

# 항공기 탑재 레이더용 X-대역 Low-Profile 능동위상배열 안테나 설계 및 제작

## Design and Implementation of an X-Band Low-Profile Active Electronically Scanned Array for Airborne Radar

황인수 · 이유리\* · 김종필\* · 장성훈 · 김선주

In-Su Hwang · Yu-Ri Lee\* · Jong-Pil Kim\* · Sung-Hoon Jang · Seon-Joo Kim

### 요 약

항공기 탑재 레이더를 위한 low-profile, 경량, 광각 스캔, 열적안정성의 특성을 가진 능동위상배열(active electronically scanned array) 안테나의 설계 및 제작 결과를 기술하였다. 안테나의 소형 경량화를 위하여 송수신블록은 RF 회로 관련 송수신 모듈은 평면 구조인 brick 형, 제어보드는 적층 구조인 tile 형을 혼합한 quasi-tile 구조로 제작하여, 안테나 전면부의 깊이를 감소시켰다. 또한 안테나 후면에 전원 및 제어 관련 모듈들을 판형으로 제작하여 안테나 후면부의 깊이를 감소시켰다. 감소된 안테나 깊이는 안테나 개구면의 확대를 가능하게 하여 EIRP(effective isotropic radiated power), 수신 이득 대 잡음 비 G/T(gain to noise temperature ratio)를 최대화 한다. 제작된 안테나는  $\pm 70^\circ$ 까지의 광각 스캔이 가능하다. 안테나 냉각시 냉각수가 전면 냉각판을 통과 후 후면 냉각판을 통과하도록 하는 이중 냉각 구조를 활용하여 냉각 효율을 높였다. 제작된 X-대역 능동위상배열 안테나의 EIRP는 104.04 dBmi 이상, G/T는 테일러 분포에서 7.46 dB/K 이상의 특성을 가진다.

### Abstract

The results of the fabrication of active electronically scanned array (AESA) antennas with low-profile, low-weight, wide-scan, and thermal stability characteristics for aircraft-mounted radar are described. To reduce the size and weight of the antenna, a transmit - receive block is constructed in a quasi-tile structure in which the radio-frequency circuit-related transmit - receive module is a brick type, which is a flat structure, and the control board is a tile type, which is a stacked structure, to reduce the depth of the front of the antenna. In addition, the depth of the rear part of the antenna was reduced by manufacturing power and plate-shaped control-related modules at the rear of the antenna. The reduced antenna depth maximizes the effective isotropic radiated power (EIRP) and gain to noise temperature (G/T) by enlarging the antenna aperture. The manufactured antenna can scan a wide angle of  $\pm 70^\circ$ . The cooling efficiency is improved by using a dual cooling structure that allows the cooling water to pass through the front cooling plate and then through the rear cooling plate. The EIRP of the manufactured AESA antenna is 104.04 dBmi, and G/T is 7.46 dB/K in Taylor weighting.

Key words: AESA, Transmit/Receive Block, Antenna, Airborne Radar, Low-Profile, Wide Angle

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

\*LIG넥스원(주) 레이더연구소(Rader R&D Lab, LIGNex1)

· Manuscript received September 29, 2020 ; Revised October 30, 2020 ; Accepted December 19, 2020. (ID No. 20200929-085)

· Corresponding Author: In-Su Hwang (e-mail: heiinsu@add.re.kr)

## I. 서 론

최근 항공기 탑재 레이더 개발은 AESA(active electronically scanned array) 능동위상배열 레이더를 중심으로 이루어지고 있다. 기존의 기계식 레이더 혹은 PESA(passive electronically scanned array) 수동 위상배열 레이더는 단일 고출력 송신기를 이용하여 고장시 성능 저하에 취약하였다. 하지만 AESA 레이더는 수백~수천 개의 송수신 모듈을 사용하여 일부 모듈이 고장 나더라도 전체 시스템에서는 약간의 성능 저하(graceful degradation)만 가지게 된다<sup>[1]</sup>. 또한 AESA 레이더는 회전하지 않고, 개별 배열 소자의 위상을 변화시켜서 일정한 탐지 영역을 사각 영역 발생 없이, 빠른 빔조향을 할 수 있다. AESA 레이더의 개별 송수신모듈은 각 소자가 송수신 기능을 가지고 있어서, 전파식 빔 조향이 가능하고, 이를 통하여 다중 모드의 동시 운용이나 다중 표적과의 교전 능력 향상도 가능하다<sup>[2][3]</sup>.

AESA 레이더가 항공기에 탑재되기 위해서는 기구, 성능, 기능, 방열 4가지 조건을 만족해야 한다. 기구적 조건으로 안테나가 항공기의 cone 모양의 nose에 장착되기 위하여 소형(low-profile), 경량(low-weight)이어야 한다. 기존에 개발된 항공기용 AESA 레이더는 소형화를 위해 설계를 간략화하였지만, 안테나 후면부가 카드형으로 구성되어서 상대적으로 안테나 후면부 깊이가 깊고, 안테나 전면부에는 plank 구조의 송수신 단위 모듈을 사용하므로 평면 구조의 한계상 안테나 전면부의 깊이가 깊다는 문제점이 있다<sup>[4]</sup>. 성능 조건으로는 한정된 공간의 안테나에서 주요 성능인 EIRP와 G/T값을 최대화 해야 한다. 안테나의 이득은 안테나 개구면의 크기에 비례하므로, 가급적 안테나 개구면이 커야 한다. 기능 조건으로는 탐지 영역을 넓게하기 위하여 넓은 빔 조향 범위(wide angle beam steering)를 만족해야 한다. 마지막으로 방열 조건으로는 안테나에서 발생하는 열에 의한 고온 환경에서 안테나가 정상 동작하기 위하여 열적 안정성을 가져야 한다.

본 논문에서는 기구, 성능, 기능, 방열 4가지 조건을 만족하는 AESA 레이더용 안테나를 설계 및 제작하였다. 기구적으로 소형 경량화를 만족하기 위하여 브릭형과 타일형의 특성을 결합한 quasi-tile 구조의 송수신 블록을 적용

하여<sup>[5]</sup> 안테나 전면부의 깊이를 줄였다. 또한 후면의 제어, 전원 및 구동 모듈을 카드형이 아닌 판형으로 적층하여 안테나 후면부의 깊이를 줄였다. 안테나 깊이를 줄이면서 개구면은 최대화하여 EIRP와 G/T 등의 안테나 성능을 최대화하였다. 기능적으로도  $\pm 70^\circ$ 까지의 넓은 빔 조향이 가능하게 하였다. 안테나 냉각시에는 냉각수가 전면 냉각판을 통과 후 후면 냉각판을 통과하도록 내부에 이중 수냉 냉각 구조를 만들어서 고효율의 열적 안정성도 확보하였다.

## II. Low-Profile AESA 안테나 시스템

본 논문에서는 항공기 탑재가 가능한 low-profile을 위하여 안테나 크기로는 700 mm(지름)×250 mm(깊이) 이하를 설계값으로 만족해야 한다.

### 2-1 일반적인 AESA 안테나 구성

안테나 장치는 그림 1과 같이 크게 3 부분으로 나눌 수 있다. Section 1은 전면부로 복사소자, 송수신모듈, 송수신모듈 제어보드 등으로 구성된다. 중앙의 Section 2는 메인보드와 RF급전조립체로 구성된다. Section 3은 후면부로 전원공급모듈, 제어기, 구동모듈 등으로 구성된다.

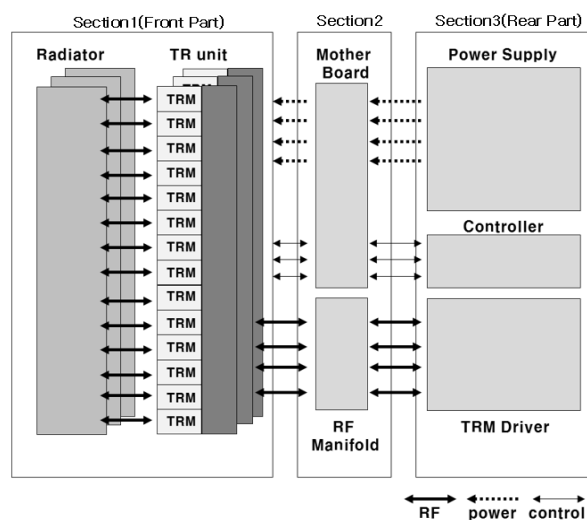


그림 1. 일반적인 AESA 안테나 구성

Fig. 1. Configuration of general AESA antenna.

## 2-2 Low-Profile을 위한 송수신 블록 설계

안테나 장치의 전면은 복사 소자 및 송수신 모듈 등으로 구성된다. 일반적인 송수신 모듈의 구조는 브릭형 또는 타일형으로 나뉠 수 있다. 브릭형 구조는 주로 plank 구조의 송수신 단위 모듈로 구성이 된다<sup>[4]</sup>. 송수신 단위 모듈은 모듈 별로 냉각 구조를 포함해야 하며, 구조의 확장성에 한계를 가진다. 또한 하나의 기관위에 RF 회로 부분, 제어 부분을 모두 포함해야 하므로 기관이 넓어진다는 단점을 가진다.

안테나 깊이 250 mm를 만족하기 위해서는 전면부의 깊이를 최소화 해야 하고, 이를 위하여 송수신 모듈의 RF 회로 부분은 평면형으로 구현하기 쉽고, 제어 부분은 타일형으로 구성하여 확장성이 용이한 quasi-tile 구조의 송수신 블록을 설계하였다<sup>[5]</sup>. 송수신 블록의 제어 회로 등은 집적도가 높은 타일형으로 구성함에 따라 소형, 경량화에 유리하다.

