

전자전용 광대역 전자식 빔 조향 배열안테나장치 설계 및 제작

Design and Fabrication of Wideband Active Electronically Scanned Array Antenna Unit for Electronic Warfare

김민철 · 이재민 · 정영훈 · 박성준 · 최주영 · 박시온 · 이병헌 · 한재섭 · 김상수 · 최남우

Minchul Kim · Jaemin Lee · Younghoon Jeong · Sungjun Park · Juyoung Choi ·
Sion Park · Byunghun Lee · Jaesub Han · Sangsu Kim · Namwoo Choi

요 약

본 논문에서는 전자전용 재밍 송신기에 사용하기 위해서 개발된 광대역(C~Ku-band) 전자식 빔 조향 배열안테나장치의 설계 및 제작 그리고 근접전계 시험을 통해 측정된 송신 빔 특성을 소개한다. 제안된 배열안테나장치는 광대역 특성을 갖는 BOR 구조의 복사소자를 16×12 사각 배열 구조로 배치하고, GaN 기반의 광대역 고풍출력 증폭소자와 빔 편이 현상 없이 넓은 순시 대역폭 신호의 빔 조향을 위해 실시간 지연 소자(TTD)를 적용한 192개의 송신 채널을 구성하여 개발하였다. 전자적 빔 조향 범위는 방위각 90°(−45°~+45°), 고각 69°(−12°~+57°) 범위에서 가능하다. 제작된 배열안테나장치의 송신 빔 패턴 성능을 확인하기 위해 근접전계 시험 시설을 이용하였다. 전자전용 송신 시스템 빔 패턴 측정 결과, 유효등방성복사전력은 목표성능(P) 대비 4.58 dB 이상을 만족하였고, 광대역 3:1 대역폭($f_{\min}:f_{\max}=1:3$)에서 방위각/고각 방향으로 각각 90°/69° 빔 조향 결과 목표성능에 만족함을 확인하였다.

Abstract

This study proposes the design and fabrication of a wideband (C-Ku-band) active electronically scanned array (AESA) antenna unit, developed for applications in electronic warfare jamming transmitters. The transmitted beam characteristics were evaluated employing near-field measurements. The proposed AESA antenna unit features a 16 × 12 rectangular lattice array and utilizes a wideband body of revolution (BOR) antenna. The system comprises 192 transmission channels, each incorporating a wideband gallium nitride (GaN) high-power amplifier and true-time delay device, enabling beam steering of wideband signals with minimal beam squint. The electronic beam-steering range spans 90° in azimuth (−45° to +45°) and 69° in elevation (−12° to +57°) in elevation. The transmitted beam pattern was characterized using a near-field measurement facility. The effective isotropic radiated power (EIRP) of the designed system exceeds the target EIRP by 4.58 dB. Additionally, the 90° azimuth and 69° elevation beam steering capabilities meet the specified requirements across a wide 3:1 bandwidth ($f_{\min}:f_{\max}=1:3$).

Key words: Electronic Warfare, Wide-Band Active Electronically Scanned Array Antenna, True Time Delay, Near-Field Measurement, Beam Squint

LIG넥스원(LIG Nex1 Co., Ltd)

· Manuscript received June 18, 2025 ; Revised June 23, 2025 ; Accepted July 3, 2025. (ID No. 20250618-059)

· Corresponding Author: Minchul Kim (e-mail: minchul.kim@lignex1.com)

I. 서 론

최근 전자전 제밍 시스템은 전장운용 환경에서 빠른 동작 속도와 정밀 빔 조향으로 적의 초고주파 탐색기 및 레이더와 같은 RF 위협에 대응 가능한 전자교란용 광대역 제밍 송신기로 개발되고 있다. 현재 운용중인 SLQ-200K, ALQ-200K 등에 적용된 TWTA(traveling wave tube amplifier)는 긴 예열 시간과 수 kV의 고전압 전원이 필요하며, 높은 대기전력을 소모한다는 단점이 있다. 또한 고장 발생 시 높은 수리비용과 긴 수리기간이 발생하는 단점이 있다. 이러한 TWTA의 운용상 단점을 보완하기 위해서 예열시간이 짧고 수십 V의 저전압을 사용하며, 빠른 동작 속도와 낮은 대기전력을 소모하는 GaN 기반의 화합물 반도체 증폭기 소자를 적용한 광대역 고풍력 제밍송신모듈에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1][2]}.

제밍 송신 신호를 자유공간에 방사하는 안테나는 기계식 및 수동위상배열(PESA, passive electronically scanned array) 안테나에서 능동위상배열(AESA, active electronically scanned array) 안테나로 발전하고 있는 추세이다. 능동위상배열 안테나는 일부 채널의 고장이 발생하더라도 전체 시스템에는 큰 영향이 없으며, 개별 채널의 크기/위상을 변화시켜 다양한 빔 형성 및 빔 조향이 가능하다는 장점이 있다. 능동위상배열 안테나의 구조 또한 방위각 또는 고각 중 한 방향의 빔 조향만 가능한 1차원 선 배열에서 방위각/고각 모두 정밀 빔 조향이 가능한 2차원 평면형 배열 구조로 개발되고 있다^{[3][4]}. 위상배열 안테나에 phase shifter를 적용하여 개별 채널의 위상을 변화시켜서 전자적 빔 조향이 가능하지만, phase shifter를 이용한 위상배열 안테나의 경우 넓은 순시 대역폭을 갖는 송신 신호를 빔 조향할 경우 주파수에 따른 신호의 빔 편이(beam-squint) 현상이 발생하게 되어 광대역 제밍 송신 신호를 빔 조향해야 하는 전자전 장비에 적용하기에는 어려움이 있다.^[5] 이러한 단점은 실시간 지연 소자(TTD, true time delay)를 이용하여 대체가 가능하고, 광대역 스펙트럼의 전자전 장비에는 필수적인 요소이다^{[6]-[9]}.

