

근접전계 시험을 이용한 항공기용 평면형 능동 위상 배열 안테나 송수신 빔 성능 검증에 관한 연구

김영완^{*,1)} · 이재민¹⁾ · 이유리¹⁾ · 김종필¹⁾ · 박종국¹⁾ · 박규철²⁾ · 김선주²⁾

¹⁾ LIG넥스원(주) 감시정찰연구센터
²⁾ 국방과학연구소 항공기레이더체계단

Study on the Tx/Rx Beam Performance of Planar Active Phased Array Antenna for Airborne as using the Near-field Measurement

Young-Wan Kim^{*,1)} · Jaemin Lee¹⁾ · Yuri Lee¹⁾ · JongPhil Kim¹⁾ · Jong-Kuk Park¹⁾ · Kyuchul Park²⁾ · Sunju Kim²⁾

¹⁾ Surveillance and Reconnaissance Research Center, LIG Nex1, Korea
²⁾ Aircraft Radar System Group, Agency for Defense Development, Korea

(Received 25 August 2017 / Revised 22 December 2017 / Accepted 26 January 2018)

ABSTRACT

In this paper, we described about methods and results to verify the Tx/Rx beam characteristics of a planar active phased array antenna as using a near-field measurement. The near-field system can effectively measure multiple beams and predict the performance degradation due to the partial failure of individual elements. Also, it can accurately predict the EIRP relating to detection performance of the active phased array radar. We briefly described the near-field measurement method to verify the Tx/Rx beam characteristics, and then verified the effectiveness of measurement method by analyzing the measured results.

Key Words : AESA(능동전자조향배열), Near-field Measurement(근접전계측정)

1. 서론

전자기파를 표적에 발사시켜 그 표적으로부터 반사되는 전자기파를 수신하여 표적과의 거리, 방위각, 고각 정보를 획득하는 장치인 레이더(RADAR : Radio

Detecting and Ranging)는 제 1차 세계 대전을 거쳐 위상 배열인 AESA(Active Electronically Scanned Array)방식으로 발전되고 항공기에 적용되어 전장에 배치되고 있다. 이러한 AESA는 기계식 구동을 배제하고 전자적으로 평면에 대한 빔을 조향시키기 위해 분산형 반도체 송신기를 적용하여 탐지, 추적을 통합시키는 다기능 레이더나 항공기용 레이더에 주로 사용되고 있다. 전자 빔 조향 레이더는 고속 빔 조향 및 빔 운용의

* Corresponding author, E-mail: kyoungwan@lignex1.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

용통성이 뛰어나며 우수한 대전자전 능력을 보유하고 있어서 현대전 항공기의 눈으로서 핵심적인 역할을 수행한다. AESA는 수백에서 수천개의 복사소자가 배열을 형성하고, TR(Transmit Receive) 모듈이 장착되어 원하는 방향으로의 송신 빔을 생성하거나 특정 빔의 수신 및 모드 변경 등을 개별적으로 수행할 수 있어 고속 빔 조향, 다수의 빔 제어를 통한 다중 모드(Multi-mode) 동시 운용, 신뢰도 향상, 무게 감소, 동시 표적 교전 능력 향상 등의 많은 장점을 가지고 있다.

이러한 평면형 능동 위상 배열 안테나의 성능 검증은 송수신 시 평면상의 모든 빔조향각에 대한 성능 검증이 이루어져야 하기 때문에 원전계 시험을 통해 모든 빔조향각에 대한 평면상의 빔특성 검증이 불가능하며, 주변 환경의 영향을 최소화하기 위해 챔버내에서 원전계 시험을 수행하기에는 챔버의 크기에 제한이 있으므로 보통 근접전계 시험을 통해 검증을 수행한다. 국내에서는 다수의 선형 능동 위상 배열 안테나의 빔 특성을 확인하고 검증하기 위해 근접전계 시험을 이용해 왔으며, 전력화를 통해 성능의 유효성을 검증하였다^[1]. 본 논문에서는 항공기에 적용될 평면형 능동 위상 배열 안테나의 근접전계 시험 절차 및 결과를 검증하였다. 평면상에서의 빔 조향에 대한 성능을 확인하였으며, 효율적인 측정을 위해 최대한 많은 시나리오를 적용하여 측정 시간을 단축시킬 수 있었다. 송신 시험의 경우 PNA-X를 이용하여 펄스 형태의 파형을 발생시켜 반도체 송수신 조립체를 구동시켜 측정을 수행하였으며, 수신 시에는 동기화를 위해 파형 발생기의 신호를 프로브에 인가하여 안테나로 수신된 신호를 측정하여 수신 빔 성능을 예측하였다.