## 2-3 Low-Profile을 위한 안테나 후면의 판형 설계

안테나 장치의 후면은 전원공급모듈, 제어기 및 구동 모듈 등으로 구성된다. 일반적으로 안테나 후면 구조는 카드형과 판형으로 나뉠 수 있다. 카드형은 안테나 장치 후면에 전원/제어 장치 박스가 카드형으로 존재하여<sup>[6]</sup> 고장 시에는 해당 카드만 빼서 쉽게 수리가 용이하다는 장점을 가진다. 하지만 카드형은 개별 카드가 따로 존재하므로, 판형에 비하여 많은 인터페이스를 요구한다. 또한 카드형에서는 전원 공급을 위한 회로가 판형일 때 공통으로 사용 가능한 회로 부분도 각 카드마다 존재해야 하므로 소형화가 어렵다.

카드형의 장점이 있지만 카드 사이즈를 고려하였을 때, 카드형을 적용시에는 설계값인 안테나 깊이 250 mm를 넘게 된다. 깊이 250 mm를 만족하기 위하여 설계된 안테나 장치에서는 카드별로 전원 공급 회로를 따로 설계하지 않고, 판형으로 설계하여 전원 공급 회로를 단일화 하였다. 본 논문에서는 소형, 경량화를 위하여 전원 공급 모듈, 제어 모듈, 구동 모듈 등을 단일 판넬에 적층하였다.

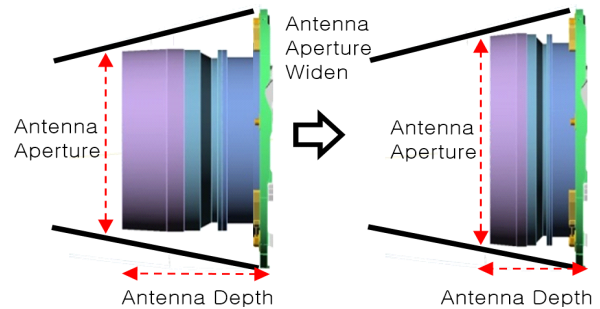


그림 2. 안테나 깊이에 따른 안테나 개구면 크기 비교  
Fig. 2. Comparison of antenna aperture size according to antenna depth.

## 2-4 Low-Profile 안테나의 성능 향상

송수신 블록 설계로 안테나 장치 전면의 깊이를 줄이고, 판형 설계로 안테나 장치 후면의 깊이를 줄임으로써, 안테나 장치 전체의 깊이를 줄였다. 안테나는 항공기 cone 모양의 nose 부분에 장착이 되므로, 그림 2와 같이 안테나 깊이가 작을 때 안테나 개구면이 넓어지게 된다. 안테나 개구면이 넓어지게 되면 안테나 이득의 증가하게 되고, 안테나 주요 성능인 EIRP와 G/T 값이 모두 증가하게 된다. 따라서 안테나 지름 길이 제한인 700 mm에 맞추어서 개구면을 최대화 하였다.

# III. AESA 안테나 설계

## 3-1 안테나 설계 항목

AESA 레이더 안테나 장치에 요구되는 기구, 성능, 기능 및 방열 설계 항목은 표 1과 같다. 수신 빔의 경우에 균일 분포(uniform weighting)와 테일러 분포(Taylor weighting)를 적용하는 경우를 나누었다. 균일 분포를 적용하는 경우는 안테나 장치에서 최대 수신 이득을 얻을 수 있고, 테일러 분포를 적용하는 경우는 안테나의 부엽을 감소시키기 위하여 amplitude를 조절한다.

## 3-2 AESA 안테나 기구 설계

### 3-2-1 전체 구성

능동배열안테나 장치는 송수신장치로부터 입력되는

표 1. AESA 안테나 기구, 성능, 기능, 방열 설계 항목  
Table 1. The structural/performance/functional/heat dissipation requirements of AESA antenna.

Design parameter		Design value
Structure	Size	> 700 mm(diameter) × 250(depth) mm
Performance	EIRP[dBm]	> 103
	G/T[dB/K]	Uniform distribution: 5.7 Taylor distribution: 4.3
Function	Operating frequency	X-band
	Beam steering angle	$\pm 70^\circ$
	Consumption power	< 8,900 W
Heat	Max operating degree	< 7℃

RF 신호를 증폭하고, 처리장치로부터 수신되는 명령에 따라서 빔조향 및 빔형성을 수행하여 방사한다. 또한, 수신된 신호를 저잡음 증폭하여 모노펄스 신호를 생성하고, 송수신장치로 전송하는 역할을 수행한다.

제안한 AESA 안테나의 내부 구성도는 그림 3과 같다. 안테나장치는 안테나복사소자, 송수신조립체, 전면모체판조립체, RF급전조립체, 안테나제어기, 전원공급조립체 등으로 구성된다. 안테나복사소자조립체는 복사소자, 냉각판, 반사판으로 이루어지며, RF 신호를 방사하거나 수신된 신호를 송수신조립체로 전달한다. 송수신조립체는 고출력 송신 및 저잡음 수신 기능을 수행하고, 빔연산 및 크기/위상 등을 가변한다. 전면모체판조립체는 제어/전원 신호를 다수의 송수신블록으로 분배한다. RF 급전조립체는 안테나 개구면을 4개 영역으로 나누어서 송/수신신호를 결합/분배하는 기능을 수행한다. 안테나제어기는 처리

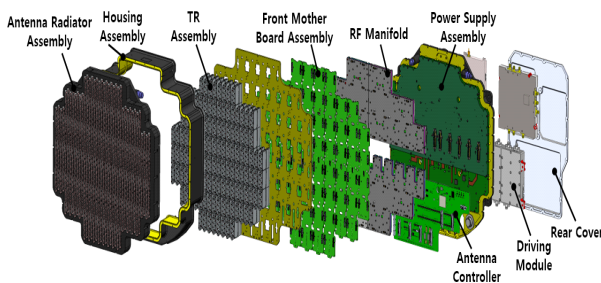


그림 3. AESA 안테나 분해도  
Fig. 3. Disassembly view of AESA antenna.

장치로부터 받은 제어명령을 각각의 송수신블록으로 전송하고, 상태정보를 수집하여 처리장치로 보낸다. 전원공급조립체에서는 전원장치로부터 270 V 신호를 입력받아서 전원을 변환하여 내부 모듈들에 전원을 공급하는 역할을 수행한다.

### 3-2-2 전면 판넬

안테나 전면에는 냉각판이 포함된 복사소자 조립체가 있고, 송수신블록 조립체가 뒤에 연결된다. 복사소자 조립체는 총 1,024채널로 구성되며, 이중 8개는 SLB 채널이다. 송수신블록 조립체를 구성하는 송수신블록은 16채널의 브릭형의 송수신 모듈과 타일형의 제어보드 조립체로 이루어진 quasi-tile 구조이다. 단일 구조의 송수신블록 64개를 배치하여 그림 4와 같은 안테나 aperture 형상을 설계하였다.

### 3-2-3 냉각 설계

AESA 안테나 장치에서는 수냉 방식을 통한 냉각이 이루어진다. 일반적인 안테나 장치의 냉각은 공냉 방식과 수냉 방식으로 나뉜다. 공냉 방식은 구조가 단순하다는 장점이 있지만 냉각 효율이 좋지 못하고, 수냉 방식은 구조가 복잡해진다는 단점은 있지만 냉각 효율이 좋다. 본 AESA 안테나 장치는 1,000개 가량의 송수신 모듈을 활용하여 높은 출력을 내기 때문에 공냉 방식으로는 충분한

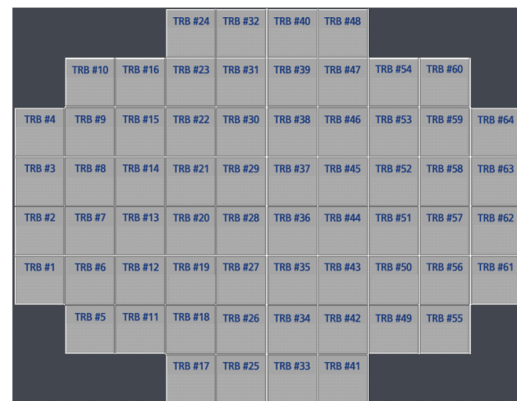


그림 4. AESA 안테나 전면 aperture 설계  
Fig. 4. Front aperture design for AESA antenna.

냉각이 어려워서 수냉 방식을 사용한다.

안테나 장치는 최대 71℃까지 동작을 해야 하는 설계 목표를 가지고 있다. 장치에서의 주요 발열원은 송수신블록내의 HPA와 전원공급모듈의 DC-DC 컨버터이다. 송수신 블록에서는 블록 내부가 아닌 블록의 한쪽 면이 외부 전면 냉각판에서 접촉식으로 냉각이 이루어진다. 사용된 HPA는 성능을 유지하려면 표면 온도가 70℃ 이하가 되어야 하고, DC-DC 컨버터는 표면 온도가 100℃ 이하가 되어야 한다. 수냉 방식에서 냉각수는 EGW(ethylene glycol water)를 사용하였다. 열에 취약한 HPA를 먼저 냉각한 뒤에 온도가 상승한 냉각수를 이용하여 DC-DC 컨버터를 냉각한다. 따라서 냉각수가 안테나 전면판과 후면판으로 나눠져서 들어가지 않고, 그림 5와 같이 전면 냉각판에서 1차 냉각 후 후면 냉각판에서 2차 냉각을 하여 유량을 극대화 할 수 있도록 하였다. 그림 6은 전면 냉각판 유로로, 위에서 냉각수가 들어가서 위로 다시 나오는 구조로 설계하였다. 냉각판에 이중유로를 형성하여 측면에서 보면 위에서 내려온 냉각수가 U자형으로 다시 위로 올라가게 설계하였다. 또한 냉각수가 여러 경로를 통해서 내려오게 될 때 경로 별로 동일한 방열 성능을 낼 수 있도록 경로별 폭을 약간씩 조정하여 방열 성능을 높였다. 그림 7은 설계된 후면 냉각판 유로이다.

