

다기능 레이다용 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나의 송신 근접전계 시험

Transmitting Near-Field Measurement of Full Digital Active Phased Array Antennas for Multi-Function Radar Application

주정명 · 임재환 · 박종국 · 진형석 · 강연덕 · 한일탁* · 김두수* · 이동국*

JoungMyoung Joo · Jae-Hwan Lim · Jongkuk Park · Hyung-Suk Jin · Yeon-Duk Kang · Il-Tak Han* · Doo-Soo Kim* · Dong-Kook Lee*

요 약

최근 하드웨어의 발전 덕분에 하나의 칩에서 RF 신호 송수신 및 아날로그/디지털 데이터 변환까지 가능한 집적화된 송수신 단일칩이 출시되어 개별 소자 단위의 디지털 능동 위상 배열 안테나 개발이 용이해졌고, 그로 인해 다기능 레이다를 포함한 레이다 분야에서 수요가 점점 증가하고 있다. 이러한 디지털 능동 위상 배열 안테나에 지금까지의 아날로그 능동 위상 배열 안테나 성능 검증에 적용한 송신 근접전계 시험 구성은 더 이상 활용되기 어렵기 때문에, 본 논문에서는 디지털 능동 위상 배열 안테나에 적용 가능한 송신 시험 구성을 제안하였다. 본 논문에서는 제안된 시험 구성을 통한 전체적인 송신 근접전계 시험 절차에 대해 기술하고, 측정된 안테나 빔 패턴 결과를 이상적인 결과와 비교/검토하였다. 또한 디지털 능동 위상 배열 안테나의 구조적인 특성을 고려하여 기존보다 훨씬 더 간편한 EIRP 측정 방법을 제시하고, 기존 방법의 측정 결과 및 이론적인 계산 결과와 비교함으로써 제안한 EIRP 측정 방법의 유효성을 검증하였다.

Abstract

Recent advances in hardware have resulted in the introduction of an integrated transmit/receive single chip that can not only transmit and receive RF(Radio Frequency) signals, but also perform analog to digital data conversion. This makes it easier to develop element-level digital active phased array(DAPA) antennas. Owing to that, there is an increasing demand for the single chip in radar applications, including the multi-function radar. The transmitting(Tx) near-field measurement configuration applied to verify the performance of the traditional analog active phased array antennas is no longer applicable to DAPA antennas. Therefore, the Tx test configuration applicable to DAPA antennas was proposed. In this paper, the overall Tx near-field test procedure has been described through the proposed test configuration. The measured and ideal results were reviewed and compared. Additionally, considering the structural characteristics of DAPA antennas, a simpler EIRP(Effective Isotropic Radiated Power) measurement method than the conventional one was presented. The validity of the proposed method was verified by comparing it with the results of conventional measurement and theoretical calculation.

Key words: Multi-Function Radar, Full Digital Radar, Digital Active Phased Array Antenna, Near-Field Measurement

「이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 연구되었음.」

LIG 넥스원(LIG Nex1)

*국방과학연구소(Agency of Defence Department)

· Manuscript received October 18, 2019 ; Revised December 10, 2019 ; Accepted December 13, 2019. (ID No. 20191018-106)

· Corresponding Author: JoungMyoung Joo (e-mail: joungmyoung.joo@lignex1.com)

I. 서 론

현대의 레이다는 기술이 발전함에 따라 이전의 아날로그형 수동 혹은 능동 위상 배열 안테나에서 디지털형의 능동 위상 배열 안테나가 적용되는 추세이다. 여기서, 디지털형 능동 위상 배열 안테나란 개별 소자 단위에서 DAC(Digital to Analog Converter)와 ADC(Analog to Digital Converter)가 각각 송/수신 경로에 포함되어 각각이 송신 파형을 발생시켜 송신 빔을 생성하고, 수신 신호를 디지털 신호로 변환 후 디지털 빔 형성기에서 수신 빔을 형성하는 안테나 형태를 일컫는다. 반면에, 기존의 아날로그형 능동 위상 배열 안테나는 송신은 물론 수신에서도 RF 단의 아날로그 빔 형성기를 통해 신호가 결합되어 수신 빔을 형성하는 형태였다^[1]. 지금까지는 아날로그 신호를 각 배열 소자에서 디지털 신호로 변환하여 데이터를 처리하는 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나의 많은 장점^[1]이 있음에도 불구하고, 대량의 디지털 데이터 처리 능력을 포함한 하드웨어, 비용, 물리적인 크기 제한 등의 한계로 실제 구현에 어려움이 있었다^{[2][3]}. 하지만 최근 하드웨어의 비약적인 발전으로 인해 집적화된 송수신 단일칩이 출시되어, 소자 단위에서 송수신단을 모두 디지털화한 디지털 능동 위상 배열 레이다가 개발되었다^{[3][4]}. 국내에서도 저피탐 항체 탐지를 목적으로 하는 지상용 고출력 레이다에 탑재되는 개별 소자 단위의 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나가 최초로 개발되었다.

개발된 안테나의 전기적 특성 검증 시험을 위해 일반적으로 능동 위상 배열 안테나는 송/수신에 대한 빔 패턴이 다르기 때문에 송신과 수신을 분리하여 근접전계 측정을 각각 수행한다^[5]. 또한 안테나 단독의 이득이 아닌 복사소자와 송수신 모듈이 결합된 상태에서 송신의 경우, 안테나 이득과 송신 출력이 더해진 유효 등방성 복사 전력(effective isotropic radiated power: EIRP)을, 수신에서는 안테나 이득과 시스템 노이즈 특성이 합쳐진 이득 대비 노이즈 온도 비(ratio between antenna gain and system noise temperature: G/T)를 측정함으로써 전기적 성능을 검토한다. 왜냐하면 능동 위상 배열 안테나에서 각 배열 소자는 단일 복사소자와 송수신 모듈을 통합하여 구성하므로, 이러한 배열 소자에서 복사소자와 송수신 모듈을 분리하여

측정할 수 없기 때문이다^{[5][6]}. 추가적으로, 아날로그 능동 위상 배열 안테나는 송수신 시험 시 입/출력 신호가 모두 RF이기 때문에, 기존의 잘 알려진 근접전계 시험이나 원전계 시험 방법으로 안테나 빔 패턴에 대한 전기적 성능 시험을 수행할 수 있다. 그러나 소자 단위의 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나의 경우, 송수신 시험에 대한 입/출력이 모두 디지털 신호이기 때문에 빔 패턴 검증을 위한 근접전계 혹은 원전계 시험 시 이전과 같은 RF단에서 측정하는 시험 구성을 적용하기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 국내 최초로 개발된 지상용 고출력 레이다의 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나 구조에 적합한 송신 근접전계 시험 구성과 전체적인 절차에 대해 기술하도록 한다. 더불어, 제한한 시험 구성을 적용해 측정된 송신 근접전계 및 EIRP 측정 시험에 대한 결과를 제시하였다.

