

항공기용 평면형 능동 전자주사식 위상 배열(AESA) 레이더 프로토 타입 개발

Development of Planar Active Electronically Scanned Array(AESA) Radar Prototype for Airborne Fighter

정민길 · 김동윤 · 김상근 · 전상미 · 나형기

Min-Kil Chong · Dong-Yoon Kim · Sang-Keun Kim · Sang-Mi Chon · Hyung-Gi Na

요 약

본 논문에서는 T/R(Transmit/Receive) 모듈을 이용한 항공기용 평면형 능동 전자주사식 위상 배열(AESA) 레이더 프로토 타입을 설계, 제작 및 시험하였다. LIG넥스원은 항공기용 레이더 개발에 필요한 핵심 기술 확보를 목적으로 AESA 레이더 프로토 타입을 개발하였다. 본 프로토 타입은 복사 소자 배열, 다수의 T/R 모듈, RF 급전기, 전원 분배, 빔 조향기, 아날로그/디지털 변환기(ADC)를 가지는 소형화된 수신기 및 액냉식 냉각과 지지 구조체로 구성되어 있다. 안테나 장치는 590 mm 직경에, 536개의 능동 소자를 배열할 수 있는 크기를 가진다. 각 T/R 모듈들은 삼각 배열을 적용하여 14.7 mm×19.5 mm 간격으로 배치하였다. 송신 최대 듀티 운용시 2,310 W의 전력이 입력되며, 발열은 1,554 W를 발산하게 된다. AESA 레이더 프로토 타입은 근접 전계 챔버에서 시험하였고, 그 결과 정확하고 유연한 제어에 의한 빔 조향과 빔 형성을 제공하는 빔 패턴을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper presents a design, fabrication and the test results of planar active electronically scanned array(AESA) radar prototype for airborne fighter applications using transmit/receive(T/R) module hybrid technology. LIG Nex1 developed a AESA radar prototype to obtain key technologies for airborne fighter's radar. The AESA radar prototype consists of a radiating array, T/R modules, a RF manifold, distributed power supplies, beam controllers, compact receivers with ADC(Analog-to-Digital Converter), a liquid-cooling unit, and an appropriate structure. The AESA antenna has a 590 mm-diameter, active-element area capable of containing 536 T/R modules. Each module is located to provide a triangle grid with 14.7 mm×19.5 mm spacing among T/R modules. The array dissipates 1,554 watts, with a DC input of 2,310 watts when operated at the maximum transmit duty factor. The AESA radar prototype was tested on near-field chamber and the results become equal in expected beam pattern, providing the accurate and flexible control of antenna beam steering and beam shaping.

Key words : AESA Radar, T/R Module, Airborne

I. 서 론

바야흐로 ‘능동 전자주사식 위상 배열(AESA: Active Electronically Scanned Array)’ 레이더 시대가 활

짝 열리고 있다. 제1차 세계대전(1914~1918년) 기간 중 무기 동기화(gun synchronization)가 공중전에 대 혁신을 일으킨 것과 같이, AESA 레이더 기술을 기반으로 한 전투기 사격 통제 장치의 출현은 향후 비

LIG 넥스원 ISR연구센터(LIG NEX1 ISR R&D Lab)

· 논문 번호 : 20100729-101

· 교신저자 : 정민길(e-mail : mkchong01@lignex1.com)

· 수정완료일자 : 2010년 11월 12일

약적인 기술 발전을 가져올 것으로 기대된다^[1].

AESA 원리는 잠자리(또는 곤충)류의 눈에서 찾을 수 있다. 잠자리류들은 10,000~30,000개의 낱눈(lenslets)으로 구성된 복잡한 눈(복안)을 가지고 있다. 낱눈들은 3차원 구조에 흩어져 있기 때문에 높이와 각도가 다른 곳에서 움직이는 물체를 감지할 수 있다. AESA 레이더가 바로 낱눈 구조의 레이더이다. AESA 레이더의 원판 위에는 손가락 크기 정도의 T/R 모듈이 500~1,500개가 방위각, 고각 방향으로 일정하게 배열되어 있으며, 이 T/R 모듈들이 잠자리의 낱눈들처럼 각각의 목표물들을 동시에 탐지, 추적한다. AESA 레이더는 일반 기계식에 비해서 뛰어난 점이 많다. 우선 기계식이 안테나 스캔 영역에 따라 시차가 발생하는데 비해서 AESA 레이더는 회전하지 않더라도 충분한 영역을 스캔할 수 있어 일정한 영역을 지속적으로 조향할 수 있고, 빔 형성 능력도 보다 균일하고 T/R 모듈이 각각 고속 프로세서에 연동되어 있기 때문에 방향 전환과 추적을 고속으로 수행할 수 있게 된다. 따라서 빠르게 이동하는 적이나 미사일도 신속하게 추적할 수 있다. 기계식 레이더는 적이나 미사일이 전투기 기체에 근접할 때 사각 지역이 생기지만, AESA 레이더는 가까이 올 경우 사각 지역 없이 모두 탐지 가능한 장점 또한 있다. AESA(능동 전자주사식 위상 배열) 레이더는 종래의 기계식 레이더처럼 송신부와 수신부가 따로 분리되어 있는 게 아니라, 작은 송수신(T/R) 모듈 수천 개가 레이더 전반부에 장착되어 여러 가지 기능을 수행한다. 익히 알려진 AESA 레이더 기술 장점으로는 높은 신뢰성과 정비성, 점진적 성능 완화(graceful degradation), 향상된 탐지 거리, 동시 다기능 그리고 표적 탐지 후 추적 및 통합 센서를 향해 다가오는 이동체 예측, 재밍 및 통신 능력 등이 있다. 최근 가격 경쟁력이 높아진 AESA 기술은 오늘날 새롭게 등장하는 대부분의 전투기 체계에 꼭 갖추어야 하는 요소라 할 수 있다^{[2],[3]}.

전투기용 AESA 레이더 설계에 있어서 가장 우선적으로 고려되어야 하는 사항은 SWaP(size: 크기, weight: 무게, power: 소모 전력), 가격 및 방열 등이다. 무게 부분에서는 첨단 소재를 이용하여 소형/경량화되는 추세이며, 가격 부분은 GaAs MMIC 기술의 발전으로 T/R 모듈의 크기와 가격을 줄일 수 있

다. 그리고, 단위 면적당 고발열로 인해 방열에 있어서는 수냉이 대부분 적용되고 있다. T/R 모듈을 포함하는 레이더 안테나부는 전체 레이더 가격의 60~70%를 차지하며, 계속되는 MMIC 기술 발전 추세로 비용 부분은 더욱 개선될 것으로 기대된다^[4].

능동 전자주사식 위상 배열(AESA: Active Electronically Scanned Array) 레이더는 빔을 송신하고 수신하는 T/R 모듈이 안테나에 다수 배열된 레이더로써, 각 소자가 송수신 기능을 갖고 있기 때문에 원하는 방향으로의 송신 빔을 생성하거나 특정 빔의 수신 및 모드 변경 등을 개별적으로 수행할 수 있어 빠른 빔 조향, 다수의 빔 제어를 통한 다중 모드(multi-mode) 동시 운용, 신뢰도 향상, 포착하기 어려운 목표에 대한 지속적 감시와 추적, 무게 감소, 스텔스 능력 향상, 탐지 거리와 탐지 범위 확대, 동시 다표적(multi-target) 교전 능력 향상 등의 장점이 있다. 한 가지 단점이라면 단위 면적당 열이 집중되어 발열량이 많고 냉각이 어려워서 부피가 크고 복잡한 액냉식 냉각 장치(liquid cooling system)를 갖추어야 된다. 따라서 냉각 장치가 복잡해지고, 비용이 많이 소요되는 단점이 있지만 AESA 레이더 장점을 위해 감수해야 하는 부분이다^{[5],[6]}.