### 3-3 AESA 안테나 전기 설계

#### 3-3-1 안테나 배열 설계

능동 위상 배열 레이더의 안테나 설계 시, 복사소자의

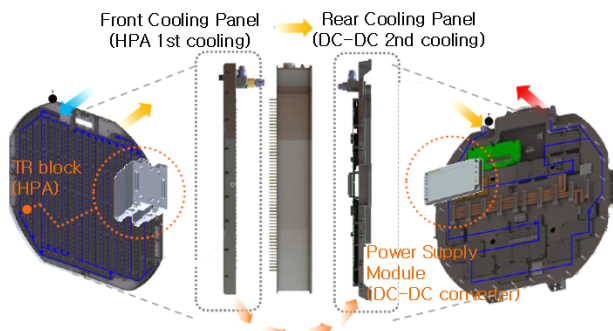


그림 5. AESA 안테나 전면/후면 냉각판 냉각 설계  
Fig. 5. Cooling design for front/rear cooling plate of AESA antenna.

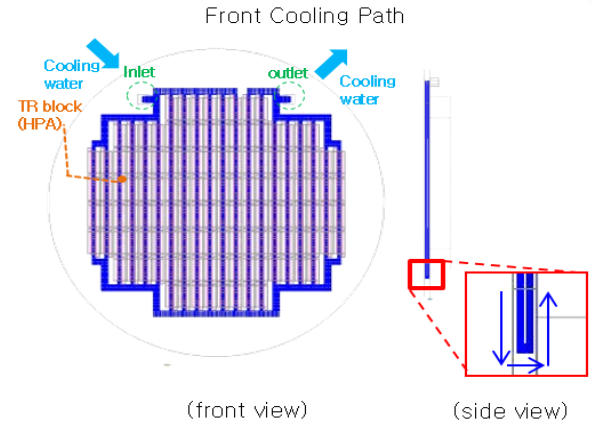


그림 6. AESA 안테나 전면 냉각판 냉각판 유로 설계  
Fig. 6. Cooling design for front cooling plate of AESA antenna.

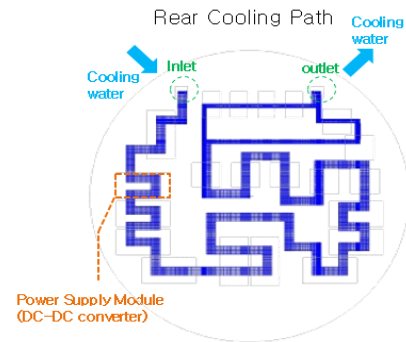


그림 7. AESA 안테나 후면 냉각판 냉각판 유로 설계  
Fig. 7. Cooling design for rear cooling plate of AESA antenna.

배열 구조와 간격을 설정해야 한다. 2차원 평면 배열 안테나의 복사소자 배열 구조에는 삼각 배열과 사각 배열이 있다. 삼각 배열 구조가 사각 배열에 비해 단위 면적당 소자 숫자를 줄일 수 있고, grating lobe 특성이 좋다. 복사소자 간격은 빔조향 범위 안에 grating lobe가 생기지 않는 배열 간격을 만족해야 한다. Grating lobe를 피하면서, 조향 범위가  $\pm 70^\circ$ 인 광각 스캔을 위하여 x 방향 15 mm, y 방향 17 mm 간격을 가진 y-shift 삼각 배열 형태를 사용하였다<sup>[4]</sup>.

높은 EIRP 및 G/T 성능을 만족하기 위하여 안테나의 지름 700 mm 크기에 맞추어서 최대한 많은 수의 복사소자를 배치하여 1,024개의 복사소자를 배치하였다. 다만



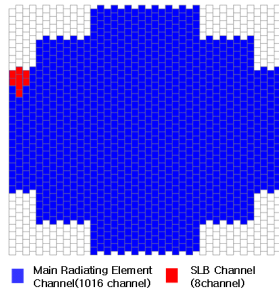


그림 8. AESA 안테나 복사소자 배열구조  
Fig. 8. Radiating element array structure of AESA antenna.

안테나에 주빔(main beam)을 제외한 부엽(side lobe)영역을 제거하기 위한 SLB(side lobe blanking) 채널을 함께 배치해야 한다. SLB 채널을 배치하기 위한 방안은 도파관 형으로 복사소자와 별개로 배치하거나, 복사소자형으로 복사소자 중에 일부를 SLB 채널로 사용할 수 있다. 도파관형으로 구성할 경우 무게가 무거워지므로, 무게 감소를 위하여 SLB 채널은 그림 8과 같이 배열 소자 중 일부 패턴을 활용하여 설계하였다<sup>7)</sup>. 복사소자 중 일부를 SLB 채널로 사용하므로 EIRP 성능이 약간 떨어지지만 trade off에 의하여 패턴 방식을 선정하였다. 총 8개의 채널이 SLB 채널이며, 주빔 영역을 제외한 전 영역에서 SLB 채널의 이득이 더 크도록 설계하였다. 그림 8은 설계된 안테나장치 주 복사소자 배열 및 SLB 채널 구조이다. SLB 배열구조의 위치는 주빔에 영향을 주지 않도록 가장자리에 임의로 배치하였다. 수신빔에서 테일러 분포를 사용할 때는 가장자리에 위치한 소자의 영향이 가장 작아서 끝 쪽에 배치하였다.

### 3-3-2 안테나의 RF 설계

AESA 안테나장치의 RF 부분은 안테나구동모듈, RF급전조립체, 송수신블록으로 구성되며, 블록도는 그림 9와 같다.

송수신 장치로부터 인가된 RF 신호는 구동회로카드에서 1차로 증폭되어, RF급전조립체를 통해 분배되어서 각각의 송수신블록으로 인가된다. 송수신블록에 인가된 송신 RF 신호는 2차 증폭되어 복사소자를 통해서 자유공간으로 방사된다. 그림 10은 AESA 안테나장치의 송신 블록도이다.

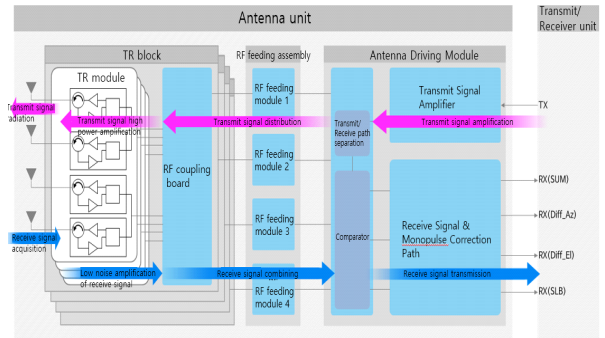


그림 9. AESA 안테나 RF 블록도  
Fig. 9. RF block diagram of AESA antenna.

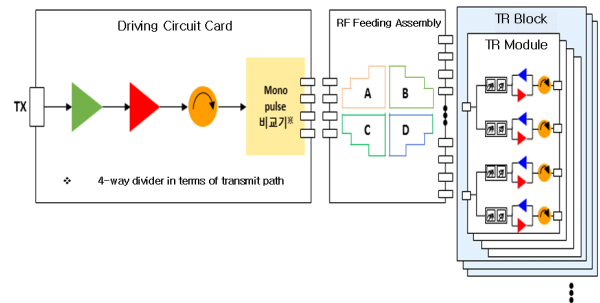


그림 10. AESA 안테나 송신블록도  
Fig. 10. Transmit block diagram of AESA antenna.

표 2에 송신 RF 이득 및 출력 budget을 나타내었다. AESA 안테나장치의 송신 RF 입력 레벨은 10 dBm $\pm$ 2 dB로 규정하였다. 구성품 별 이득에 따른 각 구성품별 출력

표 2. 송신경로 RF budget  
Table 2. The RF budget of transmit path.

Main element	Gain(dB)	Output(dBm)
Cable	-0.5	9.5
Driving circuit card	Transmitter	35
	Monopulse comparator	-9.5 <sup>1)</sup>
Cable	-1	34
RF manifold(16:1)	-15.5 <sup>2)</sup>	18.5
TR block	RF div(8:1)	-11.5 <sup>3)</sup>
	TR module	34
		41

- 1) Dividing loss 6 dB 포함.
- 2) Dividing loss 12 dB 포함.
- 3) Dividing loss 9 dB 포함.

레벨을 기술하였다. 이때 송수신모듈 단에서 최종 출력 레벨은 41 dBm이 된다.

표 3에서는 표 2의 RF budget을 활용하여 EIRP budget을 설계하였다. 항목 별 출력/이득을 합하면, 결과적으로 EIRP: 103 dBm을 설계값으로 얻을 수 있다.