II. 송신 근접전계 시험 개요

2-1 디지털 능동 위상 배열 안테나 구성

일반적으로 디지털 능동 위상 배열 안테나를 구현하는데 있어 핵심 구성품 중의 하나는 송수신모듈이라고 할 수 있다. 송수신모듈 내 집적화된 송수신 단일칩을 적용함으로써 이전에는 여러 개의 개별 소자로 구현해야 했던 기능을 통합하여 제공함으로써 RF 송수신 경로 간소화 및 소형화가 가능해졌으며, 그에 따라 개별 소자 단위에서의 디지털화를 구현할 수 있게 되었다. 이러한 집적화된 송수신 단일칩은 하나의 칩에서 RF 신호 생성/증폭 및 주파수 상/하향 변환과 아날로그/디지털 신호 변환까지 가능하다. 따라서 아날로그 능동 위상 배열 안테나의 송수신모듈과 다르게, 송수신 단일칩이 적용된 송수신모듈은 기본적으로 위상 변위기, 가변 저항이나 신호 증폭기 등이 불필요하게 된다^[1]. 그림 1에 아날로그 능동 위상 배열 안테나와 디지털 능동 위상 배열 안테나에 대한 개략적인 시스템 구성도를 비교하였다.

본 논문에서 시험한 디지털 능동 위상 배열 안테나 역시 위와 같은 특징을 가지며, 그림 2에 보인 것과 같이 크게 안테나조립체, 디지털반도체송수신조립체, 안테나제어조립체, 디지털빔형성조립체의 4가지 조립체로 구성된다.

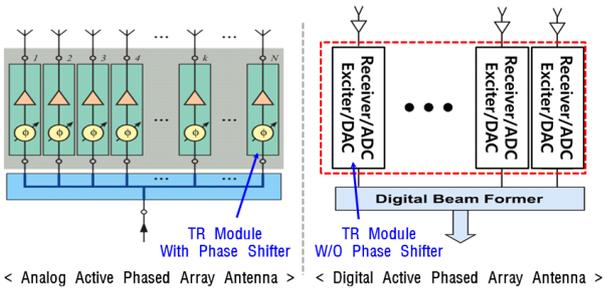


그림 1. 아날로그/디지털 능동 위상 배열 안테나 구성도 비교
 Fig. 1. Comparison of the configuration for analog/digital active phased array antenna.

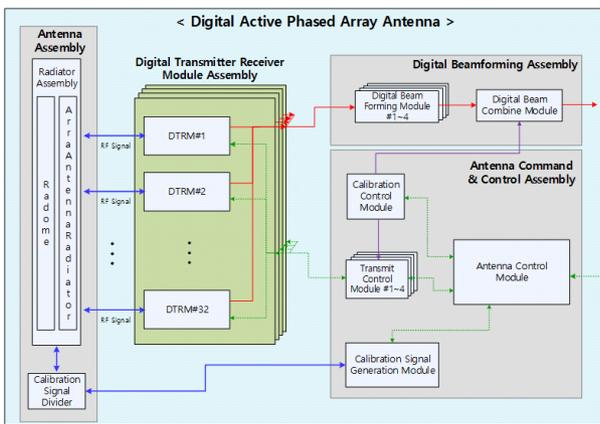


그림 2. 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나 구성도
 Fig. 2. Configuration diagram for full digital active phased array antenna.

안테나조립체는 512개 복사소자와 이 복사소자를 보호하기 위한 레이돔 및 안테나 보정을 위한 신호 분배기를 포함한다. 또한 각각의 개별 복사소자 급전선로에는 방향성 결합기를 적용한 보정 경로가 포함되어 있다.

디지털반도체송수신조립체는 128개의 디지털송수신모듈로 구성되어 있으며, 하나의 디지털송수신모듈은 개별적으로 완전한 기능을 담당하는 송수신기 4개가 집적된 쿼드팩(quad-pack) 구조를 적용하였다. 이러한 디지털송수신모듈 내 각각의 송수신기에는 고출력 신호 발생 및 고효율 구현을 위한 GaN(Gallium Nitride) 소재의 고출력 증폭소자(high power amplifier: HPA) 적용, 효율적인 방열을 위한 설계 및 대량의 디지털 신호를 전송하기 위한 광

신호 변환/전송 등 다양한 기술이 집약되어 있다^[7]. 안테나제어조립체는 대부분 FPGA(Field Programmable Gate Array) 기반의 보드(board)들로 구현되어 디지털반도체송수신조립체 및 보정에 관련된 제어 명령을 담당하고, 송신 시 메모리에 장입해 놓은 채널별 위상 정렬값과 기준 보정값을 적용한다. 마지막으로 디지털빔형성조립체는 수신 시에 디지털반도체송수신조립체의 각 개별 채널로부터 받은 디지털 데이터에 미리 장입해 놓은 채널별 정렬값과 가중치 분포를 적용하고, 계산을 통한 빔조향 계수에 따라 수신 빔을 형성한다. 또한, 디지털빔형성조립체의 채널 수 만큼 그에 해당하는 다양한 수신 빔 동시에 형성할 수 있는 멀티빔 기능이 구현되어 있다.

이와 같이 구성된 디지털 능동 위상 배열 안테나의 송신/수신 빔 패턴 측정을 통한 전기적 성능 검증을 위해 근접전계 시험을 수행하였다. 하지만 그림 1에 보인 디지털 송수신모듈은 소스원이 없는 기존의 송수신모듈과 다르게 송신 파형을 스스로 생성하여 RF 신호를 송신할 수 있다. 게다가, 앞서 언급한 것과 같이 송신 근접전계 시험 시 입/출력으로 디지털 신호를 필요로 하기때문에 지금까지 RF 신호를 입/출력으로 했던 아날로그 능동 위상 배열 안테나에 대한 송신 근접전계 시험 구성을 그대로 적용할 수 없다. 따라서 다음 장에서는 디지털 능동 위상 배열 안테나 구조에 적합한 송신 근접전계 시험 구성에 대해서 다루도록 하겠다.

2-2 송신 근접전계 시험 구성

디지털 능동 위상 배열 안테나에 대한 송신 근접전계 시험 구성에 대해 기술하기 전, 아날로그 및 디지털 능동 위상 배열 안테나의 신호 송신 방법에 대해 알아볼 필요가 있다. 먼저 대개의 아날로그 능동 위상 배열 안테나는 레이더 주장비로부터 사용하고자 하는 주파수 대역에서 생성된 RF 신호와 제어기로부터 위상 변위를 위한 제어 신호를 입력 받는다. 입력된 RF 신호와 제어 신호는 송수신모듈의 증폭기와 위상 변위기를 거쳐 원하는 크기와 위상을 가지고 복사소자를 통해 방사하게 된다. 다음으로 디지털 능동 위상 배열 안테나는 송수신모듈 내부에서 파형을 직접 생성할 수 있다. 디지털 송수신 모듈은 크게 RF 회로, 디지털 변환 회로, 전원 공급기로 구성되는데,

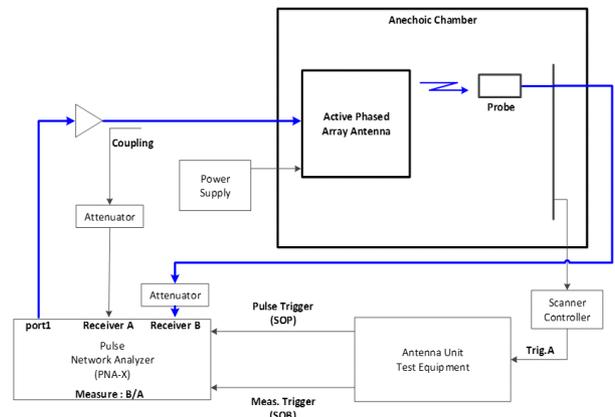
디지털 변환 회로는 제어 명령을 외부로부터 입력받아 해당하는 디지털 파형을 생성하고, 생성된 I/Q 신호에 산술적인 계산을 통해 위상을 변위하여 송수신 단일칩으로 전달한다. 송수신 단일칩에서는 입력받은 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하고, 원하는 주파수 대역으로 상향 변환시킨 후 RF 회로로 전달하면, 마지막으로 RF 회로에서 여러 단의 증폭기와 고출력증폭소자를 거쳐 신호 증폭하여 복사소자를 통해 최종 원하는 크기와 위상을 가진 RF 신호를 송신하게 된다.