논문 순서는 2절에서 측정을 수행할 능동 위상 배열 안테나의 제원 및 근접전계 시험 시설에 대한 간략한 설명을 하고, 3절에서는 실제 수행한 송신 빔 측정 및 EIRP(Effective Isotropic Radiated Power) 측정 결과를 제시하였다. 4절에서는 수신 빔 측정 결과 및 모노펄스 기울기 결과를 제시하고 실 운용 시 모노펄스 기울기를 보정하는 방법에 대하여 설명하였다. 마지막으로 5절에서 결론으로 마무리하였다.

2. 능동 위상 배열 안테나 및 근접전계시험 시설 개요

본 논문에서 측정을 수행할 능동 위상 배열 레이더의 배열 안테나는 총 384개의 배열소자로 구성되어

있으며, 배열소자 후면에 **TR 블록**으로 구성된 반도체 송수신기가 384개 연결되어 Fig. 1과 같은 형상으로 구성된다. 배열소자는 송신 시 최대 탐지 거리를 고려하여 동일한 출력을 형성하는 집중빔을 운용하며 수신 시에는 부엽 수신에 의한 탐지를 방지하기 위해 방위각, 고각 방향으로 저부엽의 펜슬빔을 형성한다. 이를 위해 수신 시에는 반도체 송수신기의 디지털 감쇄기(DCA : Digital Control Attenuator)로 크기를 조절하여 저부엽 빔을 만들기 위한 테일러 분포를 형성하게 된다.

일반적인 안테나의 근접전계 시험은 네트워크 분석기로 신호의 크기가 크지 않은 연속파를 발생시켜 측정을 수행하지만, 본 논문에 적용할 능동 위상 배열 안테나는 최대 3.84 kW 출력의 펄스 형태 RF 신호를 생성하기 때문에 일반적인 근접전계 시설에서는 측정하기 어려우며, 이를 위해 본 논문에서는 고풍력 능동 위상 배열 안테나 시험에 적합하도록 고풍력 흡수체인 HFX-36HC를 적용하여 고풍력을 견딜 수 있도록 설계된 근접전계 시험장을 이용하였다. 또한 펄스 형태의 파형을 근접전계 시험시에 사용하도록 측정 S/W를 수정하여 최대한 많은 시나리오를 적용하여 효율성을 높였다.

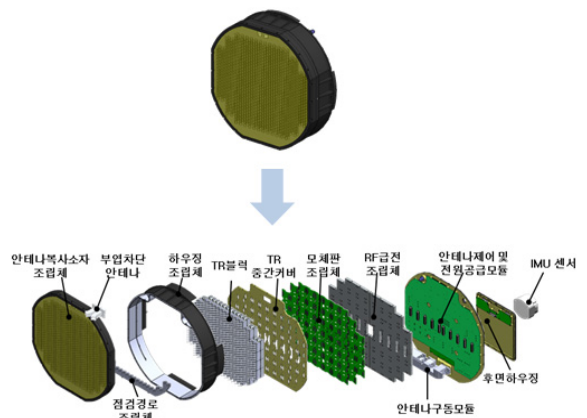


Fig. 1. Antenna unit configuration

측정을 수행한 근접전계 시험 시설의 제원은 Table 1과 같다. 기본적으로 근접전계 시험은 근접전계 스캔면과 안테나의 개구면이 평행이 되도록 기계적인 정렬을 수행한 후, 안테나부 시험 장비를 이용하여 처리부에서 발생하는 제어 신호를 모사하여 능동 위상 배열 안테나를 제어하고, 근접 전계 시험에 필요한 연

동 신호를 발생하도록 하였다. 송신과 수신빔 측정에 대한 자세한 구성은 3절과 4절에서 나눠서 구체적으로 설명하였다.

