

이동성을 구비한 능동위상배열안테나 근접전계 스캐너 설계 및 성능 검증

Design and Performance Verification of Active Phased Array Antenna Near-Field Scanner with Mobility.

유우성[★], 김성균^{*}, 권용욱^{*}, 정기용^{**}, 장현순^{**}

Woo-Sung Yoo[★], Sung-Gyun Kim^{*}, Yong-Wook Kwon^{**},
Gi-Young Jung^{**}, Heon-Soon Jang^{*}

Abstract

It is necessary to check the fault of phased array antenna, when the active phased array radar installed in the site is suspected performance degradation due to external impact or long-term operation. However, the near-field test should be performed in anechoic chamber in order to measure the phased array antenna, so that much time and cost must be applied for radar disassembly and transportation, and the operational availability of the radar system is deteriorates. Therefore, we propose a near-field scanner with mobility to check the fault of the phased array antenna at the site, and the effectiveness of the proposed scanner was verified with $\pm 0.5\text{dB}$ magnitude and $\pm 1.5^\circ$ phase in comparison with measured data in anechoic chamber.

요약

사이트에 설치되어 운용 중인 능동위상배열레이다가 외부의 충격 또는 장기간 운용에 따른 성능열화가 의심될 경우, 위상배열안테나의 이상여부를 확인해야 한다. 하지만, 위상배열안테나를 측정하기 위해서는 무반향성 챔버에서 근접전계 시험이 수행되어야 하므로, 레이더 장치의 분해 및 운송을 위해 많은 시간과 비용이 투입되어야 하고 레이더 시스템의 운용 가용도가 나빠지게 된다. 따라서, 본 논문에서는 사이트에서 위상배열안테나의 이상여부를 확인할 수 있도록 이동성을 구비한 능동위상배열안테나 근접전계 스캐너를 제안하고, 무반향성 챔버에서 측정된 데이터와 비교하여 크기 $\pm 0.5\text{dB}$ 와 위상 $\pm 1.5^\circ$ 오차수준으로 측정유효성을 검증하였다.

Key words : Radar, Phased Array Antenna, Near-Field, Scanner, AC Servo Motor Control.

* LIGNex1.Co., Ltd

** Mirae System., Inc.

★ Corresponding author

e-mail: ywoos9271123@gmail.com, tel: 054-469-8060

Manuscript received Mar. 15, 2017; revised Mar. 27, 2017 ;accepted Mar. 29, 2017

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

능동 위상배열안테나는 안테나에 급전되는 신호의 크기와 위상을 반도체 송수신모듈을 통해 제어함으로써, 빠른 전자적 빔 조향, 다중 빔 형성, 실시간 적응법 형성 등 다양한 복사패턴을 형성한다. [1],[2]

능동 위상배열안테나는 각각의 복사소자가 송수신모듈과 연결되어 있으므로 배열안테나, 송수신모듈, 하향변환기, 과형발생기, 디지털 송수신기, A/D변환기를 포함하여 경로별 크기와 위상보정을 수행하고, 시스템 전체통합 후 근접전계 측정시스템을 활용하여 복사패턴이 측정되어야 한다. [3]

기존의 아날로그 방식으로 빔을 합성하는 능동 위상배열안테나는 RF단에서 근접전계 시험 또는 원전계 시험을 통해 안테나 빔 패턴 특성을 측정할 수 있지만, 디지털 수신방식을 사용하는 능동 위상배열안테나는 디지털처리를 통해 안테나 빔 패턴이 형성되기 때문에 기존의 아날로그 측정방식을 적용하기 어려운 한계가 있다. [4]

또한, 위상배열 안테나를 사용하는 레이더는 측정 정확도를 향상하기 위한 목적으로 하나의 안테나를 사용하여 서로 다른 합 채널과 차 채널로 이루어진 두 개의 안테나 경로로 수신하여 위상 또는 진폭비교를 통해 방위각 또는 고각의 정확도를 향상하는 모노펄스 기능을 활용한다. [5]

그러므로, 능동 위상배열안테나를 적용한 레이더 시스템은 정확한 성능측정과 시스템의 안정성을 위하여 무반향성 챔버 안에서 근접전계 시설을 이용하여 보정 및 송수신시험이 이루어지며, 체계 시험에는 모노펄스 레이더 시뮬레이터를 이용한 모의시험 및 실 표적 탐지시험을 모두 수행한 후에 사이트에 설치된다. [6]

그러나, 레이더 설치 또는 운용 중 외부충격으로 인해 안테나부의 고장 및 장기간 운용에 따른 열화가 의심되면 성능 및 기능의 확인이 필요하다.