위와 같은 RF 신호 생성 위치 및 방법에서의 차이를 고려하면, 아날로그 능동 위상 배열 안테나는 송신 근접전계 시험 시 주장비 대신 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer: VNA)를 연결하여 RF 신호를 입력받아 송신할 수 있다. 그리고 안테나에서 송신한 신호를 수신하는 프로브에 네트워크 분석기의 나머지 한 포트를 연결하면 송신과 수신 신호 간 동기가 자연스럽게 일치하여 매우 간단한 구성으로 측정이 가능하게 된다. 그림 3(a)에 아날로그 능동 위상 배열 안테나에 대한 송신 근접전계 시험 구성도를 나타내었다. 여기서 실제 송신 근접전계를 측정할 때는 안테나로 입력되는 송신 신호의 출력을 높이기 위해 네트워크 분석기와 안테나 사이에 증폭기를 추가하고, 반대로 프로브와 네트워크 분석기 사이에는 감쇄기를 사용하여 수신 신호에 의해 네트워크 분석기의 수신기가 손상되지 않도록 조정한다. 마지막으로 능동 위상 배열 안테나에서는 펄스 형태의 RF 신호를 사용하므로 네트워크 분석기를 펄스 모드로 동작시키고, 안테나부 시험장비를 이용하여 근접전계 시험장 스캐너 컨트롤러와 네트워크 분석기의 타이밍을 연동시킨다^[6].

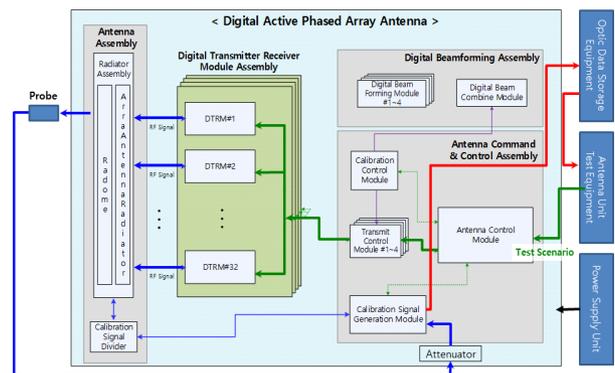
반면에, 디지털 능동 위상 배열 안테나의 경우, 송수신 모듈에서 자체적으로 디지털 파형을 생성하고 RF 신호로 변환하여 송신할 수 있으므로 디지털 파형 생성을 위한 제어 명령만을 필요로 한다. 또한 프로브를 통해 신호를 수신한다고 해도 근접전계 측정에서 가장 중요한 송수신 신호 간 동기를 정확하게 맞출 방법이 없기 때문에, 기존의 방식과 같이 네트워크 분석기를 이용해 신호를 송수신하여 안테나 근접전계를 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 네트워크 분석기를 이용하지 않고, 안테나부 시험장비를 이용해 송신 파형 생성을 위한 제

어 신호를 입력하고, 안테나부 내부 장비인 보정신호생성 모듈을 프로브와 연결하여 신호를 수신하는 시험 구성을 제안하였다.

보정신호생성모듈은 본래 디지털 능동 위상 배열 안테나 운용 및 초기 부팅 시 송수신 보정을 위해 사용되는 안테나부 구성품으로서, 내부에는 디지털 송수신모듈에 사용한 것과 똑같은 송수신 단일칩이 적용되어 있다. 그



(a) 아날로그 능동 위상 배열 안테나의 송신 근접전계 시험 구성도
(a) Tx Near-Field measurement configuration for the analog active phased array antenna



(b) 디지털 능동 위상 배열 안테나의 송신 근접전계 시험 구성도
(b) Tx Near-Field measurement configuration for the digital active phased array antenna

그림 3. 능동 위상 배열 안테나의 송신 근접전계 시험 구성 비교
Fig. 3. Configuration comparison for Tx Near-Field measurement of active phased array antenna.

러므로 보정신호생성모듈도 제어 명령만 입력된다면 스스로 디지털 송신 파형을 생성하여 RF 신호로 변환 및 송신하거나 RF 신호를 수신하여 디지털 신호로 변환 및 출력하는 하나의 완전한 송수신기 역할을 수행할 수 있다. 즉, 신호 송/수신을 위해 네트워크 분석기를 이용하는 대신 디지털 송수신모듈과 보정신호생성모듈을 직접적으로 사용하는 것이며, 더불어 두 구성품 모두 안테나부 내부 장비이므로 송수신 신호 간 동기가 정확히 일치하게 된다. 이와 같은 디지털 능동 위상 배열 안테나의 송신 근접전계 시험 구성도를 그림 3(b)에 제시하였다. 이때 실제 송신 근접전계 시에는 프로브와 보정신호생성모듈 사이에 감쇄기를 추가하여 수신 신호 크기를 조절함으로써 보정신호생성모듈의 수신기가 보호될 수 있도록 하였다. 보정신호생성모듈로부터 출력된 디지털 수신 신호는 광신호로 변환되어 광 저장장치에 저장되며, 안테나부 시험장비는 스캐너 컨트롤러에서 출력되는 기준 신호(Trig-A)를 입력받아 송수신 타이밍을 연동시킨다.

Ⅲ. 송신 근접전계 시험 및 결과

본 장에서는 2-2장에서 제안한 디지털 능동 위상 배열 안테나의 송신 근접전계 시험 구성을 적용하여 시험한 내용에 대해 기술하도록 한다. 먼저 송신 근접전계에 대한 전체적인 시험 절차를 간략히 언급하고, 관련 시험 및 각 항목에 대한 시험 내용과 결과에 대해 제시하였다.

안테나 종류에 관계없이 근접전계 시험을 위해 챔버 내 설치 후 가장 우선하여야 할 절차는 기계적 정렬이다. 측정하려는 안테나면과 프로브면이 가능한 평행이 되도록 정렬을 해야 하며, 추후 기계적 정렬 오차는 측정된 패턴의 빔 지향 오차를 판단할 때 반영 요소가 될 수 있다. 안테나 기계적 정렬 후 그 상태에서 프로브의 원점 좌표를 설정하며, 일반적으로 안테나 개구면의 중심을 프로브의 원점으로 해야 측정 시 편리하다. 여기서는 안테나 기계적 정렬 및 프로브 원점 설정 시 레이저 거리 측정기와 디지털 각도계 및 도면을 이용하였으며, 방위각/고각 방향 $\pm 0.09^\circ$ 이내로 정렬하였다.

