근접 전계 시험 시설을 이용한 능동 위상 배열 안테나 송신 빔 패턴 측정

Transmit-Beam Pattern Measurement of the Active Phased-Array Antenna Using Near-Field Measurement Facility

채희덕 · 김한생 · 이동국* · 정명득* · 박종국

Heeduck Chae · HanSaeng Kim · Dong-Kook Lee* · Myung-Deuk Jeong* · Jongkuk Park

요 약

본 논문에서는 국내 최초로 개발되는 함상용 중거리 레이더에 사용되는 능동 위상 배열 안테나의 송신 빔 특성을 근접 전계 시험으로 측정하는 방안에 대하여 제시하였다. 측정하고자 하는 능동 위상 배열 안테나는 고출력 송신 빔을 펄스 형태로 방사하기 때문에 저출력의 연속적인 파형을 사용하는 일반적인 근접 전계 시험 시설에서는 측정하기 어렵다. 그래서 본 논문에서는 고출력 송신 시에도 견딜 수 있도록 설계된 근접 전계 시험 시설과 펄스 모드 측정을 지원하는 Agilent사의 PNA-X 네트워크 분석기를 이용한 근접 전계 시험으로 펄스 형태의 고출력 송신 빔을 방사하는 능동 위상 배열 안테나를 측정하는 방안에 대하여 제시하였고, 실제 개발된 능동 위상 배열 안테나의 고출력 송신 빔 패턴을 근접 전계 시험으로 측정하였다. 또한, 능동 위상 배열 안테나의 송신 특성인 EIRP(Effective Isotropic Radiated Power)를 측정하였고, 수학적 계산을 통해 예측한 EIRP 값과 비교한 결과 0.1 dB의 오차 내에서 동일함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we proposed the transmit beam measurement method of active phased array antenna, which is installed in Korea's first developed naval medium range radar, using near-field measurement facility. The pulse-mode high power characteristics of active phased array antenna's transmit-beam make it difficult to measure with general near-field measurement facilities where low power continuous RF signals are used. Thus, in this paper, the measurement method of active phased array antenna's transmit beam in conjunction with the near-field measurement facility, which is suitable for the high-power transmit beam measurement, and PNA-X network analyzer(Agilent Technologies), which can support pulse-mode measurement, was proposed and measured by near-field measurement techniques. And the EIRP(Effective Isotropic Radiated Power), the transmit characteristic of active phased array antenna, was measured by the near field measurement techniques and compared to numerical estimation which was nearly equal with small difference of 0.1 dB.

Key words : Active-Phased Array Antenna, Near-Field Measurement, Transmit-Beam Pattern

I. 서 론

최근 레이더 기술의 발전에 따라 능동 위상 배열 안테나가 레이더용 안테나로 많이 사용되고 있다.

「이 연구는 국방과학연구소(ADD)의 체계 개발 사업비로 연구되었음.」

LIG넥스원(LIGNex1)

*국방과학연구소(Agency of Defence Department)

· 논문 번호 : 20111007-122

· 교신저자 : 박종국(e-mail : snudyong@hanmail.net)

· 수정완료일자 : 2011년 11월 21일

그림 1. 능동 위상 배열 안테나의 블록도
Fig. 1. Block diagram of active phased-array antenna.

국내에서도 합상용 중거리급 탐색 레이더용으로 2 kW급 반도체 송수신 조립체를 이용하는 능동 위상 배열 안테나가 개발되었다.

능동 위상 배열 안테나의 경우에는 일반적인 수동형 안테나와 달리 송수신기와 분리하여 측정할 수 없기 때문에, 안테나 이득 대신 송신에서는 송신 출력과 안테나 이득이 합쳐진 EIRP를 사용하고, 수신에서는 안테나 이득과 시스템의 노이즈 특성이 합쳐진 G/T (ratio between antenna gain and system noise temperature)의 개념을 사용하여 능동 위상 배열 안테나의 특성을 규정한다^{[1]~[3]}.