이 경우, 근접전계 시험을 위해 장비의 분해 및 이송이 불가피하므로 많은 시간과 비용이 투입되어야 하며, 장비의 운용 가용도가 낮아지게 된다.

따라서, 레이더 설치사이트에서 안테나부의 고장 여부를 판단할 수 있도록 근접전계시험을 모사가 가능한 경량이며 이동성을 보유하고 신뢰성이 높은 근접전계 시험장치가 필요하다.

대부분의 레이더시스템은 시스템을 구성하는 하부 구성품의 고장유무 및 시스템전체 성능을 점검할 수 있는 기능을 보유하고 있지만, 안테나는 시스템의 초단에 위치하기 때문에 자체점검기능이 포함시키기 어렵다.

본 논문에서는 레이더가 설치된 사이트환경에서 안테나부의 고장판단 및 장기간 사용에 따른 성능열화를 점검하여 재보정의 필요성을 판단할 수 있는 이동성을 구비한 이동조립형 근접전계 스캐너를 제안하고, 설계 및 구현하여 측정결과의 유효성을 검증하였다.

II장에서는 근접전계 스캐너의 설계고려사항을 반영한 하위 구성품의 선정 및 설계내용을 설명하고, III장에서는 구현된 스캐너를 이용하여 레이더 설치사이트에서 수행한 근접전계 시험데이터와 무반향성 챔버에서 측정한 데이터를 비교분석하여 그 유효성을 검증하였으며, 마지막 장에서는 결론으로 마무리하였다.

II. 본론

2.1 근접전계 스캐너 설계 고려사항

스캐너는 근접전계 측정시스템의 주요 구성품으로 안테나 개구면을 이동하는 프로브의 이동 정확도 및 안정도를 결정짓는다.

스캐너의 설계고려사항에는 스캐너의 형상과 기구적 안정성 및 RF케이블을 포함한 RF시스템의 정확도, 그리고 프로브의 정확한 위치제어가 포함되어야 한다. [7]

부가적으로 빠른 측정을 위한 스캐닝속도와 업그레이드 가능성도 고려되어야 한다. [8]

본 과제에서는 이동성과 편의성을 감안하여 박스프레임 형태에 비해 소모자재가 적게 들고, 제작이 용이하며 보정 및 교정이 간편한 무빙타워 형태를 선정하여 설계하였다.

무빙타워 형태의 스캐너는 레일 가이드 부분만 흡수체 부착이 필요하며, 반사 면적이 작으므로 클러터 성분을 최소화 할 수 있는 장점도 있다.

제안한 이동성을 구비한 무빙타워형태의 근접전계 스캐너를 이용하여 데이터를 추출할 피측정 레이더의 제원은 표 1. 과 같다.

Table 1. Radar specification.

표 1. 레이더 제원

Item	Specification
Frequency	S-band
Tx Power	≤ 〇〇kW
Pulse Type	Linear Frequency Modulation
Antenna	Active Phased Array Antenna
Mono Pulse	2-Axis(Azimuth/Elevation)
Aperture Size	0.0m x 0.0m

2.2 RF 프로브와 RF케이블의 선정

레이더 설치사이트에서 측정한 근접전계 결과는 무반향 챔버에서 수행한 근접전계 결과와 비교하여 데이터의 유효성을 판단하여야 한다.

따라서, RF 프로브는 피측정 안테나의 사용주파수와 및 개구면의 크기 및 측정공간의 크기를 감안하여 표 2.와 같이 선정하였다. [9]

Table 2. RF Probe specification.

표 2. RF프로브 사양

Item	Specification
Frequency [GHz]	2.60 ~ 3.95
Gain [dB]	5.13 ~ 7.25
Connector	N Type Female

RF케이블은 삽입손실 성능이 우수하고, 진폭변화율 및 위상안정도가 높고 유연성 좋아야 한다.

프로브가 가이드를 이동하며 케이블에 꺾임이 발생하게 되면 진폭과 위상이 변화하여 정확한 측정이 되지 않기 때문이다.

따라서, 주파수범위를 만족하고 삽입손실 및 꺾임에 의한 위상변화 특성이 우수한 Gore사의 Phaseflex 시리즈의 OS타입 RF케이블을 선정하였다. [10]

2.3 가이드(Guide) 선정 및 설계

근접전계를 수행하기 위해서는 프로브를 제어하여 이동시켜야 하므로, 프로브를 장착할 수 있는 가이드가 필요하다.

가이드를 설계하기 위해서는 피측정 안테나의 운용주파수에 따른 파장을 먼저 계산하여야 한다.

그림 1.과 같이 방사근접전계 영역에서는 프로브와 안테나의 거리가 변화하더라도 평균에너지 밀도가 일정하게 유지된다.

