

## 능동위상배열레이다용 레이다모듈 연구

## Study on a Radar Module for Active Phased Array Radars

양진모 · 최준호 · 권민상 · 김태완 · 한일탁 · 임재혁 · 심국보\* · 박영규\* · 이희민\* · 권호상 · 오선진

Jin-Mo Yang · Jun-Ho Choi · Min-Sang Kwon · Tae-Wan Kim · Il-Tak Han · Jae-Hyuk Im ·  
Kuk-Bo Sim\* · Young-Kyu Park\* · Hui-Min Yi\* · Ho-Sang Kwon · Seon-Jin Oh

## 요 약

본 논문에서는 X-대역 능동위상배열 레이다에 적용되는 레이다모듈을 제안한다. 하드웨어적 확장성과 소프트웨어적 융통성을 갖는 레이다모듈은 레이다 요구성능에 따라 자유자재로 구성이 가능한 기본 블록이다. 레이다모듈은 DAC(digital-to-analog converter)를 이용한 레이다 파형생성, 주파수 상하향변환/증폭 및 ADC(analog-to-digital converter)/DDC(digital down converter)를 통한 I/Q생성과 1차 디지털 빔형성 및 전단 신호처리 기능들을 가진다. 또한, 레이다 모듈은 동일한 전기적 성능과 기능들을 갖기 때문에 개발 기간 단축, 예산 절감 및 공용화에 따른 이점을 가진다. 본 연구에서는 X-대역 능동위상배열 레이다에 적용할 수 있는 레이다 모듈의 개발결과와 시험결과들을 제시하였고 3×3 성능 검증 배열안테나의 근접전계 시험결과를 통해 제안한 연구의 하드웨어적 확장성 및 소프트웨어적 융통성을 검증하였다.

## Abstract

In this paper, we propose a radar module that can be applied to an X-band active phased-array radar. The radar module, with hardware scalability and software flexibility, is a basic block that can be freely configured according to system requirements. It generates radar waveforms using a digital-to-analog converter, frequency up-down conversion/amplification, baseband I/Q generation through an analog-to-digital converter or digital down converter, primary digital beamforming, and pre-signal processing functions. Because it has the same electrical performance and function, it has advantages such as reducing the development period, reducing the development budget, and improving maintenance and serviceability. This paper presents the radar module design and fabrication/test results applicable to X-band active phased-array radars. The hardware scalability and software flexibility of the proposed design were verified through a near-field test of a 3×3 array antenna.

Key words: Active Phased Array, Radar Module, Near Field Test

## I. 서 론

최근 개발되고 있는 최신 레이다들은 능동위상배열 안

테나를 적용한 레이다들이 주류를 이루고 있다. 특히 반복적인 배열 구조를 효과적으로 확장하고 빔형성의 융통성을 확보하기 위해 최소 단위의 모듈화 연구에 대한 관

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

\*한화시스템(Hanwha Systems)

· Manuscript received October 4, 2023 ; Revised October 13, 2023 ; Accepted November 20, 2023. (ID No. 20231004-079)

· Corresponding Author: Jin-Mo Yang (e-mail: yang-j@add.re.kr)

심이 높아가고 있으며 S-대역으로 개발된 AMDR(air & missile defense radar)용 RMA(radar module assembly)<sup>[1]</sup>가 대표적인 예이다. AMDR용 RMA는 안테나 복사소자와 송수신모듈간 케이블 연결 구조를 가지며 6개의 TRM (transmit/receive module)로 구성된 24개 TRIMM (transmit/receive integrated microwave module)과 2개의 이중 채널 변환기, 1개의 주파수합성기 및 보조 전력 제어기로 이루어져 있고 총 28개의 모듈들이 하나의 RMA를 구성한다. 또한 고전력 및 전력효율이 우수한 GaN(gallium nitride)기술과 COTS(commercial off-the-shelf)기반 디지털 신호처리 기술이 적용되었다.

반도체 기술과 배열안테나 기술의 발전으로 S-대역 이상에서 적용할 수 있는 모듈화 연구가 가능해졌으며, 동일한 성능과 기능을 갖는 기본 모듈 개발을 통해 하드웨어적 확장성이 확보될 뿐만 아니라 개발기간의 단축효과, 예산의 절감효과 및 공용화에 따른 다양한 이점들을 가질 수 있다. 특히 높은 주파수 대역에 적용할 수 있는 레이더 모듈화 연구는 탐색과 추적 기능을 보유한 다기능 레이더의 개발에 필요한 연구 중 하나이며 모듈화를 통해 소프트웨어적 융통성을 활용할 수 이점을 갖는다. 또한 모듈화 기술을 디지털 배열에 적용하게 되면 사용자의 요구에 따라 다양한 빔 합성이 가능하기 때문에 레이더 시스템의 프레임 시간 최적화 및 불필요한 빔 할당에 따른 자원 낭비 등의 문제를 해소할 수 있다. 그림 1은 본 논문에서 제안한 레이더모듈의 확장성과 시스템 적용성에 대한 기대효과를 개념적으로 나타낸다.

본 논문에서는 국내외 최초로 X-대역에서 확장성과 융통성을 갖는 레이더모듈(RM, radar module)을 제안한다. 레이더모듈은 8개의 하부 모듈들로 구성된다. 송수신블록은 4채널 단위의 TRM이 4개 단위로 구성되어 있으며 IF-대역과 X-대역간의 RF연동을 위한 상하향모듈과 Xilinx사의 RFSoc(ZU49DR)<sup>[2]</sup>이 적용된 송수신제어모듈로 구성된다. 송수신제어모듈 내 RFSoc는 다양한 송신신호 생성 기능과 펄스압축 처리 및 빔형성을 위한 전단 처리기능이 있다. 이외에 레이더모듈에 전원을 공급하는 전원공급모듈과 각종 연동신호들을 인터페이스해주는 전원제어분배모듈 및 LO(local oscillator)분배모듈로 구성된다. 열적 안정성을 확보하기 위한 냉각판을 레이더모듈의

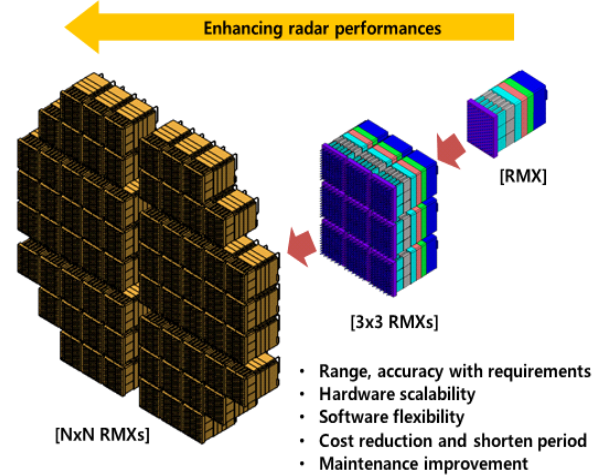


그림 1. 레이더모듈 개념도

Fig. 1. Radar module conceptual diagram.

주요 발열부분에 위치시킴으로써 전기적 안정성을 확보하도록 설계하였다. 제작된 레이더모듈의 시험결과들을 분석함으로써 제안한 연구의 타당성을 검증하였다.