해외에서는 근접 전계 시설을 이용한 능동 위상 배열 안테나 시험에 관하여 많이 연구되고 있다^{[1]~[3]}. 하지만 아직까지 국내에서는 근접 전계 시험 시설을 이용한 능동 위상 배열 안테나 측정에 대한 연구가 활성화되어 있지 않다. 그 이유는 능동 위상 배열 안테나에 대한 수요가 없었을 뿐 아니라 고출력의 송신 패턴을 측정하기 위한 근접 전계 시험 시설과 펄스 형태의 근접 전계 시험을 하기 위한 시험 장비가 제대로 갖추어지지 않았고, 펄스 형태를 사용하는 근접 전계 시험 구성에 대한 연구가 부족했기 때문이다.

그래서 본 논문에서는 국내 최초로 근접 전계 시험 시설에서 펄스 형태의 고출력 송신 패턴 시험을 하기 위한 측정 방안을 제안하였고, 실제 고출력 송신 시험이 가능하도록 설계된 근접 전계 시험 시설

에서 개발된 능동 위상 배열 안테나를 이용하여 제안한 시험 방법을 검증하였다. II 장에서는 시험에 사용된 능동 위상 배열 안테나와 근접 전계 시험 시설의 제원을 간략히 설명하고, 펄스 형태의 송신 시험을 하기 위한 근접 전계 시험 구성을 제안한 후, 시험 구성에서 신호의 흐름에 따른 동작 원리를 설명하였다. III 장에서는 실제 개발된 능동 위상 배열 안테나의 펄스 형태 고출력 송신 빔 패턴을 II 장에서 제안한 시험 방안으로 근접 전계 시험 시설을 이용하여 측정하고, VI 장에서 결론으로 마무리하였다.

II. 근접 전계 송신 시험 구성

2-1 능동 위상 배열 안테나 개요

국내 최초로 개발되는 능동 배열 레이더용 안테나는 그림 1과 같이 24개의 배열 소자로 구성된 주안테나 조립체, 16개의 반도체 송수신 조립체, 8개의 반도체 수신 조립체, 그리고 신호를 발생시키는 파형 발생기, 24개 채널을 수신하기 위한 디지털 수신기 등으로 구성된다. 배열 소자는 방위각 방향으로 고정된 저부엽 빔 패턴을 가지도록 38개의 복사소자와 테일러 분포를 만드는 굽전기로 구성되었다. 주안테나 조립체는 수직 방향으로 배열된 24개 배열 소자로 구성되고, 배열 소자 중에서 16개는 반도체 송수신 조립체와 연결되어 송신과 수신에 모두 관여하고, 나머지 8개는 반도체 수신 조립체와 연결되어 수신만을 담당한다.

파형 발생기에서 공급된 펄스 형태의 RF 신호는 분배기에 의해 각각의 반도체 송수신 조립체로 전달되고, 첨두 전력이 2 kW인 고출력 신호로 증폭된 후 배열 소자를 통해 공간으로 방사된다. 각각의 반도체 송신 조립체는 6-비트의 변위기를 가지고 있어 송신 시에 각 송신 경로마다의 위상차를 보상하면서 수직 방향으로 코시컨트 4승 형태의 송신 빔을 형성할 수 있도록 구현하였다. 수신 신호는 반도체(송)수신 조립체를 거쳐 저잡음 증폭된 후 디지털 수신기를 통해 24개의 I/Q의 디지털 신호로 변환되고, 처리부에서 신호 처리 과정을 거쳐 고각 방향으로 다중빔을 형성한다. 간략히 설명된 능동 위상 배열 안테나의 제원은 표 1과 같다. 능동 위상 배열 안테나의 크기는 주안테나 조립체 외에 하우징과 레이돔을 포

표 1. 능동 위상 배열 안테나 제원

Table 1. Resource of active phased-array antenna.

주파수	$f_c \pm 200$ MHz
크기	4.0 m(W)×1.7 m(H)
배열 소자	송신시 16개, 수신시 24개
방위각 부엽	< -30 dB
송신 출력	첨두 2 kW×16개
수신 NF	<3 dB
Duty	<10 %

표 2. 근접 전계 시험 시설 제원

Table 2. Resource of near-field measurement facility.