따라서, 레이더와 프로브사이의 거리가 3λ에서 2D²/λ 사이에 위치하도록 설계하여야 한다. [11]

본 과제에서는 피측정 안테나의 운용주파수인 S-밴드 대역을 포함하며, 협소한 사이트 설치환경 및 이동 편이성을 감안하여 최소 이격 요구거리가 되도록 피측정 안테나 개구면과 프로브 개구면 사이의 거리를 40cm로 구성하였다.

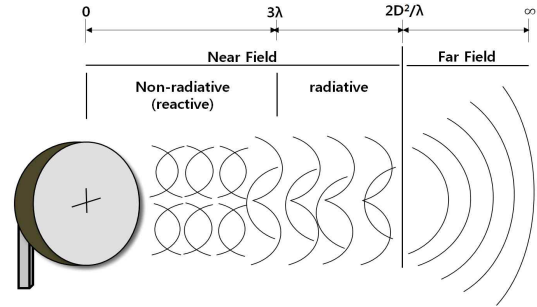


Fig. 1. Radiating near-field region.

그림 1. 근접전계 방사영역

안테나와 프로브의 거리가 결정되면, 프로브가 이동하는 레일의 길이가 계산되어야 한다.

근접전계를 측정하기 위한 프로브 이동영역은 그림 2.와 같이 안테나 개구면의 크기와 안테나 개구면 양 끝단과 프로브의 개구면 중심으로부터 방사패턴을 모두 포함시킬 수 있는 임계각으로 정의되며, 계산식은 수식(1)과 같다. [12]

$$L = D + P + 2Z \tan(\Phi) \tag{1}$$

L : Probe travel length

D : Diameter of antenna under test

P : Probe diameter(72.14mm)

Z : Antenna and probe separation distance

Φ : Critical angle

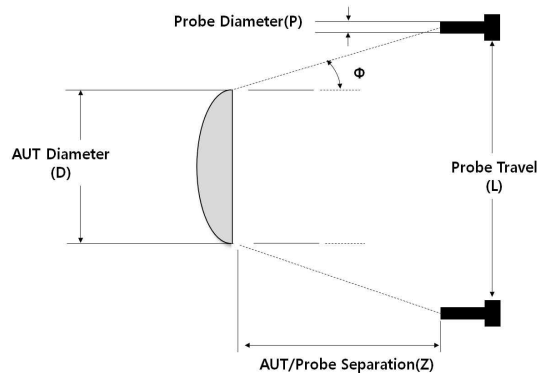


Fig. 2. Maximum scan size.

그림 2. 최대 스캔거리

피측정 안테나의 개구면 세로 길이가 2.2m, 프로브의 개구면 크기가 72.14mm, 안테나 개구면과 프로브 개구면 이격 거리가 40cm이고, 임계각은 방사 빔 패턴 폭을 고려하여 60°로 계산하여 가이드의 길이는 최소한 3.3m 이상을 만족하여야 한다. 여기에 장착대 및 리미트 스위치 설치공간을 감안하여 총 길이는 3.8m로 설계하였다. 가이드의 사양은 표 2와 같으며, 형상은 그림 3과 같다. [13]

Table 2. Linear Motion Guide specification.
표 2. LM 가이드 사양

Item	Specification
Max Speed	5m/sec
Stroke per revolution	130mm/rev
Repeating Accuracy	±0.05mm
Straightness of rail	0.35mm/m
Parallelism between shafts	±0.02mm/m
Tolerance of length	±0.5mm

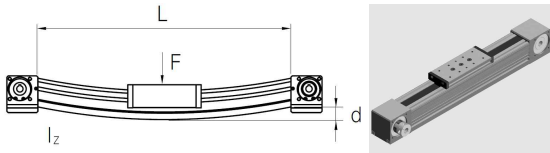


Fig. 3. Linear Motion Guide Configuration.
그림 3. LM 가이드 형상

$$d = \frac{F \times L^3}{192 \times E \times I} \quad (2)$$

- E : Young's modulus, 70,000N/mm²(aluminum)
- d : Deflection [mm]
- F : Load [N]
- L : Free Length [mm], 3800mm
- I : 2nd moment of area [mm⁴], 1870000mm⁴

프로브와 장착대 및 가이드에 부착되는 기구물의 중량은 약 20kg이며 가이드 설치방향이 수직에서 15° 기울여진 상태에서 설치되므로, 수식(2)에 이 값들을 대입하여 계산하면 레일의 처짐은 약 0.1 mm가 발생하게 된다.

또한, 레일의 평행도가 ±0.02mm/m이므로 전체 길이 3.8m를 감안하면 ±0.064mm 수준의 평행도 오차가 발생한다.