기계적 정렬 후에는 채널별 정렬값 및 기준 보정값 추출 시험을 수행한다. 각 배열 간 송수신 경로가 물리적으로

차이가 있고, 사용된 능동 및 수동 소자들도 모두 동일한 특성을 가지고 있지 않다. 따라서 보어사이트(boresight)에서 동위상을 형성하여 빔 패턴이 생성되도록 각 채널 간 특성 차이를 보정해 주어야 한다. 일반적으로 크기/위상을 모두 보정해 주어야 하지만, 레이더의 경우 최대 탐지 거리 성능을 확보하기 위해 증폭기를 포화 구간에서 사용하여 최대 전력을 송신하므로 각 채널 간 위상 차이만 보정을 해준다. 근접전계 시험장은 무반향 챔버로서 외부 요인이 없는 안정적인 상태이므로 근접전계 패턴 측정 전 각 채널에 대한 S_{21} 특성을 먼저 측정하고, 이로부터 보상할 위상 정렬값을 추출한다. 이에 수반하여 기준 보정값 추출 시험도 함께 수행해야 한다. 정렬값 추출 후 장비 상태가 변하게 되면 이 정렬값을 더 이상 사용할 수 없기 때문에, 정렬값 추출 시험 전/후로 보정 경로로부터 보정신호를 저장하고, 보상할 기준 보정값을 추출한다. 더불어 위상 정렬값 추출 시험 전/후의 보정 데이터를 비교하여 시험 중 장비 상태가 변하지 않았는지 확인해야 한다.

앞서 추출한 채널별 위상 정렬값과 기준 보정값 적용 후 송신 근접전계 측정을 수행한다. 측정된 근접전계 데이터로부터 푸리에 변환(fourier transformation)을 통해 원전계 빔 패턴으로 변환하여 성능을 검토한다. 필요시 근접전계 및 백프로젝션(back-projection) 데이터로부터 필요한 정보를 확인할 수도 있다.

마지막으로 신호 발생기(signal generator)와 첨두 전력 측정기(peak power analyzer) 또는 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer)를 이용해 보정신호생성모듈에 입력된 절대 전력 대비 출력된 I/Q 값으로부터 AD(Analog to Digital) 변환 관계를 추출하여 송신 EIRP를 계산한다.

위와 같이 제안된 디지털 능동 위상 배열 안테나의 송신 근접전계 시험 구성을 적용하여 시험을 수행하고, 측정된 빔 패턴에 대한 전기적 성능을 검토하였다.

3-1 채널별 기준 보정값 및 위상 정렬값 추출 시험

채널별 기준 보정값 추출 시험은 위상 정렬값 추출 시험과 연속적으로 이루어진다. 보정 기능 수행 시 각 채널의 디지털 송수신모듈이 순차적으로 on/off 되도록 개별 제어하며, 디지털 송수신모듈로부터 송신된 신호 중 일부가 안테나조립체의 보정 경로로 커플링(coupling) 되고, 분

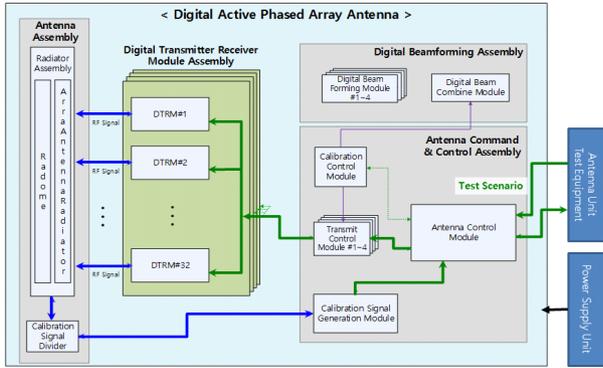
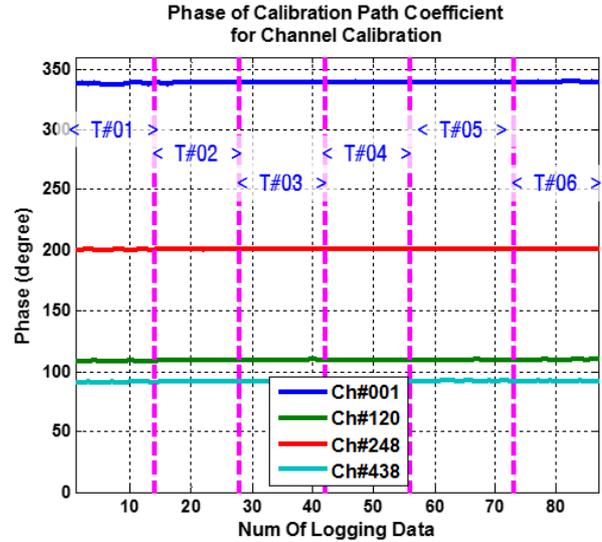


그림 4. 채널별 기준 보정값 추출 시험 구성도
 Fig. 4. Measurement configuration to extract reference calibration coefficient for each channel.

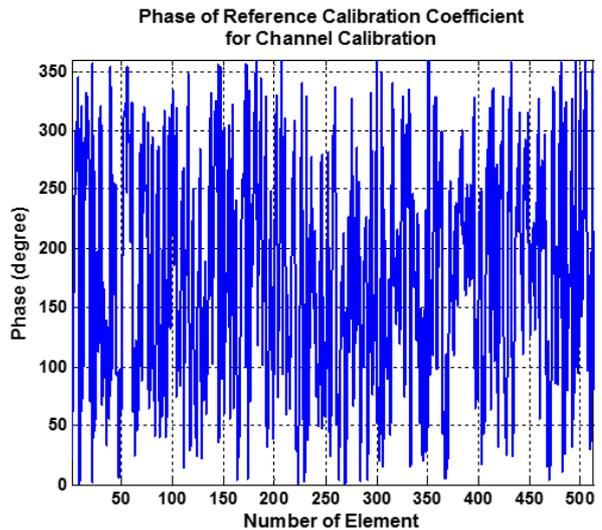
배기를 거쳐 보정신호생성모듈에서 디지털 신호로 변환되어 안테나통제모듈에 전달된다. 기준 보정값 추출 시험에 대한 신호 흐름 및 구성도를 그림 4에 나타내었다.

시험 데이터의 신뢰도를 확보하고 시험하는 동안의 장비 상태 변화 유무를 확인하기 위해 정렬값 추출 시험 전/후로 보정을 수행하여 데이터를 수집하였다. 위상 정렬값 추출 시험을 3회 수행하였기 때문에 보정 데이터는 총 6회 획득하였고, 측정된 데이터들의 평균값을 이용해 최종 기준 보정값을 추출하였다. 그림 5(a)는 6회의 기준 보정값 추출 시험에서 측정된 위상 결과를 임의의 채널에 대해 나타낸 것이며, 측정하는 동안 장비 변화 없이 안정적으로 데이터가 획득되었음을 알 수 있다. 각각의 채널별 보정 데이터로부터 최종 추출된 기준 보정값은 그림 5(b)와 같다.