## II. X-대역 능동위상배열레이더용 레이더모듈 설계

레이더의 탐지거리는 안테나 이득, 송신출력, 표적 RCS(radar cross section) 및 수신 잡음지수 등에 의해 결정되며 방위각과 고각 탐지범위는 시스템의 운용 개념에 따라 그 범위가 결정된다. 식 (1)은 레이더의 신호-대-잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)와 탐지거리의 관계를 나타내는 일반적인 레이더 방정식<sup>[3]</sup>이다.

$$\frac{S}{N} = \frac{P_T G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 k T_s B_N L} \quad (1)$$

여기서  $P_T$ 는 송신 첨두전력,  $G_T$ 는 송신안테나 이득,  $G_R$ 는 수신안테나 이득,  $\sigma$ 는 표적 RCS,  $\lambda$ 는 송신신호의 파장,  $R$ 은 탐지거리,  $k$ 는 볼츠만상수,  $T_s$ 는 시스템 잡음 온도,  $B_N$ 는 잡음대역폭,  $L$ 은 시스템 잡음온도를 제외한 모든 손실 합을 나타낸다.

장거리 표적 탐지를 위해 높은 안테나 이득이 필요하지만 안테나 이득과 빔폭은 반비례하므로 탐지영역이 작아지게 된다. 반대의 경우는 탐지거리가 감소하게 된다. 따라서 안테나 이득 및 빔폭의 관점에서 탐지거리와 방

위각/고각의 탐지범위에 대한 최적조건이 도출되어야 한다. 그림 2는 레이다 요구성능(탐지거리, 방위각 및 고각)과 안테나 빔폭과의 관계를 나타내는 개념도이다. 동일한 탐지영역조건에서 장거리 표적을 탐지하기 위해 높은 안테나 이득이 필요하지만 빔폭이 줄어들어 프레임 시간이 증가하게 되고 표적 갱신율이 떨어지게 된다. 반면에 표적 갱신율을 높이기 위해 즉, 프레임 시간을 줄이기 위해 넓은 빔폭을 사용하게 되면 안테나 이득은 감소하게 되고 탐지거리가 감소하게 된다. 따라서 주어진 탐지영역 내에서 배열 안테나 설계값(이득, 빔폭 및 배열간격 등)을 최적화하는 것이 중요하다.

안테나 빔폭 및 dwell 시간은 레이다의 탐지영역( $\Omega$ ) 및 프레임시간( $t_s$ )과 식 (2)와 같은 관계를 가진다.

$$\frac{\Omega}{t_s} = \frac{\theta_{AZ}\theta_{EL}}{t_{dwell}} \quad (2)$$

식 (1)로 주어진 레이다방정식은 식 (2)의 관계를 이용하여 식 (3)과 같이 다르게 표현될 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{av} A_e t_s \sigma}{4\pi R^4 \Omega k T_s L} \quad (3)$$

여기서  $P_{av}$ 는 송신 평균 전력,  $A_e$ 는 안테나의 유효면적,  $t_s$ 는 레이다 프레임 시간,  $\Omega$ 는 레이다의 전체 탐지영역을 나타낸다.

레이다의 탐지거리와 탐지범위는 안테나의 이득과 빔폭 및 grating lobe의 성능에 의해 성능이 좌우된다. 안테

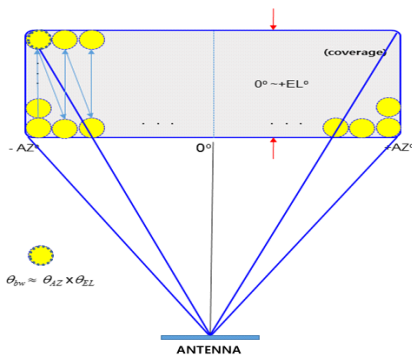


그림 2. 레이다 커버리지와 안테나 빔폭  
Fig. 2. Radar coverage and antenna beamwidth.

나 이득은 식 (1)에서 알 수 있듯이 SNR에 비례하며 빔폭은 식 (2)의 관계를 이용하여 변형된 식 (3)에 의해 반비례관계를 가진다. 탐지거리와 탐지범위는 안테나의 이득과 빔폭간의 trade-off를 통해 시스템 요구성능을 만족하도록 최적화한다. 계측거리 50 km 이상에서 면형 위상배열안테나의 탐지범위  $\pm 45^\circ$ 를 기준으로 프레임시간을 만족하도록 1.2도 안테나 빔폭을 초기값으로 설정한다.

위상배열 안테나를 적용함으로써 고려되어야 할 또 하나의 요소로 안테나 grating lobe의 영향성이다. 그림 3은 삼각배열 구조에 대한 탐지영역(파란색)과 grating lobe 발생영역(빨간색)을 나타낸 것이다. Grating lobe가 탐지범위 내에 발생하게 되면 주엽(main lobe)으로부터 인가되는 표적신호와 grating lobe로부터 인가되는 간섭, 잡음 또는 클러터 신호가 혼재되게 되고 표적신호의 탐지가 어려워진다. 또한 탐지영역 내에 주엽 및 grating lobe가 존재하게 되면 안테나 이득의 감소(3 dB)가 발생하고 레이다 탐지거리가 감소하게 된다<sup>[4]</sup>. 따라서 시스템에서 요구하는 탐지범위와 배열안테나의 소자간 간격으로부터 도출된 grating lobe 간의 겹침이 없도록 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 운용주파수 대역에서의 하드웨어 제작성과 grating lobe 등의 탐지범위 영향성 등을 고려하여 삼각배열 구조를 채택한다. 배열 간격은 이등변 삼각형

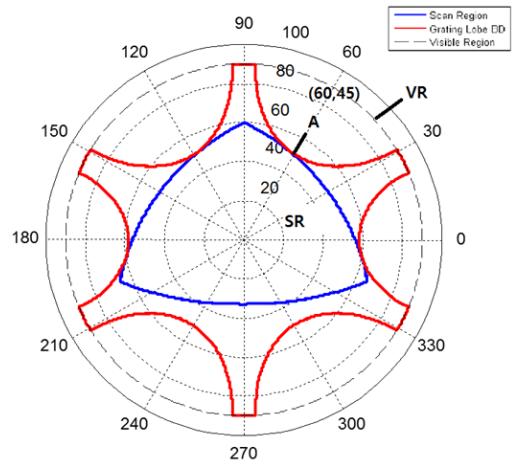


그림 3. 삼각배열구조에서 탐지영역(파란색)과 grating lobe 경계(빨간색)  
Fig. 3. Coverage (blue) and grating lobe boundary (red) in triangular array.

형태로 x축 방향으로  $\lambda/2-0.1$  mm, y축 방향으로  $\lambda/2+0.15$  mm를 갖도록 배치하였다.

레이다 설계 시 SNR을 성능지표로 설계하는 것이 일반적인 접근이지만 클러터와 같은 실제 운용환경에서의 레이다 성능을 분석하고 실제 상황에 적용할 수 있는 레이다 파라미터들을 도출하는 것 또한 중요하다. 본 연구에서는 잡음 이외에 클러터 등의 외부 영향을 포함한 레이다 성능 분석을 위해 클러터 감쇄(CA, clutter attenuation)에 의한 SCR(signal-to-clutter ratio) 성능을 또 다른 성능지표로 설정하여 설계를 수행한다. CA성능은 신호처리 구조<sup>[3]</sup>에 의해 영향을 받는다. 대표적인 신호처리 구조는 SNR을 높이기 위한 정합필터링과 클러터 제거를 위한 MTI(moving target indicator) 필터 및 도플러 필터들의 조합으로 구성된다. MTI 필터의 경우 DC에서부터 수십 ~수백 Hz 영역의 클러터 제거 능력이 우수하지만 낮은 속도의 표적 또한 함께 제거될 수 있고 표적의 도플러 정보가 모호하기 때문에 프로세싱 손실이 상대적으로 큰 단점이 있다. 반면에 도플러 필터는 원하는 표적 속도를 정확히 필터링 할 수 있는 장점이 있는 반면 원거리 작은 세기의 표적 신호가 매 PRF(pulse repetition frequency)마다 fold-over되어 누적되는 클러터에 의해 묻힐 수 있다는 단점을 가진다. 현재 개발되고 있는 대부분의 정밀 레이다들은 표적 추적 기능을 보유하기 때문에 도플러 필터가 적용된 신호처리 구조<sup>[3]</sup>를 가지며 전체 CA성능은 100 dB이상을 필요로 한다. CNR이 100 dB인 시스템에서 CA 100 dB를 가지는 경우, SIR(signal-to-interference ratio)은 SNR에 근접하며 클러터 억제 후 남겨진 잔여 클러터에 의한 SIR영향이 사라지기 때문이다.