스캐너를 설치에 발생하는 기구적 공차를 제외하고 가이드에서 발생 가능한 최대 변화량은

처짐과 평행도를 더하여 ±0.164mm이며, 이를 S-밴드 대역의 파장으로 변환하면 약 ±0.6°의 오차가 발생하는 것으로 계산되었다.

2.4 RF 프로브의 위치제어 설계

인버터와 AC서보 제어방식에는 주로 아날로그 전압 등으로 모터의 회전속도를 제어하는 속도제어, 리미트 스위치나 고정밀의 엔코더 등을 사용해 모터의 회전량을 제어하는 위치제어, 서보모터에 흐르는 전류를 제어해 토크가 항상 일정한 값으로 유지하도록 제어하는 토크제어방식이 있다. [14] 근접전계 스캐너는 고정밀의 엔코더를 이용하여 모터의 회전량을 제어하는 것으로, 무엇보다도 위치정확도가 중요한 요소로 작용한다.

표 3.은 일반적인 인버터와 AC서보의 비교표로 AC서보 해상도가 가장 우수함을 나타낸다.

Table 3. Comparison between inverter and AC servo.
표 3. 인버터와 AC서보의 성능비교

Division Item	Commercial inverter	Vector inverter	AC servo
Power	0.1kW~280kW	1.5~250kW	10W~55kW
Transmission ratio	1:10 ~1:120	1:1000 ~1:1500	1:1000 ~1:5000
Speed change rate	3~4%	0.03%	0.03%
Frequency response	1~5Hz	30~50Hz	200~550Hz
Position accuracy	1mm ~5mm	10um ~100um	1um ~10um
Torque	steady	steady	steady

위치제어 정확도 향상을 위해 높은 해상도는 필수적으로, 17비트 엔코더를 채용하여 모터 1회전 당 131072개의 펄스를 발생하는 AC모터를 선정하였으며, 사양은 표 4와 같다. [15]

이는 앞서 선정된 레일의 1회전 당 이동거리가 130mm이므로, 0.001mm/pulse로 이동하게 된다.

Table 4. AC Servo Motor specification.
표 4. AC서보모터 사양

Item	Specification
Power facility capacity(kVA)	1.3
Rated output(W)	750
Maximum torque(N·m)	2.4
Maximum speed(r/min)	4500
Maximum current(A)	5.8
Speed/position detector	131072 p/rev

III. 구현 및 성능검증

3.1 스캐너 구현

위상배열안테나의 개구면과 프로브 개구면 사이의 이격거리에 대한 미세조정이 가능하도록 레일의 각도조절기능과 중심선을 일치시킬 수 상하 좌우 이동기능을 구현하였다.

또한, 위상배열안테나와 프로브 사이의 거리는 레이저 거리 측정계를 프로브의 종단에 고정시켜 측정하도록 하였으며, 스캐너의 설치각도는 레일의 상단부와 하단부에 각도계를 장착하여 거리 및 각도조절이 확인이 가능하도록 하였다.

그림 4는 스캐너의 설계 형상과 구현된 스캐너를 배열안테나에 설치한 형상이다.



Fig. 4. Scanner installation
그림 4. 스캐너 설치

3.2 스캐너 제어기와 소프트웨어 구현

스캐너를 제어하기 위해서는 제어용 소프트웨어로부터 명령을 받아 서보를 제어하여 모터를 구동시키고, 모터의 엔코더로부터 펄스를 입력받아 프로브의 위치정보를 계산하고 명령한 위치로 이동하면 트리거를 발생하여 근접전계 시험장비를 구동할 수 있어야 한다.

그림 5는 프로브 스캐너 제어기의 기능블록이며, 그림 6은 구현된 제어기 형상과 제어용 프로그램 GUI이다.

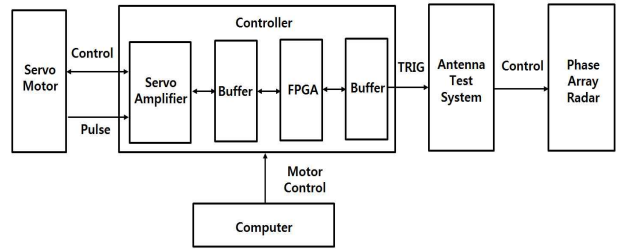
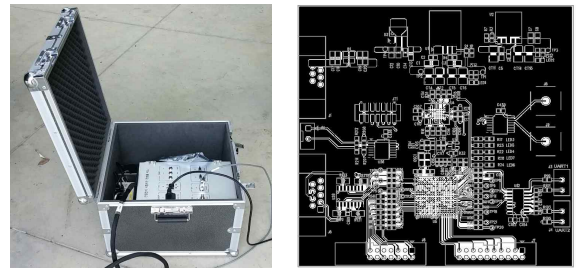
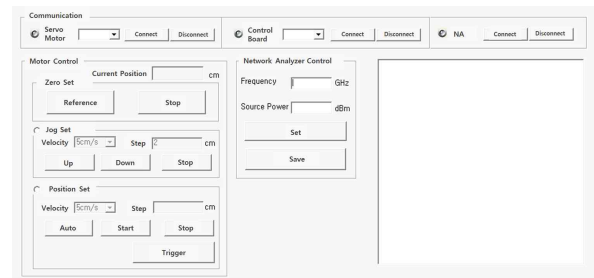