복사소자를 통해 수신된 미약한 신호는 송수신블록에서 저잡음 증폭되고, RF급전조립체와 구동회로카드(Monopulse 비교기 포함)를 통해 SUM, AZ, EL 빔을 형성하여 송수신장치에 전달한다. 그림 11은 AESA 안테나 장치의 수신 블록도이다.

수신 경로의 경우, 균일 분포와 테일러 분포는 송수신 블록 내의 송수신모듈 채널 별 크기 조절을 통해 이루어 지는데, 이에 따른 잡음지수(noise figure)와 이득의 차이가 발생하게 된다. 송수신블록의 경우, 균일 분포는 잡음 지수가 3.8 dB이고, 테일러 분포는 3.83 dB로 차이가 발생하는 이유는 테일러 분포에서 감쇄량이 커서 노이즈처럼 여겨지기 때문이다. 표 4 및 표 5에서는 잡음지수와 이득 차이에 따른 수신 경로 누적(cascade) 잡음지수와 이득을

표 3. EIRP 설계 budget  
Table 3. Budget design of EIRP.

	Output/gain	Unit
Transmit output (1 channel)	41	dBm
TRM number	30	dB(1,016)
Antenna aperture gain	33	dB
Ohmic loss	-1	dB
EIRP	103	dBm

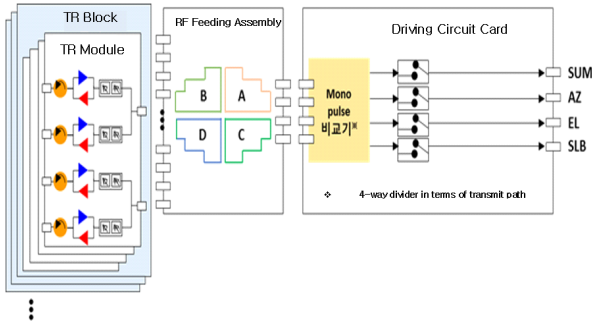


그림 11. AESA 안테나 수신블럭도  
Fig. 11. Receive block diagram of AESA antenna.

표 4. 수신경로(균일 분포) 잡음지수 RF budget  
Table 4. The noise figure RF budget of receive path (uniform weighting).

Main element	NF(dB)	Gain(dB)
TR block(1 channel)	3.8	28
RF manifold	3.5	-3.5
Cable	1	-1
Driving circuit card	Monopulse comparator	3.5
	Receiver	2.5
Cable	0.5	-0.5
Cascade sum	3.83	17

표 5. 수신경로(테일러 분포) 잡음지수 RF budget  
Table 5. The noise figure RF budget of receive path (Taylor weighting).

Main element	NF(dB)	Gain(dB)
TR block(1 channel)	3.83	21
RF manifold	3.5	-3.5
Cable	1	-1
Driving circuit card	Monopulse comparator	3.5
	Receiver	2.5
Cable	0.5	-0.5
Cascade sum	3.99	10

나타내었다.

### 3-3-3 전원 분배/제어 구조 설계

안테나 장치는 입력 전원 분배부에서 270 V를 공급받아, 출력 전원 생성부에서 DC-DC conversion을 통해 주요 부품에 필요한 +28 V, +9 V, +5 V, +/-3 V, GND 전원을 생성한다.

안테나 장치의 소모전력 설계 목표 값은 duty 13%에서 8,900 W 이하를 만족하는 것이다. 표 6은 규격 목표를 만족하기 위하여 duty 13 %에서 모듈 별 소모 전력 budget을 나타낸다. 송수신모듈의 채널당 소모전력 7.095 W에 송수신블록내 채널 개수 16을 곱하고, RF 결합보드 0.85 W 송수신제어보드 1.25 W를 더하면 송수신블록의 소모

표 6. AESA 안테나 모듈별 소모전력 budget

Table 6. Power consumption budget by AESA antenna module.

Consumption power per module		
Element		Consumption power[W]
TR block	TR module (1 channel)	7.095
	RF assembly board	0.85
	TR controll board	1.25
Antenna control circuit card		12.5
Antenna driving circuit card		37.96
Sum of antenna consumption power		7450

전력 115.62 W를 구할 수 있다. 송수신블록 소모전력 115.62 W에 송수신블록 개수 64를 곱하고, 안테나제어회로카드 12.5 W와 안테나 구동회로카드 37.96 W를 합하면 총 소모전력 합이 7,450 W가 되어서 규격 목표 값인 8,900 W 이하를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

AESA 안테나 제어의 주요 기능은 그림 12와 같이 처리장치로부터 명령을 수신해서 안테나 장치의 내부 모듈들을 제어하는 것이다. 명령 수신 후 빔연산을 수행해서 빔형성 및 빔조향을 위하여 송수신모듈의 위상과 크기를 제어한다.

안테나장치에서 빔연산 기능을 제어하는 구조로는 분산형 구조와 집중형 구조가 있다. 안테나 내에서 빔연산

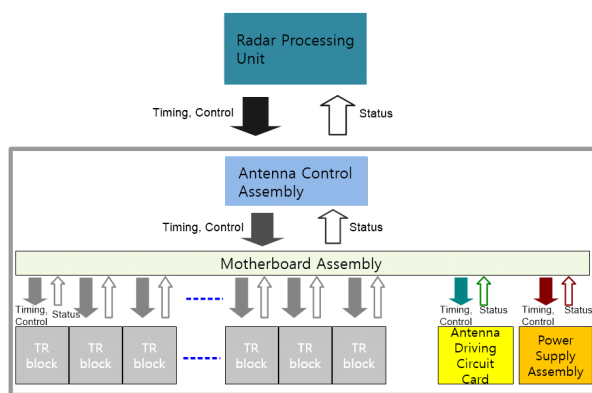


그림 12. AESA 안테나 제어 구조

Fig. 12. Control structure of AESA antenna.

기능을 배열 소자에 분산 배치하는 것이 분산형 구조이고, 빔연산 기능을 별도의 제어기를 두어서 집중하는 것이 집중형 구조이다. 본 논문에서는 분산형 제어 구조를 선택하여, 송수신 블록내에 송수신 모듈 제어를 위한 FPGA가 존재하고, FPGA를 통해서 빔연산 기능을 수행하도록 설계하였다.

### 3-4 AESA 안테나 구성품 설계

#### 3-4-1 복사소자 설계

개별 복사소자는 다이폴 안테나를 이용하여 설계하였다. 복사소자는 다이폴 안테나에 신호 인가를 위한 급전부, 신호 방사하는 다이폴, E/H-plane 방향의 상호 결합성을 최소화하기 위한 director와 E-plane isolator로 구성된다. 복사소자에서는 반사 계수는 최소화하였고, 배열 상태에서 배열 소자간 상호 결합 영향을 최소화 하도록 설계되었다. 또한 LPF(low pass filter)를 급전부에 삽입해서 고차 하모닉 성분을 억제할 수 있도록 하였다. 그림 13은 설계된 단일 복사 소자의 형상이다.

#### 3-4-2 송수신블록 및 안테나 RF구동부 설계

송수신블록은 송신신호 증폭 및 수신신호 저잡음 증폭

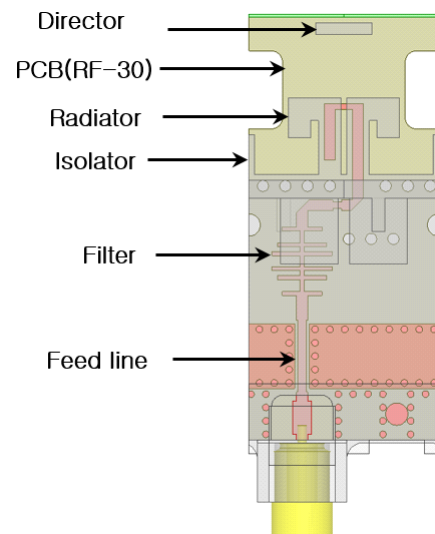


그림 13. 설계된 단일 복사 소자 형상

Fig. 13. Designed single radiation element shape.



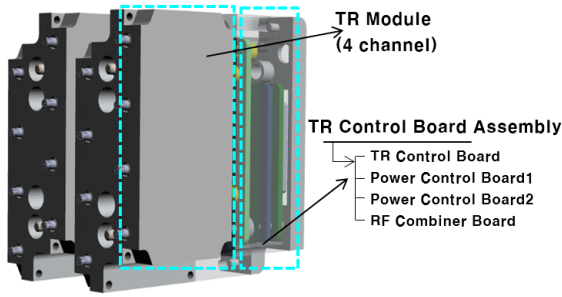


그림 14. 송수신블록 설계 형상  
Fig. 14. Transmit/receive block design geometry.

의 기능을 수행한다. 1개의 송수신블록내에는 16개 채널의 송수신 모듈이 있고, 제어보드 조립체에는 RF 결합기, 전원 및 빔조향 제어를 위한 제어보드로 구성된다. 그림 14와 같이 RF 회로 관련 송수신 모듈은 브릭형으로, 제어 관련 모듈은 타일형 적층 구조로 설계한 quasi-tile 형태이다. 송수신블록은 내부에 수냉 냉각 구조를 포함하지 않고, 냉각판에 한쪽 면이 직접 접촉하여 전도방식으로 냉각이 이루어지도록 설계하였다<sup>[5]</sup>.

송수신블록과 송/수신 신호를 주고받는 RF 구동부는 RF 급전조립체와 구동조립체로 이루어져 있다. RF 급전조립체는 송신신호 분배 및 수신신호 결합 기능을 수행한다. 모노펄스 처리를 위하여 SUM/AZ/EL 채널을 형성해야 하므로 4분면 분할형 구조로 설계하였다. 또한 SLB 기능을 위한 경로를 가지도록 설계하였다.