Table 1. Near-field measurement facility data

측정 가능 주파수	1~40 GHz
챔버 크기	8.8 m(L) × 9.7 m(W) × 9.1 m(H)
스캔 형태	평면형, 원통형
스캔 범위	5 m(가로) × 6 m(세로)
측정 가능 출력	최대 100 kW
향온 및 향습	적용
펄스 모드	가능

3. 송신 분야 측정

근접전계 시험 시설을 이용한 송신 빔 측정은 근접전계 시험장의 PNA-X를 이용하여 주파수 영역에서 시험장비를 이용하여 펄스 형태의 동기화된 파형을 발생시켜 반도체 송수신 조립체를 구동시켰다. 송신 시험을 위한 안테나의 근접전계시험 구성도는 Fig. 2와 같으며, 송신 시 유의할 점은 반도체 송수신 조립체를 안정적으로 구동시키기 위해 Fig. 2의 입력 레벨(A)을 8 dBm ± 2 dB로 맞추었으며 PNA-X의 수신 포트(B)에 손상을 주지 않는 범위(< 15 dBm)내의 수신 신호를 생성하기 위해 고출력 감쇄기를 추가하여 수신 신호의 크기를 조절하였다.

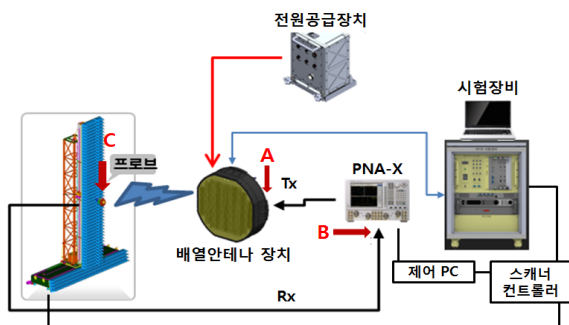


Fig. 2. Test configuration of Tx. beam near-field measurement

Fig. 2에서 보는 것과 같이 근접전계 제어 PC는 PNA-X를 제어하고 측정된 데이터를 저장하며 스캐너를 구동시킨다. 또한 배열안테나 장치 시험장비는 연동 신호를 발생시켜 스캔면의 특정 위치에 프로브가 도달하면 발생하는 기준 신호를 바탕으로 모든 장비를 동기화시켜 배열안테나 장치에 정해진 조향된 시나리오에 따라 신호를 발생시키고 계측기를 통해 다음 동기화 신호 전까지 약속된 조향 시나리오 타이밍에 데이터를 수집하여 저장하게 된다.

이렇게 송신 시험을 위한 근접전계 시험 구성이 완료되면, 송신 채널의 배열 소자와 송신기에 해당하는 반도체 송수신 조립체의 채널별 경로차를 보상하기 위해 채널 정렬을 수행한다. 송신 채널의 위상차를 보상하기 위한 방법은 위상 정렬 전 채널 송신한 패턴의 Back-Projection 기법을 통해 안테나 개구면에서의 전계의 크기 및 위상을 구하여 역으로 위상차를 보정하는 방법이 사용되기도 하지만²⁾, 본 논문에서는 프로브를 계측기와 동기화시켜 모든 배열소자의 물리적인 중심점에서 S-파라미터 값을 저장하여 원하는 대역내에서의 채널간 위상 정렬값을 한 번에 측정하여 저장하였다.

추출된 위상 정렬값을 적용한 후 송신 시나리오를 적용하여 측정한 송신 집중빔 2D 패턴은 Fig. 3과 같았으며, 방위각 방향으로 조향한 2D 패턴은 Fig. 4와 같았다.

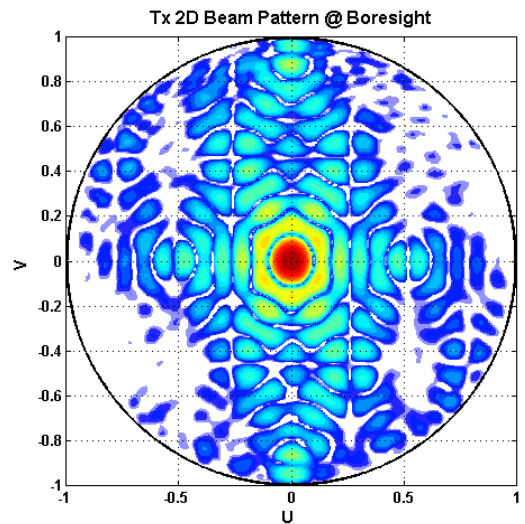


Fig. 3. Tx. 2D beam pattern measurement result (@Boresight)