Fig. 5. Function block of the probe scanner controller.
그림 5. 프로브 스캐너 제어기의 기능블록



(a)



(b)

Fig. 6. Scanner controller and program :
(a) scanner controller, (b) control program
그림 6. 스캐너 제어기 및 프로그램 :
(a) 스캐너 제어기, (b) 제어 프로그램

그림 7은 스캐너 제어 프로그램을 이용하여 제어명령을 인가하고 모터의 엔코더 펄스 출력을 카운트하여 프로브가 정위치에 도달하면 트리거를 발생하는 파형을 측정하는 것이다.

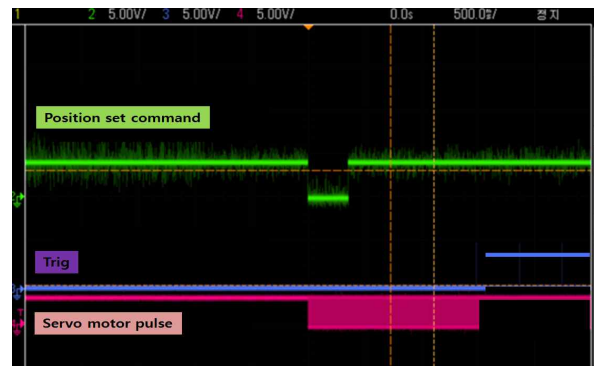


Fig. 7. Measuring encoder pulse and trigger waveform.
그림 7. 엔코더 펄스와 트리거 출력파형

3.3 시험 및 성능검증

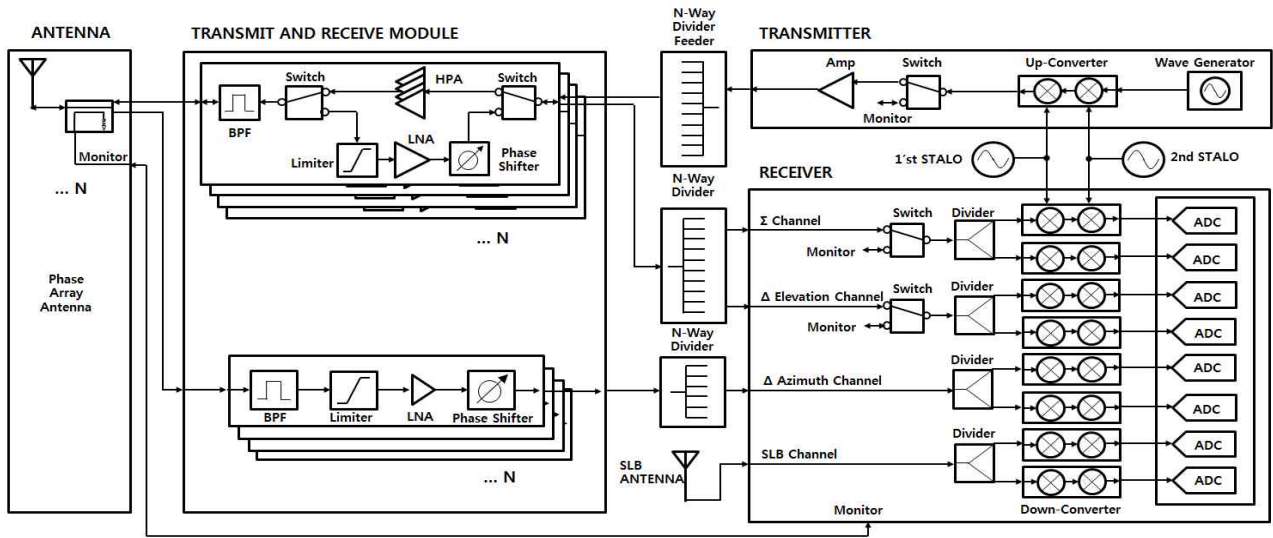


Fig. 8. Active phased array antenna function block diagram.
그림 8. 능동 위상 배열안테나 기능블록도

본 과제에서 설계한 이동조립형 근접전계 스캐너를 이용하여 측정된 위상배열안테나의 기능블록도는 그림 8.과 같다.

