정면 조건에서 안테나 수신 이득은 37.5 dB, 방위각 빔폭 2.91°, 고각 빔폭 1.55°, 부엽 레벨은 방위각 -36.7 dB, 고각 -35.4 dB로 측정되었다. 빔 조향은 방위각 -45°~45° 고각 -10°~30°로 이때 빔 조향 오차는 0.03°로 확인되었다. 근접전계 시험을 통해 확인된 안테나 노이즈는 -58 dBm이며 전체 수신 이득은 85 dB로 G/N 은 143 dBm⁻¹로 측정되었다.

그림 18은 백프로젝션 기법을 사용하여 확인한 안테나 개구면상의 전계분포를 나타내었다. 크기는 테일러 분포가 적용되었으며, 위상은 동위상으로 수신 정렬 파라미터 및 DBF 계수가 정상적으로 적용되었음을 확인할 수 있다. 그림 19는 중심주파수, 빔 조향 안테나 정면 조건에서 측정된 방위각 고각 빔 패턴이며, DBF를 사용하여 고각 방위각 차패턴이 시뮬레이션을 통한 예측과 같이 형성됨을 확인하였다. 그림 20은 고각 -10°~30°, 방위각 -45°~45°로 조향 시 수신 방위각, 고각 패턴을 측정된 결과로 안테나 제어에 따라 조향됨을 확인하였다. 표 3에서는 수신 패턴 측정 결과를 설계 목표와 비교하였으며, 모든 측정 결과가 설계 목표를 만족함을 확인할 수 있다.

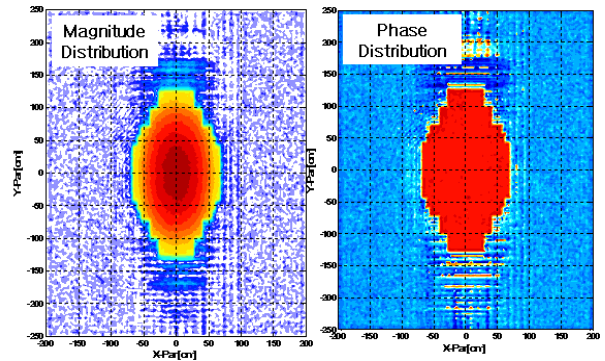
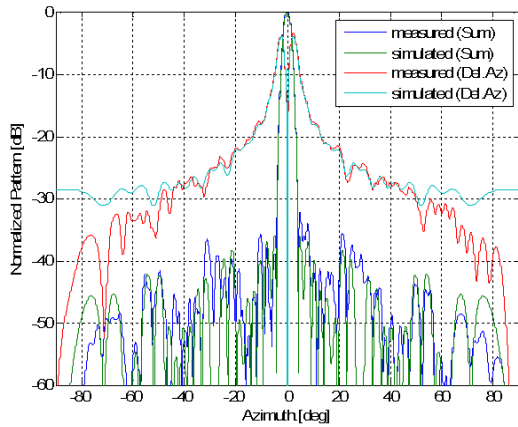
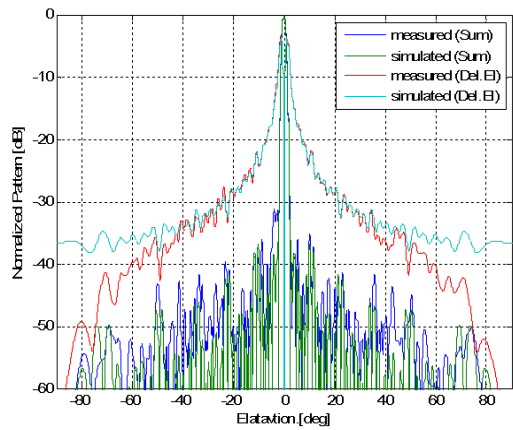


그림 18. 안테나 개구면 전계 분포(수신)
Fig. 18. E-field distribution on the antenna aperture(receive).



(a) 수신 패턴 측정 결과(방위각)
(a) Measurement result of receive 1-D pattern(azimuth)

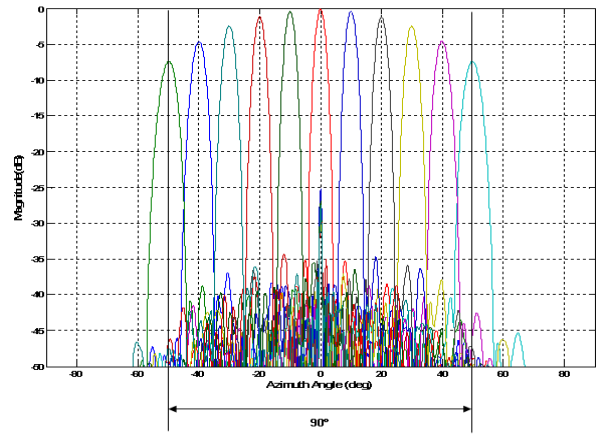


(b) 수신 패턴 측정 결과(고각)
(b) Measurement result of receive 1-D pattern(elevation)