AESA 레이더는 전투기의 임무 수행에 필요한 공중전(공대공), 공대지 및 공대해의 운용 모드를 갖추고 목표물에 대한 탐지, 추적 및 화기 통제 기능을 수행한다. 특히, 조종사에게 필요한 정보를 전방 상향 시현기(Head-Up Display: HUD)나 다기능 시현기(Multi-Function Display: MFD) 등에 도시할 수 있도록 획득 정보를 전송하는 전투기의 가장 중요한 센서이다. AESA 레이더는 전투기 시스템의 주 센서로 성공적인 임무를 위해 공대공(Air-to-Air) 모드, 공대지(Air-to-Ground) 모드, 공대해(Air-to-Surface) 모드, 대전자전(ECCM) 모드, 자체 점검(Built-In-Test) 기능 및 다중화(Redundancy) 관리를 수행할 수 있어야 한다^{[5],[7]}.

본 논문에서는 전투기용 능동 전자주사식 위상 배열(AESA) 레이더에 필요한 소요 기술을 획득하기 위해 항공기의 전기적 및 기계적 인터페이스를 고려하여 소형/경량의 AESA 레이더 프로토 타입을 자체 개발하였다. 논문의 II장에서는 AESA 레이더의 주요 전기적/기계적 인터페이스를 고려하여, 주요 구

성품을 설계한다. 주요 구성품은 T/R 모듈을 이용한 안테나 장치, RF/처리부, 전원공급기 및 냉각 장치의 설계에 대해 기술하였고, III장에서는 제작된 하드웨어 시제품을 이용하여 근접 전계 시험실에서 전자적 빔 조향 특성을 시험을 통해 확인하였다. 그리고, IV장에서는 결론을 내리도록 한다.

II. AESA 레이더 프로토 타입 설계

2-1 AESA 레이더 설계

본 논문의 설계 목표는 평면형 능동 전자주사식 위상 배열(AESA) 레이더 프로토 타입을 개발하여 항공기 탑재 가능성을 확인하기 위해 전기적 및 기계적 인터페이스를 먼저 확인하고, 실시간 빔 형성 및 빔 조향을 확인하는 성능 시험을 목표로 한다. 본 논문에서 제안하는 AESA 레이더 프로토 타입 구조 및 블록도는 그림 1과 같다. AESA 레이더 프로토 타입은 AESA 안테나 장치, RF/처리 장치, 냉각수 순환 장치로 구성되어 있다.

AESA 안테나 장치는 T/R 모듈과 복사 소자로 구성되는 1차원 T/R 단위 모듈, 부배열 급전기, 빔 조향기, 제어 및 타이밍 인터페이스, 지지 및 냉각 구조체, 그리고 전원 공급기로 이루어져 있다.

RF/처리 장치는 여자기(exciter), 4채널 수신기, 신호 처리기로 구성되어 있다. 여자기는 다중 모드 파형 발생 신호, 보정 신호와 수신기 및 신호 처리기 기준 클럭 신호를 생성·분배하여 준다. 수신기는 4채널을 가지고 있으며, 각 채널은 모드에 따라 광대역(공대지해 모드) 및 레이더 모드 신호를 수신하

여 IF단까지 주파수 하향 변환을 하고, 또한 각 채널은 디지털 감쇄 소자를 두어 STC(Sensitivity Time Control) 기능을 수행한다. 신호 처리는 COTS(Commercial Off-The-Shelf) 보드를 기반으로 획득된 신호를 분석하여 상황 판단에 의한 각종 기능 수행에 있어서 성공적으로 제어되는 것을 확인하고, 차체 점검 상태를 모니터링하게 된다.

냉각수 순환 장치는 AESA 안테나 장치에서 발생하는 열과 RF/처리 장치, 전원 공급기 및 냉각제 펌프에서 발생하는 열을 방열한다. AESA 안테나 장치는 액냉식 냉각 시스템을 사용하고, 안테나 장치의 열을 냉각수 순환 장치로 전달하고, 펌프와 열교환기를 통해 열을 방출한다.

주 전원 공급 장치는 3상, 400 Hz, 115 V의 항공기 교류 전원을 270 V 직류로 변환한다. 변환된 직류 전원은 각 장치로 전달되어 각 부 체제 레벨에서 필요한 전원을 생성하여 공급된다.

본 논문에서 개발한 AESA 레이더 프로토 타입은 핵심 기술 확보가 목표이며, AESA 레이더 프로토 타입에서는 항공기에 장착되어 완전 체계 시제품에 적용 가능성을 확인하기 위한 것이 목적이다. 실제 항공기 탑재되는 모델에서는 T/R 모듈이 1,000개 급으로 이루어지지만, 본 개발에서는 미래 장착될 시스템에 바로 적용 가능한 확장성 있는 구조 개발에 초점을 둔 개발이어서, 일반적인 체계 규격(탐지 거리, 추적 거리 등) 도출보다는 항공기 개구면의 전기적/기계적 인터페이스, 방열 성능 및 AESA 레이더 응용을 위한 기능적 요구사항을 표 1과 같이 도출하였다.

2-1-1 능동 전자주사식 위상 배열(AESA) 안테나 장치

안테나 장치는 고속 빔 조향이 가능한 능동 전자주사식 위상 배열 특성을 가지고 있고, 구조는 그림 2, 3과 같다. 크기는 590 mm(개구면 직경)×258 mm(길이)로써 항공기 기계적 인터페이스에 적합한 구조로 설계하였다. AESA 안테나 장치는 536개 T/R 모듈을 가지는 T/R 단위 모듈, 부 배열 급전기, 보정 경로 급전기, 인터페이스 및 안테나 장치 제어 보드, 전원 공급기, 지지 및 냉각 구조체로 구성되어 있다.

2-1-1-1 복사 소자 및 배열 구조

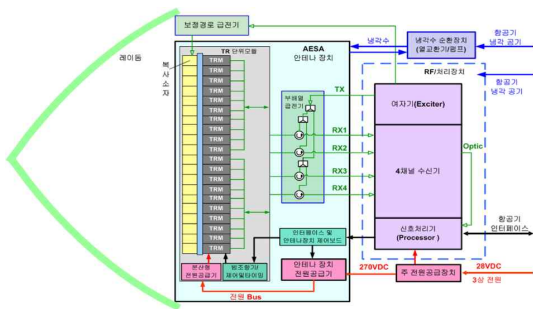


그림 1. 능동 전자주사식 위상 배열(AESA) 레이더 프로토 타입 기능 블록도

Fig. 1. Functional block diagram of AESA radar prototype.

표 1. AESA 레이더 프로토타입 주요 성능 파라미터

Table 1. Key performance parameters of AESA radar proto-type.