레이다 송신 출력은 레이다의 탐지 성능을 결정하는 중요 지표 중 하나이며 식 (2)에서 알 수 있듯이 레이다 탐지거리는 송신출력의 1/4에 비례한다. 레이다 송신출력은 일반적인 RF시스템과는 달리 포화전력을 이용한다. HPA (high power amplifier)의 DC-RF 변환효율 관점에서 HPA의 급(class)를 선정하고 방열구조를 설계한다. 레이다에 적용된 HPA의 열적 안정성 유지는 레이다 성능에 직접적인 영향을 주며 열적 안정성 확보가 유리한 냉각 방식을 채택한다. 발열원과 냉각수가 면접촉을 통해 열적 안정성을 유지하는 수냉방식을 적용하여 전기적 안정성

을 확보하도록 설계한다. 발열부위와 냉각관의 접촉면 거칠기와 냉각관의 부피에 따라 발열성능이 결정된다. 수신기의 잡음지수 역시 탐지성능에 영향을 주는 요소이다. 레이다 잡음지수는 수신기 전단의 잡음지수 성능에 의해 결정되며 능동위상배열 안테나의 경우 수신안테나 G/T (gain-to-temperature) 성능에 영향을 준다. 단일복사소자 이득 4.5 dB, 복사소자 온도 290 K, 진폭 가중치를 적용한 G/T는 약 1 dB/K 이상을 갖도록 설계되었고 TRB 수신채널의 잡음지수는 4 dB 이하를 유지해야 한다.

본 연구에서는 X-대역의 구현 가능성을 고려하여 레이다모듈과 배열안테나로 나누어 설계한다. 배열안테나와 레이다모듈은 최소의 삽입손실과 허용된 채널 간 위상차를 보장하도록 PCB(printed circuit board) 형태로 구현된 RF인터페이스모듈을 통해 기계적, 전기적으로 연동한다.

## 2-1 레이다모듈 설계

레이다모듈은 X-대역 반도체 송수신블록에서 생성된 고출력 송신 신호 및 저잡음 수신신호를 이용하여 안정적으로 안테나 빔을 형성하는 것이 주요 기능이며 세부 기능들은 다음과 같다.

- 고출력/저잡음 반도체 송수신블록(TRB)
- IF 송신 신호 생성/분배 및 IF 수신 신호 증폭/필터링 /AGC기능을 수행하는 송수신제어
- 제어/상태, I/Q 데이터 연동을 위한 연동
- 탐색 및 추적을 위한 디지털 빔형성 처리
- 구성품 단위의 자체점검(BIT)
- 집적화된 방열 구조를 가지는 냉각판

레이다모듈은 4개의 QTRM(quad transmit/receive module)으로 구성된 송수신블록, 주파수 상향/하향변환 및 레이다 파형생성/ADC 처리를 수행하는 송수신/제어모듈, 제어/상태정보 및 빔 처리 데이터, LO/CLK 연동을 위한 연동모듈, LO/CLK신호를 분배해 주는 LO/CLK분배모듈과 전원공급모듈, 냉각을 위한 냉각판모듈등으로 구성되어 있다. 배열안테나와는 blind-mate 형태로 연동되고 기타 외부의 장치/조립체와는 케이블(광케이블 및 RF케이블과 전원선) 등으로 연동된다. 그림 4는 레이다모듈의 구성이다.

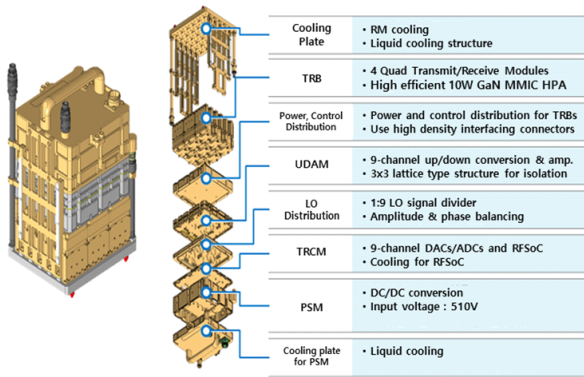


그림 4. 레이더모듈 구성

Fig. 4. Radar module configuration.

### 2-1-1 송수신블록

송수신블록은 레이더의 송신출력을 만들어내는 송신기와 안테나로부터 인가된 작은 표적신호를 저잡음 증폭해 주는 수신기 전단으로 구성된다. 레이더모듈에 적용된 송수신블록은 배열안테나 간격을 고려하여 X-대역 T/R 칩을 적용하였고 하나의 송수신모듈은 4채널로 구성되며 송수신블록은 4개의 송수신모듈로 구성된다.

하나의 송수신 채널은 구동증폭기(HMC441LC3B)<sup>[5]</sup>와 다기능칩(ADAR1000)<sup>[6]</sup> 및 송신 고출력증폭기, 수신 저잡음증폭기, Limiter, 송수신 경로 Switch가 하나의 패키지로 구성된 SiP(system in package) FEM(front end module) (QPF5010)<sup>[7]</sup>으로 구성되어 있다. 송수신모듈은 송수신 경로 전환, 송수신 위상 및 수신 이득 제어, 송신 신호 고출력 증폭, 수신 신호 저잡음 증폭 및 송수신 신호 보정 경로 제공 등의 기능을 갖는다.

그림 5는 송수신블록의 구성 및 블록도이며 그림 6은 송신/수신 경로의 버짓 설계 결과이다. 송신 경로는 공통 포트에  $-9$  dBm 신호를 상하향증폭모듈로부터 인가 받아 다기능칩에서 20 dB를 증폭하고, 구동증폭기에서 16 dB를 증폭하여 +20 dBm으로 증폭된 신호가 SiP FEM의 고출력증폭기로 입력되어 +40 dBm 이상으로 증폭된 송신 신호를 배열안테나로 전달한다. 수신 경로는 배열안테나로부터 수신된 RF 신호가 SiP FEM의 수신 저잡음증폭기를 통해 23 dB 저잡음 증폭되고, 다기능칩을 통해서 8 dB 이득만큼 증폭하여 총 25.5 dB 저잡음 증폭된 신호가

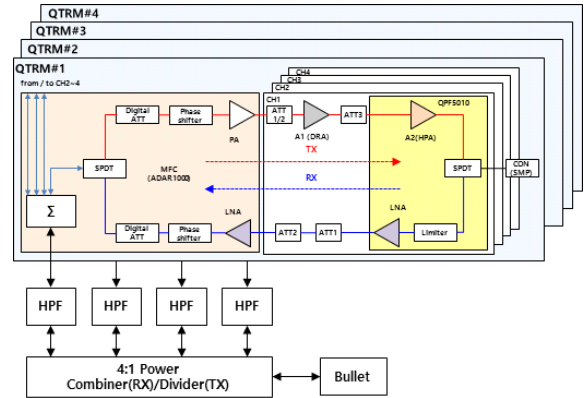
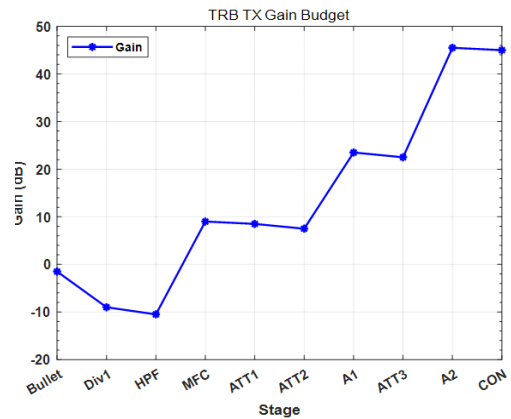