측정 가능 주파수	1~40 GHz
챔버 크기	12.0 m(L)×10.0 m(W)×8.5 m(H)
스캔 형태	평면형, 원통형
스캔 범위	6.0 m(W)×6.2 m(H)
측정 가능 출력	최대 100 kW
향온 및 향습	적용
펄스 모드	가능

함하고 있다.

2-2 근접 전계 시험 시설 개요

일반적인 근접 전계 시험은 신호 발생기나 네트워분석기로 연속파를 발생시켜 측정하고, 측정에 사용되는 신호의 크기도 크지 않다. 하지만 개발된 능동 위상 배열 안테나는 최대 32 kW 출력의 펄스 형태 RF 신호를 생성하기 때문에 일반적인 근접 전계 시험에서는 측정하기 어렵다. 그래서 본 논문에서는 근접 전계 시험을 위해 고출력 능동 위상 배열 안테나 시험에 적합하도록 설계된 근접 전계 시험 시설(LIG 넥스원, 구미)을 사용하였다. 사용된 근접 전계 시험 시설의 특징은 가장 큰 고출력 신호가 방사되는 중앙 전면부에 특수한 고출력 흡수체인 HFX-36-HC(Emerson & Cuming사)를 적용하여 고출력을 견딜 수 있도록 설계된 점과 펄스 모드의 전자파 산란계수 측정이 가능한 모델명이 N5242A(Agilent사)인 PNA-X 네트워분석기(이후 PNA-X로 표시)를 이용하여 펄스 형태의 파형을 근접 전계 시험시에 사용 가능하도록 한 점이다. 사용한 근접 전계 시험 시설의 제원은 표 2와 같다.

그림 2. 능동 위상 배열 안테나의 근접 전계 시험 구성도
Fig. 2. Block diagram for the near-field measurement of the active phased-array antenna.

2-3 근접 전계 시험 구성

근접 전계 스캔면(프로브가 움직이면서 만드는 평면)과 안테나의 개구면이 평행이 되도록 기계적인 정렬을 한 후, 그림 2와 같이 개발된 능동 위상 배열 안테나가 근접 전계 시험 시설과 연동하여 시험이 가능하도록 구성하였다. 추가적으로 안테나부 시험장비를 이용하여 처리부에서 발생하는 제어 신호를 모사하여 능동 위상 배열 안테나를 제어하고, 근접 전계 시험에 필요한 연동 신호를 발생하도록 하였다.

근접 전계 시험 시설을 이용한 송신 빔 측정을 위해 능동 위상 배열 안테나의 파형 발생기 대신 PNA-X를 이용하여 펄스 형태의 파형을 발생시켜 반도체 송수신 조립체를 구동시켰다. PNA-X의 최대 출력이 15 dBm이고, PNA-X에서 안테나 입력단까지의 케이블 길이가 10 m 이상이기 때문에 반도체 송수신 조립체의 구동 조건을 만족시킬 수 있도록 그림 2와 같이 PNA-X의 송신 출력 포트 다음에 안정적인 구동증폭기를 추가하였고, 그림 2의 A 위치에서 그림 1의 A 위치인 파형 발생기의 출력과 동일한 13 dBm $\pm$ 0.5 dBm이 되도록 조정하였다. 추가적으로 PNA-X에 손상을 주지 않는 범위(<15 dBm) 내의 수신 신호가 수신 포트에 들어오도록 프로브와 PNA-X 사이에 고출력 감쇄기를 추가하여 조절하였다.

근접 전계 제어 PC는 GPIB를 이용하여 PNA-X를 제어하고 PNA-X에서 측정된 데이터를 저장하며, 스캐너 컨트롤러와 LAN으로 연결하여 스캐너의 구동

제어를 담당하도록 하였다.