본 논문에서는 GaN 기반 반도체 증폭기 소자를 이용하여 기존의 긴 예열 시간과 수 kV의 고전압 전원이 필요한 TWTA의 단점을 보완하고, 실시간 지연 소자를 적용

하여 기존 phase shifter의 빔 편이 현상과 같은 단점을 보완하였다. 미래 전장 운용환경에서 광대역(C~Ku-band) 다중표적의 동시 교전 전자교란 및 원거리 지원 제밍을 위한 목표성능(P) 대비 4.58dB 이상의 높은 유효등방성복사전력(EIRP, effective isotropic radiated power) 성능을 갖고, 방위각 90°(-45°~+45°), 고각 69°(-12°~+57°)의 넓은 2차원 빔 조향 범위를 만족하는 전자전용 광대역 전자식 빔 조향 배열안테나장치의 설계, 제작 및 시험에 관한 내용을 기술하였다. 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 전자전용 광대역 전자식 빔 조향 배열안테나장치 설계 방안과 주요 구성품들의 설계 및 제작결과에 관한 내용을 다루고, III장에서는 제작된 배열안테나장치의 송신 빔 특성 성능검증을 위해 수행한 근접전계 시험의 결과 내용을 기술하였다. 마지막으로 IV장에서는 본 연구의 결론을 기술하였다.

II. 전자식 빔 조향 배열안테나장치 설계 및 제작

전자전용 광대역 전자식 빔 조향 배열안테나장치는 송신제어조립체, 모체판조립체, 고풍력송신조립체, 안테나복사소자조립체, 전력분배기 및 냉각수분배/결합조립체로 구성된다. 송신제어조립체는 시스템제어장치로부터 제어 명령을 수신하여 고풍력송신조립체를 제어하고, 고풍력송신조립체 상태정보를 수집하여 시스템제어장치로 전달하는 기능과 전원공급장치에서 디지털전원을 수신하여 고풍력송신조립체에 분배하는 기능을 수행한다. 모체판조립체는 송신제어조립체와 고풍력송신조립체간 제어 및 타이밍신호, 상태정보 및 디지털전원 인터페이스 기능을 수행한다. 고풍력송신조립체는 한면에 12채널 양면으로 구성되어 24채널의 광대역 RF신호를 증폭하여 안테나복사소자조립체로 전달하고, 내부 빔조향제어기는 송신제어조립체에서 제어명령을 수신하여 전자식 빔 조향을 위한 빔연산, 순시대역폭이 광대역인 제밍RF신호 빔 조향을 위한 TTD 기능을 보유하고 있는 MFC(multi-function chip) 제어, 채널간 정렬을 위한 개별제어 기능을 수행한다. 안테나복사소자조립체는 16×12 사각배열 구조로 192채널의 광대역 복사소자로 구성되며 고풍력송신조립체에서 증폭한 RF신호를 일정한 패턴과 지향성을 갖는

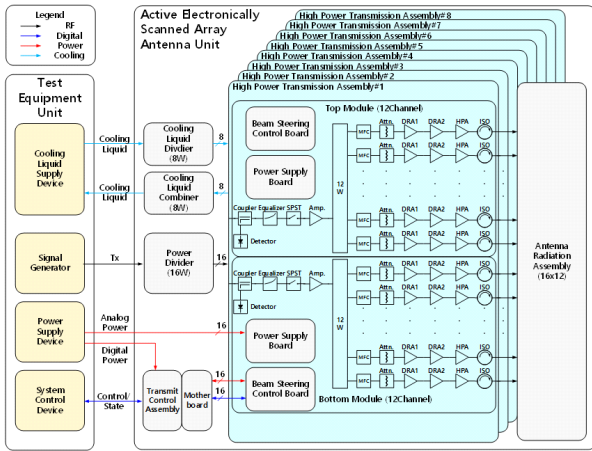


그림 1. 전자식 빔 조향 배열안테나장치 기능블록도
Fig. 1. Block diagram of active electronically scanned array antenna unit.

전자기파 신호로 변환하여 대기중에 방사하는 기능을 수행한다. 전력분배기는 입력받은 RF신호를 16-way로 분기하여 고출력송신조립체 입력신호로 전달하는 기능을 수행한다. 냉각수분배/결합조립체는 고출력송신조립체 냉각을 위해 냉각수공급장치에서 입력받은 냉각수를 8-way로 분배하여 고출력송신조립체에 전달하고 고출력송신조립체 방열 후 가열된 냉각수를 회수하여 냉각수공급장치에 전달하는 기능을 수행한다. 설계된 전자식 빔 조향 배열안테나장치 기능블록도는 그림 1과 같다.

2.1 안테나복사소자조립체 설계 및 제작

안테나복사소자조립체는 모든 복사소자가 조향하고자 하는 각도에서 동위상이 되도록 각 복사소자별 위상을 조절함으로써 원하는 빔 조향 방향에서 안테나 빔의 크기가 최대가 되도록 설계한다. 이때, 요구되는 운용주파수(C~Ku-band), 고각 기울임각 +15° 기준으로 최대 빔 조향 범위 방위각 90°(-45°~+45°), 고각 69°(-12°~+57°) 범위에서 그레이팅 로브(grating lobe)가 발생하지 않으면서, 최소의 배열소자 개수로 주파수 및 빔 조향 평균 EIRP 목표성능(P)을 만족하는 효율적인 배열구조 및 배열 간격을 설계한다.