항 목		개발 목표 규격
1. 안테나 구조		능동 전자주사식 위상 배열
2. 동작 주파수		X-대역
3. 송신 듀티		33 %(Max.)
4. 송신 펄스 폭		40 us(Max.)
5. PRF(Pulse Repetition Frequency)		150 kHz(Max.)
6. 송신 첨두 전력		10 W/모듈당
7. 잡음 지수		4 dB 미만 @T/R 모듈
8. 배열 수		500개급
9. 송신 빔 패턴	빔 폭(방위각/고각)	3.73°±10 % / 4.68°±10 %
	이득	32.9 dB
10. 수신 빔 패턴	빔 폭(방위각/고각)	4.3°±10 % / 5.49°±10 %
	이득	31.9 dB
11. 수신 채널 수		4채널
12. 소모 전력	안테나 장치	2.243 kW
	RF/처리 장치	440 W
	냉각수 순환 장치	800 W
13. 크기	안테나 장치	590 mm(개구면 직경)×258 mm(길이)
	RF/처리 장치	254 mm(너비)×230 mm(높이)×457 mm(길이)
	냉각수 순환 장치	275 mm(너비)×350 mm(높이)×500 mm(길이)

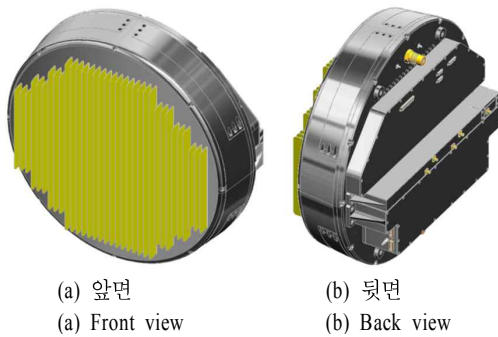


그림 2. AESA 안테나 장치 구조
Fig. 2. Structure of the AESA antenna.

능동 전자주사식 위상 배열 레이더 설계 시 그레이팅 로브(grating lobe)를 피하면서 원하는 빔 패턴을 효율적으로 방사하기 위해서는 먼저 배열 구조 및 간격을 설정해야 한다. 그레이팅 로브가 발생하는 각도를 θ_p 라고 하면, 다음의 식에서 그레이팅 로브가 발생하는 조건을 알 수 있다^{[8],[9]}.



그림 3. AESA 안테나 배열 조립도
Fig. 3. Exploded view of AESA antenna array.

$$\sin \theta_p = \sin \theta_0 + \frac{p\lambda}{d} \Rightarrow \frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{1 + \sin \theta_0} \quad (1)$$

$\sin \theta_p$ 가 1 이상이 되는 조건, 즉 배열 간격이 식 (1)의 우측 조건을 만족할 때, 그레이팅 로브가 발생하지 않는다. 조건식에 알 수 있듯이 그레이팅 로브가 발생하는 조건은 배열 간격(d), 파장(λ), 빔 조향각(θ_0)에 의해 결정되며, 2차원 배열에서는 방위각/

고각 방향으로 빔 조향과 배열 구조 및 배열 간격을 동시에 고려해야 한다. 배열 구조에서 그레이팅 로브 발생 영역을 비교하여 보면 같은 배열 간격일 경우, 사각 배열 구조에서 그레이팅 로브 발생 영역이 더욱 많이 발생하게 된다. 일반적으로 빔 조향 범위가 넓은 AESA 레이더에서는 공간을 효율적으로 사용하면서 그레이팅 로브를 피하기 위해서 삼각 배열 구조를 많이 사용한다^{[10]~[12]}.

본 논문에서 배열을 경제적으로 구성할 수 있는 삼각형 구조를 적용하였고, AESA 레이더의 일반적인 빔 커버리지가 방위각/고각 $\pm 60^\circ$ 근처인 것을 감안하여 삼각형 구조의 배열 간격이 $dx=19.5\text{ mm}$, $dy=14.7\text{ mm}$ 이하일 경우에는 그레이팅 로브가 발생하지 않는 것을 시뮬레이션으로 확인하고, 배열 간격은 $dx=19.5\text{ mm}$, $dy=14.7\text{ mm}$ 로 설정하였다^[13].

단일 복사 소자는 테이퍼 슬롯(tapered slot) 구조인 비발디(vivaldi) 형태를 사용하여 T/R 단위 모듈과 일체형으로 제작함으로써 제작/조립이 용이해지고, 광대역 특성을 구현한다. 단일 복사 소자 구조는 그림 4와 같고, 모의 해석한 방사 패턴은 그림 5와 같다.

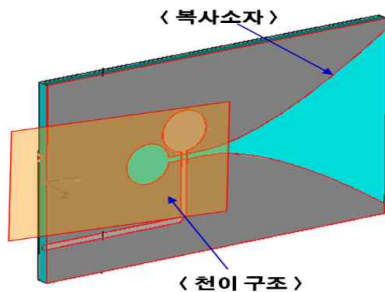


그림 4. 비발디 복사 소자 구조
Fig. 4. Structure of vivaldi radiator.

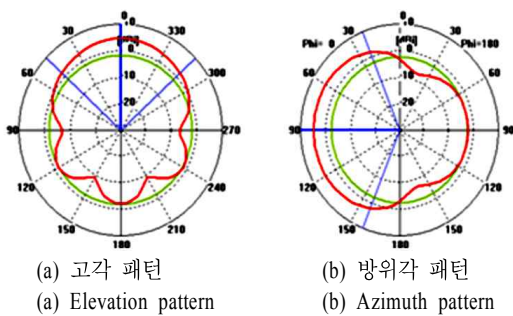


그림 5. 복사 소자 패턴 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation result of the radiation patterns.

표 2. 복사 소자 파라미터
Table 2. Parameters of radiator.

항 목	개발 목표 규격
1. 이득	4.9 dBi(최대)
2. 방사 효율	0.99
3. 반사계수(S_{11})	-15 dB 이하
4. 빔 폭(고각/방위각)	95°/ 135°

복사 소자 기능적 파라미터들은 표 2와 같다. 특히, 본 논문에서 제안하는 스트립 비발디 구조는 적층 구조가 가능하여 점검 신호 경로를 추가하는데 아주 용이한 구조이다^[14].

2-1-1-2 T/R 단위 모듈

T/R 단위 모듈은 안테나 장치의 가장 핵심 조립체로서 그림 6에서와 같이 복사 소자, T/R 모듈, 빔 조향기, 급전기, 제어/전원 분배기, 냉각 수로 및 하우징 조립체로 이루어진다. T/R 단위 모듈은 20배열, 16배열, 12배열, 8배열 T/R 단위 모듈들이 각각 16조, 6조, 6조, 6조로 이루어진다. 급전기는 RF 신호를 각 T/R 모듈에 분배 및 결합하여 신호를 송신하거나 수신하는 기능을 가진다.

AESA 안테나에 있어서 가장 핵심 소자인 T/R 모듈의 블록도는 그림 7과 같다. AESA 레이더의 위상 배열 안테나 빔은 T/R 모듈 출력들의 합으로서 형성되고, 각각의 개별적 모듈의 위상과 크기를 조절하여 빔 스캔을 한다. T/R 모듈은 AESA 안테나 장치에서 많은 부분을 차지하고 있기 때문에 전기적/기계적 인터페이스를 간략화하여 소형화되고 경량화된 간단한 인터페이스로 구현되어야 한다. 특히, 7개 MMIC(스위치 3개, 이득 증폭기 2개, 위상변위기, 디지털 감쇠기) 기능을 대신하는 고집적화된 단일 core chip MMIC를 적용하여 소형 경량화할 수 있다. 또한,

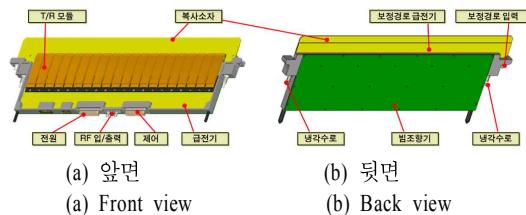


그림 6. T/R 단위 모듈 조립체(20 배열)
Fig. 6. T/R unit assembly with T/R module(20 array).