2.4 신호 흐름에 따른 동작 원리

펄스 형태의 고출력 송신 패턴을 측정하기 위해서는 측정하고자 하는 능동 위상 배열 안테나와 근접 전계 시험 시설과의 타이밍 연동이 매우 중요하다. 그래서 스캔면에서 샘플링된 특정 위치에 프로브가 도달하면 Trig-A라는 기준 신호를 스캐너 컨트롤러에서 생성시켜 이 신호를 기준으로 모든 장비가 동기화되도록 구성하였다. Trig-A를 기준으로 생성되는 나머지 트리거 및 RF 신호는 그림 3과 같다. 안테나부 시험 장비는 Trig-A에 맞추어 $(t_1 + mD)$ 초 뒤에 Trig-B를 생성하여 PNA-X에 전달한다. Trig-B는 하나의 샘플 데이터를 측정하라는 명령으로 안테나부 시험 장비에서 PNA-X로 전달된다. 또한, Trig-B에 맞추어 안테나부 시험 장비는 반도체 송수신기 내의 변위기와 여러 스위치들이 정해진 시나리오대로 측정 가능한 상태가 되도록 Trig-B 발생 이후 일정 시간이 지나면 제어 신호를 능동 위상 배열 안테나에 전달한다. 안테나부 시험 장비는 PNA-X에 Pre-TxPW라는 트리거를 전달하는데, 이 신호는 PNA-X가 펄스 형태의 송신 신호를 발생시키기 위한 기준 신호가 된다. 펄스 모드를 지원하는 PNA-X는 외부 트리거 신호에 해당하는 Pre-TxPW가 들어오면 사전에 세팅된 펄스 모드 정보에 따라 펄스 형태의 RF 신호 즉 TxPW를 발생한다. 표 3은 근접 전계 시험 시 사용된 PNA-X의 펄스 모드 세팅 정보이다.

외부 트리거에 해당하는 Pre-TxPW가 PNA-X에 들어오면 PNA-X는 표 3에서 세팅된 대로 $(t_2' - t_2)$ 뒤에 W_1 만큼의 펄스폭을 가지는 펄스 형태의 RF 신호를 PNA-X의 송신 포트에 발생시킨다. 한편, Strobe 신호가 안테나부 시험 장비에서 능동 위상 배열 안테나에 전달되면 반도체 송수신기는 스트로브 신호에 맞추어 정해진 펄스폭 동안 송신 구간을 개방한다. 이 구간에 맞추어 펄스 형태의 RF 신호가 전달되어 고출력으로 증폭될 수 있도록 Strobe 신호의 펄스폭은 그림 3에서와 같이 TxPW의 펄스에 비해 앞뒤에 각각 Δ_1 과 Δ_2 만큼의 여유를 가지도록 하였다.

펄스 모드로 PNA-X가 동작할 경우에는 PNA-X가 IF bandwidth(IFBW)를 만족하는 샘플 데이터가 취득할 수 있도록 충분한 펄스 개수의 TxPW가 만들어져

그림 3. 능동 위상 배열 안테나 근접 전계 시험 타이밍
Fig. 3. Timing diagram for the near-field measurement of the active phased-array antenna.

표 3. 펄스 모드 동작을 위한 PNA-X 세팅값

Table 3. Setting values for the pulse-mode operation of PNA-X.

Desired PRF and IFBW		
Pulse Repetition Frequency(PRF)	5 kHz	
Pulse Repetition Interval(PRI)	200 usec	
Receiver IF Bandwidth(IFBW)	357 Hz	
Modulation/gates		
	Width	Delay
Source modulation	W_1	$t_2' - t_2$
A IF gate	$W_1 - 4$ us	$t_2' - t_2 + 4$ us
B IF gate	$W_1 - 4$ us	$t_2' - t_2 + 4$ us
R1 IF gate	$W_1 - 4$ us	$t_2' - t_2 + 4$ us
R2 IF gate	$W_1 - 4$ us	$t_2' - t_2 + 4$ us

야 한다. 본 논문에서는 357 Hz의 IFBW를 만족할 수 있도록 1개의 Trig-B당 16개의 TxPW 펄스를 사용하였다. 그리고 반도체 송수신 조립체의 안정성을 고려하여 duty 4 %의 PRI(Pulse Repetition Interval)와 펄스폭으로 측정하였다. 반도체 송수신 조립체의 duty를 고려하지 않고 PRI를 줄이거나 펄스폭을 늘리게 되면 반도체 송수신 조립체의 동작 온도의 상승을 야기하여 근접 전계 시험이 수행되는 동안 반도체 송수신 조립체의 RF 특성이 변하는 문제가 발생할 수 있기 때문이다.