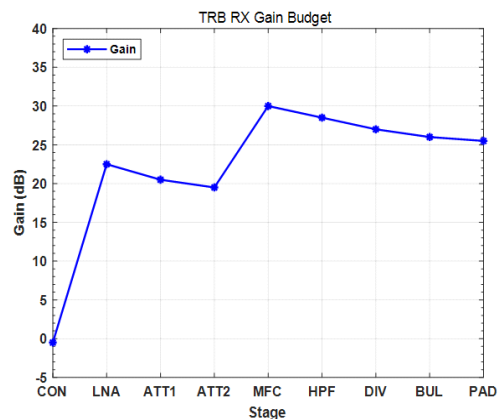
그림 5. TRB 구성 및 블록도

Fig. 5. TRB configuration and block diagram.



(a) 송신 경로 버짓

(a) Transmit path budget



(b) 수신 경로 버짓

(b) Receive path budget

그림 6. TRB 송신 및 수신 이득 버짓

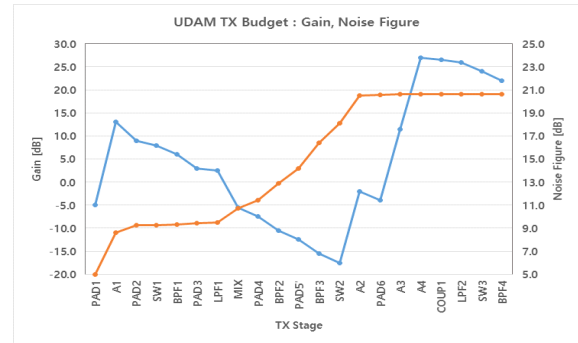
Fig. 6. TRB Tx/Rx gain budget.

상하향증폭모듈로 전달된다. 송신경로 출력전력은 40 dBm 이상, 이득은 41 dB 이상이며, 수신경로는 잡음지수 4 dB 이하, 수신이득은 25 dB 이상, Input P1dB는 -39 dBm이다. 송수신블록의 크기는 55 mm(D)×71 mm(W)×112 mm(H), 무게는 1.0 kg 이하이다.

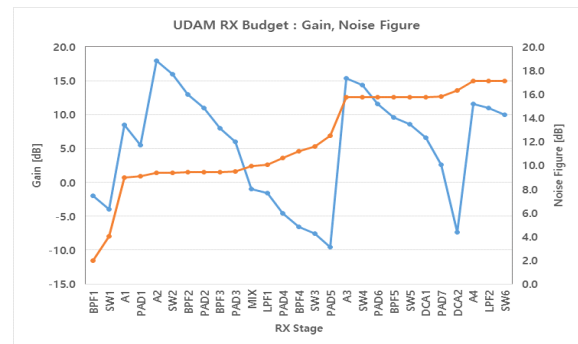
## 2-1-2 상하향증폭모듈

상하향증폭모듈은 송수신제어모듈로부터 입력되는 IF 신호를 상향변환하여 송수신블록에 제공하고, 송수신블록으로부터 입력되는 RF 신호를 하향 변환하여 송수신제어모듈에 전달하는 기능을 가진다. 송신 시 주파수 상향 변환 및 신호 증폭, 수신 시 주파수 하향 변환 및 저잡음 신호 증폭 기능을 수행한다.

그림 7은 동일한 특성을 갖는 9개의 채널 중 한 송신/수신채널의 블록도를 나타내며 그림 8은 송신/수신 채널 각각의 전력 버짓 설계 결과이다. 송신출력은 2 dBm, 송신이득 22.0 dB, 하모닉 레벨 -45 dBc 이하, 불요파 -55 dBc(in-band) 이하를 만족하도록 버짓 및 주파수 플랜을 설계하였다. 수신인 경우 운용파형에 따라 filter bank를 통하여 수신 대역폭을 선택할 수 있으며 수신 이득은 23 dB, 수신잡음지수 12 dB 이하, 수신 이득 평탄도는  $\pm 1.5$  dB, 출력 P1dB는 5 dBm 이상, AGC 이득제어 범위는 30 dB, NAGC 이득제어 범위는  $\pm 8$  dB, 불요파는 -55 dBc 이하, 고조파는 -45 dBc 이하, 송/수신 스위칭 속도는 1us 이하, 수신 시 송수신 경로 격리도는 60 dB 이상, 수신 채널 간 격리도는 60 dB 이상, 수신 채널간 이득차는  $\pm 1$  dB 이내, 수신 채널 간 위상차는  $\pm 15^\circ$  이내를 만족하도록 설계하였다. 그림 9는 제작된 상하향증폭모듈을 나타내며 크기는 55 mm(D)×71 mm(W)×112 mm(H), 무게는



(a) 송신 경로 버짓  
(a) Transmit path budget



(b) 수신 경로 버짓  
(b) Receive path budget

그림 8. UDAM 송신/수신 버짓

Fig. 8. UDAM Tx/Rx budget.

1.0 kg 이하이다.

## 2-1-3 송수신제어모듈

레이다모듈의 제어, 내/외부 연동, 송신신호 생성 및 수신 IF 신호 ADC처리, 정합필터링과 같은 전단 신호처리

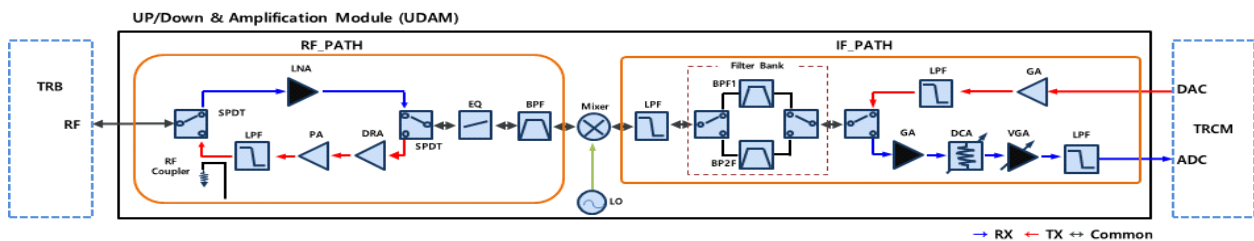
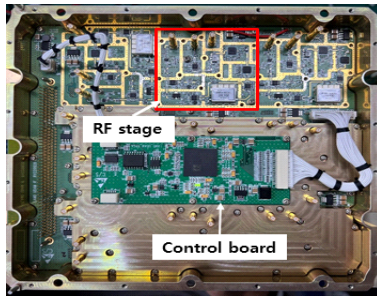


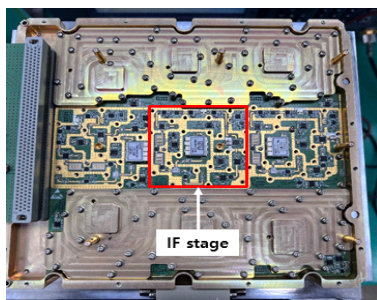
그림 7. UDAM 블록도

Fig. 7. UDAM block diagram.