구동조립체는 RF 급전조립체로부터 입력된 4개의 수신 신호를 이용하여 Sum 채널, AZ 차채널, EL 차채널을 생성한다. 또한 안테나장치의 송/수신 분리 기능을 제공한다.

#### IV. AESA 안테나 시뮬레이션

##### 4-1 냉각 시뮬레이션

안테나 장치에서 설계된 방열 특성을 검증하기 위하여 ICEPAK 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 수행 시 주요 발열 소자인 HPA(high power amplifier), DC-DC 컨버터 등을 사각형 패치의 발열원으로 가정하여 실제 구성품의 위치에 배치하였다. 시뮬레이

션 수행시 외부 환경 온도는 설계 목표인 71℃에서 수행하였다. 그림 15는 전면 냉각판에서의 방열 시뮬레이션 결과이며, 표면 최고 온도가 65.4℃로 HPA 기준온도 70℃를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 가장자리에는 송수신블록이 없어서 송수신블록이 몰려있는 중심부에서 열이 상대적으로 더 높게 올라간다. 그림 16은 후면 냉각판에서의 방열 시뮬레이션 결과로, 표면 최고 온도 52.1℃로 DC-DC모듈 허용 온도 100℃를 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 안테나 장치가 71℃까지 동작해야 하는 설계 목표를 만족함을 확인할 수 있다.

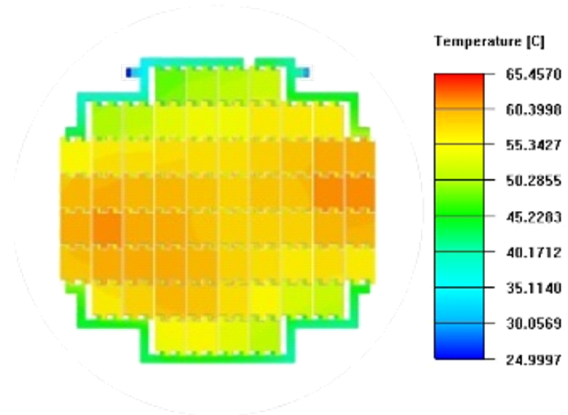


그림 15. AESA 안테나 전면 냉각판 방열 시뮬레이션 결과  
Fig. 15. Heat dissipation simulation result on front cooling plate of the AESA antenna.

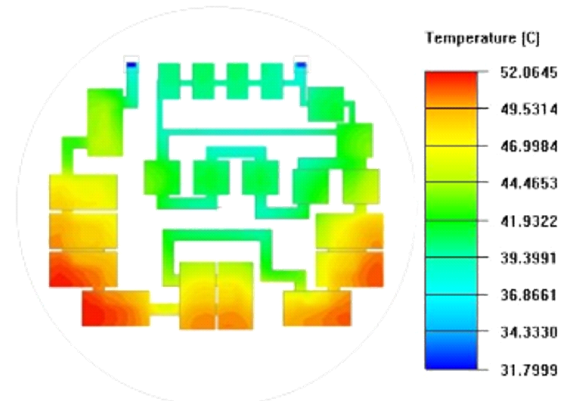


그림 16. AESA 안테나 후면 냉각판 방열 시뮬레이션 결과  
Fig. 16. Heat dissipation simulation result on rear cooling plate of the AESA antenna.

#### 4-2 SLB 시뮬레이션

그림 17은 위에서 부터 주안테나 패턴, SLB 안테나 패턴, (주안테나-SLB안테나) 패턴을 시뮬레이션한 것이다. 주안테나의 패턴에서 SLB 안테나 패턴을 빼면 결과적으로 주빔 부분만 남게 되어서 부엽이 차단되는 것을 확인할 수 있다.

#### 4-3 복사소자 시뮬레이션

복사소자 조립체에서 송신 고조파의 설계값은  $-80$  dBc 이하를 만족하는 것이다. 그림 18의 특성을 가지는 LPF를 급전부에 삽입하여 고차 하모닉을 억제하였다. LPF 적용 전 고조파가  $-42.67$  dBc 발생하였지만 LPF 적용 후 고조파가  $-87$  dBc 발생하여 설계값  $-80$  dBc를 만족한다.

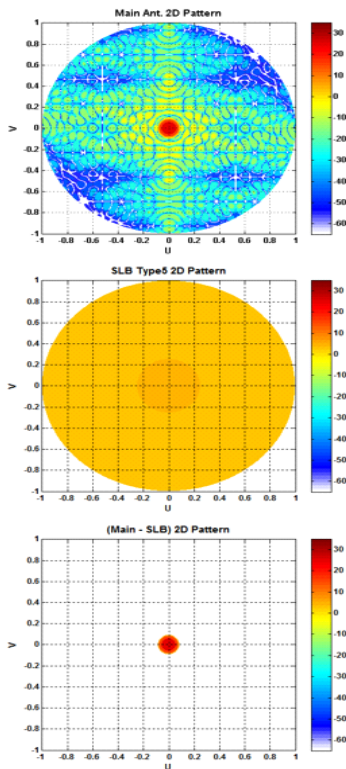


그림 17. 주빔패턴(2D), SLB패턴(2D), 주빔-SLB패턴(2D)  
Fig. 17. Main beam pattern(2D), SLB pattern(2D), main beam-SLB pattern (2D).

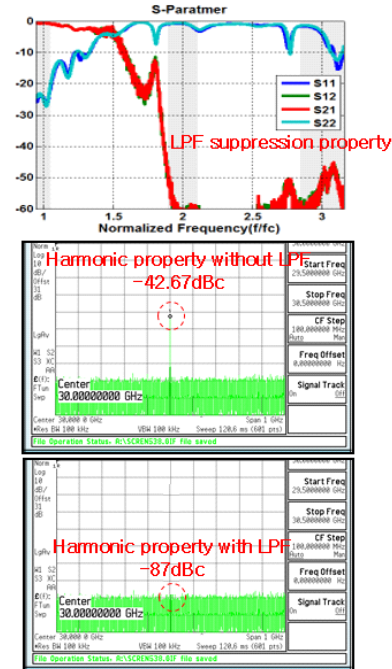


그림 18. 복사소자 LPF 추가를 통한 고조파 억제 시뮬레이션

Fig. 18. Harmonic suppression simulation by adding LPF to radiation element.

복사소자 조립체에서 능동반사손실 설계값은 중심소자를 기준으로  $-5$  dB 이하를 만족하는 것이다. 빔조향 범위가  $\pm 70^\circ$ 인 광각 스캔을 위해서는 능동반사손실  $-5$  dB 이하를 만족해야 하고, 그렇지 않으면 mutual coupling이 발생하여 이를 만족하기 어렵다. 주변에 복사 소자에 의하여 mutual coupling이 발생하게 되면 송수신블록의 HPA의 손상을 일으킬 수 있다. Mutual coupling에 대한 영향을 줄이기 위하여 송수신블록 내에 추가로 이중수신 구조를 구현하여 HPA로 입력되는 VSWR을 상쇄할 수 있도록 하였다. 이러한 점을 고려하여 능동반사손실  $-5$  dB 정도를 만족하게 되면 광각 스캔이 가능하다.

설계된 복사소자의 성능 검증을 위하여  $13 \times 13$  크기의 부배열을 설계하여 성능을 시뮬레이션하였다. 부배열을 통해 능동반사계수를 시뮬레이션은 그림 19의 상단과 같고, 능동반사손실 규격을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 그림 19의 하단은 실제 능동반사계수의 측정 값으로 역시 규격  $-5$  dB 이하를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

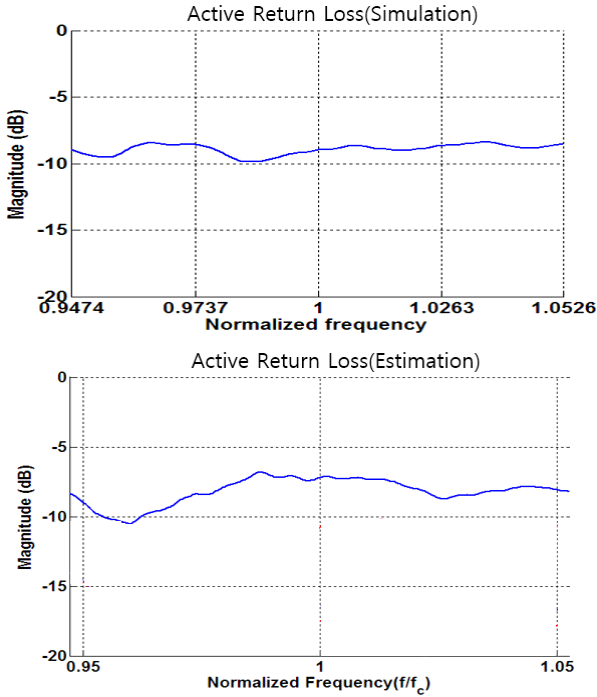


그림 19. 능동반사손실 최대값(중심소자)의 예측(위)/추정 값(아래)  
 Fig. 19. Prediction(up)/estimation(down) of maximum active reflection loss(center element).