다음으로 채널별 위상 정렬값을 추출하기 위해 그림 6과 같이 각각의 개별 소자 중심 위치로 측정 프로브를 옮기면서 S_{21} 을 측정하였다. 개별 복사소자의 개수가 매우 많으므로 측정을 자동화하기 위해 프로브가 각 개별 소자 위치마다 이동하게 하고, 측정 위치의 타이밍에 따라 해당하는 디지털 송수신모듈만 순차적으로 on/off 되도록 개별 제어하였다. 여기서 안테나 배열 형태가 삼각 배열임을 고려하여 $dy/2$ 간격으로 S_{21} 을 측정하고, 실제 개별 소자 위치에 해당하는 데이터만 사용하였다. 채널별 위상 정렬값 추출 시험에 대한 구성도는 그림 3(b)에 보인 송신 근접전계 시험 구성도와 유사하며, 단지 차이점은 측정하는 동안 디지털 송수신모듈을 개별 제어하고, 수신



(a) 임의의 채널에 대한 보정 데이터 위상 결과
 (a) Phase result for calibration data of arbitrary channels



(b) 최종 추출된 채널별 기준 보정값
 (b) Final extracted reference calibration coefficient of each channel

그림 5. 채널별 기준 보정값 추출 시험 결과
 Fig. 5. Measurement result for extract to reference calibration coefficient of each channel.

데이터가 보정신호생성모듈에서 안테나통제모듈로 전달되어 안테나부 시험장비로 저장된다는 것이다.

여기서 시험 오차를 줄이고, 더 정확한 정렬값을 추출하여 신뢰도를 높이기 위해 위상 정렬값 추출 시험은 총

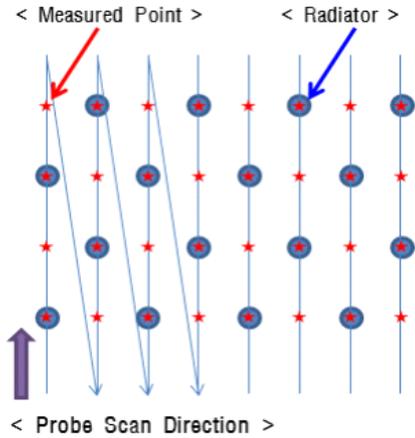


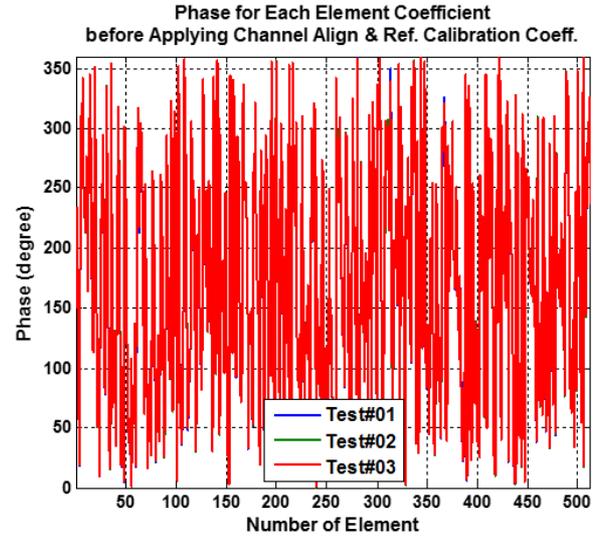
그림 6. 채널별 위상 정렬값 추출을 위한 S_{21} 측정 위치
Fig. 6. S_{21} measurements position for extract to phase alignment coefficient of each channel.

3회를 실시하였으며, 이에 대한 평균값으로부터 최종 정렬값을 추출하였다. 3회의 추출 시험 동안 장비 상태가 변하지 않고 유지되어 거의 같은 값이 측정됨을 볼 수 있다(그림 7(a) 참조).

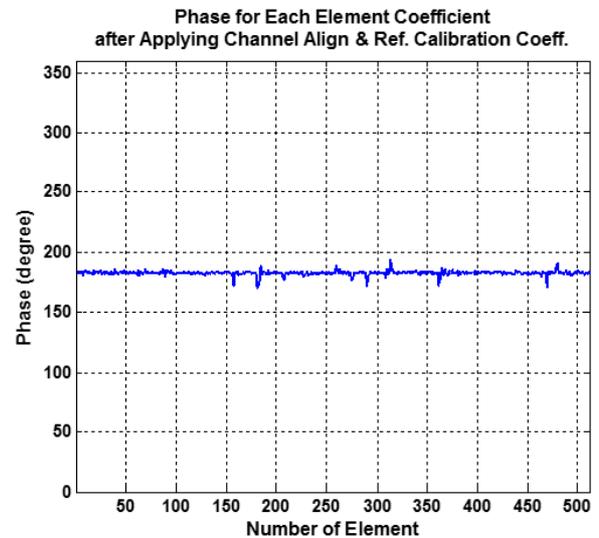
마지막으로, 추출한 채널별 위상 정렬값과 기준 보정값을 안테나제어조립체의 메모리에 장입하고, 이 두 가지 값을 적용하였을 때 각 채널별 위상이 정상적으로 정렬되는지, 데이터에 대한 유효성을 검증하기 위해 정렬값 추출 시험과 같은 방식으로 각 소자별 S_{21} 을 재측정하였다. 이때, 디지털 능동 위상 배열 안테나에서는 장비 off/on 시 위상값이 이전 상태와 완전히 달라지기 때문에 반드시 장입한 기준 보정값으로 보정을 수행하여 장비를 위상 정렬값 추출 당시의 상태로 되돌려야 한다. 채널별 기준 보정값 및 위상 정렬값 적용 후 각 소자별로 측정된 S_{21} 의 위상 결과를 그림 7(b)에 나타내었으며, 전(全) 채널에 대해 초기 목표했던 $\pm 15^\circ$ 내에서 위상 정렬이 잘 되었음을 확인하였다.

3-2 송신 빔 패턴 및 EIRP 측정 시험

앞서 추출된 채널별 위상 정렬값과 기준 보정값을 적용하고, 본 논문에서 제안한 디지털 능동 위상 배열 안테나를 위한 송신 근접전계 시험 구성 및 측정을 통해 원전계 빔 패턴에 대한 전기적 특성을 검토하였다. 여기서 안



(a) 위상 정렬값 및 기준 보정값 적용 전 위상 측정 결과
(a) Phase measurement result before applying channel align and reference calibration coefficient



(b) 위상 정렬값 및 기준 보정값 적용 후 위상 측정 결과
(b) Phase measurement result after applying channel align and reference calibration coefficient

그림 7. 채널별 S_{21} 의 위상 측정 결과
Fig. 7. Phase result of measured S_{21} for each channel.

테나 및 측정 프로브 간 이격거리는 약 4.3λ 로 하였고, 근접전계 측정 영역은 안테나 최대 빔 조향 각도를 고려하여 X축으로 ± 600 cm, Y축으로 ± 380 cm로 설정하였다.

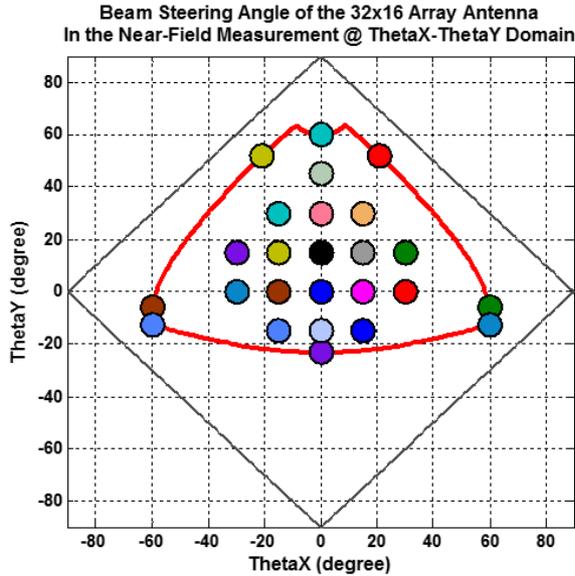
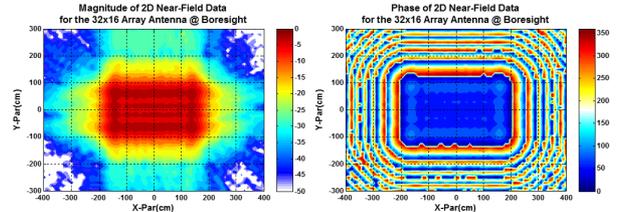


그림 8. 송신 근접전계 시험에 대한 빔 조향 시나리오
Fig. 8. Beam steering scenario for the Tx Near-Field measurement.