PNA-X에서 발생한 신호는 평탄한 envelope을 가지는 펄스 신호이지만, 반도체 송수신 조립체를 거쳐 고출력으로 증폭된 신호는 그림 4와 같이 필연적으로 처음 수 us 동안 overshoot가 발생한다. 그래서 프

그림 4. 펄스 형태 RF 신호 파형 변화 과정
Fig. 4. The change procedure of pulsed RF signal.

로브를 통해 포트 2로 입력되는 overshoot가 포함된 입력 신호를 그림 4와 같이 PNA-X에서 overshoot를 포함하지 않고 수신 신호를 샘플링하여 산란계수를 계산할 수 있도록 표 3과 같이 수신 게이트를 조절하였다.

앞에서 제안한 방법은 하나의 Trig-B 신호에 하나의 시나리오에 대한 데이터를 취득하는 방법을 기준으로 설명하였다. 발생하는 Trig-A의 시간 간격이 충분할 경우에는 하나의 Trig-A 안에 여러 개의 Trig-B를 추가하여 동시에 여러 개의 시나리오를 측정할 수 있다. 본 논문에서 Trig-A의 발생에 의해 측정되는 샘플은 근접 전계 측정의 정확도를 고려하여 최대주파수에서의 반파장보다 작은 값인 4.8 cm의 간격으로 측정하였고, 프로브의 이동 속도는 20 cm/s를 유지하였다. 그러므로 Trig-A 간에 소요되는 시간 간격은 240 ms이다. 1개의 Trig-B에 의해 PNA-X에서 측정에 소요되는 시간은 13 ms가 필요하다. 그러므로 1개의 Trig-A당 최대 18개의 Trig-B 신호가 들어갈 수 있다. 하지만 PNA-X의 데이터 처리 시간, 반도체 송수신기로 필요한 명령을 보내는 시간 등을 고려하여 본 논문에서는 하나의 Trig-A 신호에 14개의 Trig-B 신호를 두었다. 이 방법으로 한 번의 근접 전계 시험 수행 시 총 14개의 빔 패턴을 측정할 수 있도록 하여 측정에 소요되는 시간을 효과적으로 감소시켰다. 14개 시나리오는 동일한 주파수에서 반도체 송수신기의 변위기 설정의 조합에 따른 빔 패턴으로 본 논문에서는 송신에 사용되는 빔 모드와 빔 조향각의 조합으로 설정하고 빔 패턴을 측정하였다.

III. 근접 전계 송신 시험

3-1 송신 위상 정렬

제작된 능동 위상 배열 안테나는 16개의 송신 채널로 구성된다. 각 송신 채널은 안테나에 해당하는 배열 소자와 송신기에 해당하는 반도체 송수신 조립체를 가지고 있고, 송신 빔 패턴은 모든 송신 채널에서 빔을 방사하면 공간상에서 합성된다. 각 송신 채널이 동일한 빔 패턴을 가지고 있을 경우에는 배열 이론^[7]을 이용하여 송신 빔 패턴을 계산할 수 있다. 하지만 한정된 배열 구조와 안테나 구조물의 형상 및 가장자리 효과(edge effect), 그리고 배열 소자 상호간의 간섭 효과로 인하여 각 송신 채널이 동일한 패턴을 가지지 않는다. 또한, 송신 채널을 형성하기 위해 사용된 능동 소자와 수동 소자들이 모두 동일한 특성을 가지고 있지 않기 때문에 채널마다 송신 특성의 차이가 발생한다. 그러므로 송신 빔을 형성하기에 앞서 능동 위상 배열 안테나의 각 송신 채널 간의 차이를 최소화할 필요가 있다. 그래서 본 논문에서는 각 송신 채널 간 발생한 위상 차이를 반도체 송수신 조립체 내의 6-비트 변위기를 이용하여 보상하는 송신 위상 정렬 시험을 수행하였다. 그리고 송신 위상 정렬 시험의 유효성을 보장하기 위해 송신 위상 정렬 시험 전/후에 보정 경로를 이용하여 보정 신호를 저장하고 비교하여 송신 위상 정렬 시험 중에 능동 소자의 변화가 발생하지 않음을 확인하였다.