배열구조는 크게 삼각배열과 사각배열로 나눌 수 있는데, 삼각배열은 방위각과 고각의 대각선 방향으로 그레이

팅 로브 폴(pole)이 발생하고, 사각배열은 방위각 및 고각 방향으로 그레이팅 로브 폴이 발생한다. 그레이팅 로브는 배열간 거리(d), 최대 운용주파수의 파장(λ_h), 최대 빔 조향각(θ_{max})에 의해 식 (1)과 같이 결정된다^[10].

$$d \leq \frac{\lambda_h}{1 + \sin\theta_{max}} \tag{1}$$

그림 2와 같이 시뮬레이션을 통해 16×12 배열구조에서 최대 운용주파수(f_{max})와 최대 빔 조향각에서 그레이팅 로브가 들어오지 않는 삼각배열 및 사각배열의 최적 배열 간격을 확인하였다. 삼각배열의 배열 간격은 dx_{tri} 는 $0.4008 \lambda_h$, dy_{tri} 는 $0.8016 \lambda_h$ 이고, 사각배열의 배열 간격은 $0.588 \lambda_h$ 이다. 동일한 그레이팅 로브 조건에서 사각배열의 개구면 면적이 삼각배열의 개구면 면적보다 7.54% 더 크게 분석되었고, 개구면 크기와 안테나의 지향성은 비례하는 관계이기 때문에 더 좋은 EIRP 성능을 갖는 사각배열 구조를 선정하였다.

안테나복사소자조립체의 복사소자는 다음과 같은 설계고려사항을 고려하여 설계하였다. 광대역 특성을 갖는 BOR(body of revolution) 구조를 선정하였고, 100% duty를 갖는 연속파 재밍신호 송신을 위해 금속 구조를 적용하여 고출력 연속파에 대한 전력 및 열적 내성을 갖도록 설계하였다. 45° slant 복사소자 구조를 적용하여 수직(V-pol)과 수평(H-pol) 편파 모두 송신이 가능하도록 설계하였고, 고출력송신조립체와 블라인드(blind) 체결을 위해 SMP(sub-miniature push-on) 커넥터

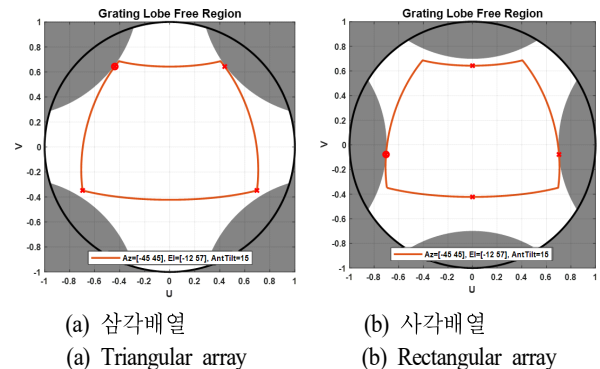


그림 2. 최대 운용주파수(f_{max})에서의 그레이팅 로브 발생 영역 시뮬레이션 결과

Fig. 2. Grating lobe region simulation result at f_{max} .

를 적용하여 설계하였다.

단일 안테나의 경우와는 달리 위상배열안테나의 경우 인접소자 간의 상호결합(mutual coupling)이 크게 작용하게 된다. 단일 안테나에서 정의되는 반사계수가 아닌 인접소자와의 상호결합을 포함한 능동반사계수를 고려하여 설계해야 한다. 능동반사계수 특성이 안 좋으면 고출력 송신조립체의 증단 HPA에 큰 반사신호가 인가되어 HPA의 고장발생 원인이 된다^[11]. 전체 운용주파수 대역에서 모든 복사소자 포트(port)가 전체 빔 조향 범위 능동반사손실 평균이 -10 dB 이하 목표 성능을 만족하도록 복사소자의 최적화 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 3은 시뮬레이션을 통해 설계한 안테나복사소자조립체의 제작 형상이다. 제작한 안테나복사소자조립체의 전기적 성능 검증은 단일복사소자의 넓은 빔폭 특성을 고려하여 원전계 측정을 통해 이득과 빔폭 특성을 검증하였다. 능동반사손실은 무반향챔버에서 192개 복사소자가 모두 조립된 상태에서 복사소자간 커플링을 측정하고 수학적 계산을 통해 주파수별/조향각별 특성을 검증하였다.

그림 4는 안테나복사소자조립체의 전기적 특성을 측정 한 결과이다. 그림 4(a)는 전체 운용주파수 대역에서 자기 반사손실 측정결과이고, 그림 4(b) 및 그림 4(c)는 각각 방위각/고각의 이득과 3 dB 빔폭 측정결과이다. 능동반사손실은 조향각 평균 -10 dB 이하를 만족함을 그림 4(d)와 같이 확인하였다. 측정결과 모든 설계 목표를 만족함을 확인하였고, 표 1은 안테나복사소자조립체의 설계 목표 대비 측정 결과를 정리한 것이다.

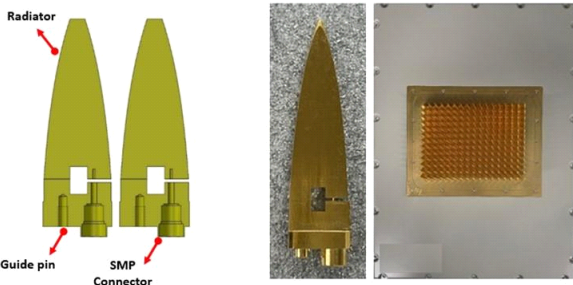
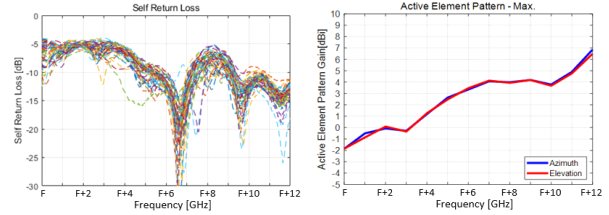
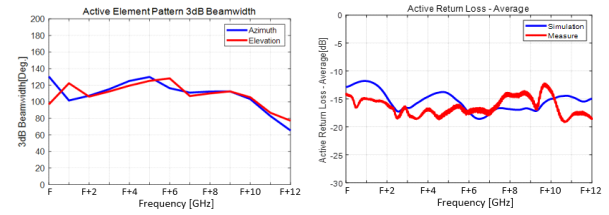


그림 3. 설계된 안테나복사소자조립체 및 제작 형상
Fig. 3. Designed antenna radiation assembly and manufactured shape.