송신은 파형발생기에서 신호를 발생시키고 상향 변환기에서 주파수를 S-밴드 대역으로 상향 변환하여 급전기를 통하여 반도체송수신모듈로 신호를 전달한다.

반도체송수신모듈에서 증폭된 신호는 배열안테나로 급전되어 방사된다.

수신은 배열안테나로 입력된 신호가 안테나에서 물리적으로 합 채널과 차 채널로 분리되며, 반도체송수신모듈의 저잡음 증폭기를 통하여 증폭되어 수신기로 전달된 후, 하향 변환되어 A/D변환기로 입력된다.

배열 안테나와 반도체송수신모듈은 각각 하나의 채널을 구성하며, 시스템의 기능 및 성능의 정상유무는 배열안테나의 급전부에서 커플링을 통하여 확인할 수 있다.

그러나, 배열안테나의 정상유무 판단을 할 수 없으므로 외부의 신호원을 이용하여 안테나의 기능 및 성능확인 이 이루어져야 한다.

안테나의 합 채널 경로는 송수신을 공유하며, 차 채널은 안테나에서 물리적 수신경로만을 제공하므로, 수신시험만으로도 안테나의 정상유무 판단이 가능하다.

그림 9.는 근접전계 수신시험을 위한 시험구성도이다.

시험구성은 프로브 위치제어를 제어하기 위한 제어컴퓨터, AC모터를 제어하여 프로브의 위치를 결정하는 프로브 위치제어기, 프로브를 정확한 위치로 이동시키기 위한 스캐너, RF 프로브, 피측정 안테나 그리고 시험시나리오에 따라 피측정 안테나를 제어하고 측정값을 광 데이터로 저장하는 안테나 시험용 시스템으로 구성된다.

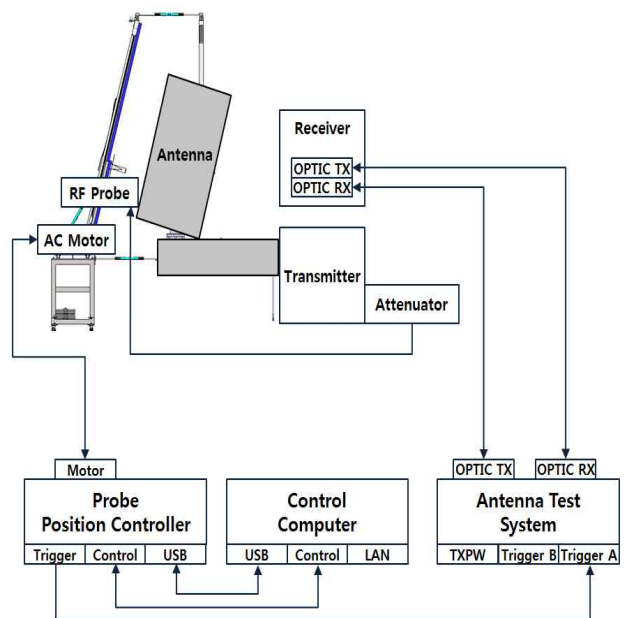


Fig. 9. Near-field Rx measurement setup.
그림 9. 근접전계 수신시험 구성

그림10.은 근접전계 수신시험 순서도이다.

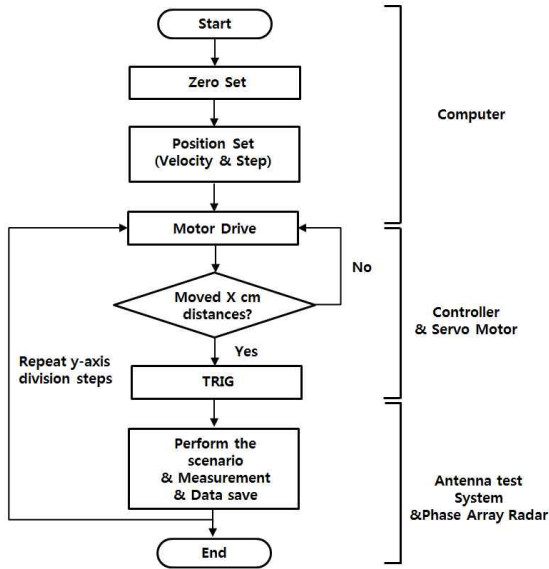


Fig. 10. Near-Field Rx measurement flow chart.
그림 10. 근접전계 수신시험 순서도

동작순서는 제어컴퓨터에서 스캐너의 원점을 결정하고, 스캐너의 이동속도와 측정을 위한 이동거리 스텝을 입력하면 모터가 구동하게 된다.

모터에 내장된 엔코더에서 펄스열이 회전수에 따라 발생되며, 모터가 1회전 시 프로브가 1.0mm 이동하게 된다.