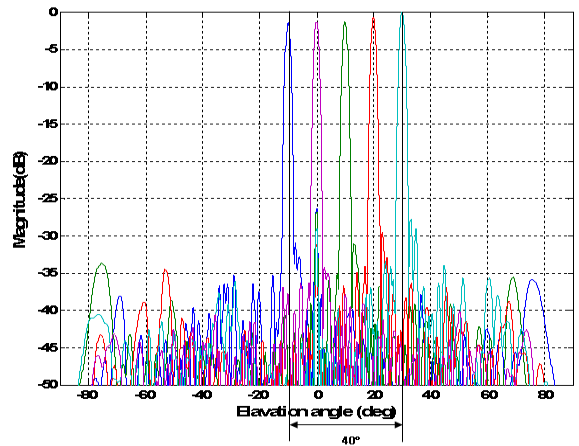
그림 19. 수신 패턴 측정 결과
Fig. 19. Measurement results of receive 1-D pattern.

표 3. 안테나 수신 패턴 측정 결과
Table 3. Measurement results of receive pattern.

	Specification	Measurement
Gain	37 dB	37.4 dB
Beamwidth	Az 3.0° El 1.6°	Az 2.91° El 1.55°
Beam steering	Az>90° El>40°	Az -45°~45° El -10°~30°
Side lobe	<-30 dB	Az<-36.7 dB El<-35.4 dB
G/N	143 dBm ⁻¹	143 dBm ⁻¹



(a) 수신 패턴 조향 측정 결과(방위각)
(a) Measurement result of receive, 1-D agile pattern(azimuth)



(b) 수신 패턴 조향 측정 결과(고각)
(b) Measurement result of receive, 1-D agile pattern(elevation)

그림 20. 수신 패턴 조향 측정 결과
Fig. 20. Measurement results of receive 1-D agile pattern.

V. 결 론

본 논문에서는 국내 최초의 화포탐지 레이더에 사용되는 평면형 능동위상배열안테나의 설계 및 제작 측정 결과를 확인하였다. 화포탐지 레이더는 작은 RCS를 갖고 빠르게 이동하는 표적인 포탄의 탐지를 위해 고속의 스캔 시간과 고각 방위각 방향으로 수신 멀티빔을 구현할 수 있는 평면형 능동위상배열 안테나가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 국내 최초의 화포탐지 레이더에 사용되는 C대역 평면형 능동위상배열안테나의 설계 및 제작결과

를 알아보았다. 또한 제작된 안테나의 측정을 위한 근접전계 시험 구성을 확인하였으며, 송신, 수신 패턴 및 수신 G/N의 측정 결과를 확인하였다. 개발된 안테나는 설계목표를 만족하였으며, 성공적으로 화포탐지용 레이더에 적용 완료하였다. 본 논문을 통해 개발된 안테나는 차후 개발되는 평면형능동위상배열 레이더의 설계 및 제작과 성능분석에 도움이 될 것으로 기대한다.

References

[1] 김현, 나형기, 전민현, "능동위상배열레이더의 개발 동향," 전자과학기술, 25(2), pp. 39-49, 2014년 3월.
 [2] 채희덕, 이재민, 김영완, 김한생, 진형석, 박종국, "완

전 디지털 레이더에 적용 가능한 능동위상배열안테나 근접전계 수신 시험," 한국전자과학회논문지, 27(7), pp. 625-634, 2016년 7월.

[3] A. D. Brown, *Electronically Scanned Arrays MATLAB® Modeling and Simulation*, Boca Raton, CRC Press, 2012.
 [4] W. L. Melvin, J. Scheer, *Principle Modern Radar: Advanced Techniques*, Edison, SCITECH Publishing, 2013.
 [5] W. Haselwander, M. Uhlmann, S. Wustefeld, and M. Bock, "Measurement on active phased array antenna on near-field range and anechoic far-field chamber," in *2001 31st European Microwave Conference*, London, England, 2001.
 [6] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed. NewYork, John Wiley & Son, 2005.

김 기 호 [LIG넥스원/선임연구원]



2005년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2007년 4월~현재: LIG 넥스원(주) 선임연구원
 [주 관심분야] 능동위상배열안테나 시스템 설계, 레이더 시스템, 고출력 전력증폭기

김 동 윤 [LIG넥스원/수석연구원]



2005년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2007년 2월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연구원
 [주 관심분야] 능동위상배열안테나 시스템 설계, 레이더 시스템

김 현 [LIG넥스원/수석연구원]



2002년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2011년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2011년 2월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열안테나 시스템 설계, 레이더 시스템 설계, 마이크로파 수치해석

진 형 석 [LIG넥스원/수석연구원]



1998년 2월: 수원대학교 전자재료공학과 (공학사)
 2000년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2000년 8월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 초고주파능동회로 및 송수신기 설계, 능동위상배열 레이더 시스템 및 TRM