(a) 주파수 & 자기반사손실 (a) Frequency & self return loss
(b) 이득 (b) Gain



(c) 3dB 빔폭 (c) 3dB Beamwidth
(d) 능동반사손실 (d) Active return loss

그림 4. 안테나복사소자조립체 측정결과
Fig. 4. Measurement results of antenna radiation assembly.

표 1. 안테나복사소자조립체 측정결과표
Table 1. Measurement table of antenna radiation assembly.

No.	Parameter	Design value	Meas. result
1	Frequency & Self Return loss	Average ≤ -6 dB (F~F+12 GHz)	Max. -8.59 dB (F~F+12 GHz)
2	Gain	≥ 2 dBi	Min. 2.42 dBi
3	3dB BW	$\leq -45^\circ \sim +45^\circ$	$-52.1^\circ \sim +56.6^\circ$
4	Active RL	Average ≤ -10 dB	Max. -12 dB

2-2 고출력송신조립체 설계 및 제작

고출력송신조립체는 하나의 재밍송신신호를 입력받아서 12채널로 분기하고, 송신 위상 및 이득을 가변하는 구동증폭모듈, 송신 신호를 고출력으로 증폭하는 고출력증폭모듈과 전자전 빔 조향을 위해 빔연산을 수행하고, 구성품을 제어하는 빔조향제어모듈로 구성된다. 고출력송신조립체의 출력포트 간격은 안테나복사소자조립체의 사각배열 배열 간격인 $0.588 \lambda_h$ 를 고려하여 설계하였고, 가로방향으로 한면에 12채널로 구성되고, 양면으로 구성되어 총 24채널의 출력포트로 구성된다.

하나의 송신 채널은 DRA(drive amplifier), HPA(high

power amplifier), 격리기 및 실시간 지연소자, 감쇄기, 광대역 증폭기가 하나의 칩으로 구성된 MFC(multifunction chip)^[12]으로 구성되어 있다. 고출력송신조립체는 반도체 증폭소자를 이용한 송신 신호 고출력 증폭, 실시간 지연소자를 이용한 광대역 전자적 빔 조향, 격리기를 통한 송신 신호 보호 등의 기능을 갖는다.

그림 5는 고출력송신조립체의 구성 및 기능블럭도이다. 고출력송신조립체에 송신신호가 입력되면 방향성 결합기를 통해 입력신호의 크기를 감시하고, 광대역 동작 주파수에서 이득 평탄도를 맞추기 위해 equalizer를 적용하였다. RF 스위치를 통해 재밍신호 송신 on/off 기능을 수행하고, 전력분배기에서 하나의 입력 신호를 12채널로 분기한다. 각 채널별로 MFC에서 실시간 지연소자를 이용하여 빔조향을 수행하고, DRA와 HPA에서 고출력으로 증폭한다. 안테나복사소자조립체에서의 반사신호로 인한 HPA 고장을 방지하기 위해 종단에 격리기를 적용하였다. 고출력송신조립체는 0 dBm의 입력 신호를 받아서 최종 41.46 dBm(14 W) 이상의 출력을 갖도록 설계하였고, 송신 이득 버짓 설계 결과는 그림 6과 같다.

$m \times n$ 사각배열에서의 채널 위치별 시간 지연은 배열간 거리(dx, dy), 방위각(Az), 고각(EI), 빛의 속도(c)에 의해 식 (2)와 같이 결정된다.

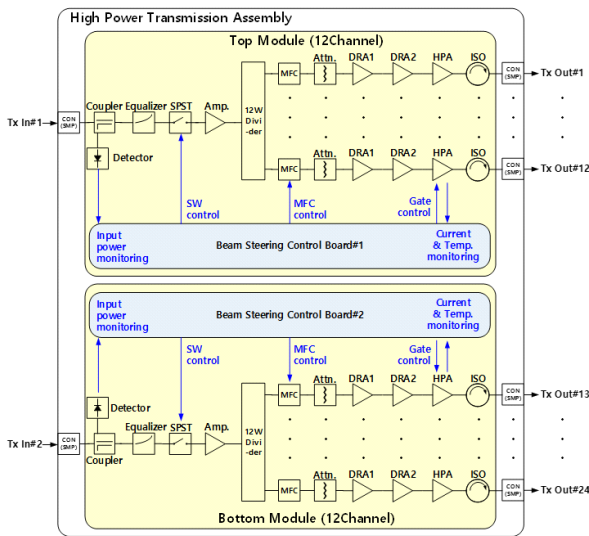


그림 5. 고출력송신조립체 기능블럭도
Fig. 5. Block diagram of high power transmission assembly.

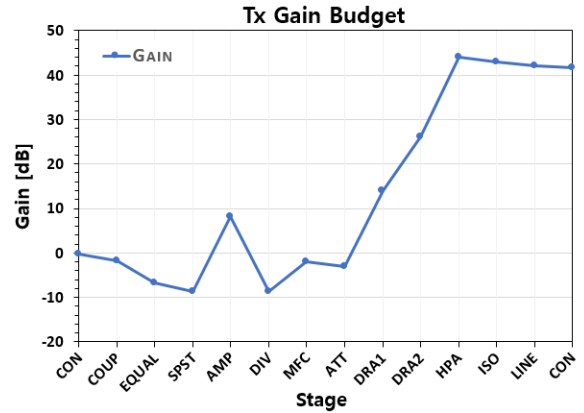


그림 6. 고출력송신조립체 송신 이득 버짓
Fig. 6. Tx gain budget of high power transmission assembly.