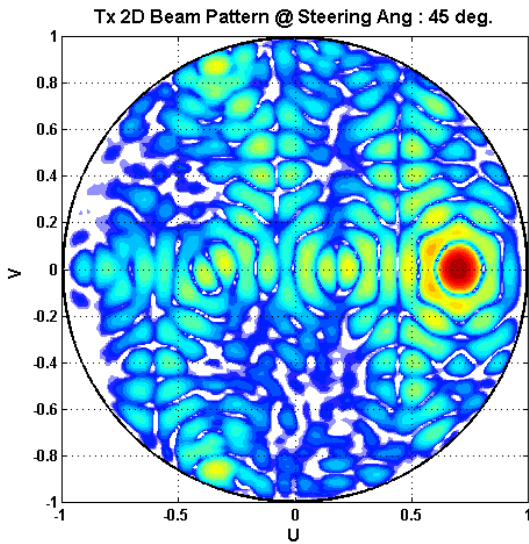


Fig. 4. Tx. 2D beam pattern measurement result (@Steering Angle)

배열 구조의 빔 합성 기법을 통해 수학적으로 계산된 이상적인 값과의 비교는 Fig. 5, 6을 통해 방위각, 고각 방향으로 확인할 수 있으며, 주빔 및 주빔 이의 부엽레벨의 수준 및 널 위치가 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는, 한 번의 근접전계 시험 동안 총 20개의 빔조향 시나리오를 적용하였으며, 측정된 결과의 비교를 통해 시나리오 설정 및 유효성을 검증하였다.

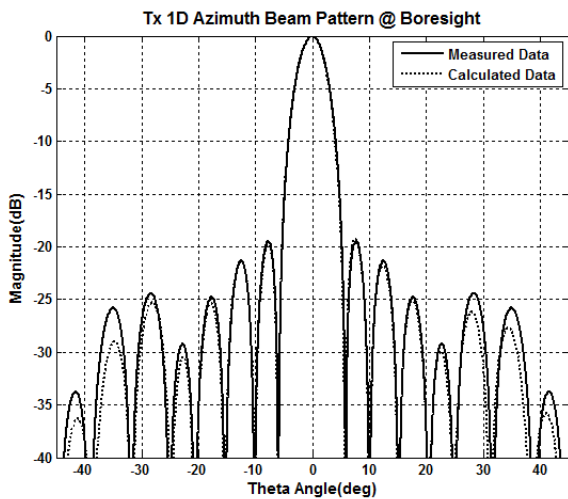


Fig. 5. Tx. azimuth beam pattern comparison

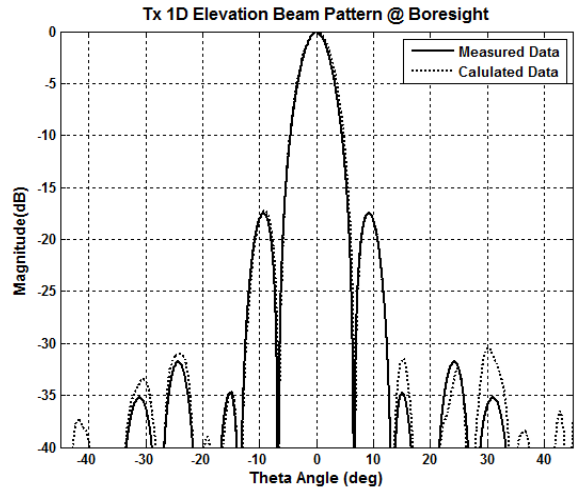


Fig. 6. Tx. elevation beam pattern comparison

능동 위상 배열 안테나는 기존의 일반적인 수동형 안테나와 달리 송수신기를 분리하여 측정할 수 없기 때문에, 안테나 이득 대신 안테나의 이득과 송신 출력이 합쳐진 EIRP를 사용하며, 상대적인 값인 안테나 이득과 달리 EIRP는 안테나 이득과 송신 출력이 합쳐진 절대값으로 근접전계 시험에서 EIRP를 측정하기 위해서는 근접전계시험에서 프로브 출력단의 절대 전력값(Fig. 2의 C에서의 전력값)을 알아야 한다^[3]. 일반적인 근접전계시험 시 이득 계산을 위해 수행하는 보정값을 임의로 0을 입력한 뒤 출력단의 절대 전력값을 적용함으로써 배열안테나 장치의 안테나 송신빔 이득 및 송신 출력이 포함된 EIRP를 측정할 수 있다. 수학적으로 합성하여 계산된 배열안테나 이득에 반도체 송수신 조립체 송신 출력을 곱한 값과의 측정값의 비교는 Table 2를 보면 확인할 수 있다. 예측한 값과 측정값이 오차 범위 0.1 dBm 이내에서 일치함을 확인할 수 있다.