펄스 개수를 스캐너제어기에서 카운트하여 이동거리로 환산하여 트리거가 발생하게 된다.

트리거는 안테나 시험 장비를 구동시켜 시나리오를 발생시키며, 시나리오에 따라 안테나부의 송신기와 수신기를 제어 및 측정하여 데이터를 저장하게 된다.

그림 11.은 무반향성 챔버에서 측정한 근접전계 수신시험결과와 레이다 설치사이트에서 측정한 근접전계 수신시험 결과를 비교한 것이다.

레이다 설치장소는 동일대역의 전파간섭 영향성이 가장 작은 곳으로 선정하여 측정에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 관찰되었으며, 노출된 야외환경에서는 주변잡음성분으로 인하여 노이즈레벨이 높게 측정되었다.

합 채널과 차 채널의 크기 및 위상변화량은 무반향성 챔버에서 측정한 데이터와 비교한 결과 기구물 조립공차를 포함하여 크기 $\pm 0.5\text{dB}$ 와 위상 $\pm 1.5^\circ$ 수준으로, 제안한 이동조립형 근접전계 스캐너의 성능 유효성이 검증되었다.

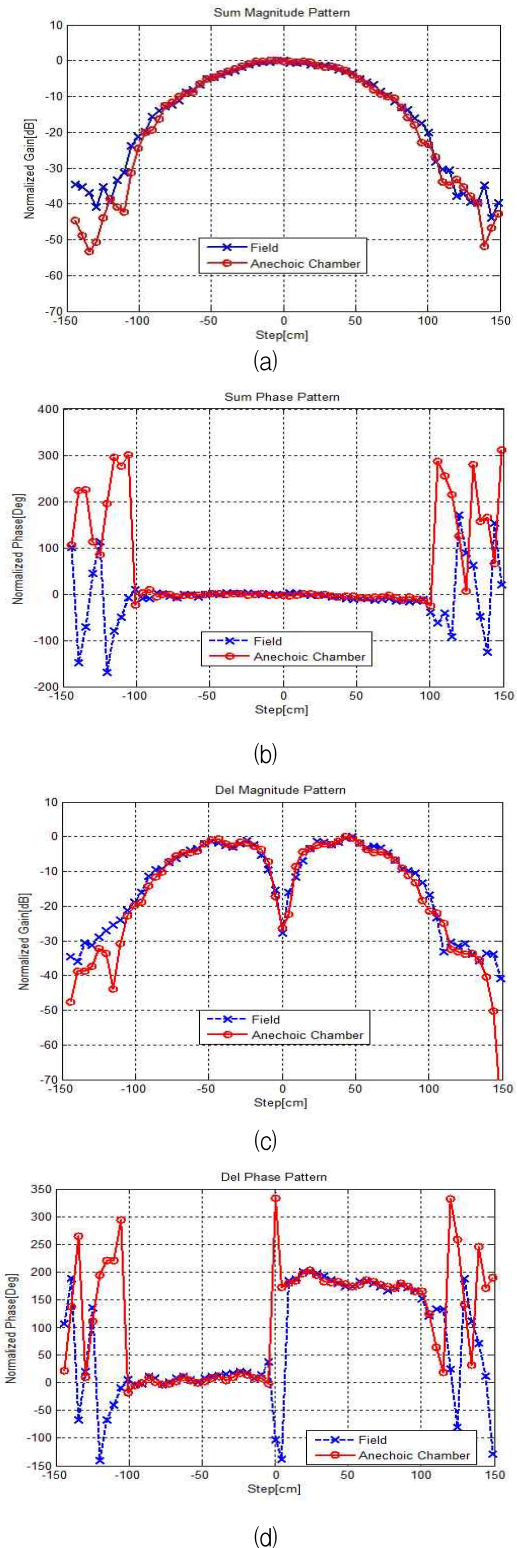


Fig. 11. Comparison of Near-field data in anechoic chamber and site. : (a) sum magnitude, (b) sum phase, (c) difference magnitude (d) difference phase.

그림 11. 무반향성 챔버와 사이트에서의 근접전계 비교 : (a) 합 채널 크기, (b) 합 채널 위상, (c) 차 채널 크기, (d) 차 채널 위상

IV. 결론

본 논문에서는 위상 배열안테나를 사용하는 레이더 시스템에 대하여 자체점검이 되지 않는 안테나의 기능 및 성능점검이 가능하도록 이동성을 구비한 근접전계 수신 시험용 스캐너를 제안하고, 시스템에 적용하여 그 측정결과와 유효성을 검증하였다. 이는 설치운용 중인 레이더가 외부의 충격 또는 예상치 못한 하드웨어적인 문제로 인하여 근접전계 시험을 통해 검증이 필요할 경우, 장비의 분해 및 이송 등을 위해 투입되는 시간과 비용을 절감할 수 있으며 장비의 운용가용도도 높이는 효과가 있다. 레이더 시스템마다 크기와 설치환경이 상이하지만 제안한 이동조립형 근접전계 스캐너에서 가이드의 길이등 부분 변경만으로도 유사 레이더 시스템에 적용할 수 있으므로 활용도가 높을 것으로 기대된다.