$$\Delta t = (m d_x / c) \cos(El) \sin(Az) + (n d_y / c) \sin(El) \quad (2)$$

위의 식 (2)를 통해 계산한 결과, 시스템요구 최대 시간 지연 값(t_{max})는 476 ps으로 분석하였다. 최대 빔조향각에 대한 시간지연 가변범위와 채널간 정렬 시 최소 운용주파수에서 360° 위상가변에 해당하는 시간지연 값을 고려하여 255 ps의 시간지연이 가능한 8-bit 시간지연회로가 포함된 MFC 소자를 채널별로 cascade 형태로 3개씩 구성하여 최대 765 ps까지 시간지연이 가능하도록 설계하였다. 시간지연회로의 시간지연 시 발생하는 신호감쇄 특성을 보상하기 위하여 MFC 소자의 7-bit 디지털 감쇄기를 사용하였다. 시간지연 전체 가변범위에서 크기오차 및 시간지연오차가 각각 0.5 dB[RMS], 2 ps[RMS] 이하를 갖도록 LUT(look-up table)를 적용하였고, 넓은 주파수 범위와 넓은 시간지연 가변범위에 대해 크기오차 및 시간지연오차가 설계 목표를 만족하면서 측정시간을 단축시킬수 있도록 자동화프로그램을 구현하여 LUT를 생성하였다.

그림 7은 제작된 고출력송신조립체의 제작 형상이다. 고출력송신조립체는 양면으로 구성되고, 양면 구조의 고출력송신조립체 하우징 가운데에는 방열을 위한 냉각수 유로로 구성되어 있다. 냉각수 유로의 경로를 발열량이 가장 높은 소자인 HPA 바로 아래에 배치하여 100 % duty를 갖는 연속파 재밍신호 송신이 가능하도록 제작하였다. 회로설계를 통해 소자들을 배치하고, 채널간 간섭 최소화를 위해 내부 커버 구조를 적용하였다. 가이드 핀을 적용

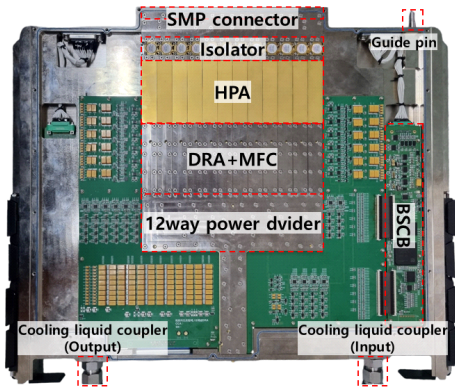
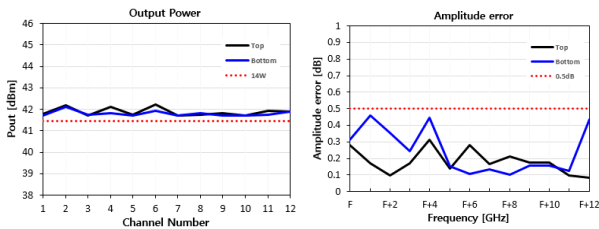


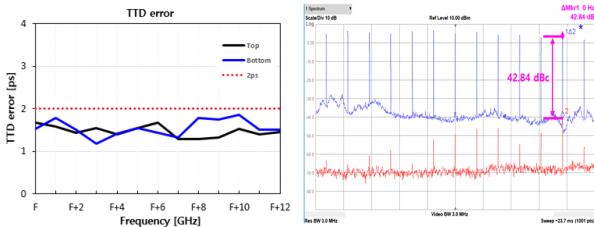
그림 7. 제작된 고출력송신조립체 형상
Fig. 7. Manufactured high power transmission assembly.

하여 안테나복사소자조립체와 24채널의 SMP 커넥터가 한번에 블라인드(blind) 체결될 수 있도록 제작하였다.

그림 8은 고출력송신조립체의 전기적 특성 측정결과이다. 그림 8(a)는 채널별 주파수평균 출력전력 측정결과로 41.67 dBm(14.7 W) 이상이고, 그림 8(b) 및 그림 8(c)는 전체 시간지연 가변범위(0~765 ps)에 따른 진폭 및 시간지연오차 측정결과로 채널별 최대 크기오차는 0.46



(a) 주파수 & 출력전력 (b) 진폭오차
(a) Frequency & output power (b) Amplitude error



(c) 시간지연오차 (d) 채널간격리도
(c) TTD error (d) Channel isolation

그림 8. 고출력송신조립체 측정결과
Fig. 8. Measurement results of high power transmission assembly.

dB[RMS] 이하, 최대 시간지연오차는 1.85 ps[RMS] 이하를 가졌다. 그림 8(d)는 채널간 격리도 측정결과로 최대 42.84 dBc이하로 설계 목표를 만족하였다. 표 2에 고출력 송신조립체의 설계 목표 대비 측정 결과를 정리하였다.

III. 전자식 빔 조향 배열안테나장치 성능시험 결과

제작된 전자식 빔 조향 배열안테나장치의 빔 패턴 특성 확인을 위해선 원전계 시험, 근접전계 시험, compact range 시험 등이 필요하다. 이 중에서 근접전계 시험이 측정 데이터를 수학적 변환을 통해 원전계 빔 패턴으로 변환 및 분석이 가능하기 때문에 송신 평면상의 모든 빔 조향각에 대한 성능 검증 측면에서 가장 우수하다^[13]. 그림 9와 같이 배열안테나장치를 무반향 챔버 내에 설치 후 기계적 정렬을 수행하고, 근접전계 시험을 진행하였다.

표 2. 고출력송신조립체 측정결과표

Table 2. Measurement table of high power transmission assembly.