Table 2. EIRP prediction/measurement value comparison

주파수	x-band
배열안테나 이득 (계산값)	29.23 dBi
송신 출력 (계산값)	65.84 dBm
EIRP (계산값)	95.07 dBm
EIRP (측정값)	95.05 dBm

이때 측정된 송신빔 방위각 EIRP 패턴은 Fig. 7과 같다.

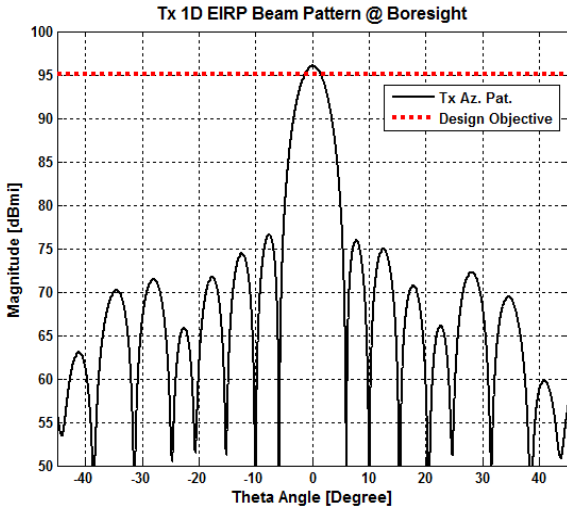


Fig. 7. Tx. EIRP pattern

4. 수신 분야 측정

능동 위상 배열 안테나의 수신 시험은 고풍력의 펄스 신호에 대한 측정을 수행하는 송신 시험과 달리 수신 신호가 광신호로 변환되는 형태이기 때문에 PNA-X를 이용하지 않고 데이터 저장 장치를 이용하여 원하는 시나리오의 데이터를 수집하게 되며, 이를 근접전계 데이터로 가공하고 원전계변환하여 수신 빔 특성을 검증하게 된다⁴⁾.

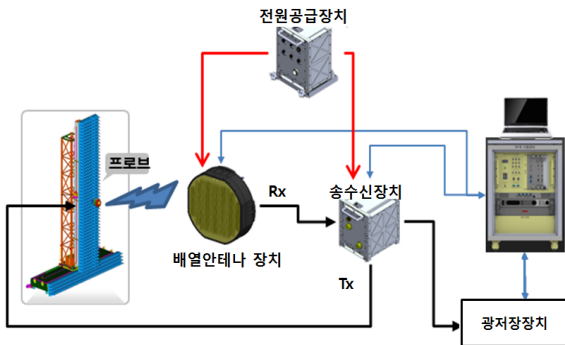


Fig. 8. Test configuration of Rx. beam near-field measurement

Fig. 8은 능동 위상 배열 안테나의 수신 빔 검증을 위한 시험 구성도이며, 송신 시험과 달리 프로브에 배열 안테나 장치에서 발생시킨 동기화된 연속(CW) 신호를 근접전계 프로브를 통해 주장비에 인가하여 수신 채널의 특성을 검증한다. 본 논문에서 적용한 배열 안테나 장치는 크게 수신 합패턴과 방위각, 고각 방향 각도 정확도 향상을 위해 적용할 모노펄스용 차패턴을 포함해 총 3개의 채널을 측정하였다. 측정된 시나리오는 프로브의 속도와 시나리오의 개수에 적합한 타이밍을 적용하여 한번 측정 시 최대한 많은 빔패턴을 확인 할 수 있게 최적화된 타이밍을 적용하였다. Fig. 9에서 보는 것처럼 총 측정 시나리오는 프로브의 측정 위치 사이에서 20개를 측정하였다. 본 논문에서 측정한 수신 패턴은 1번부터 19번까지 수신 주경로의 합, 차 패턴 측정을 수행하였으며, 마지막 20번째 시나리오에서는 수신 합, 차 패턴으로 추출된 모노펄스 기울기의 보정용 데이터를 추출하였다. 수신 시에는 표적의 각도 정확도 개선을 위해 방위각, 고각 모노펄스를 수행하며 이는 합, 차 패턴의 비교를 통해 구현된다. 하지만, 실 운용 시 합, 차 채널의 내외부적 요인에 의한 합, 차 채널의 상대적인 크기/위상이 바뀌게 되면 모노펄스 기울기는 왜곡되게 되고, 이러한 변화를 보정하기 위해서는 Fig. 9의 20번째 시나리오에서 추출한 수신 채널 보정 데이터가 필요하다.