송신 채널의 위상차를 보상하기 위한 송신 위상 정렬 시험의 방법은 point-to-point 측정, 백프로젝션을 이용한 반복적인 방법, 원전계 또는 근접 전계 시험으로 측정된 배열 소자 패턴의 위상 비교 방법 등이 있다. 개발된 안테나가 1차원 선배열로 구성된 능동 위상 배열 안테나이므로 각 송신 채널을 별도로 측정하더라도 소요되는 시간이 많지 않고 정확한 위상 오차를 측정할 수 있기 때문에 본 논문에서는 배열 소자 패턴을 근접 전계 시험으로 측정하여 위상을 비교하는 방법으로 송신 위상 정렬을 수행하였다. 송신 위상 정렬 전에 반도체 송수신 조립체를 1개씩 순차적으로 켜고, 근접 전계 시험을 수행한 후 원전계 변환^[4]을 하여 구한 송신 채널의 빔 패턴 결과는 그림 5(a), (b)와 같다. 그림 5(a)는 측정된 각각의 송신 채널 빔 패턴 크기이다. 반도체 송수신 조립체 내의

(a) 16개 송신 채널의 빔 패턴 크기
(a) Beam pattern magnitude of 16 transmit channels

(b) 16개 송신 채널의 빔 패턴 위상
(b) Beam pattern phase of 16 transmit channels

(c) 송신 채널 위상 정렬 후의 16개 송신 채널의 빔 패턴 위상
(c) Beam pattern phase of 16 transmit channels after transmit channel compensation for the phase alignment

그림 5. 송신 채널의 개별 빔 패턴 특성

Fig. 5. Characteristics of transmit channel beam pattern.

고출력 증폭기에서 거의 동일한 송신 출력이 발생한다고 보면 그림 5(a)에서 보이는 각 송신 패턴상의

출력임은 배열 소자간의 상호 간섭 등과 같이 구조적 영향으로 발생한 빔 패턴의 왜곡 성분이다. 그림 5(b)는 측정된 송신 채널 빔 패턴의 위상 성분이다. 각 송신 채널간의 경로차와 능동 소자/수동 소자의 특성 차이로 인해 전면 방향(고각 0도)에서의 위상이 동일하지 않다. 그러므로 그림 5(c)와 같이 안테나 전면 방향에 대해 위상 지연 특성이 동일하게 정렬되도록 각 송신 채널마다 차이가 나는 위상값을 변위기를 이용하여 보상하였다.

정렬 상태를 확인하기 위해 모든 송신 채널에 송신 위상 정렬값을 적용하고, 동시에 방사하면서 근접 전계 시험을 통해 측정된 근접 전계 데이터는 그림 6 과 같다. 좀 더 정확한 정렬 상태를 확인하기 위해

(a) 크기 분포
(a) Magnitude distribution

(b) 위상 분포
(b) Phase distribution

그림 6. 송신 채널 위상 정렬 후 측정된 근접 전계 시험 데이터

Fig. 6. Measured near-field data after transmit channel phase alignment.

그림 7. Back-projection 기법을 이용하여 안테나 개구면에서 계산된 전계 분포

Fig. 7. Calculated E-field distribution on the antenna aperture using back-projection technique.