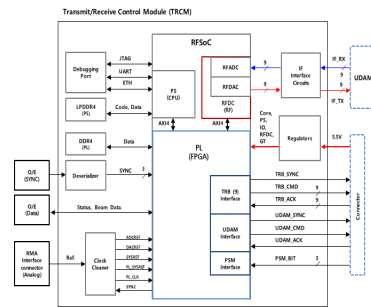
(a) RF단과 제어보드  
(a) RF stage and control board



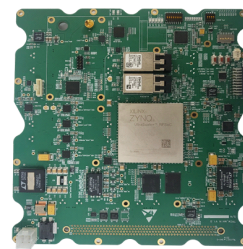
(b) IF단  
(b) IF stage

그림 9. UDAM 보드(사진)  
Fig. 9. UDAM board (photo).

기능들은 송수신제어모듈에 구현하였다. 송수신제어모듈은 FPGA블록과 내부/외부 인터페이스 블록, 클럭블록, 디지털 광송수신 블록 및 ADC/DAC블록으로 구성되고 프로세서 블록에는 RFSoc를 포함한 memory interfaces, I/O Peripherals, JTAG 등이 포함된다. 내부 연동 블록에는 레이다 모듈내부 구성 모듈들(상하향증폭모듈, 송수신블록) 간의 연동을 위한 LVDS 레벨의 CMD, ACK 신호등으로 구성된다. 클럭 블록은 광전변환보드에서 전달받은 기준클럭을 입력받아 FPGA에 공급 및 동기신호의 생성에 사용한다. 디지털 광송수신 블록은 안테나제어/빔형성기와 연동된 Aurora 10G 신호규격으로 제어 신호 및 상태 메시지를 수집 및 전송하는 기능을 수행하는 블록과 송수신제어모듈의 동기를 위한 블록으로 구성된다. ADC/DAC블록은 RFSoc 칩 내부에 패키징되어 있으며 외부 인터페이스를 위한 ADC와 DAC 간 loopback용 아날로그 스위치와 BALUN 및 SMP커넥터로 구성된다. 그림 10은 송수신제어모듈의 구성도 및 형상을 나타낸다.



(a) 블록도  
(a) Block diagram



(b) 보드(사진)  
(b) Board (photo)

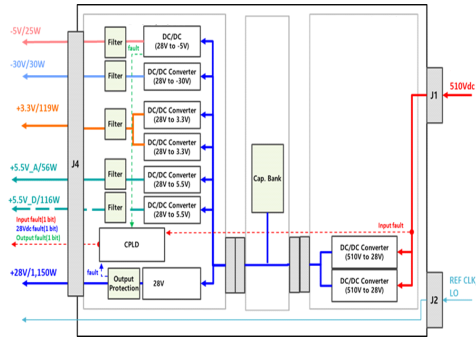
그림 10. TRCM 블록도 및 보드(사진)  
Fig. 10. TRCM block diagram and board (photo).

## 2-1-4 전원공급모듈

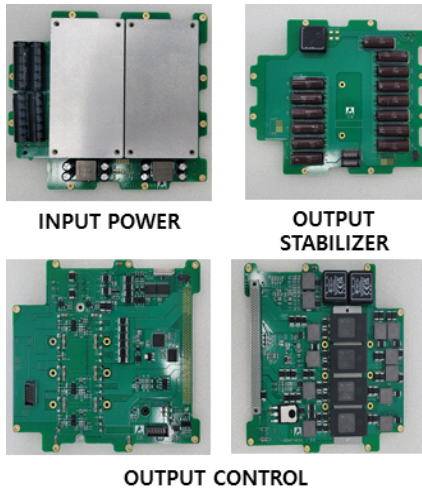
전원공급모듈은 TRB 및 레이다모듈을 구성하는 모듈들에서 필요한 내부 전원을 외부로부터 입력받은 510 VDC 전원을 이용하여 DC/DC 변환 후 공급한다. 송수신 모듈 SiP FEM에 사용하는 28VDC 전원과 그 외 모듈들에서 사용되는 +5.5 Vdc, +3.3 Vdc, -5 Vdc, -30 Vdc 전원은 별도의 DC/DC 파워팩으로 분리하여 설계하였다. TRB HPA 소모 전력량이 가장 크므로 이로 인한 영향을 최소화하고, HPA에 의한 전원계통 고장을 차단하여 다른 모듈들의 동작에 영향을 최소화하도록 설계하였다. 그림 11은 전원공급모듈의 기능블록도와 형상이다. 28VDC 전원은 출력전류, 전압을 항시 감시하고 이상상태를 연동하도록 설계하였다.

## 2-1-5 냉각판

냉각판은 송수신블록과 기계적으로 면대면으로 결합하고 송수신블록에서 발생하는 열을 효율적으로 방열하



(a) 블록도  
(a) Block diagram



(b) 보드(사진)  
(b) Board (photo)

그림 11. PSM 블록도 및 보드(사진)  
Fig. 11. PSM block diagram and board (photo).

는 역할을 한다. 또한 외부의 진동/충격으로부터 모듈들을 보호하고 고정 및 지지핀을 사용하여 배열안테나에 결합, 냉각수 입/출에 용이하면서 분해 시 냉각수 누수를 방지하는 기능을 가진다. 냉각판 유로 최적화 및 열유동 해석을 통해 유로 깊이는 7 mm, 너비는 3.5 mm, 핀 두께는 1.5 mm를 가지도록 설계하였다.

냉각판 재질은 AL6061-T6이며 제작공정은 진공브레이징을 적용하였다. TRB 9개가 장착되며 장착면 편평도 및 거칠기 공차를 최적화하여 방열성능을 높였다. 공급용 냉각배관과 회수용 냉각배관은 냉각판에 스테인리스 강관에 O-ring 가스킷을 적용하여 M11×0.75탭 배관을 가공 후

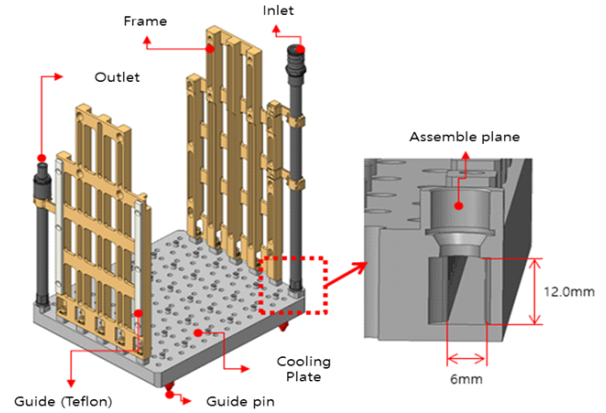


그림 12. 냉각배관 조립체 형상  
Fig. 12. Cold plate assembly.

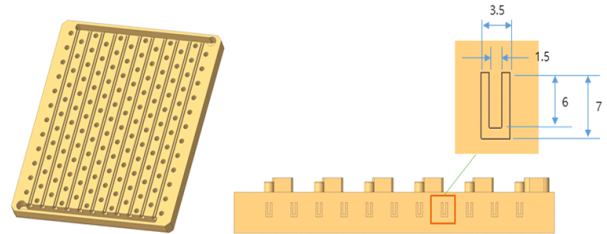


그림 13. 냉각판 내부 유로 및 핀 형상  
Fig. 13. Cold plate inlet and fin dimensions.

연결하여 압력손실을 최소화하였다. 또한 쿼커플러 (STAUBLI sockets)을 적용하여 RMA 조립/분해 시 냉각수 누수를 방지할 수 있도록 설계하였다. 그림 12 및 그림 13은 냉각배관 및 내부유로 핀 형상이며 열해석 결과 TRM 소자에서 최고 온도는 57.9℃로 확인되었다.