No.	Parameter	Design value	Meas. result
1	Frequency & output power	Average ≥ 14 W (F~F+12 GHz)	Min. 14.7 W (F~F+12 GHz)
2	Amplitude error	≤ 0.5 dB (RMS)	Max. 0.46 dB (RMS)
3	TTD error	≤ 2 ps (RMS)	Max. 1.85 ps (RMS)
4	Channel isolation	≥ 30 dBc	Min. 42.84 dBc

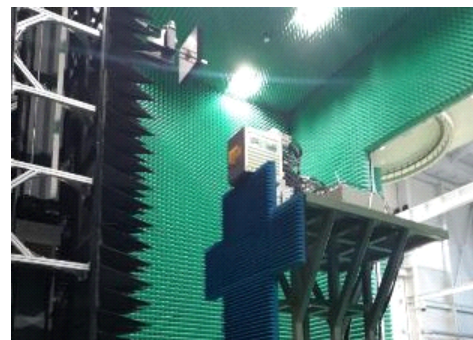


그림 9. 전자식 빔 조향 배열안테나장치 근접전계 시험 사진
Fig. 9. Picture of active electronically scanned array antenna unit.

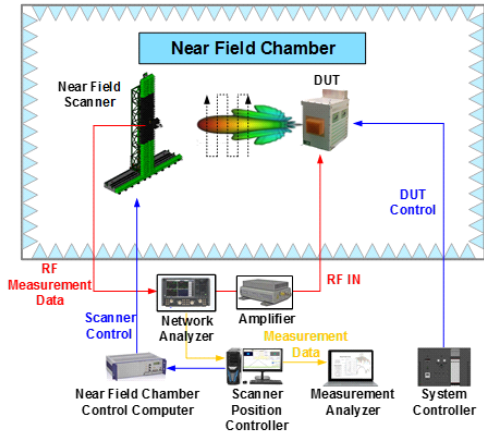


그림 10. 송신 근접전계 시험 구성도
Fig. 10. Block diagram for transmit near field measurement.

그림 10과 같이 송신 근접전계 시험을 구성해서 네트 워크분석기(PNA-X)를 통해 송신 빔 패턴 특성을 측정하였다. 송신 빔 패턴을 측정하기 전 각 채널별로 개별로 하나씩 동작시켜 위상을 측정하고, 그중 하나의 소자를 기준으로 위상을 정렬하기 위한 위상 정렬값을 추출해서 제어기에 장입 후 매번 전원 인가 시 동일한 정렬데이터를 적용할 수 있도록 하였다.

송신 빔 패턴은 균일(uniform) 분포를 적용하였고, 목표 성능확인을 위해 평면형(planar) 근접전계 시험을 통해 측정된 데이터를 원전계 패턴으로 변환하였다^{14,15}. 방위각 고각 양 방향 모두 빔 조향이 가능한 2차원 재밍 송신이 가능해야 하므로, 빔 형성 제어를 확인하기 위해 전체 운용주파수 대역(F~F+12 GHz)에서 방위각 고각 최대 빔 조향 범위를 포함하는 20개의 빔 조향 지점에서 빔 패턴 측정결과를 확인하였다. 그림 11은 전체 운용주파수 대역 측정결과 중에서 중심주파수(F+6 GHz)에서의 2D 빔 패턴 측정결과로, 빔 조향을 위한 시간지연 값은 운용주파수에 무관한 동일한 시간지연 값으로 빔 조향 제어하여 광대역에서 빔 편이 현상 없이 빔 조향이 가능함을 확인하였다.

주파수별로 Boresight 빔 조향 지점에서 송신 빔 패턴의 반전력 빔폭(half power beam width)과 부엽준위 크기(side lobe level)의 방위각과 고각 방향에 대한 시뮬레이션 분석결과와 실제 측정결과는 그림 12를 통해 확인할 수

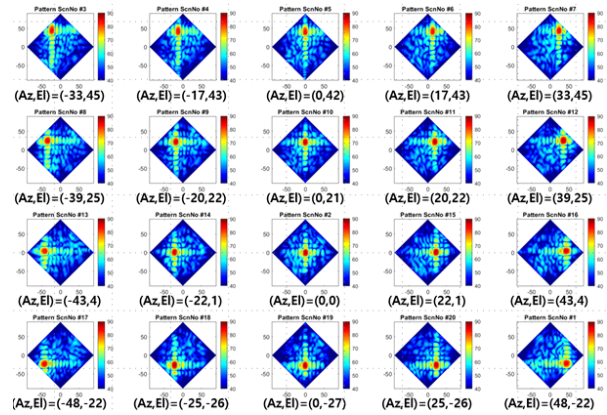


그림 11. 빔 조향 시 2D 빔 패턴 측정결과(f_{mid})
Fig. 11. 2D beam pattern measured result of beam steering (f_{mid}).

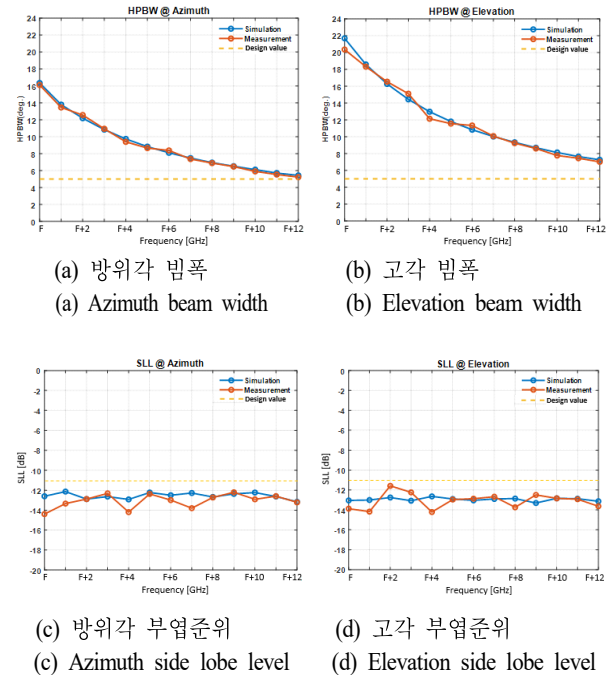


그림 12. 빔폭 및 부엽준위 시뮬레이션 및 측정결과
Fig. 12. Simulation and measurement results of beam width and side lobe level.