표 3. T/R 모듈 개발 목표 규격

Table 3. The specification of T/R module.

항 목	개발 목표 규격	비 고	
1. 동작 대역	$F_0 \pm 5 \% \text{ GHz}$		
2. 송신	1) 송신 출력	$\geq 40 \text{ dBm}$	Max.
	2) 송신 펄스 평탄도	0.6 dB 미만	
	3) 송신 펄스 폭	40 us	Max.
	4) 송신 이득	37 dB 이상	
	4) 듀티	10 % 이상	
3. 수신	1) 잡음 지수	3 dB 미만	
	2) 수신 이득	$32 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$	
	3) RMS 위상 오차	1.5°	6 bits / 5.625° step
	4) RMS 이득 오차	0.5 dB	5 bits / 0.9 dB step
4. 전력 소모	4.3 W @ duty 10 %		
5. 효율	26 %		
6. 발열량	2.9 W @ duty 10 %		
7. 크기	16.5 mm×5 mm×67 mm	넓이×높이×길이	
8. 무게	15 g 이하		

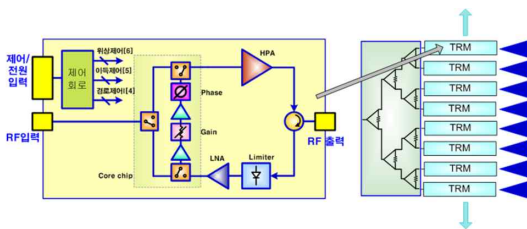


그림 7. T/R 모듈 블록도

Fig. 7. T/R module block diagrams.

단일 칩으로 위상 오차와 감쇠 오차를 획기적으로 줄일 수 있다. 항공기용으로 적용이 가능하도록 표 3과 같이 T/R 모듈 성능 파라미터를 도출하며, 무엇보다도 SWaP(size: 크기, weight: 무게, power: 전력 소모)를 고려해서 크기는 소형화, 무게는 경량, 전력 소모는 낮게 구현되도록 하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 성숙 단계에 있는 갈륨비소(GaAs) MM-IC를 적용한 T/R 모듈을 설계/제작한다.

항공기용 레이더 시스템의 빔 제어는 특정 운영 모드에서 낮은 부엽 조건을 만족하기 위해서 정확한 위상 및 이득 제어가 요구되어진다. 또한, 빠른 빔 조향이 가능해야 되기 때문에 제어 명령 전송 및 계산시간을 줄이기 위해 분산형 빔 조향기를 적용하여

빔 계산을 수행한다^[13]. 본 논문에서 전기적/기계적 인터페이스를 간략화하여 소형/경량의 LRU 단위의 빔 조향기를 최소화 하였다.

2-1-1-3 부 배열 급전기

부배열 급전기 설계는 쉽게 과소 평가되는 부분이지만, AESA 레이더의 전반적인 사양에 영향을 주는 중요한 부분이다. 부 배열 급전기는 송신 및 수신 동작 시 모든 T/R 모듈에 동일한 위상과 이득이 전달되도록 설계되어야 한다. 또한, 부배열 급전기는 일정 모듈들을 묶어서 하나의 부분 집합체를 형성하여 레이더 운용에 필요한 채널을 형성한다. 종래의 레이더에서 많이 볼 수 있는 합, 차 채널을 이용한 모노펄스 구조가 그 대표적인 예이다. 최근 적용 빔 형성 등과 같이 많은 수신 채널이 필요로 하게 되고 있으며, 부 배열 급전기 채널 수가 증가하게 되어 급전기 설계가 AESA 레이더 설계에 있어서 중요한 요소로 대두되고 있다. 특히, 다채널 부배열 구조를 필요로 하는 항공기용 레이더에 적용 가능하기 위해서 급전기 구조는 소형화되고 있다^[15].

2-1-1-4 전원 공급기

AESA 레이더용 전원 공급기는 T/R 모듈에 낮은 전압을 공급하고, 빔 조향기 및 수신기에도 전원을 공급할 수 있어야 한다. 공급되는 전압은 낮은 리플과 노이즈로 반드시 안정화 되어야 하고, 레이더 시스템에 요구되는 깨끗한 스펙트럼 특성을 가져야 한다. 특히, 536개 T/R 모듈에 전력을 집중적으로 공급하는 데는 항공기 탑재에 많은 어려움이 따른다. 여러 인터페이스 특성 등을 고려해 볼 때 분산형 구조 방식으로 전력을 공급하여야 하며, 신뢰성 측면에서 다중화 기능을 가지게 되어 안정적으로 동작할 수 있다²⁾.

2-1-2 RF/처리 장치

RF/처리 장치는 RF 장치 부분인 4채널 수신기 및 아날로그 변환/디지털 변환(ADC/DDC) 모듈, 여자기(exciter), 송수신 제어기 및 전원 공급기와 처리 장치 부분인 신호 처리기로 구성되어 있다. 여자기는 다중 모드 파형 발생 신호, 보정 신호와 수신기 및 신호 처리기 기준 클럭 신호를 생성하여 분배하여 준다. 수신기는 4채널을 가지고 있으며, 각 채널은 모드에 따라 광대역(공대역/해 모드) 및 레이더 모드 신호를 수신하여 IF단까지 주파수 하향 변환을 하고, 또한 각 채널은 디지털 감쇄 소자를 두어 STC (Sensitivity Time Control) 기능을 수행한다. 수신기부터 입력된 IF 신호는 A/D 변환기를 거쳐 디지털로 변환되고, 직접 신호 변환 방식의 디지털 복조 처리(DDC)를 거쳐 기저대역의 I/Q 신호로 복조하는 기능을 수행한다. 광 전송을 통해 전달된 I/Q 신호 처리는 COTS 보드를 기반으로 획득된 신호를 분석하여 상황 판단에 의한 각종 기능 수행에 있어서 성공적으로 제어되는 것을 확인하고, 차체 점검 상태를 모니터링하게 된다. RF/처리 장치는 VME(Versa Module Eurocard) 버스 기반의 개방형 구조로 되어 있다. RF/처리 장치 블록도는 그림 8, 수신기 블록도는 그림 9와 같다.

2-1-3 냉각수 순환 장치

AESA 레이더의 운용 시 열적 안전성 확보를 위하여 방열 시스템 구성이 필요하다. 방열 시스템은 장치 구성 요소인 냉각수 순환 장치, T/R 단위 모듈,

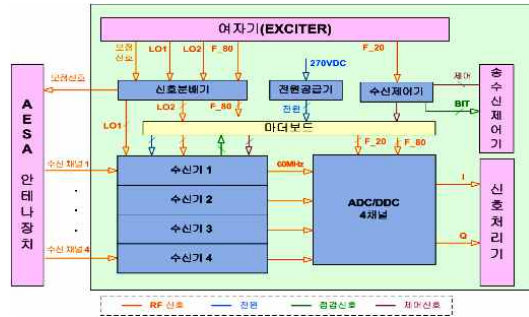


그림 8. RF/처리 장치 블록도
Fig. 8. Block diagram of RF and processor.