## 2-2 배열안테나 및 성능 검증용 3×3 배열 설계

배열안테나는 레이다모듈로부터 입력받은 RF신호를 RF인터페이스모듈을 통해 공급받아 방사하고, 표적으로부터 반사된 RF 신호를 RF인터페이스모듈을 통해 레이다모듈로 전달하는 기능을 갖는다. 또한, 1:N 분배기를 통해 송수신 신호 보정 경로를 제공한다. 동작주파수는 X-대역, 구형 용이성 및 레이돔과의 물리적 연동성 등을 고려하여 cavity back-type patch 안테나<sup>[8]</sup>로 설계하였다. 시스템의 탐지영역을 고려하여 복사소자 간 간격이 결정되었고 레이다 모듈 한 개당 144개의 복사소자를 가진다.



운용주파수 내에서 반사손실은  $-10$  dB 이하를 만족하며,  $5$  dBi 이상의 단일소자이득을 갖도록 설계하였다. 또한, 운용주파수 및 빔 조향 범위 내에서 능동반사손실은  $-6$  dB 이하를 만족함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다 (그림 14).

144개의 복사소자로 구성된 배열안테나는 빔조향범위 내에 grating lobe가 발생하지 않는 조건을 만족하도록 소자 간격을 결정하였고 이에 대한 방사패턴은 그림 15와 같다. 빔폭은  $8.14^\circ \times 6.68^\circ$ 도이며 부엽레벨은  $-13$  dB 이하를

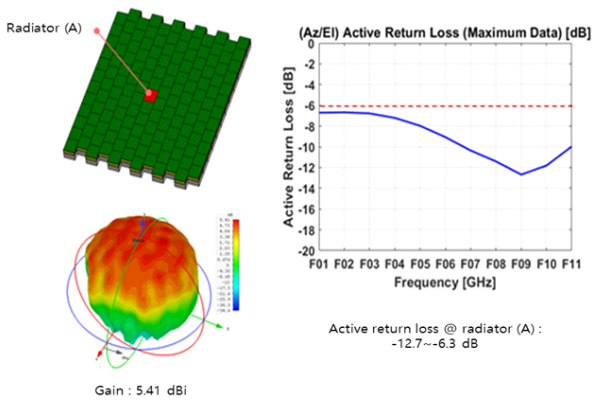


그림 14. 복사소자 이득 패턴  
Fig. 14. Radiating element gain pattern.

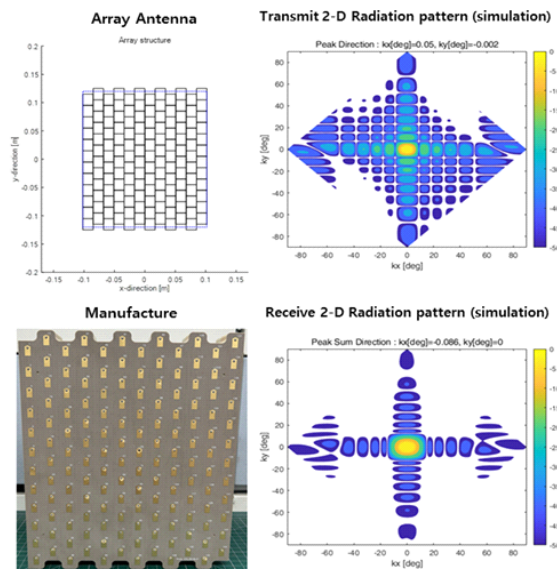


그림 15. 배열안테나 설계 및 제작(사진)  
Fig. 15. Array antenna design and photo.

만족한다. 운용주파수 내 이득은  $24$  dBi 이상을 갖는다.

설계된 배열안테나를 이용하여 레이더모듈의 성능을 검증하기 위한  $3 \times 3$  배열을 설계하였으며 그림 16과 같다. 삼각배열 구조로 설계된 배열안테나에서  $y$ 축 방향으로 일정한 offset을 주어 모듈 간 소자간격이 일정하게 유지되도록 설계한다. 복사소자 간격과 레이더모듈 채널 간의 연결을 위한 RF연동 모듈이 배열안테나 뒷면에 위치한다. RF연동모듈과 레이더모듈 채널 사이에는 하모닉 성분 제거용 5차 하모닉필터가 구성되어 있다.  $3 \times 3$  검증용 배열 안테나의 M&S 결과는 그림 17과 같다. 수신은

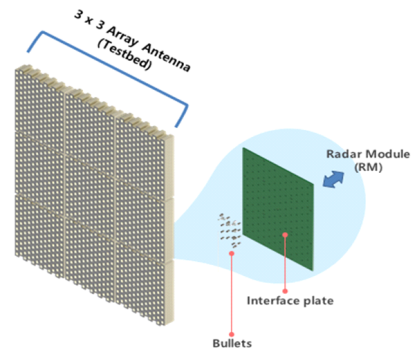


그림 16.  $3 \times 3$  시험용 배열 안테나  
Fig. 16.  $3 \times 3$  array antenna for test.

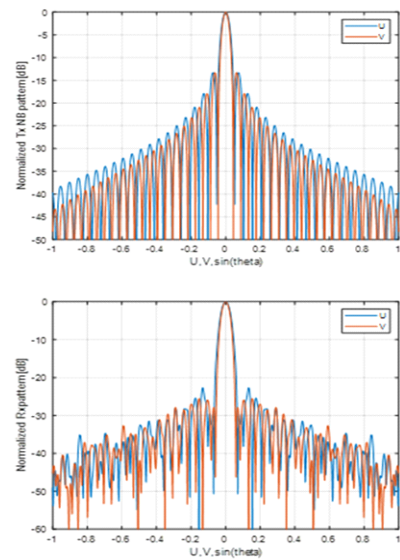


그림 17.  $3 \times 3$  검증용 배열 안테나 설계 결과  
Fig. 17.  $3 \times 3$  antenna design result.

Talyer  $-35$  dB의 테이퍼링 값을 적용하였으며, 송신과 수신은 각각  $33$  dB와  $31$  dB 이상을 가진다. 송신 및 수신의 부엽준위는 각각  $-12$  dB와  $-28$  dB 이하이고 송신 빔폭은  $2.7^\circ \times 2.3^\circ$ 이며 수신 빔폭은  $3.7^\circ \times 3.1^\circ$ 를 갖도록 설계하였다.

### Ⅲ. 레이더모듈 제작 및 성능 측정

레이더모듈에 들어가는 각 구성품(모듈)들을 제작하고 성능을 확인한 후 레이더모듈로 조립하여 제작하였으며, 시험을 통해 성능을 검증하였다.

#### 3-1 레이더모듈 제작

레이더모듈은 목적과 기능에 맞게 차하위 단위로 최적 설계되었고 stack 형태로 조립되도록 구성하였다. 그림 18은 제작된 X-대역 레이더 모듈 형상<sup>[9]</sup>이며 크기는  $216$  mm(D) $\times$  $204$  mm(W) $\times$  $408$  mm(H), 무게는  $17.0$  kg 이하이다. 레이더모듈과 배열안테나는 blind-mate 컨넥터를 통해 연동되며 레이더모듈의 포트 간격이 배열안테나의 소자 간격보다 작게 설계되었고 PCB형태의 RF연동모듈에 의해 전기적, 기계적으로 연동된다. RF연동모듈은 포트간 상대적 위상차와 컨넥터에 의한 삽입손실등을 고려하여 설계되었다 삽입손실은  $0.5$  dB 이하, 포트간 상대적 위상차는  $15^\circ$  이하이다.

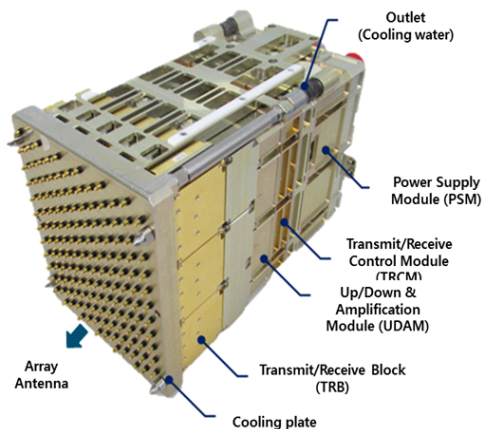


그림 18. 제작된 X-대역 레이더모듈  
Fig. 18. X-band radar module.