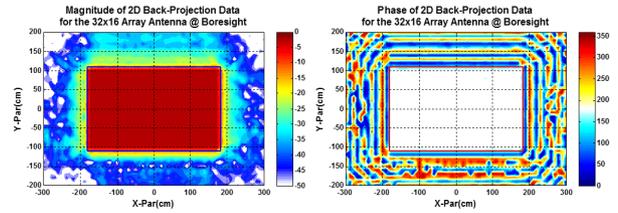
또한, 레이더 운용 중심 주파수에서 보어사이트를 포함한 총 25개의 빔 조향 각도를 시험 시나리오로 하여 송신 근접전계를 측정하였다. 그림 8에 디지털 능동 위상 배열 안테나에 요구되는 빔 조향 범위와 측정된 빔 조향 각도를 나타내었다.

다음은 보어사이트에서 측정된 송신 근접전계 데이터(그림 9(a))와 백프로젝션 기법을 통해 안테나 개구면에서 계산된 전계 분포(그림 9(b))를 나타낸다. 앞서 보였던 그림 7(b)와 같이 point-to-point 측정을 통해 채널별 위상 정렬 상태를 확인하는 방법도 있지만, 그림 9(b)와 같이 송신 근접전계 측정 후 백프로젝션을 이용한 안테나 개구면에서의 크기/위상 전계 분포를 통해서도 채널별 위상 정렬 상태를 확인할 수 있다. 송신 빔에 대해서 가중치 분포는 유니폼(Uniform) 분포이고, 전 채널 위상이 매우 잘 정렬되었음을 한눈에 알 수 있다.

측정된 근접전계 데이터로부터 푸리에 변환을 통해 원전계 빔 패턴으로 변환하고, 보어사이트 빔에 대해서는 이상적인 빔 패턴과 비교하였다(그림 10 참조). 측정된 빔 패턴과 이상적인 빔 패턴의 널(Null) 위치가 일치하여 전체적으로 매우 유사한 경향을 보였으며, 그 밖의 빔 패턴



(a) 송신 근접전계 데이터에 대한 크기/위상 분포
(a) Magnitude and phase distribution for Tx Near-Field data



(b) 백프로젝션 데이터에 대한 크기/위상 분포 @ 안테나 개구면
(b) Magnitude and phase distribution for Back-Projection data @ antenna aperture

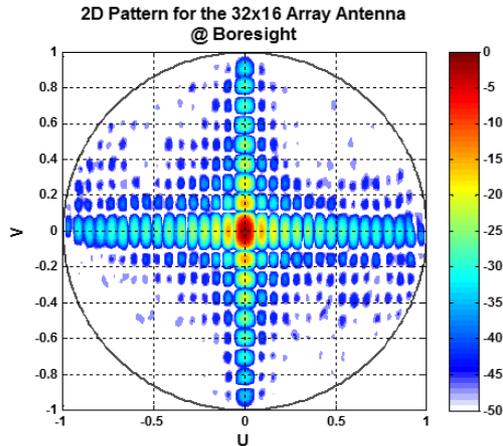
그림 9. 보어사이트에서의 송신 근접전계 측정 결과
Fig. 9. Measurement result of Tx Near-Field on boresight.

성능에 대해서는 표 1에 비교하였다. 다만, 실제 능동 배열 안테나는 레이돔을 포함하고 있기 때문에 이 레이돔에 의한 상하/좌우 끝 쪽 복사소자들의 개별 소자 패턴 영향, 배열 소자 간 상호 간섭 등의 배열 구조에 의한 개별 소자 패턴 영향, 한정된 비트수로 적용한 채널별 위상 정렬값과 기준 보정값 및 시험 치구 영향을 포함한 측정 오차 등으로 인해 약간의 불일치가 발생하였다.

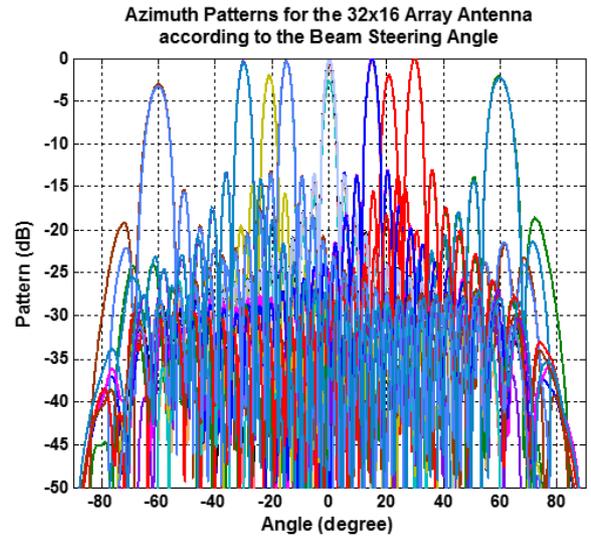
송신 근접전계 시험 시 시나리오로 했던 25개 조향각에 따른 안테나 빔 패턴 전체 결과는 그림 11과 같다.

입력한 시나리오에 따라 생성된 빔 패턴의 조향각이 명령한 빔 조향각과 거의 일치하게 나타났으며(그림 12), 각 시나리오에 대한 측정된 빔 패턴 대비 이상적인 빔 패턴의 지향 오차는 $\pm 0.3^\circ$ 이내로 계산되었다. 빔 지향 오차의 원인은 안테나의 기계적 정렬 오차, 제한된 비트의 빔 조향 제어로 인한 위상 오차, 개별 복사소자에 의한 최종 패턴 영향 등이 있다.