있다. 최대 주파수에서 방위각 빔폭은 시뮬레이션 분석결과 5.43°, 측정결과 5.22°, 고각 빔폭은 시뮬레이션 분석결과 7.26°, 측정결과 7.02°이고, 전체 주파수에서 방위각 부엽준위는 시뮬레이션 분석결과 -12.13 dB 이하, 측정결과

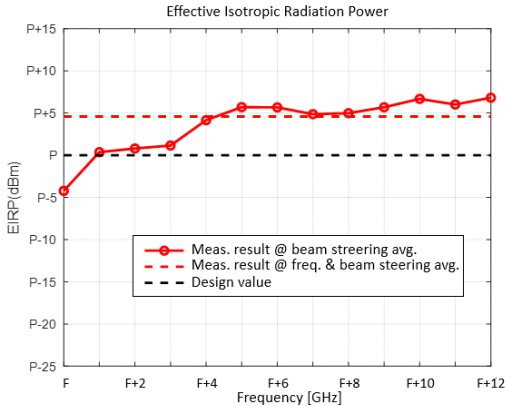


그림 13. 유효등방성복사전력 측정결과
Fig. 13. EIRP measurement result.

과 -12.2 dB 이하, 고각 부엽준위는 시뮬레이션 분석결과 -12.64 dB 이하, 측정결과 -11.58 dB 이하로 목표성능을 만족함을 확인하였고, 시뮬레이션 분석결과와 상당히 유사한 수준으로 잘 측정된 것을 확인할 수 있다. 그림 13은 유효등방성복사전력(EIRP)의 목표성능 확인을 위해 각 주파수별로 20개의 빔 조향 지점에서 측정된 EIRP를 빔 조향 평균으로 분석하고, 모든 주파수에서 측정한 빔 조향 평균 EIRP를 주파수 평균으로 분석하여 주파수 및 빔 조향 평균 EIRP 목표성능(P) 대비 $P+4.58$ dBm으로 목표성능을 만족함을 확인하였다.

채널간 위상 정렬을 위한 정렬값은 중심주파수(F+6 GHz)에 해당하는 시간지연 값으로 고정하고, 측정주파수를 200 MHz 간격으로 전체 2 GHz 대역에 대한 송신 빔 패턴의 빔 조향 오차와 부엽준위 수준에 대해서 측정한 결과를 그림 14에 나타내었다. 빔 조향 오차는 최대 1° 수준이고, 부엽준위는 최대 1 dB 수준의 변화를 보였다. 시간지연소자를 적용함으로써 동일한 정렬값으로도 순시대역폭이 광대역인 노이즈 재밍송신신호에 대해서 빔 정렬 특성이 유지됨을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전자전용 고출력 재밍 송신장치에 사용할 수 있고, 다중위협 신호를 대응하기 위해 반도체 증폭 소자를 기반으로 한 광대역 전자식 빔 조향 배열안테나

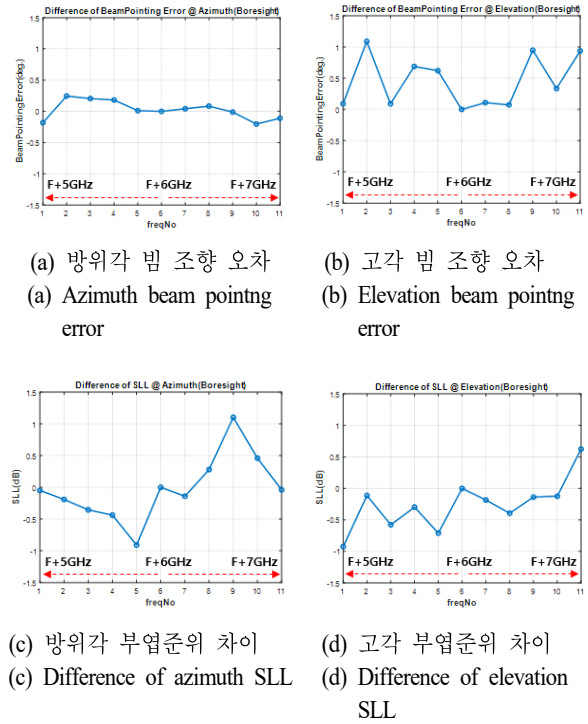


그림 14. 광대역 정렬데이터 타당성 측정결과
Fig. 14. Results of validation of broadband alignment data.

장치를 설계 및 제작하고, 근접전계시험을 통해 배열안테나 장치의 성능 측정 결과를 확인하였다. 광대역 전자식 빔 조향 배열안테나장치는 고출력 GaN 반도체 증폭 소자를 이용하여 고출력으로 증폭하고, 실시간 지연소자를 이용하여 원하는 방위각/고각 방향으로 빔 편이 현상 없이 고속의 광대역 전자식 빔 조향이 가능하다. 안테나복사소자조립체는 16×12 사각배열 구조를 적용하여 더 좋은 EIRP 성능을 확보하였고, 복사소자는 광대역 특성을 갖는 BOR 금속 구조를 적용하여 고출력 연속파에 대한 전력 및 열적 내성을 갖도록 설계하였다. 기존 TWTA 기반의 전자전용 고출력 재밍 송신장치는 긴 예열시간, 수 kV의 고전압 사용 및 방위각 한 방향에 대해 정해진 지점의 빔 조향만 가능하였으나, GaN 반도체 증폭 소자를 적용하여 수십 V의 저전압 사용과 예열시간이 필요 없고, 실시간 지연소자를 적용하여 방위각/고각 2차원 방향에 대해서 원하는 방향으로 보다 정밀하고 넓은 빔 조향 성능을 고속으로 구현할 수 있다. 중심주파수(F+6 GHz) 기준

100 %에 해당하는 광대역 운용주파수(C~Ku-band)에서 송신 빔 패턴 및 목표성능(P) 대비 P+4.58 dBm으로 EIRP 측정 결과를 확인하였다.