백프로젝션 기법^[6]을 이용하여 안테나 개구면에서의 전계의 크기와 위상을 구하였고, 그 결과는 그림 7과 같다. 근접 전계 데이터만을 이용하여 정렬 상태를 확인한 것에 비해 백프로젝션을 이용하면 안테나 개구면에서의 전력 분포를 확인할 수 있는 장점이 있다. 그림 7에서 개구면의 전계 분포가 방위각 방향으로 테일러 분포, 고각 방향으로 균일함을 확인할 수 있고, 위상은 모두 동위상으로 잘 정렬되어 있음을 확인할 수 있었다. 백프로젝션의 결과를 바탕으로 계산된 개구면 내에서 배열 소자간의 크기와 위상의 표준차는 각각 0.3 dB와 2.25도로 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

3-2 송신 빔 패턴 및 EIRP 측정

개발된 능동 위상 배열 안테나는 송신시에는 고각 방향으로 팬 빔을 형성하고, 수신시에는 디지털 빔 형성 기법을 사용하여 다중 빔을 형성한다. 수신시에 다중 빔을 활용하여 고각 방향으로 균일한 크기의 신호를 탐지한다고 가정하면 송신시에 탐지 빔위를 만족하는 최적화된 빔 패턴은 cosec^4 형태의 빔이다. 그래서 본 논문에서는 송신 빔이 고각 방향으로 cosec^4 형태를 만족하도록 최적화 알고리즘을 이용하여 개구면 위상 분포를 설정하였다.

앞절에서 구한 송신 위상 정렬값과 최적화 알고리즘으로 구한 위상 가중치를 동시에 적용하고, 근접 전계 실방사 연동 시험을 통해 측정된 빔 패턴은 그림 8과 같다. 그림 8은 2차원 빔 패턴으로 고각 방향으로 넓게 팬 빔을 형성하고 있고, 방위각 방향으로는 저부엽 빔을 형성하고 있다. 그림 9(a)의 실선은 측정된 고각 방향의 빔 패턴으로 배열이론으로 계산된 이상적인 송신 빔 패턴과 유사함을 알 수 있다. 이상적인 패턴은 배열 소자 빔 패턴을 코사인으로 가정하고 이상적인 가중치를 적용한 패턴이지만 측정된 패턴은 배열 구조에 의해 배열 소자마다 고각 빔 패턴의 차이가 존재하므로 그림 9(a)와 같이 이상적인 패턴과 실제 패턴 사이에 약간의 불일치가 발생하였다. 방위각 방향으로로는 테일러 전력 분포에

그림 8. 근접 전계 시험 데이터로부터 변환된 2차원 원전계 빔 패턴

Fig. 8. Transformed 2-dimensional far-field beam pattern from measured near-field data.

(a) 고각 빔 패턴
(a) Vertical pattern

(b) 방위각 빔 패턴
(b) Horizontal pattern

그림 9. 1차원 송신 빔 패턴
Fig. 9. 1-dimensional beam pattern.

따라 급전기를 정밀하게 설계하고 제작함으로써 그림 9(b)과 같이 -30 dB 이하의 저부엽 빔 패턴을 얻을 수 있었다.

한 번의 근접 전계 시험을 통해 측정된 14개 시나리오에 따른 빔 패턴 결과는 그림 10과 같다. 동일 주파수에서 각각의 반도체 송수신 조립체의 변위기 위상 세팅값의 조합은 송신에 필요한 3개의 빔 모드에 대한 수 개의 빔 조향이 되도록 적용하였다.

EIRP는 간단하게는 안테나 이득과 송신 출력의 곱으로 설명할 수 있다. 근접 전계 시험에서 EIRP를 측정하기 위해서는 근접 전계 시험에서 프로브 출력단의 전력 즉 그림 2에서 B위치에서의 전력값을 알

그림 10. 14개 시나리오의 고각 빔 패턴 결과
Fig. 10. Vertical beam pattern of 14 scenario.

표 4. 능동 위상 배열 안테나의 EIRP
Table 4. EIRP of active phased-array antenna.