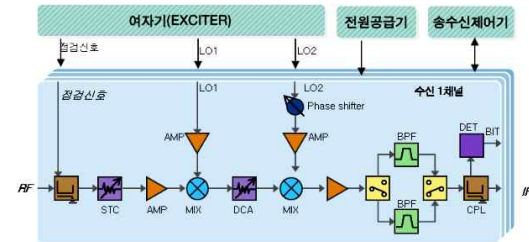


그림 9. 다채널 수신기 블록도
Fig. 9. Block diagram of multi-channel receiver.

냉각수 매니폴드로 구성된다. 냉각수 순환 장치에서 공급되는 냉각수는 안테나 장치 하우징의 상부 매니폴드에 연결되며, 매니폴드에서 각각의 T/R 단위 모듈로 분기되게 된다. 각각의 T/R 단위 모듈을 냉각시킨 냉각수는 하부 매니폴드에서 모이지며, 다시 냉각수 순환 장치로 연결되게 되는 구조로 되어 있다. 매니폴드 및 T/R 단위 모듈과 연결되는 커넥터는 자동 밀봉식(self-sealing) 커넥터를 사용하여 커넥터 분리 시 자동적으로 입구가 닫혀서 냉각수가 흐르지 않도록 하는 구조로 설계 및 제작하였다. AESA 안테나 장치의 냉각 구조는 그림 10과 같고,

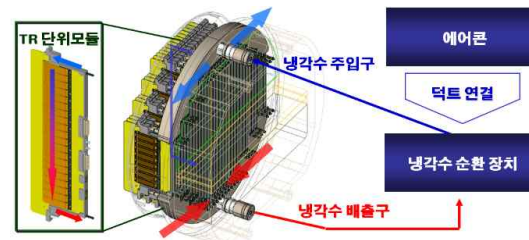


그림 10. AESA 안테나 장치의 냉각 구조
Fig. 10. Cooling mechanism of AESA antenna.

표 4. 냉각수 순환 장치의 사양

Table 4. The specification of liquid heat-exchanger.

항 목	개발 목표 규격	비 고
1. 냉각 능력	3 kW	duty 10 % 기준
2. 냉각수 순환 유량	15 LPM	
3. 냉각수 토출 압력	0.05 MPa	
4. Size	275 mm×350 mm×500 mm	넓이×높이×길이

냉각수 순환 장치의 사양은 표 4와 같다.

III. 제작 및 시험 결과

3-1 안테나 장치

본 논문에서 항공기 탑재가 가능하도록 전기적 기계적 인터페이스를 고려하여 설계/제작된 X-대역 AESA 레이더용 안테나 장치 형상은 그림 11과 같다.

제작된 안테나 장치에서 각 단위 모듈은 출력 40 dBm 이상의 T/R 모듈로 구성되며, T/R 모듈의 전원/제어/방열을 효율적으로 하기 위해서 분산형 구조의 T/R 단위 모듈 단위로 구성하였다. 20배열, 16배열, 12배열, 8배열 T/R 단위 모듈들이 각각 16조, 6조, 6조, 6조로 구성된다. 각각의 단위 모듈들은 그림 13과 같이 단일 LRU(Line Replaceable Unit)로 되어 있어 단위 모듈별로 한 번에 장착 가능한 구조로 되어 있다 특히, 안테나 장치에는 536개의 T/R 모듈을 제어하기 위한 제어 인터페이스, 공급되어야 하는 전원 인터페이스 RF 입/출력 인터페이스 및 단위 면적당 발열량이 밀집되어 있는 방열 인터페이스가 집약되

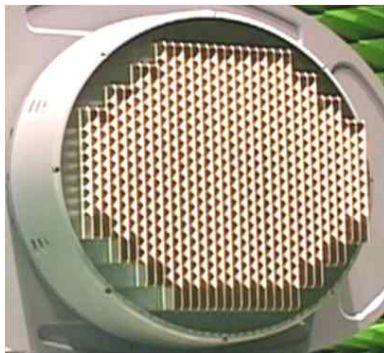


그림 11. 제작된 AESA 안테나 장치
Fig. 11. Photo of AESA antenna.

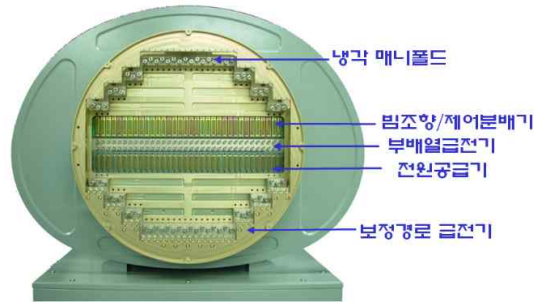


그림 12. AESA 안테나 장치 내부 구조
Fig. 12. Inside of AESA antenna.

는 구조여서 전기적/기계적 인터페이스를 보다 간략화해야 한다. 본 논문에서는 그림 12와 같이 T/R 단위 모듈에 분산형 구조의 기능들이 구현되어 전기적/기계적 인터페이스가 한 번에 체결되는 구조로 설계/제작되었다.

T/R 단위 모듈은 비발디 타입의 복사 소자(그림 13), T/R 모듈(그림 14), 빔 조향기, RF 분배/합성기 및 전원/제어 분배기로 구성되어 있다. 복사 소자는 스트립 구조의 광대역 특성을 갖고, 보정 경로 구조를 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있고, 측정 결과는 해석한 결과와 유사함을 확인하였다. T/R 모듈은 목표한 모든 사양을 만족하였으며, 특히, 그림 15와 같이 송신 출력은 40 dBm 이상을 만족함을 측정으로 확인하였다. 무게는 15 g으로 기존 개발된 T/R 모듈보다 경량화되고, 효율은 26 %로 고효율화 되었다.

제작된 T/R 단위 모듈은 그림 16과 같다. 또한 T/R 단위 모듈에 바로 장착되는 구조여서 조립과 배열 간격을 맞추는데 아주 용이하다. T/R 단위 모듈에는 각 모듈들의 크기/위상을 제어하기 위해서 빔 조향기와 전원/제어분배기가 후면에 형성되어 있다. T/R 단위 모듈은 탈 장착이 용이하도록 모든 인터페이스가 같은 면에 형성되어 있기 때문에 쉽게 조립

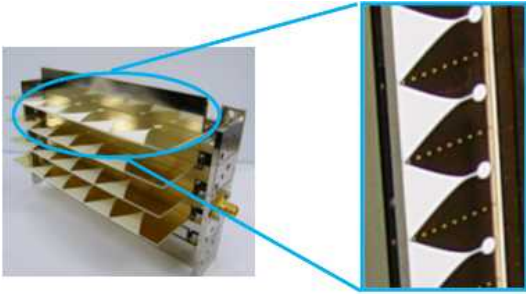


그림 13. 제작된 비발디 복사 소자
Fig. 13. Photo of vivaldi radiator.

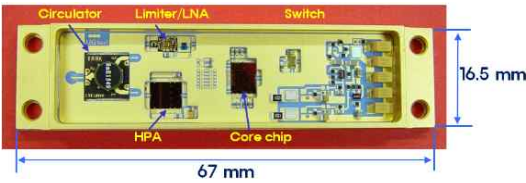


그림 14. 제작된 T/R 모듈
Fig. 14. Photo of T/R module.