실 운용 시 근접전계 보정 데이터 및 실 운용 시 획득하게 될 보정 데이터를 이용하여 수신 모노펄스 기울기를 보상하는 과정은 다음과 같다. 식 (1)은 근접전계 수신 시험을 통해 측정된 합, 차 채널의 복소상수의 위상을 정렬하기 위한 기준값을 나타낸다. 일반적인 모노펄스 기울기는 합, 차 패턴의 복소상수 실수부 및 허수부를 이용하며, 본 논문에서는 실수부를 적용하기 위해 차패턴의 우측 위상에 정렬값을 맞추었다. 다음으로 합, 차 채널 복소 상수의 비율로 표현하면 식 (2)와 같이 근접전계 시험을 통해 추출한 이상적인 모노펄스 기울기를 추출하게 된다.

$$MS_{NF}^{SC} = MS_{NF}^S \times \exp(-j \angle MS_{NF}^S) \quad (1)$$

$$MS_{NF}^{DC} = MS_{NF}^D \times \exp(-j \angle MS_{NF}^{D,R})$$

$MS_{NF}^{SC}, MS_{NF}^{DC}$: 위상 보정된 근접전계 합/차 채널 패턴
 MS_{NF}^S, MS_{NF}^D : 측정된 근접전계 합/차 채널 패턴
 $MS_{NF}^{D,R}$: 차 채널 패턴 우측 영역 위상 기준값

SC #n : n번째 시나리오 Rx-Main Path : 수신 주 경로
 MP #m : m번째 측정 위치 Rx-Cal Path : 수신 보정 경로
 (모노펄스 보정)

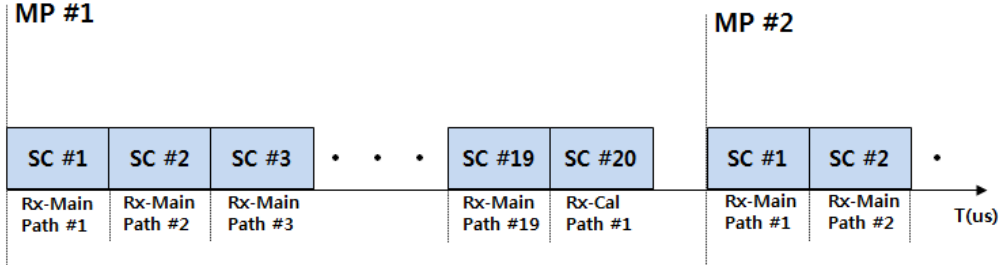


Fig. 9. Scenario configuration of Rx. beam measurement

$$Slope_{NF} = \frac{MS_{NF}^{DC}}{MS_{NF}^{SC}} \quad (2)$$

식 (2)는 다시 식 (3)처럼 모노펄스용 위상 정렬값을 따로 정의할 수 있으며, 여기서 식 (4)는 모노펄스 기울기를 만들기 위한 위상 정렬값으로 정의할 수 있으며, 이 값을 적용하여 차폐턴의 우측 위상에 정렬된 모노펄스 기울기를 얻을 수 있다.

$$Slope_{NF} = Re\left(\left(\frac{MS_{NF}^D}{MS_{NF}^S}\right) \times \exp(-j \arg\left(\frac{MS_{NF}^{DR}}{MS_{NF}^S}\right))\right) \quad (3)$$

$$\Phi = -\arg\left(\frac{MS_{NF}^{DR}}{MS_{NF}^S}\right) : \text{합, 차 채널 위상차} \quad (4)$$

이렇게 근접전계 시험을 통해 추출한 모노펄스 기울기를 이용하면 실 운용 시 표적의 각도 정확도를 높일 수 있지만, 실 운용 시 장치 내외부적인 변화에 의해 합, 차 채널의 상대적인 위상 변화가 생길 수 있으며, 이로 인해 모노펄스 기울기는 근접전계 시 추출한 값과 달라질 수 있게 되면 이는 각도 정확도의 열화로 탐지/추적 성능 저하의 원인이 된다. 이를 보상하기 위해 근접전계 시 보정값을 추출하며, 이 값을 기준으로 실 운용시의 보정값과 비교하여 보상함으로써 근접전계 상태의 모노펄스 기울기를 유지할 수 있게 된다.