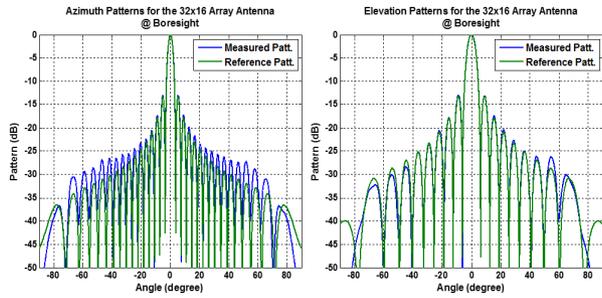
일반적으로 송신 근접전계 시험을 통해 측정된 빔 패턴의 크기는 송신기에서 송신한 신호가 근접전계 시험 상에 구성된 경로를 지나 프로브를 통해 최종 수신기에



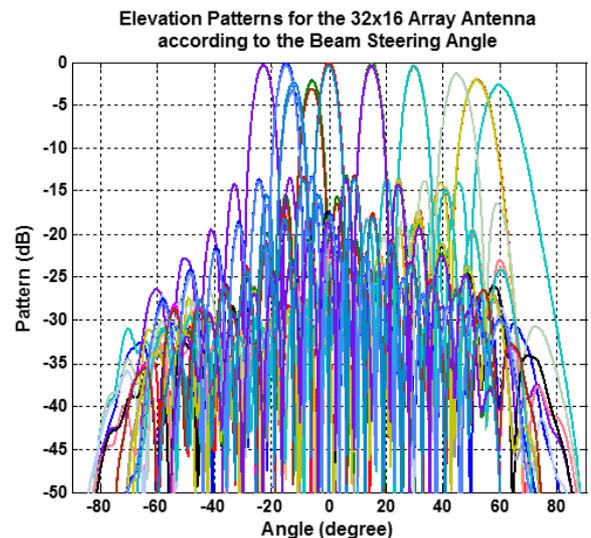
(a) 근접전계 데이터로부터 변환된 2차원 원전계 빔 패턴
 (a) 2D Far-Field beam pattern transformed from Near-Field data



(a) 조향각에 따른 방위각 방향 빔 패턴
 (a) Azimuth beam pattern according to beam steering angle



(b) 1차원 방위각/고각 방향 빔 패턴 비교 결과
 (b) Comparison result for 1D azimuth/elevation beam pattern



(b) 조향각에 따른 고각 방향 빔 패턴
 (b) Elevation beam pattern according to beam steering angle

그림 10. 측정된 원전계 송신 빔 패턴 @ 보어사이트
 Fig. 10. Measured Far-Field transmitting beam pattern @ boresight.

그림 11. 25개 시나리오에 대한 1차원 빔 패턴 결과
 Fig. 11. 1D beam pattern result for 25 scenario.

표 1. 안테나 빔 패턴 성능 비교 @ 보어사이트
 Table 1. Performance comparison for antenna beam pattern @ boresight.

Item		Ideal pattern	Measured pattern
Beam pointing	Azimuth	0°	-0.006°
	Elevation	0°	-0.006°
Beam point error(Az/El)		-0.006° / -0.006°	
HPBW	Azimuth	3.21°	3.30°
	Elevation	5.50°	5.61°
Max. SLL	2D	-13.25 dB	-12.97 dB
	Azimuth	-13.25 dB	-12.98 dB
	Elevation	-13.28 dB	-12.98 dB

수신된 신호의 상대적인 값이다. 따라서 레이더 방적식을 이용해 최대 탐지거리 등의 레이더 성능을 분석하기 위해서는 측정된 송신 패턴을 절대값으로 환산하기 위한 EIRP를 측정할 필요가 있다.

본 논문에서는 EIRP 측정을 위해 기존의 아날로그 능

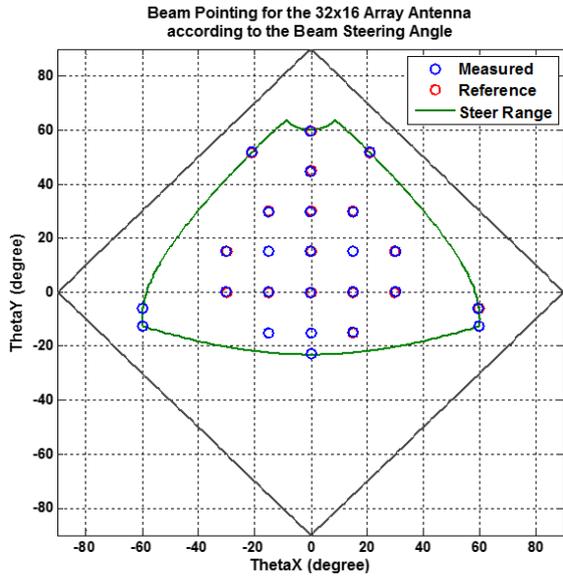


그림 12. 조향각에 따른 빔 지향 결과 비교
Fig. 12. Result comparison according to beam steering angle.

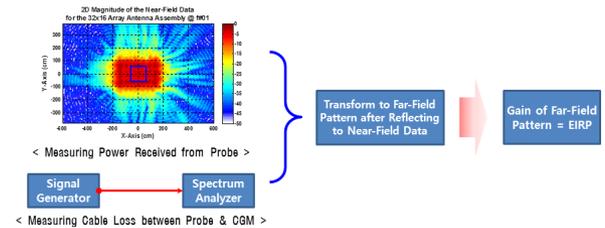
동 위상 배열 안테나에서 사용해 왔던 방식과 디지털 능동 위상 배열 안테나의 시험 구성을 고려하여 간단하게 적용 가능한 새로운 방식의 두 가지 방법으로 EIRP를 측정하고, 이론적인 예측값과 비교함으로써 새로운 방법에 대해 교차 검토하였다.

먼저, 기존의 EIRP 측정 방법을 설명하면 측정된 송신 근접전계 데이터에서 에너지가 몰려 있는 개구면 중심 부근(주 신호 크기가 평탄한 영역)의 한 지점에 측정 프로브를 위치시키고, 송신 근접전계 시와 똑같은 시험 구성에서 신호를 송신하여 보정신호생성모듈 전(前)단에서 수신되는 절대 전력값을 스펙트럼 분석기로 측정한다. 여기서 측정 정확도 향상을 위해 프로브를 부근의 몇 지점으로 옮기면서 반복 측정하고 평균값을 사용하였으며, 프로브의 이동 위치는 근접전계 시험 시 측정 위치와 같게 해야 한다. 다음으로 그림 3(b)의 측정 프로브와 보정신호생성모듈 간 연결된 케이블 손실을 측정하고, 앞서 측정 한 보정신호생성모듈 전단에서의 절대 전력값에 반영하여 프로브에서 수신되는 절대 전력값으로 디임베딩(De-embedding)해준다. 케이블 손실도 마찬가지로 수차례 반복 측정하여 평균값을 사용하였다. 마지막으로, 디임베딩된 프로브에서의 절대 전력값을 측정된 근접전계 데이터

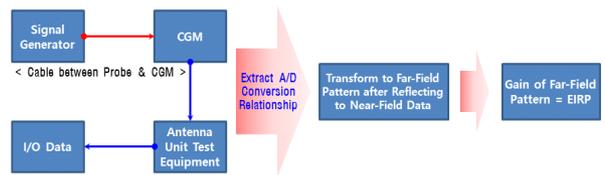
에 반영 후 푸리에 변환하면 절대값을 가진 원전계 빔 패턴을 얻을 수 있다.

EIRP 측정을 위한 두 번째 방법의 개념은 프로브에서 수신된 RF 값 즉, 보정신호생성모듈의 입력값 대비 보정신호생성모듈에서 출력된 I/Q 값으로부터 AD 변환 관계를 추출하고, 이것을 역으로 환산하여 측정된 근접전계 데이터를 프로브에서의 절대 전력값으로 보상하는 것이다. 따라서 그림 3(b)의 근접전계 시험 구성에서 프로브 대신 신호 발생기를 연결한 후, 알고 있는 전력값을 송신하여 보정신호생성모듈에서 출력된 I/Q 값의 크기를 확인한다. 입력된 절대 전력값 대비 출력된 I/Q 데이터 간 변환 관계는 선형 특성 및 1:1 대응 관계를 갖기 때문에, 입력 대비 출력 간 차이는 일정하게 된다. 여기서 측정 정확도 향상을 위해 입력 전력값을 다르게 하여 수차례 반복 측정 후 입력과 출력 간 차이값을 평균하였다. 이 평균값을 측정된 근접전계 데이터에 그대로 보상해 주고 원전계 빔 패턴으로 변환하면 EIRP 값을 얻을 수 있다.