채널간 위상 정렬을 위한 정렬값은 고정하고, 전체 2 GHz 대역에 대한 송신 빔 패턴의 빔 조향 오차는 최대 1° 수준이고, 부엽준위는 최대 1 dB 수준의 변화를 갖는 것을 근접전계시험을 통해 확인함으로써 동일한 정렬값으로도 순시대역폭이 광대역인 노이즈 재밍송신신호에 대해서 빔 정렬 특성이 유지됨을 확인하였다. 본 논문을 통해 개발된 광대역 전자식 빔 조향 배열안테나장치는 향후 개발되는 전자전용 광대역 고출력 재밍 송신장치의 설계 및 제작과 성능분석에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] J. D. Kim, B. G. Kim, S. H. Yoo, K. W. Lee, M. S. Lee, and W. Y. Lee, "Design of wide band 80 W solid state power amplifier using GaN HEMT," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 9, pp. 770-779, Sep. 2020.
- [2] J. Kim, S. Jung, S. Yoo, J. Jo, J. Lee, and W. Lee, et al., "Design and fabrication of S to C-band GaN solid state power amplifier for the electronic warfare," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 5, pp. 435-445, May 2021.
- [3] I. S. Hwang, Y. R. Lee, J. P. Kim, S. H. Jang, and S. J. Kim, "Design and implementation of an X-band low-profile active electronically scanned array for airborne radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 2, pp. 127-143, Feb. 2021.
- [4] H. J. Jung, J. S. Han, M. C. Kang, C. H. Lee, B. H. Park, and Y. W. Kim, et al., "Design and fabrication of X-band air-cooled, compact, and lightweight active electronically scanned array antenna unit for aircraft installation," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 8, pp. 618-628, Aug. 2023.
- [5] M. Longbrake, "True time-delay beamsteering for radar," in *2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference(NAECON)*, Dayton, OH, Jul. 2012, pp. 246-249.
- [6] R. Rotman, M. Tur, and L. Yaron, "True time delay in phased arrays," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 504-518, Mar. 2016.
- [7] J. Jung, J. Ryu, J. Park, and J. Seo, "A study on configuration of true time delay phase shifter for wideband beam steering phased array antenna," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 413-420, Jun. 2017.
- [8] K. Sreenivasulu, A. Kedar, and B. Kuriokose, "T/R module technologies for radar EW and communication applications," in *2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference(MAPCON)*, Bangalore, Dec. 2022, pp. 1578-1584.
- [9] S. Yoo, M. Kim, C. Jung, J. Park, J. Lee, and S. Jang, "Development for wide-band active array system with photonics-based optical transceiver," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 2, pp. 145-154, Feb. 2023.
- [10] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill Education, 2008.
- [11] Y. W. Kim, H. D. Chae, D. K. Lee, M. D. Jeong, and J. K. Park, "A study on the stabilized system operation considering the reflection characteristic of an active-phased array antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 1, pp. 29-37, Jan. 2012.
- [12] J. C. Jeong, I. B. Yom, J. D. Kim, W. Y. Lee, and C. H. Lee, "A 6 - 18-GHz GaAs multifunction chip with 8-bit true time delay and 7-bit amplitude control," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2220-2230, May 2018.
- [13] Y. W. Kim, H. D. Chae, J. K. Park, H. G. Na, and M. H. Jeon, "Measurement technique for the active phased array antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 2, pp. 50-59, Mar. 2014.
- [14] A. C. Newell, R. D. Ward, and E. J. McFarlane, "Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 6, pp. 792-803, Jun. 1988.
- [15] J. J. H. Wang, "An examination of the theory and practices of planar near-field measurement," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 6, pp. 746-753, Jun. 1988.

김민철 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4801-0027>



2005년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
2007년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2007년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원 [주 관심분야] 능동위상배열 안테나 시스템, 전자전 시스템, 레이더 시스템

박성준 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0297-615X>



2021년 2월: 호서대학교 전자디스플레이공학부 (공학사)
2023년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
2023년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] RF 집적회로 및 송수신 모듈 설계, 안테나 및 수동회로 설계 등

이재민 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2293-0976>



2011년 2월: 경기대학교 전자공학부 (공학사)
2013년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2013년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 레이더 시스템, 초고주파 수동회로 설계

최주영 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0008-2776-2773>



2022년 8월: 숭실대학교 전자정보공학부 (공학사)
2022년 11월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] 레이더 시스템, 능동위상배열 송수신기

정영훈 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8296-2892>



2020년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부 (공학사)
2023년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)
2023년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] RF Devices, T/R Module, Radar, EW Systems 등

박시온 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-4896-3745>



2021년 8월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2023년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 레이더 시스템

이 병 헌 [LIG 넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-1525-8222>



2011년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)
2013년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학석사)
2013년 4월~현재: LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] 고전압전원공급기 설계, 대전력 전원공급기 설계, 진행파관증폭기

김 상 수 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2606-0947>



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
2007년 12월~현재: LIG 넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 전자공격 기법 개발

한 재 섭 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4410-6240>



2005년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)
2020년 8월: 연세대학교 통신방송공학과 (공학석사)
2004년 12월~2007년 4월: LG Philips LCD 엔지니어
2007년 10월~현재: LIG 넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 시스템, 다기능 레이더

최 남 우 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8287-3312>



2002년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 10월~현재: LIG 넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 신호처리, 방향탐지