$$MS_{NF}^S = MS_{FF}^S \times CS^S \quad (5)$$

$$MS_{NF}^D = MS_{FF}^D \times CS^D$$

MS_{FF}^S, MS_{FF}^D : 실 운용 시 합/차 채널 패턴
 CS^S, CS^D : 실 운용/근접전계 보정값 차이

이를 검증하기 위해 식 (5)와 같이 실 운용 시의 안테나 패턴과 근접전계 시의 패턴을 보정데이터 차이를 이용하여 표현하였다. 여기서 CS^S, CS^D 은 근접전계 당시와 실 운용 시 로깅한 보정값의 차이를 나타내며 이 값을 적용하여 실 운용 시의 패턴을 근접전계 상태로 복원할 수 있게 된다. 식 (5)를 이용하여 다시 모노펄스 기울기를 표현하면 최종적으로 식 (6)과 같아진다. 결론적으로 실 운용 시의 패턴에 계산된 보정값 차이를 보상하면 근접전계 상태 시 추출한 모노펄스 기울기로 복원할 수 있게 된다.

$$Slope_{NF} = Re\left(\left(\frac{MS_{FF}^D}{MS_{FF}^S}\right) \times \left(\frac{CS^D}{CS^S}\right) \exp(-j\Phi)\right) \quad (6)$$

앞서 설명한 Fig. 9의 시나리오를 적용하여 측정할 수신 2D 빔 패턴은 Fig. 10, 11과 같으며, 방위각 방향으로 조향된 패턴을 확인할 수 있다.

모노펄스를 위한 방위각, 고각 방향 합, 차 패턴은 Fig. 12, 13을 통해 확인할 수 있으며, 방위각, 고각 모두 30 dB 이하의 부엽레벨을 만족함을 확인할 수 있었다.

합, 차 패턴의 위상 정렬을 통해 확인한 모노펄스 기울기는 Fig. 14, 15를 통해 확인할 수 있다. 모노펄스 기울기의 성능 지표인 K-factor로 기울기에 반전력 빔폭값을 곱해주어 환산하면 방위각은 1.805° 고각은 1.919°로 이상적인 값을 확인하였다[8].

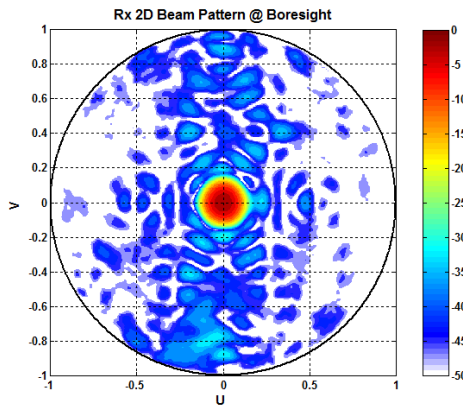


Fig. 10. Rx. 2D beam pattern measurement result (@Boresight)

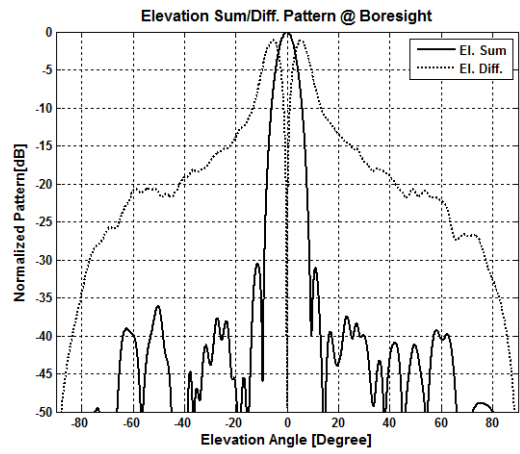


Fig. 13. Rx. elevation Sum./Del. pattern

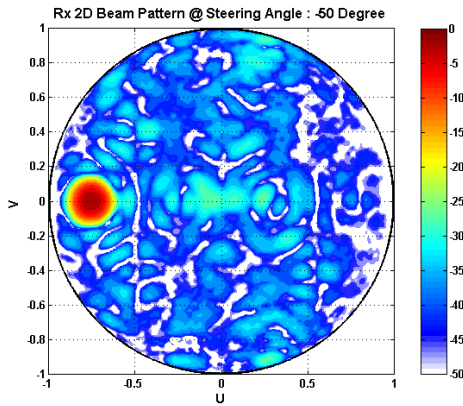


Fig. 11. Rx. 2D beam pattern measurement result (@Steering Angle)