References

- [1] Young-Wan Kim, Hee-duck Chae, Jong-kuk Park, Hyeong-gi Na, Min-Hyeon Jeon, "Active Phased Array Antenna Measurement Technology," *The Proceedings of the Korean institute of electromagnetic engineering and science*, vol.25, no.2, pp. 50-59, Mar. 2014.
- [2] Young-Bae Jung, "A Compact Active Channel Module Design for Active Phased Array Antenna System," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, Vol.17, no.4, pp. 393-397, Dec. 2013.
DOI : 10.7471/ikeee.2013.17.4.393
- [3] Seok-Gon Lee, "Design of an Active Phased Array Antenna Having Multiple Monopulse Beams," Ph.D. Thesis, Chung-buk University, 2016.
- [4] Hee-duck Chae, Jae-Min Lee, Young-Wan Kim, Han-Saeng Kim, Huong-Seog Jin, Jong-Kuk Park, "Near-Field Receiving Measurement of Active Phased Array Antenna for Full Digital Radar Application," *The journal of Korean institute of electromagnetic engineering and science*, vol.27, no.7, pp. 625-634, Jul. 2016.
DOI : 10.5515/KJKIEES.2016.27.7.625
- [5] Hyuk-Ja Kwon, Young-Jin Lee, Jin-Woo Jung, "A Study on 1-Channel Monopulse Receiver," *Journal of the Institute of Electronic and Information Engineers*, Vol.51, no.1, pp. 71-76, Jan. 2014.DOI : 10.5573/ieie.2014.51.1.071
- [6] Jae-Jun Kim, Jong-Pil Lee, Ill-Keun Rhee, "Realization of Multi-purpose Coherent Monopulse Radar Simulator with Expandable Feature," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, Vol.8, no.1, pp. 39-46, Jul. 2004.
- [7] Joseph H. Pape, James D. Huff, Alan L.Wilcox, "Design Considerations for a Planar Near-Field Scanner"
<http://www-nsi-mi.com/library/technical-papers/1992-thchnical-papers>
- [8] Yavuz Öztürk, Fatih Üstüner, "Design and Realization of a Planar Near Field Antenna Measurement System," *XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Aug. 2011.
DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6050293
- [9] MTG, "Open-Ended Waveguide Probe"
http://mtginc.co.kr/product/Antennas/product_antennas.html
- [10] GORE PHASEFLEX, "Data Sheet : GORE Phaseflex Microwave/RF Test Assemblies"
<http://www.fore.com/resources/data-sheet-gore-phaseflex-microwave-rf-test-assmbles>
- [11] Nearfield Systems Inc., "Near-field 101"
<http://www.nearfield.com/aboutus/near-field101.aspx>
- [12] Keysight, "Antenna Measurement Theory"
http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/ORFR-Theory.pdf
- [13] SAMICK THK E-lmsystem, "REAL GUIDE QB series catalogue"
<http://www.e-lmsystem.co.kr/homepage/catalog/dwnlist.do>
- [14] MITSUBISHI Electric Korea-Factory Automation, "Inverter·AC Servo basic course"
<http://kr.mitsubishielectric.com/fa/ko/index.do>
- [15] MITSUBISHI Electric, "Servo Motor Instruction manual"
<http://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/servo/hs31811.pdf>

BIOGRAPHY

Woo-Sung Yoo (Member)

2003 : BS degree in
Electronic Engineering,
Kwangwoon University.
2002~present : Research
Engineer, LIGNex1.

Heon-Soon Jang (Member)

1992 : BS degree in
Electronic Engineering,
Kangwon National University.
2013 : MS degree in
Electronic Engineering,
Kyungpook National
University.

1996~present : Research Engineer, LIGNex1.

Sung-gyun Kim (Member)

2012 : BS degree in
Electronic Engineering,
Kyungpook National
University.
2012~present : Research
Engineer, LIGNex1.

Yong-Wook Kwon (Member)

2008 : BS degree in
Electronic Engineering,
Yeungnam University.
2007~present : Research
Engineer, LIGNex1.

Gi-Young Jung (Member)

2002 : BS degree in
Mechanical Engineering,
Hanbat National University.
2002~present : Research
Engineer, Mirae System, Inc