#### 4.4 안테나 패턴 시뮬레이션

2D 배열안테나의 정규화 원전계 빔패턴은 식 (1)과 같은 Array Factor를 통해서 예측이 가능하다.

$$AF(kx, ky) = \frac{1}{MN} \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\exp[-jk_0 m \Delta m \sin(ky) - \sin(ky_0)] \times \exp[-jk_0 n \Delta n \sin(kx) \cos(ky) - \sin(kx_0) \cos(ky_0)]] \quad (1)$$

$M$ : 세로 방향 배열소자 개수  
 $N$ : 가로 방향 배열소자 개수  
 $\Delta m$ : 세로 방향 배열소자 간격  
 $\Delta n$ : 가로 방향 배열소자 간격  
 $ky_0$ : y방향 조향 방향  
 $kx_0$ : x방향 조향 방향  
 $k_0$ :  $2\pi/\lambda$  ( $\lambda$ : 파장)

식 (1)의 Array Factor를 이용하여 그림 19~그림 22까지 안테나장치의 정규화된 빔패턴을 예측하였다. 이는 ideal 빔패턴이며, 실제로는 배열 소자간의 크기와 위상의 차이가 발생하며, 이는 부엽의 증가를 야기한다.

그림 20 및 그림 21은 예측 송신 빔패턴(kx/ky) 1D cut 결과이다. 그림 20은 송신 방위각 시뮬레이션 결과로 각각 boresight, 방위각 45°, 60°, 70°로 조향시의 빔패턴이다. 빔조향 범위가 최대  $\pm 70^\circ$ 이므로 빔패턴도 이에 맞춰서 시뮬레이션하였다. 결과로 조향각이 커짐에 따라서 주엽의 peak 값은 점차 낮아지고, 빔폭은 점차 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 그림 21은 송신 고각 시뮬레이션 결과로 각각 boresight, 고각 45°, 60°, 70°로 조향시의 빔패턴이다.

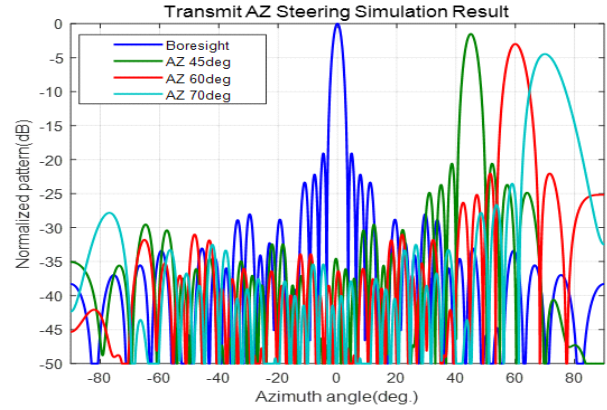


그림 20. 예측 송신 방위각 빔패턴(1차원 단면)  
 Fig. 20. Predicted transmit azimuth beam pattern (1D cut).

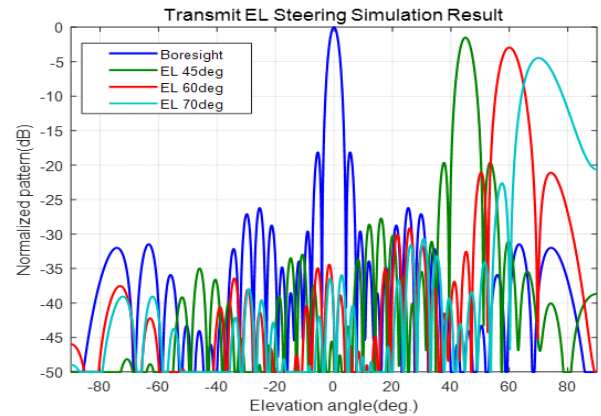


그림 21. 예측 송신 고각 빔패턴(1차원 단면)  
 Fig. 21. Predicted transmit elevation beam pattern (1D cut).

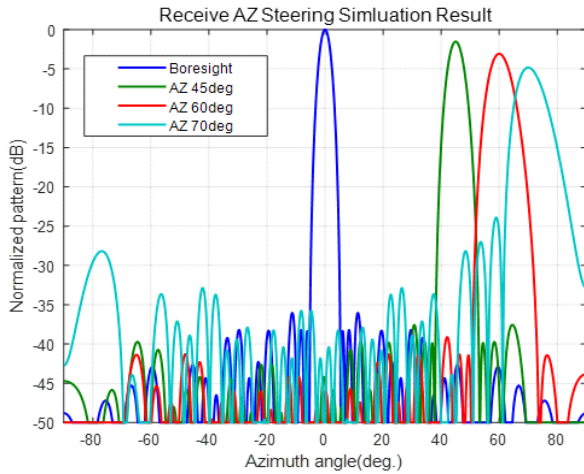


그림 22. 예측 수신 방위각 빔패턴(1차원 단면, 테일러 분포)

Fig. 22. Predicted receive azimuth beam pattern (1D cut, Taylor weighting).

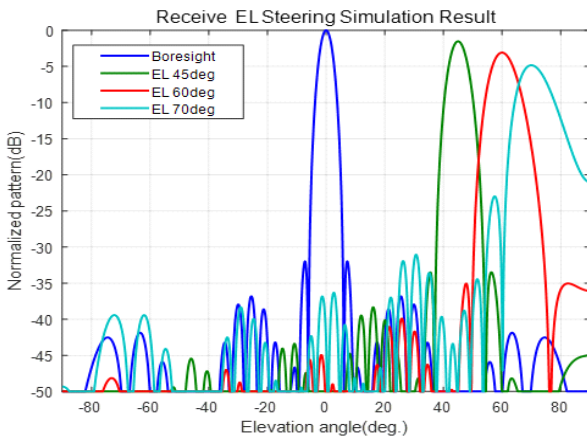


그림 23. 예측 수신 고각 빔패턴(1차원 단면, 테일러 분포)

Fig. 23. Predicted receive elevation beam pattern (1D cut, Taylor weighting).

그림 22 및 그림 23은 테일러 분포에서 예측 수신 빔패턴(kx/ky) 결과이다. 그림 22는 수신 방위각 시뮬레이션 결과로 각각 boresight, 방위각 45°, 60°, 70°로 조향시의 빔패턴이다. 그림 23은 수신 고각 시뮬레이션 결과로 각각 boresight, 방위각 45°, 60°, 70°로 조향시의 빔패턴이다. 공통적으로 조향각이 커지면서 주빔의 peak 값은 낮아지고, 빔폭은 넓어짐을 확인할 수 있다.

#### 4-5 RF 특성 계산

일반적인 수동안테나와 달리 AESA 안테나는 안테나(개구면)와 송신기를 분리하여 측정할 수 없기 때문에 AESA 안테나의 송신출력은 EIRP 분석을 통해서 예측 가능하다. 이는 송수신모듈 채널별 출력, 송수신모듈 송신 채널 수, 안테나의 개구면 이득을 통해서 얻을 수 있다. 본 논문에서 기술하는 AESA 안테나장치의 EIRP 예측값은 표 7과 같다. 이때 주파수에 따라서 안테나 개구면 이득이 달라지므로, X-대역 내에서 가장 낮은 주파수를  $F_L$ , 가장 높은 주파수를  $F_H$ , 중간 주파수를  $F_C$ 로 정의하여 구분하였다.

AESA 안테나의 경우, 수백 ~ 수천개의 송수신모듈이 결합되어 수신 경로를 형성할 뿐 아니라, 수신 입력단이 복사소자로 구성되어 잡음지수를 직접 측정할 수 없기 때문에 수신 성능은 수신 이득 대 잡음비(G/T)로 정의한다. 근접전계 시험 과정에서 안테나 이득을 측정하고, 잡음전력(noise power)를 측정하여 잡음온도(T)로 변환하여 그 값을 획득한다. AESA 안테나장치 수신 budget 분석을 통해 획득한 누적 잡음지수를 잡음온도(T)로 변환하는 식은 다음과 같다. 복사소자의 ohmic loss(A) 2 dB와 수신 budget 분석을 통해 획득한 누적 잡음지수(B) 3.83 dB(균일 분포)를 선형값(linear scale)으로 변환한 noise factor는 식 (2)을 통해 3.82가 됨을 알 수 있다.

$$\text{Noise Factor} = 10^{\frac{(A+B)}{10}} \quad (2)$$

표 7. AESA 안테나 EIRP 예측

Table 7. EIRP prediction of AESA antenna.

Element		Output/gain	Unit
TRM output(1 channel)		41	dBm
TRM Num		30	dB(1,016 ch)
Antenna aperture gain (M&S)	F_L	34.6	dB
	F_C	35	
	F_H	35.5	
Ohmic loss		-2	dB
EIRP	F_L	103.6	dBmi
	F_C	104	
	F_H	104.5	



표 8. AESA 안테나 G/T 예측

Table 8. G/T prediction of AESA antenna.

Element		Output/gain	Unit
Antenna aperture gain (M&S)	F_L	34.6	dB
	F_C	35	
	F_H	35.5	
Noise degree		29.48	dB
G/T	F_L	5.12	dB/K
	F_C	5.52	
	F_H	5.87	

$$\text{잡음온도}(T) = T_0 * (\text{Noise Factor} - 1) + 70 \quad (3)$$

$T_0$ 는 290으로 식 (3)을 통해 획득한 잡음온도는 887.8이며, 이를 dB scale로 변환하면 29.48 dB가 된다. 이를 바탕으로 주파수별 G/T를 예측하면 표 8과 같다.