#### 3-2 레이더모듈 시험 및 측정

레이더모듈의 시험을 위해서 필요한 타이밍과 제어신호를 인가해주고 수신신호를 저장하기 위한 자동화 시험장비를 그림 19와 같이 구성하였다. 송신출력, 송신이득 등의 송신 RF특성과 수신이득, 잡음지수 및 수신 RF성능은 시험장비를 통해 범용 계측기들을 이용하여 측정하며 GUI환경을 이용하여 분석한다.

송신출력의 경우 각각의 HPA가 포화모드에서 동작하도록 설계되었기 때문에 TRB 송신 시험결과와 같은 결과를 가진다. 송신출력의 크기는  $1$  dB 이내로 균등하며 전 동작 주파수 대역에서  $41.5$  dBm 이상 출력됨을 확인할 수 있다. 송신신호의 duty는  $15\%$  이상이 되도록 설계되었고 측정결과  $15\%$ 를 만족함을 확인하였다. 레이더모듈의 구조상 TRB의 수신단이 레이더모듈의 수신단이 되므로 TRB의 잡음지수를 측정한다. 측정된 수신 잡음 지수는 최고  $2.65$  dB로 측정되어 개발 목표치를 만족하였다. 표 1은 레이더모듈의 설계 대비 측정 결과를 정리한 것이다. 설계 시 목표했던 최종 출력  $40$  dBm 이상을 만족하였고, 레이더 탐지성능에 직접적인 영향을 주는 수신 잡음 지수 역시 설계값을 만족하였다. 각 개별 채널별로 디지털로 변환된 수신신호를 전송할 수 있는 구조를 검증하

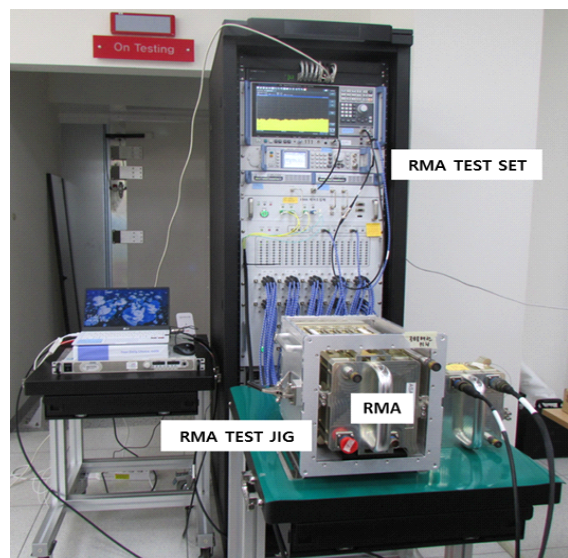


그림 19. 자동화된 시험 셋팅  
Fig. 19. Automated test setting.

표 1. X-대역 레이더모듈 시험 결과

Table 1. Test results of X-band radar module.

Items	Design value	Measured value
1. Operating frequency	X-band	X-band
2. TX output level	>40 dBm	>41.5 dBm
3. Duty	<15 %	<15 %
4. RX noise figure	<3 dB	<2.65 dB
5. TX waveform	LFM, PCM	LFM, PCM
6. Beamforming	O	O
7. Efficiency	>30 %	>32 %

\* Refer to single channel.

였고 9개 부배열 수신신호를 ADC-DDC변환하여 레이더 모듈에서 1차 빔형성후 광신호채널을 통해 전송한 결과는 그림 20과 같다. 송수신제어모듈에 저장된 9개 채널 데이터의 진폭 및 위상을 보정한 후 빔형성(summation)한 결과, 19 dB의 이득을 가짐을 확인할 수 있다.

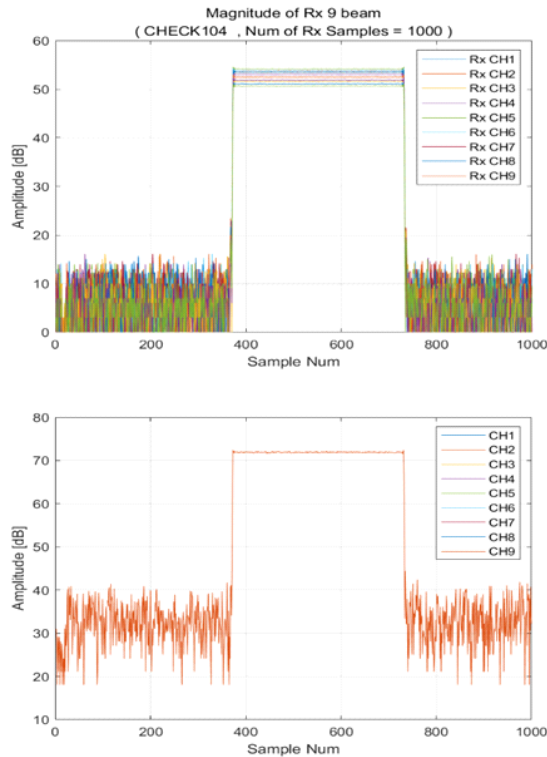


그림 20. 부배열 데이터와 빔형성 결과

Fig. 20. Subarray data and beamforming result.

### 3.3 레이더모듈 성능 검증용 3×3 배열 시험

레이더모듈의 성능을 검증하기 위해 3×3 배열안테나를 구성하여 P2P(point-to-point) 측정 및 근접전계 측정을 수행하여 성능을 확인하였다. 송신 P2P시험을 통해 각 채널의 송신 진폭 및 위상을 측정하여 저장하고 근접전계 송신시험 시 기준값으로 사용한다. 안테나 수신 성능시험 또한 동일하게 수신 진폭 및 위상을 저장하고 기준값으로 사용하여 수신 안테나의 성능(G/T, 부엽준위 등)을 측정한다.

9개의 레이더모듈(그림 21 노란 실선)을 이용하여 구성된 3×3 배열 안테나의 근접전계 시험 구성이다. 그림 22 및 그림 23은 안테나의 송신 EIRP 102.7 dBm, 빔폭 2.68°×2.24°, 부엽준위 -12.3 dB와 수신 G/T 2.0 dB/K, 수신 빔폭 3.46°×2.95°, 부엽준위 -28 dB 이하를 모두 만족함을

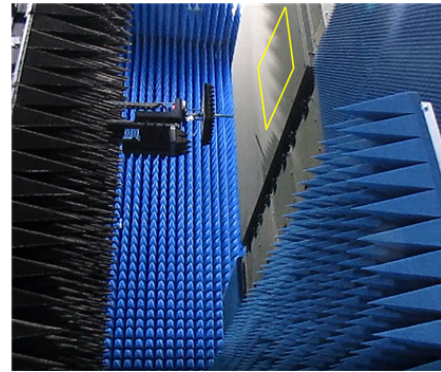


그림 21. 근접전계시험(사진)

Fig. 21. Near field test (photo).

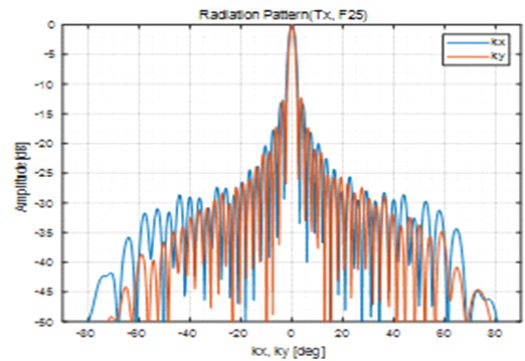


그림 22. 안테나 송신 패턴(정규화)

Fig. 22. Antenna TX pattern (normalized).