주파수	f_c
EIRP(측정값)	101.9 dBmi
안테나 이득(계산값)	27.4 dBi
송신 출력(계산값)	74.6 dBm
EIRP(계산값)	102.0 dBmi

아야 한다^[5]. 고출력의 송신 빔이 방사되고 있는 상황에서 프로브 출력단의 전력을 직접 측정하는 것은 불가능하므로 손실을 알고 있는 전송 선로를 추가하여 측정한 후 디임 베딩(de-embedding)하는 방법으로 측정하였다. EIRP 측정을 위해 삽입된 전송 선로는 계측기 측정 범위를 고려하여 추가된 고출력 감쇄기를 포함하여 거의 -60 dB에 이르는 삽입 손실을 가지기 때문에, 삽입 손실을 측정할 때 수차례 반복 측정하였고, 근접 전계 프로브를 여러 위치로 이동하여 측정한 후 평균을 취하는 방법으로 EIRP 측정의 정확도를 높였다. 비교를 위해 별도로 측정한 배열 소자 빔 패턴을 수학적으로 합성하여 계산된 안테나 이득에 반도체 송수신 조립체의 송신 출력을 곱한 값과 실제 측정된 EIRP 값은 표 4와 같다. 표 4에서 안테나의 이득은 반도체 송수신 조립체를 조립하기 전에 복사소자와 방위각 급전기로 구성된 각 배열 소자를 일반적인 근접 전계 시험으로 별도로 측정 후 측정된 근접 전계 데이터를 수학적으로 합성하여 구하였고, 송신 출력은 반도체 송수신 조립체를 단

독으로 시험하여 얻은 평균값을 적용하였다. 배열 소자와 반도체 송수신 조립체를 연결할 경우에 각각의 송신 채널의 특성이 약간씩 달라질 수도 있으나, 반도체 송수신 조립체의 경우에는 일정한 출력을 유지하도록 하는 ALC(Auto Level Control) 기능이 추가되어 있기 때문에 안정적인 송신 출력을 유지할 수 있다. 그래서 안테나 이득과 송신 출력을 정확히 예측할 수 있어 표 4와 같이 EIRP의 계산값과 실측치가 0.1 dB의 차이로 일치하는 결과를 얻었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 펄스 형태의 고출력 송신 빔 패턴을 가지는 능동 위상 배열 안테나를 근접 전계 시험 시설과 펄스 모드를 지원하는 PNA-X 네트워크 분석기를 이용하여 직접 측정하는 방법을 제안하였고, 실제 개발된 능동 위상 배열 안테나의 고출력 송신 빔 패턴을 측정하였다. 또한, 능동 위상 배열 안테나의 송신 특성인 EIRP를 실측하였고, 계산을 통해 예측한 결과와 0.1 dB 오차로 동일한 결과를 얻었다. 향후 레이더의 개발 추세를 고려할 때 능동 위상 배열 안테나의 특성을 근접 전계 시험을 이용하여 측정하는 경우가 증가할 것으로 예상되므로, 본 논문에서 제시한 방안이 펄스 모드의 송신 빔 패턴 시험에 많이 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] E. Grorud, C. Mehl, C. Renard, E. Semmler, and K. Weidmann, "Design and measurement of an active

array antenna for an airborne X-Band SAR/MTI radar", *Proceedings of The European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP 2006)*, Nice, France, Nov. 2006.

- [2] D. W. Hess, "Measurement of EIRP and antenna response for active antennas with spherical near-field scanning", *IEEE Antenna Measurements and SAR*, pp. 49-54, May 2004.
- [3] W. Haselwander, M. Uhlmann, S. Wustefeld, and M. Bock, "Measurement on an active phased array antenna on a near-field range and an anechoic far-field chamber", *31st European Microwave Conference*, London, Sep. 2001.
- [4] J. J. H. Wang, "An examination of the theory and practices of planar near-field measurement", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, pp. 746-753, Jun. 1988.
- [5] 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, Jun. 1988.
- [6] 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 Techniques Association*, Philadelphia, 1990.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory & Analysis and Design*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1982.

채 희 덕

1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2007년 3월~현재: LIG넥스원 선임

연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

김 한 생

2000년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 2월~현재: LIG넥스원 수석
연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템

이 동 국

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

[주 관심분야] 레이더 시스템 설계/분석, 위상 배열 안테나 설계/분석, 안테나 측정, 전자장 수치 해석, 안테나 신호 처리

박 중 국

1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2001년 11월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

정 명 득

2003년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
2001년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 능동 배열 레이더 시스템