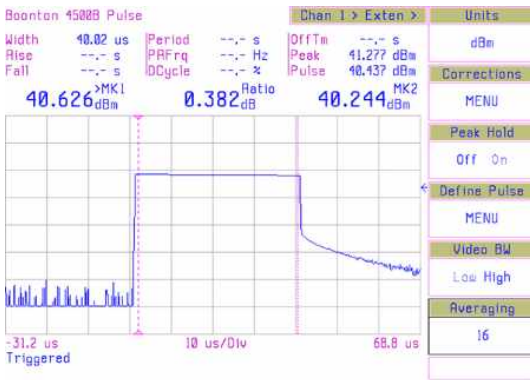


그림 15. 송신 출력 측정 결과
Fig. 15. The result of transmit power.

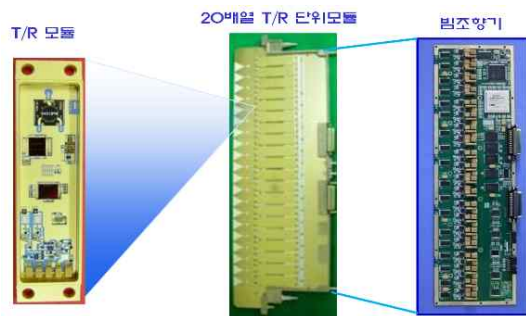


그림 16. 제작된 T/R 단위 모듈
Fig. 16. Photo of T/R unit assembly.



그림 17. 제작된 전원 공급기
Fig. 17. Photo of power supply.

이 가능하다.

그림 17은 제작된 전원 공급기 형상이다. 전원 공급기는 536개의 T/R 모듈에 전원을 공급하기 위해서 분산형 구조의 낮은 전압을 공급하게 된다. 특히, 전기적/기계적 인터페이스를 간략히 하여 LRU 단위의 체결이 가능한 구조로 설계되어 있는 것이 큰 특징이다.

3-2 RF/처리 장치

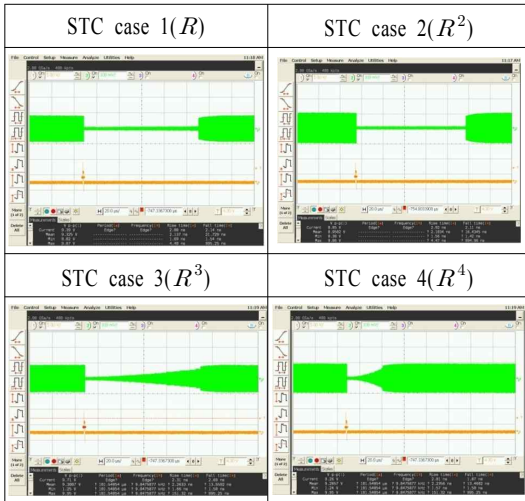
그림 18은 제작된 RF/처리 장치의 형상이다. 크기는 254 mm(너비)×230 mm(높이)×457 mm(길이)로서, 내부에 총 12개의 모듈들로 설계/제작되었다. 구조는 바닥면이 모기판 조립체로 되어 있고, 나머지 모듈들이 표준 인터페이스를 가지며, 너비가 모두 같은 크기(6U 크기)로 되어 있는 것이 가장 큰 특징이다. 모듈을 표준 크기 및 인터페이스를 적용하여 향후 확장이 가능하도록 하였다. RF 장치인 수신기, 스위치 모듈, 분배기 모듈, 여자기(파형/주파수 합성기), ADC/DDC 복조기 등은 HMIC로 소형/경량화 하였고, 전원 공급기 또한 6U 크기로 표준 인터페이스를 갖도록 제작하였다. 신호 처리기는 상용 SBC(Single Board Computer) COTS 제품을 사용할 계획이며, 이



그림 18. RF/처리 장치 형상
Fig. 18. Photo of RF and processor.

표 5. STC 감쇄 곡선

Table 5. The attenuation curve of STC.



번 핵심 기술 확보에서는 제외되었다.

제작된 RF 장치의 수신기 STC(Sensitive Time Control) 기능 시험은 표 5에서와 같이 설계된 대로 구현됨을 확인하였다. 수신 신호는 근거리 클러터 특성을

으로 인해 수신기가 포화되는 현상을 방지하기 위해 근거리 수신 처리 구간 동안 일정한 감쇄를 주어 수신기가 정상 동작할 수 있게 하는 기능이 STC 기능이다. STC는 지형 또는 클러터 특성 등 송신 펄스 신호 간의 구간 특성을 고려하여 STC 지수 곡선을 적용한다.

또한 파형 발생기에서는 다양한 운용 모드에 필요한 여러 가지 파형 또한 양호한 출력 특성을 표 6에서와 같이 확인하였다.

3.3 냉각수 순환 장치

그림 19는 제작된 냉각수 순환 장치의 형상이다. 크기는 275 mm(너비)×350 mm(높이)×500 mm(길이)로서 항공기 장착에 적합하도록 소형화 하였고, 항공기 외부에서 강제 공랭된 공기를 에어 덕트를 통해 냉각수 순환 장치로 받아들여 차가운 냉각수를 만들게 된다. 이 액냉식 냉각 시스템을 이용해 안테나 장치의 열을 방열하게 된다. 냉각수 순환 장치는 펌프와 열교환기를 통해 열이 방출된다.

표 6. 파형 발생기 측정 결과

Table 6. Measurement result of waveform generator.

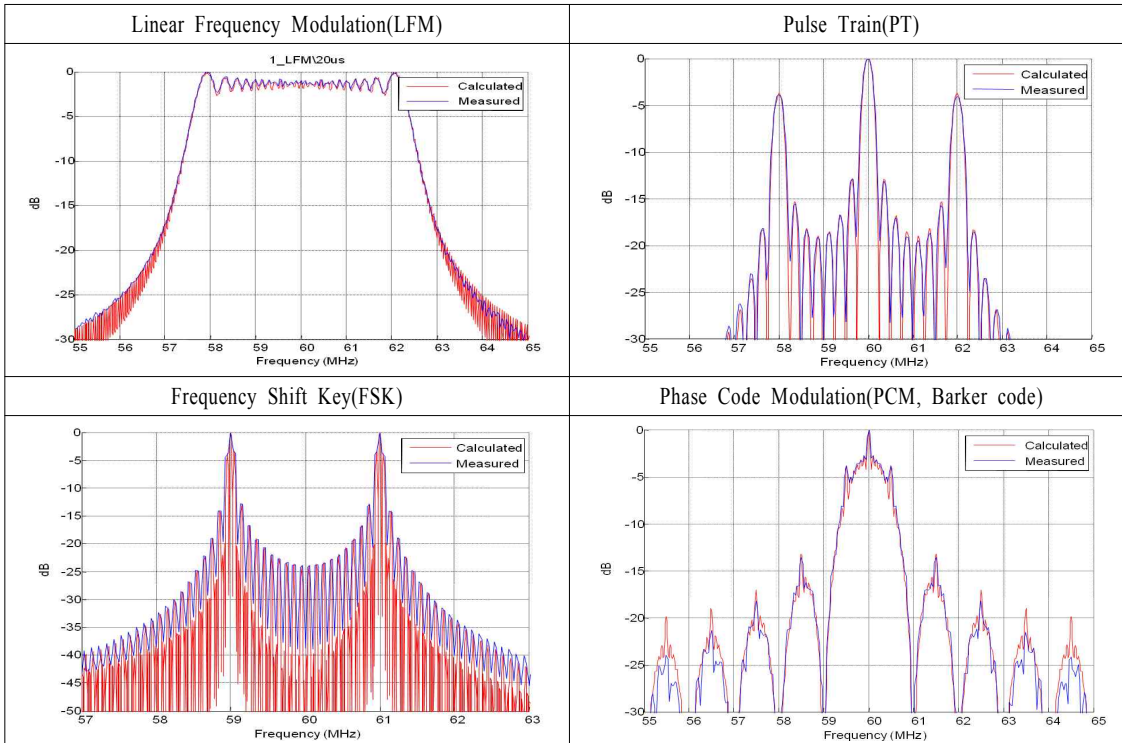




그림 19. 냉각수 순환 장치 형상
Fig. 19. Photo of heat exchanger.