그림 13에 두 가지 측정 방법에 대한 개념을 간략히 도식화하여 나타내었다. 기존의 방법은 빔 조향 각에 대해 각각 EIRP를 측정해야 하지만, 본 논문에서 제안한 방법은 AD 변환 관계를 한번만 추출하고 나면 이 값을 모든



(a) 기존의 EIRP 측정 방법
(a) Conventional method for EIRP measurement



(b) 제안된 EIRP 측정 방법
(b) Proposed method for EIRP measurement

그림 13. EIRP 측정 방법 비교
Fig. 13. Comparison of methods for EIRP measurement.

표 2. 측정 및 이론적인 송신 EIRP 결과 비교
Table 2. Result comparison between measured and ideal Tx EIRP.

Item		Measured frequency(f_c)
Measured EIRP	Conventional method	114.58 dBm
	Proposed method	114.48 dBm
Calculated EIRP		114.55 dBm

※ Expected antenna gain: 31.66 dBi.
Expected transmitter power: 82.89 dBm.

빔 조향 경우에 적용할 수 있다. 또한, 케이블 손실을 추가적으로 측정할 필요 없이 프로브와 보정신호생성모듈 간 경로를 그대로 두고 프로브만 신호 발생기로 대체하여 측정하면 되기 때문에 EIRP 측정이 매우 단순하고 간편해진다.

위의 두 가지 방법으로 측정한 EIRP 값과 이론적으로 계산한 EIRP 값은 표 2와 같다. 여기서, 배열 이론에 의한 배열 계수(AF, Array Factor)와 안테나 단독 시험 시 측정된 개별 소자 패턴을 이론적으로 합성하고, 합성된 빔 패턴의 지향도 계산 후 예상되는 안테나 손실을 반영하여 안테나 이득을 예측하였다. 송신기 출력은 디지털 송수신 모듈 단독 시험 시 측정된 개별 송신 출력의 평균값을 사용하였다.

기존 방법과 제안된 방법으로 측정한 EIRP 값의 차이는 약 0.1 dB로 두 결과가 매우 유사했으며, 이론적인 계산값과의 차이도 각각 약 0.03 dB/0.07 dB로 거의 일치하였다. 따라서 EIRP 측정값에 대한 신뢰성이 검증되었고, 본 논문에서 제안한 측정 방법에 대해서도 그 유효성을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

지금까지 국내 최초로 개발되는 지상용 고출력 레이더의 디지털 능동 위상 배열 안테나에 대한 송신 근접전계 시험 내용에 대해 살펴보았다. 개별 소자 단위의 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나는 지금까지의 아날로그형 능동 위상 배열 안테나에 적용해 왔던 송신 근접전계 시험 구성을 그대로 이용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서

는 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나에 적용 가능한 송신 근접전계 시험 구성을 제안하고, 제안된 시험 구성을 적용하여 수행한 송신 근접전계 시험 절차 및 결과에 대해 기술하였다. 원전계 빔 패턴 검토 결과, 요구되는 빔 조향 범위 내에서 조향 명령한 각도에서 빔 패턴이 생성됨을 확인하였고, 이상적인 빔 패턴과도 거의 일치함을 보였다. 또한, 능동 위상 배열 안테나의 송신 시험에서 검증해야 할 매우 중요한 성능 중 하나인 EIRP에 있어서도 기존의 방법보다 훨씬 더 편리한 측정 방법을 제시하고, 기존 방법으로 측정한 결과와 비교하여 약 0.1 dB 차이로 두 결과가 매우 유사함을 보였다. 마지막으로 이론적인 EIRP 계산값과 비교하였을 때 약 0.07 dB 오차로 제안된 EIRP 측정 방법이 유효함을 확인하였다. 디지털 능동 위상 배열 안테나는 향후 다기능 레이더에도 적용 가능하기 때문에 본 논문에서 제안한 시험 방법들이 안테나의 송신 성능 검증에 있어서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] S. H. Talisa, K. W. O'Haver, T. M. Comberiate, M. D. Sharp, and O. F. Somerlock, "Benefits of digital phased array radars," in *Proceedings of the IEEE*, Mar. 2016, vol. 104, no 3, pp. 530-543.
- [2] D. Thompson, R. Kelley, M. Yeary, and J. Meier, "Direct digital synthesizer architecture in multichannel, dual-polarization weather radar transceiver modules," in *2011 IEEE RadarCon(RADAR)*, Kansas City, MO, May 2011, pp. 859-864.
- [3] W. Chappell, C. Fulton, "Digital array radar panel development," in *2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Waltham, MA, May 2010, pp. 50-60.
- [4] I. Lupa, "Phased array-technology and trends," in *2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems*, Tel-Aviv, May 2008, pp. 1-8.
- [5] Y. W. Kim, H. D. Chae, J. K. Park, H. G. Na, and M.

H. Jeon, "Measurement technique for the active phased array antenna," in *Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, Mar. 2014, vol. 25, no 2, pp. 50-59.

[6] H. D. Chae, H. S. Kim, D. K. Lee, M. D. Jeong, and J. K. Park, "Transmit-beam pattern measurement of the active phased-array antenna using near-field measurement facility," *The Journal of Korean Institute of Electro-*

magnetic Engineering and Science, vol. 22, no 12, pp. 1155-1164, Dec. 2011.

[7] J. H. Lim, S. J. Park, S. M. Jun, H. S. Jin, K. S. Kim, and T. H. Kum, et al., "Design and fabrication of an L-band digital TR module for radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no 11, pp. 857-867, Nov. 2018.

주 정 명 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8210-1758>



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2013년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] 수동 및 능동 위상 배열 안테나, 레이더 시스템

박 종 국 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2001년 11월~현재: LIG넥스원 수석연구원 [주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 시스템, 다기능 레이더 시스템, 적응형 빔 형성, 전자파 수치 해석

임 재 환 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5338-3285>



2004년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
 2006년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2006년 2월~2008년 1월: 삼성전자 무선사업부
 2008년 2월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계, 반도체 송수신모듈, 디지털 레이더 시스템

진 형 석 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0764-9596>



2000년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 8월~현재: LIG넥스원 수석연구원 [주 관심분야] 디지털 레이더 시스템, 능동 위상 배열 레이더, 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계

강 연 덕 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0527-3641>

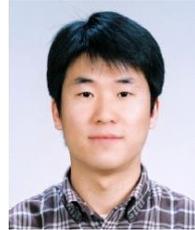


1993년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 8월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)
2000년 9월~현재: LIG넥스원 연구위원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 초고주파 소자, 전자파 해석

김 두 수 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1570-1291>



2001년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2006년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 최적화 알고리즘 구현

한 일 탁 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7944-4816>



2006년 2월: 충남대학교 전자전파정보통신공학부 (공학사)
2008년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2008년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템 및 신호처리, 전자파 전파 및 산란, 전자전파 특성 예측 모델링

이 동 국 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7372-1218>



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 전자장 수치 해석