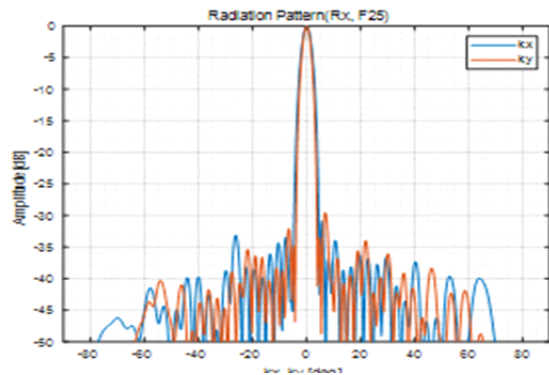


그림 23. 안테나 수신 패턴(정규화)

Fig. 23. Antenna RX pattern (normalized).

확인하였다. 측정 조건은 동작주파수 범위 내에서 정면조향 기준이다.

#### IV. 결 론

세계 최초로 하드웨어적 확장성과 소프트웨어적 융통성을 고려한 X-대역 레이다모듈을 제안하였다. 레이다모듈은 사용자의 요구성능에 따라 자유자재로 구성이 가능한 기본 블록이다. 본 논문에서는 X-대역에서 확장성이 가능한 새로운 개념의 레이다모듈을 최초로 설계하고 제작하였으며 주요 시험결과들을 제시하고 검증하였다.

기존과 다르게 송수신회로 및 다수의 ADC, DAC가 집적화된 RFSoc(ZU49DR)을 이용하여 9개의 송수신채널을 하나의 모듈에 설계하고 구현하였으며 16개 RF 송수신채널로 구성된 송수신블록(TRB)를 이용하여 X-대역 신호를 송신하고 수신하도록 설계/구현하였다. 레이다모듈의 송신출력, 수신잡음지수 등 자동화 시험환경을 이용하여 설계값을 만족함을 확인하였다. 또한 레이다모듈의 성능검증을 위해 3×3 배열안테나를 구성하였고 근접전계시험을 통해 안테나의 송신/수신 성능을 검증하였다.

레이다모듈을 이용하면 시스템 요구조건에 따른 레이다 설계 결과에 맞게 레이다모듈을 확장하면서 자유롭게 구성하는 것이 가능하다. 또한 1차 빔형성된 수신데이터가 디지털화되어 있으므로 출력되는 빔을 시스템 운용조

건에 따라 자유롭게 구성할 수 있는 소프트웨어적 융통성을 가진다. 향후 부배열 능동위상배열 또는 디지털배열 안테나가 적용된 레이다 시스템에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] T. Dickenson, "Air & missile defense radar(AMDR) AN-SPY-6(V)." Available: <https://missilethreat.csis.org/de-fsys/amdr/>
- [2] AMD, "Zynq UltraScale+ RFSoc Data Sheet: Overview," 2023. Available: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds889-zynq-usp-rfsoc-overview>
- [3] M. C. Budge Jr., S. R. German, *Basic Radar Analysis*, Norwood, MA, Artech House, 2015.
- [4] P. J. Kahrilas, *Electronic Scanning Radar Systems(ESRS) Design Handbook*, Dedham, MA, Artech House, 1976.
- [5] Analog Device, "GaAs pHEMT MMIC medium power amplifier, 6~18 GHz v08.1017." Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc441lc3b.pdf>
- [6] Analog Device, "8 GHz to 16 GHz, 4-channel, X band and Ku band beamformer, rev.B." Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAR1000.pdf>
- [7] QPF5010, "8 - 12GHz 10W T/R Module Rev.F," 2021. Available: <https://www.qorvo.com>
- [8] D. M. Pozar, "The active element pattern," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 8, pp. 1176-1178, Aug. 1994.
- [9] J. H. Choi, J. M. Yang, M. S. Kwon, T. W. Kim, D. S. Kim, and I. T. Han, et al., "Development of the scalable radar module," in *Autumn Annual Conference of Korea Institute of Military Science and Technology* 2022, Daejeon, 2022, pp. 698-699.



양 진 모 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0000-0070-4233>



1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
1991년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
2011년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)  
1991년 2월~현재: 국방과학연구소 수석

연구원

[주 관심분야] 센서 신호처리, 위상 배열 레이다 시스템 설계 및 성능분석 등

김 태 완 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0004-7111-5769>



2014년 2월: 건국대학교 전자공학부 (공학사)  
2015년 8월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)  
2019년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)  
2019년 3월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 안테나 이론 및 설계, 위상 배열 레이다 시스템 등

최 준 호 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9244-6637>



2001년 2월: 경상국립대학교 전자공학과 (공학사)  
2003년 2월: 광주과학기술원 기전공학과 (공학석사)  
2015년 2월: 광주과학기술원 기전공학과 (공학박사)  
2005년 2월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] RF 송수신모듈 설계, 위상 배열 레이다 시스템 설계 및 성능분석 등

한 일 탁 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-9471-7011>



2006년 2월: 충남대학교 전자·전파·정보통신공학부 (공학사)  
2008년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
2008년 2월~현재: 국방과학연구소 선임

[주 관심분야] 전자파 전파 및 산란, 위상 배열 레이다 시스템 및 신호처리

권 민 상 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0136-168X>



2000년 6월: 미국 State University of New York at Buffalo (공학사)  
2003년 8월: 미국 University of Washington (공학석사)  
2006년 1월~현재: 국방과학연구소 책임

[주 관심분야] 레이다 기계설계, 위상 배열 레이다 시스템 설계 등

임 재 혁 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3570-9533>



2014년 2월: 고려대학교 컴퓨터통신공학부 (공학사)  
2020년 2월: 고려대학교 전파통신공학과 (공학박사)  
2019년 12월~현재: 국방과학연구소 선임

[주 관심분야] 초고주파 시스템, 레이다 신호처리, 레이다 시스템 설계 및 성능분석 등



심 국 보 [한화시스템/선임연구원]

<http://orcid.org/0009-0001-0713-041X>



이다 시스템

2017년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
2019년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
2020년 3월~현재: 한화시스템 선임연구원  
[주 관심분야] RF, 위상 배열 안테나, 레

권 호 상 [국방과학연구소/책임연구원]

<http://orcid.org/0000-0001-5133-296X>



연구원

1995년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)  
1997년 3월~1999년 2월: 대우전자 연구원  
1999년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원  
2018년 3월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 박사과정  
[주 관심분야] 레이더, 레이더용 송수신기, RF 송수신 모듈, RF Power Amplifier, 비선형 모델링 등

박 영 규 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0410-191X>



원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나, 레이더 시스템

2016년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2018년 2월: 충북대학교 전파통신공학과 (공학석사)  
2018년 3월~2022년 5월: 두타기술 주임연구원  
2022년 6월~현재: 한화시스템 선임연구

오 선 진 [국방과학연구소/수석연구원]

<http://orcid.org/0009-0005-1103-2141>



학박사)

[주 관심분야] 위상배열 레이더 시스템 설계 및 성능분석, 모델 기반 설계, 실시간 제어 시스템 설계, 신호처리 등

1990년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
1992년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)  
1992년 2월~현재: 국방과학연구소 수석연구원  
2007년 2월: 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)

이 희 민 [한화시스템/수석연구원]

<http://orcid.org/0009-0003-0967-0668>



원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나, 레이더 시스템

1999년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
2001년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
2008년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)  
2007년 8월~현재: 한화시스템 수석연구