본 개발에서 제작된 냉각수 순환 장치는 536개 급의 T/R 모듈을 방열할 수 있는 냉각 능력, 유량, 냉각수 토출 압력 등이 만족하는지 안테나 장치에서 확인 시험을 하였고, 목표 성능을 만족함을 확인하였다.

3-4 근접 전계 시험

AESA 레이더에서 가장 중요한 시험 중 하나가 고속 빔 조향 및 빔 형성을 확인하는 것이다. 이를 위해서 근접 전계 측정 시설을 사용하여 빔 조향 기능을 확인하고, 안테나 패턴을 측정하였다. 챔버 내

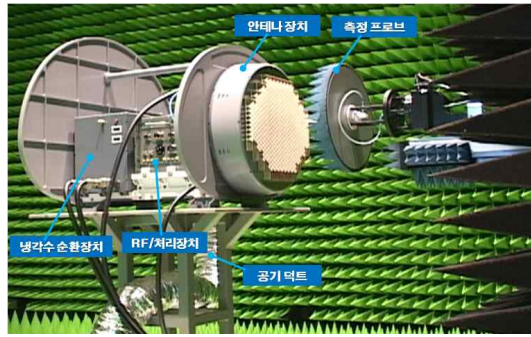
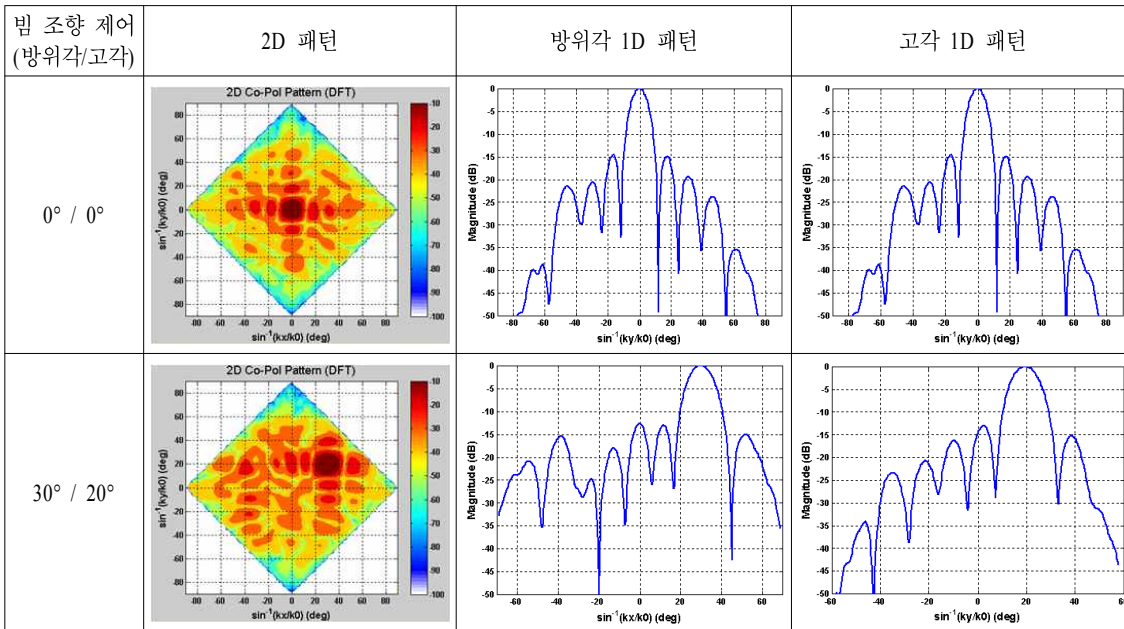


그림 20. AESA 레이더 프로토타입의 근접 전계 측정
Fig. 20. Near-field measurement of AESA radar prototype.

장치 구성도는 그림 20과 같다. 근접 전계 측정은 3차원 안테나의 전기적 특성을 외부 환경을 배제하여 근거리 측정을 통해 분석하는 시스템이다. 안테나의 근접 전계를 측정하여 획득한 이득 및 위상 정보를 FFT 알고리즘을 이용하여 원 전계(far-field) 데이터로 변환한다.

본 개발에서는 AESA 레이더 안테나 장치의 성능, 구조, 제어 기능 및 인터페이스 등을 확인하기 위해서 T/R 모듈을 전체 536개급에서 실체는 19 % 정

표 7. 송신 패턴 측정 결과
Table 7. Transmit pattern results.



도 장착하고, 나머지 부분은 50 Ω으로 터미네이션 시켰다.

3-4-1 송신 패턴

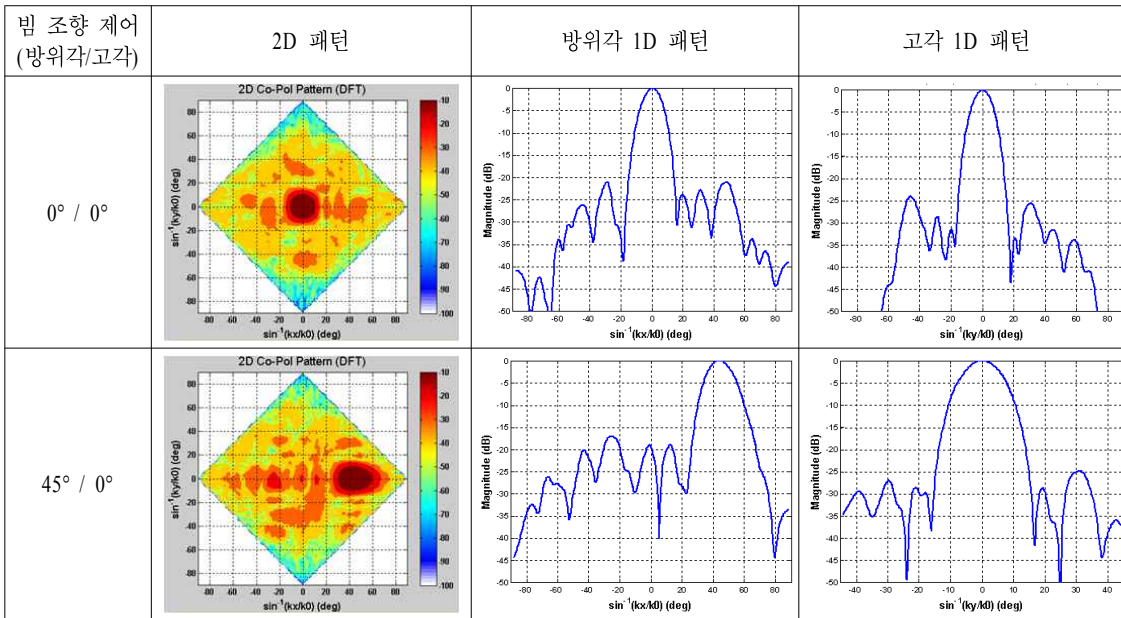
송신 빔은 균일(uniform) 분포를 사용하여 빔 조향의 정확도와 빔 형성 제어를 확인하였다. 또한 AESA 레이더 안테나에서의 송신 출력은 EIRP(Effective Isotropically Radiated Power)를 통해 확인하였다. 측정 결과는 표 7, 8과 같다.