## V. 안테나 제작 및 시험

### 5-1 안테나 및 구성품 제작 결과

그림 13의 설계된 개별 복사소자를 제작한 것이 그림 24이다. 개별 복사 소자를 활용하여 제작된 복사 소자 조립체는 그림 25와 같다. 그림 3의 순서로 개별 조립체들을 통합하여 안테나 장치를 제작하였다. 그림 26은 제작된 안테나 장치의 측면/정면 사진이다.

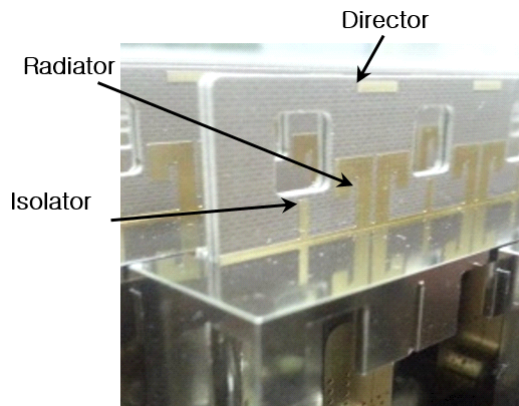


그림 24. 제작된 개별 복사소자

Fig. 24. The implemented single radiation element.

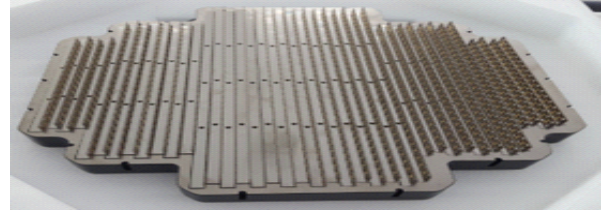


그림 25. 제작된 복사소자 조립체

Fig. 25. The implemented radiation element assembly.

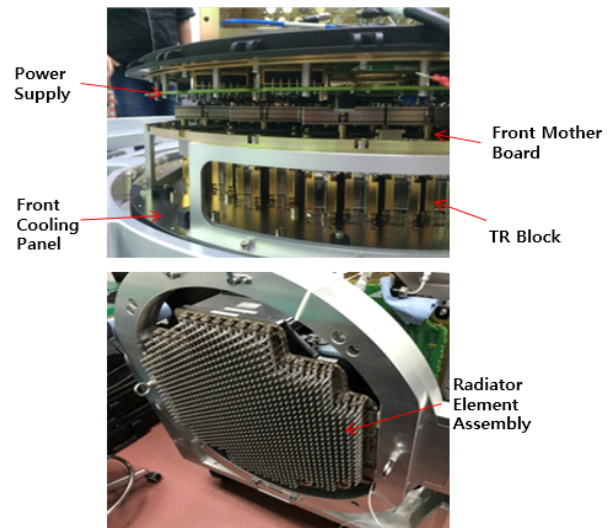


그림 26. 제작된 AESA 안테나 측면(위), 정면(아래) 사진

Fig. 26. The implemented aesa antenna side(top) & front (bottom) view.

### 5-2 안테나 시험결과 및 분석

#### 5-2-1 송수신 패턴 측정 및 분석

안테나의 패턴 및 EIRP, G/T는 근접전계 시험을 통해 확인할 수 있다. 근접전계는 챔버 내 안테나장치 설치 후 기계적 정렬 및 전기적 정렬 이후 빔패턴을 측정하게 된다. 근접전계 시험을 위한 구성은 송신부는 그림 27, 수신부는 그림 28과 같다.

그림 29~그림 32는 그림 20~그림 23까지의 예측된 송수신 빔패턴에 대한 측정 빔패턴을 비교한 결과이다. 그림 29 및 그림 30은 측정된 송신 빔패턴으로 각각 방위 각/고각 방향으로 조향각을 boresight, 45°, 60°, 70°로 변화시킨 결과이다. 그림 31 및 그림 32는 측정된 수신 빔패턴

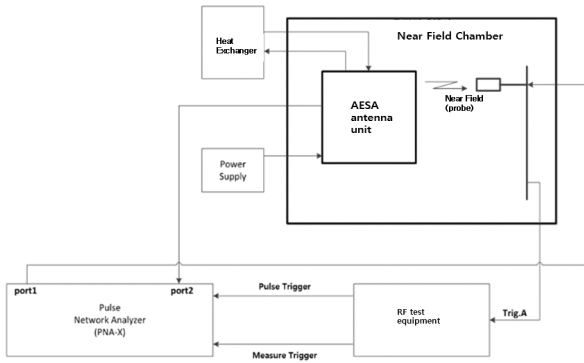


그림 27. 근접전계 시험 구성(송신)  
Fig. 27. Near field test setup(transmit path).

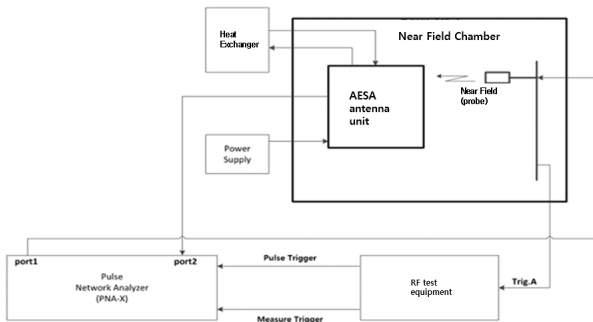


그림 28. 근접전계 시험 구성(수신)  
Fig. 28. Near field test setup(receive path).

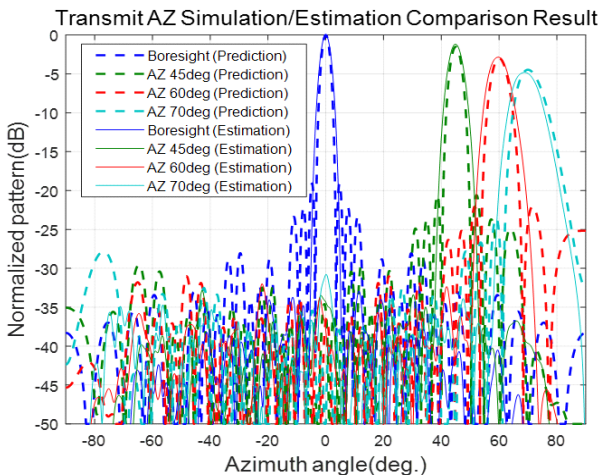


그림 29. 예측/측정 송신 방위각 빔패턴(1차원 단면)  
Fig. 29. Predicted/estimated transmit azimuth beam pattern (1D cut).

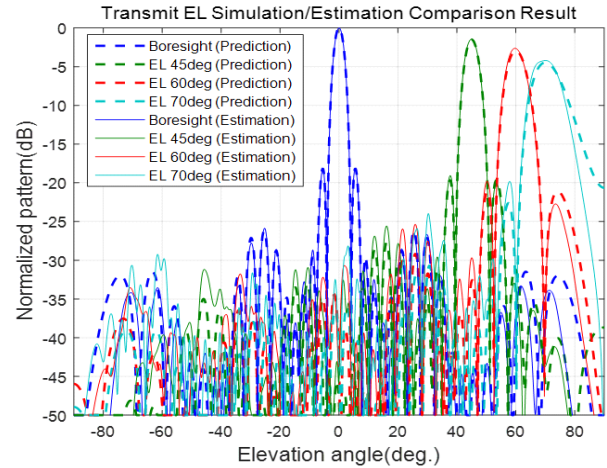


그림 30. 예측/측정 송신 고각 빔패턴(1차원 단면)  
Fig. 30. Predicted/estimated transmit elevation beam pattern (1D cut).

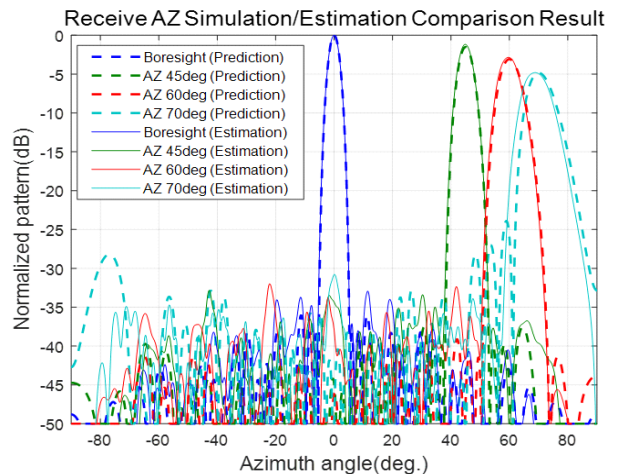


그림 31. 예측/측정 수신 방위각 빔패턴(1차원 단면, 테일러 분포)  
Fig. 31. Predicted/estimated receive azimuth beam pattern (1D cut, Taylor weighting).

으로 각각 방위각/고각 방향으로 조향각을 boresight, 45°, 60°, 70°로 변화시킨 결과이다.