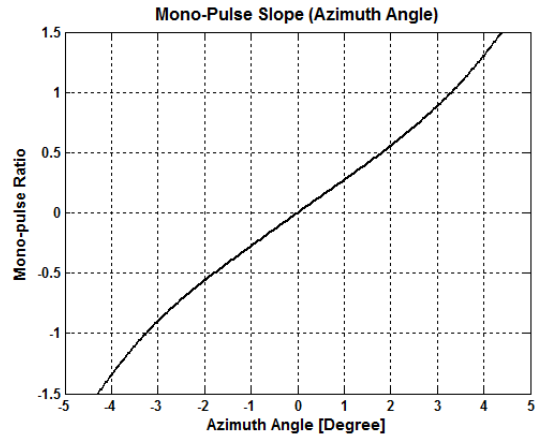


Fig. 14. Azimuth mono-pulse slope

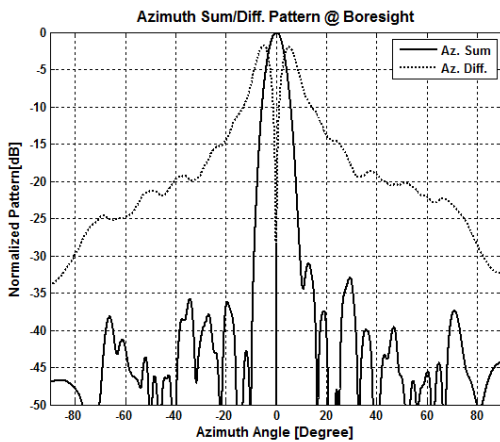


Fig. 12. Rx. azimuth Sum./Del. pattern

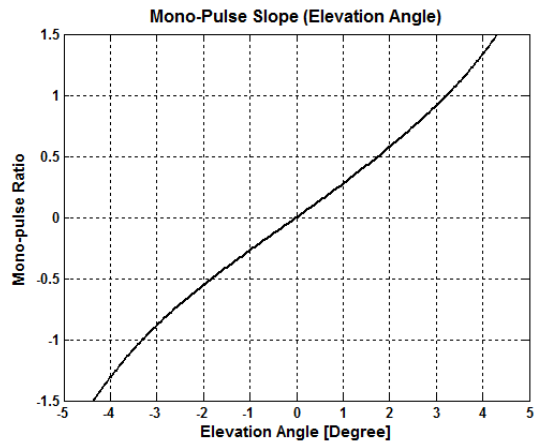


Fig. 15. Elevation mono-pulse slope

5. 결 론

본 논문에서는 평면형 능동 위상 배열안테나의 근접전계 시험을 통한 성능 검증에 관하여 기술하였다. 송수신 빔의 정확한 성능 검증을 위해 근접전계 시험장 내에서 측정을 수행하였으며, 측정 시 시나리오를 적용하여, 주파수 및 빔 조향각에 대한 검증을 효율적으로 수행할 수 있었다. 또한 능동 위상 배열안테나의 송신 이득 지표로 활용되는 EIRP의 측정을 통해 수학적으로 계산한 값과 비교하여 측정의 유효성을 검증하였으며, 수신 모노펄스 기울기를 보정하기 위한 보정값을 추출하여, 실 운용 시 모노펄스 기울기 보정의 유효성을 수학적으로 검증하였다. 근접전계 시험은 주변 환경의 영향을 거의 받지 않는 상태에서 정확한 기준 데이터를 추출할 수 있는 장점이 있고, 또한 효율성이나 활용성 측면에서 많은 장점을 가지고 있으므로, 향후에도 평면형 레이더 개발 시에 성능 검증에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 지원으로 수행되었음.

References

- [1] H. Chae, H. Kim, D. Lee, M. Jung and J. Park, "Transmit-Beam Pattern Measurement of the Active Phased-Array Antenna Using Near-Field Measurement Facility," The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 22(12), pp. 1155-1164, 2011. 12.
- [2] D. Garneski, "A New Implementation of the Planar Near-Field Back Projection Technique for Phased Array Testing and Aperture Imaging," in The 1990 Symposium Digest of the Antenna Measurement Technique Association, Philadelphia, 1990.
- [3] A. C. Newell, R. D. Ward and E. J. McFarlane, "Gain and Power Parameter Measurements using Planar Near-Field Techniques," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 36, pp. 792-803, June. 1988.
- [4] H. Chae, J. Lee, Y. Kim, H. Kim, H. Jin and J. Park, "Near-Field Receiving Measurement of Active Phased Array Antenna for Full Digital Radar Application," The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 27(7), pp. 625-634, July, 2016.
- [5] Lamont V. Blake, "Radar Range-Performance Analysis," Artech House, Inc., 1986.