측정된 EIRP와 예측된 EIRP 차이는 0.67 dB 발생하였으며, 원인은 각 T/R 모듈과 복사 소자의 손실이 모두 동일하지 않고 약간의 차이가 발생하여 오차가 나타난 것으로 판단된다. 그리고, T/R 모듈의 개수가 소량이어서 더 많은 오차가 나타난 것 같다.

표 8. 송신 EIRP
Table 8. Transmit EIRP.

	예측값	비고
Directivity	24.7 dB	
복사 소자 손실	1.5 dB	
총 출력	40 dBm × 100개 = 60 dBm	
예상 EIRP	24.7 dB - 1.5 dB + 60 dBm = 83.2 dBm	
측정 EIRP	82.53 dBm	예측값과의 차이: 0.67 dB

표 9. 수신 패턴 측정 결과
Table 9. Receive pattern results.



3-4-2 수신 패턴

수신 결과는 4채널의 부 배열로 구성되어 있으며, 각 채널의 측정 결과를 처리하여 전체 빔 패턴을 형성하였다. 측정 결과는 표 9와 같다. 높은 부엽은 배열 개수가 많지 않고 T/R 모듈 간의 이득 및 위상 오차 영향이 많이 작용한 것으로 판단된다. 하지만 배열 개수가 536개 정도로 되면 예측하는 낮은 부엽 수준으로 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문은 항공기 탑재 가능한 AESA 레이더의 핵심 기술 확보를 위해 프로토 타입을 자체 개발하였다. 항공기 탑재에 적합하도록 전기적, 기계적 인

터페이스를 고려하여 소형, 경량화 구조로 설계/제작하였다. 특히, 열 문제, 복잡한 인터페이스 및 제어분배에 관련된 문제를 간략화 하여 체결과 장착이 용이한 LRU 구조로 AESA 안테나 장치를 설계/제작하였고, 항공기 탑재가 가능하도록 소형, 경량화된 평면형 능동 전자주사식 위상 배열(AESA) 안테나 장치, 파형 발생 및 주파수 합성기 제작 기술, 다채널 수신기 등을 개발하였다.

레이더 프로토 타입에서는 AESA 레이더의 핵심 부품인 T/R(Transmit/Receive) 모듈을 기존 개발된 모듈보다 소형/경량화하여 항공기 탑재 가능성을 확인하였다. 출력 40 dBm 이상, 무게 15 g 이하, 효율 26 % 이상의 T/R 모듈을 개발하였다. 또한, T/R 단위 모듈도 기존 장비보다 소형/경량화하여 열 문제, 인터페이스 및 제어 분배를 LRU 단위로 구현하여 전기적/기계적 인터페이스를 보다 더 간략히 하였다. 이를 바탕으로 AESA 레이더 가장 핵심 기능인 전자적/고속 능동 빔 조향과 빔 형성을 안테나 근접 전개 패턴시험을 통해 확인하였다. 또한, 단위 면적당 출력 전력이 집중되는 항공기용 AESA 레이더에서 방열은 수냉이 적합함을 선진국 사례를 통해 알 수 있었으며, 개발된 장비의 수냉 능력이 만족함을 시험을 통해서 확인하였다. 무엇보다도 항공기 장착이 가능한 전기적 및 기계적 인터페이스 관련된 핵심 기술을 확보할 수 있었다.

본 개발에서 제외되었던 신호 처리 핵심 기술 확보는 향후 실시간 신호 처리기와 연동하여 실제 표적 탐지/추적 등 기본적인 AESA 레이더 성능 확인을 위한 추가적인 연구를 할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] 임상민, 전투기의 이해, 상, 이지북, pp. 76-90, 2005년.
- [2] D. N. McQuiddy, R. L. Gassner, "Transmit/receive module technology for X-band active array radar", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, issue 3, pp. 308-341, Mar. 1991.
- [3] S. Moore, "UK airborne AESA radar research", *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, pp. 29-35, Feb. 2010.
- [4] P. Lacomme, "New trend in airborne phased array radars", *IEEE International Symposium, Phased Array Systems and Technology*, pp. 17-22, Oct. 2003.
- [5] Merrill I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill, pp. 5.1-5.46, 2008.
- [6] F. Gautier, P. Lacomme, "Future electronically steered antennas for airborne radar", *IEE Workshop, The Future of Radar in the UK and Europe*, pp. 2/1-2/6, Nov. 1999.
- [7] D. N. McQuiddy, R. L. Gassner, P. Hull, J. S. Mason, and J. M. Bedinger, "Transmit/receive module technology for X-band active array radar", *Proceedings of the IEEE*, pp. 308-341, Mar. 1991.
- [8] Hubregt J. Visser, *Array and Phased Array Antenna Basics*, John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
- [9] Robert J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Second Edition, Artech House.
- [10] M. Uhlmann, J. S. Tanner, and G. Albarel, "Design characteristics of the AMSAR airborne phased array antenna", *Electronic Beam Steering(Ref. No. 1998/481), IEE Colloquium on*, issue 28, pp. 3/1-3/5, Oct. 1998.
- [11] M. Scott, "SAMPSON MFR active phased array antenna", *2003 IEEE International Symposium, Phased Array Systems and Technology*, pp. 119-123, Oct. 2003.
- [12] A. B. Smolders, "Design and construction of a broadband wide-scan angle phased-array antenna with 4096 radiating elements", *IEEE International Symposium, Phased Array Systems and Technology*, pp. 87-92, Oct. 1996.
- [13] 전상미, 나형기, 김수범, 이정원, 김동윤, 김선주, 안창수, 이창의, "평면형 능동 위상 배열 레이더용 안테나 시스템 개발", *한국전자과학회 논문지*, 20(12), pp. 1340-1350, 2009년 12월.
- [14] D. H. Schaubert, "Wide-band phased arrays of vivaldi notch antennas", *Conference Publication No. 436 IEE 1997, 10th International Conference on Antennas and Propagation*, pp. 14-17, Apr. 1997.
- [15] L. Josefsson, L. Erhage, and T. Emanuelsson, "An

AESA development model for next generation fighter aircraft radar", *IEEE International Sympo-*

sium, Phased Array Systems and Technology, pp. 454-457, Oct. 1996.

정 민 길



1994년 2월: 경상대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 경상대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 7월~현재: (주)LIG넥스원 책임연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템, 능동 위상 배열 레이더

전 상 미



1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
2006년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2006년 5월~현재: (주)LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] 안테나 및 능동위상 배열 레이더

김 동 윤



2005년 2월: 광주대학교 전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 광주대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 2월~현재: (주)LIG넥스원 주임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈, 능동 위상 배열 레이더

나 형 기



1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
1996년 1월~현재:(주)LIG넥스원 선임연구원, 책임연구원, 수석연구원
[주 관심분야] 안테나 및 능동위상 배열 레이더

김 상 근



2005년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2007년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2007년 2월~현재: (주)LIG넥스원 주임연구원
[주 관심분야] 초고주파 능동회로 설계, 초고주파 송수신