측정패턴을 예측패턴과 비교하였을 때, 주 빔의 빔조향 위치와 빔폭은 거의 유사하고, 부엽에서는 차이를 보인다. 실제 안테나의 기능을 구현하기 위해 근접전계 과정에서 배열소자의 크기와 위상을 일치시키는 정렬과정을 거치게 된다. 이 때 배열소자의 크기와 위상을 일치시



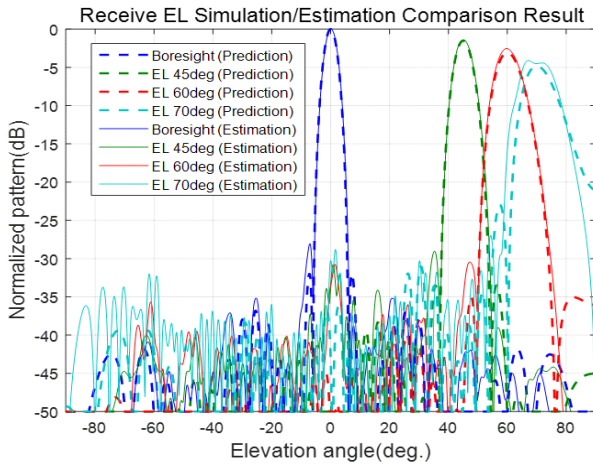


그림 32. 예측/측정 수신 고각 빔패턴(1차원 단면, 테일러 분포)

Fig. 32. Predicted/estimated receive elevation beam pattern (1D cut, Taylor weighting).

키기 위해 배열소자경로에 가변위상기와 가변감쇄기가 사용된다. 또한 빔형성과 빔조향을 위해 배열소자의 위상과 크기를 가변하게 되는데, 이때도 배열소자경로에 가변위상기와 가변감쇄기를 사용한다. 가변위상기와 가변감쇄기의 경우 6-bit 디지털 소자로 구현되며, 이에 따른 양자화 오차와 측정시 발생하는 오차가 존재한다. 이러한 크기, 위상 오차는 부엽 패턴의 오차를 발생시킨다.

안테나를 각도별 빔 조향시 scan loss가 발생하게 되는데, 이론적인 설계값과 실제 측정값이 표 9에 기술되었다. 이론설계값은 scan loss가 조향 각도에 따라서  $\cos$ 으로 감소하는 것으로 가정하여,  $\cos \theta$  값을 dB로 바꾼 값에 추가 1 dB 가량의 마진을 포함하여 계산하였다. 가령  $\cos$

표 9. AESA 안테나 각도별 scan loss 설계값/측정값

Table 9. Scan loss design value/estimated value by angle of aesa antenna.

Component/degree			45°	60°	70°
Design value			< 2.5 dB	< 4.0 dB	< 5.6 dB
Measurement	Transmit	AZ	1.31 dB	3.15 dB	5.12 dB
		EL	1.45 dB	2.63 dB	4.22 dB
	Receive	AZ	1.17 dB	2.84 dB	4.81 dB
		EL	1.39 dB	2.54 dB	4.11 dB

45°을 dB로 바꾸면 1.5 dB가량이 되고, 1 dB의 마진을 포함하면 2.5 dB를 얻을 수 있다. 측정값을 확인하였을 때 모두 설계값 이내를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

## 5-2-2 EIRP & G/T 분석

표 10은 AESA 안테나장치의 EIRP 측정 결과이다. 개구면 이득은 주파수가 낮아질수록 높아지기 때문에 EIRP 규격은 F<sub>L</sub>를 기준으로 설정하였다.

EIRP 예측값과 측정값이 0.4~0.6 dB 이내에서 유사성을 가짐을 확인할 수 있었다. 송수신모듈의 출력은 측정 가능하며, 일반적으로 안테나 개구면 이득의 M&S 정확도가 높음을 가만할 때, EIRP 예측치와 측정치의 차이는 ohmic loss에서 기인할 것으로 예상된다. Ohmic loss는 복사소자 패턴에서 발생하는 손실로 측정이 불가능하다.

표 11은 AESA 안테나장치의 G/T 측정 결과이다. 송신 EIRP 규격과 마찬가지로 개구면 이득과 주파수와 상관관계를 고려하여 G/T 규격 역시 F<sub>L</sub> 기준으로 설정하였다. G/T의 예측값과 측정값의 차이는 ohmic loss와 송수신 블록의 잡음지수를 보수적으로 분석한 것이 원인이라고 예상한다. 세부적으로 예측값을 계산할 때는 기관의 ohmic loss나 복사소자의 Ohmic Loss 등을 보수적으로 worst case를 기준으로 하였다. 잡음지수의 경우에도 주파수에

표 10. AESA 안테나 EIRP 측정값

Table 10. EIRP measurement of AESA antenna.

Freq.	Design value (dBmi)	Simulation value (dBmi)	Measurement value (dBmi)
F <sub>L</sub>	> 103	103.6	104.04
F <sub>C</sub>		104	104.39
F <sub>H</sub>		104.5	105.17

표 11. AESA 안테나 G/T 측정값

Table 11. G/T measurement of AESA antenna.

Freq.	Design value (dB/K)	Simulation value (dB/K)	Measurement value (dB/K)
F <sub>L</sub>	> 4.3	5.12	7.83
F <sub>C</sub>		5.52	7.46
F <sub>H</sub>		5.87	8.65

따라서 편차가 생기고, 여러 송수신블록에 따라서도 잡음 지수 값이 차이가 나는데, 예측값을 계산할 때는 가장 worst case를 기준으로 하였다. 이러한 원인으로 예측값과 측정값에는 어느 정도 차이가 있는 것으로 예상된다. Cascade 시스템의 누적잡음의 경우, ohmic loss와 TR 블록의 잡음지수가 주요한 영향 성분이다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 항공기탑재 레이더용 AESA 안테나를 설계 및 제작하였다. 항공기 탑재를 위하여 기구, 성능, 기능, 방열을 만족하는 안테나를 설계 및 제작하였다. 안테나의 소형 경량화를 위하여 먼저 송수신블록을 브릭형 타입의 송수신 모듈과 타일형 타입의 제어부를 결합한 quasi-tile cubic 구조로 제작하였고, 타일형의 특성으로 안테나 전면부의 깊이를 줄였다. 또한 안테나 후면 제어 및 전원 관련 모듈을 카드형이 아닌 판형으로 설계하여 후면부의 깊이를 줄였다. 감소된 안테나의 깊이로 안테나 개구면을 최대화 하여 EIRP와 G/T 등의 안테나 성능을 높였다. 또한 제작된 안테나는 기능적으로  $\pm 70^\circ$ 까지의 넓은 빔 조향이 가능하다. 냉각 구조도 전면 냉각판을 통과한 냉각수가 후면 냉각판을 통과하는 이중 냉각 구조 덕분에 냉각 효율을 높이고 열적 안정성을 확보하였다.

제작된 안테나의 측정 결과, EIRP는 104.04 dBm 이상, 수신 이득 대 잡음 비(G/T)는 테일러 분포에서 7.46 dB/K 이상으로 설계값을 모두 만족하였다.

## References

[1] Y. R. Lee, J. P. Kim, Y. Kang, and S. J. Kim, "Array error analysis and correction of active array antenna for AESA radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 4,

pp. 414-423, Apr. 2015.

- [2] S. M. Chon, H. G. Na, S. B. Kim, J. W. Lee, D. Y. Kim, and S. J. Kim, et al., "Development of planar active array antenna system for radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 12, pp. 1340-1350, Dec. 2009.
- [3] M. K. Chong, D. Y. Kim, S. K. Kim, S. M. Chon, and H. G. Na, "Development of planar active electronically scanned array(AESA) radar prototype for airborne fighter," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 12, pp. 1380-1393, Dec. 2010.
- [4] S. H. Jang, J. P. Kim, S. J. Kim, and C. Y. Cheon, "Implementation of electronic beam steering system using look-up table calibration method," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 12, pp. 2769-2773, Dec. 2014.
- [5] I. S. Hwang, Y. R. Lee, and S. H. Jang, "Design and implementation of the high efficiency X-band transmit/receive block for scalable active electronically scanned array antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 7, pp. 588-598, Jul. 2020.
- [6] M. Barclay, U. Pietzschmann, G. Gonzalez, and P. Tellini, "AESA upgrade option for eurofighter CAPTOR radar," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 25, no. 6, pp. 15-20, Jun. 2010.
- [7] S. H. Jang, Y. R. Lee, M. C. Kim, S. H. Ryu, and S. J. Kim, "An adaptation of the side lobe blanking function in active array antenna," in *2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Oct. 2019, pp. 980-982.

황 인 수 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4080-2684>



2014년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자  
공학과 (공학사)  
2016년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자  
공학과 (공학석사)  
2016년 2월~현재: 국방과학연구소 연구  
원

[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈 설계,  
능동 위상배열 레이더 시스템 설계, 항공기 레이더

장 성 훈 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3100-0834>



1996년 2월: 서울시립대학교 전자공학과  
(공학사)  
1998년 2월: 서울시립대학교 전자공학과  
(공학석사)  
2015년 2월: 서울시립대학교 전자공학과  
(공학박사)  
1998년 2월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈 설계, 능동 위상배열 레이더  
시스템 설계, 항공기 레이더

이 유 리 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5741-9182>



2005년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학  
사)  
2007년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학  
석사)  
2007년 2월~현재: LIG넥스원 수석연구원  
[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈, 능동  
위상 배열 레이더

김 선 주 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2099-9953>



1986년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학  
사)  
1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학  
석사)  
1988년 2월~현재: 국방과학연구소 수석  
연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, AESA  
안테나 설계, 항공기탐제 AESA 레이더 시스템, 시스템 설계,  
항공기 레이더

김 중 필 [LIG넥스원/소장]

<https://orcid.org/0000-0002-8490-3391>



1998년 2월: 경기대학교 전자공학과(공학  
사)  
1997년~2000년: 단암전자 주임연구원  
2010년 2월: 아주대학교 전자공학과(공학  
석사)  
2000년~현재: LIG넥스원 위성체계연구  
소 소장

[주 관심분야] 반도체송수신모듈, 능동위상배열레이더, SAR,  
위성시스템