

연직바람관측장비를 위한 능동위상배열안테나 개발

Development of Active Phased Array Antenna for Radar Wind Profiler

강병주 · 정우재 · 이호선 · 공동욱 · 김재영 · 전정익* · 전종훈

Byung-Joo Kang · Woo-Jae Jung · Ho-Seon Lee · Tong-Ook Kong ·
Jae-Young Kim · Jung-ik Chun* · Jong-Hoon Chun

요 약

본 논문에서는 연직바람관측장비에 적용 가능한 64배열 능동위상배열안테나에 대한 연구 결과를 기술하였다. 주요 구성부인 위상배열안테나는 인접 안테나와 격리도를 개선한 Bended 다이폴 안테나의 형태이며, 시스템 파라미터 분석에 근거하여 64개의 단일 송수신 모듈을 설계하였다. 특히 단일 송수신 모듈은 위상 및 감쇄 제어 기능이 있어, 능동위상배열안테나의 핵심 역할을 한다. 이를 통해 개발된 64배열 능동위상배열안테나는 적합한 안테나 이득 및 빔폭 특성과 함께 전자적 제어에 의한 20° 빔 조향 각도에서 왜곡 없는 우수한 방사 특성을 확인하였다. 그러므로 본 논문에서 개발한 64배열 능동위상배열안테나는 연직바람관측장비 개발에 적용 가능성을 검증하였다.

Abstract

In this study, we demonstrate the results of a 64-array active phased antenna for radar wind profiler. The main part, the active phased array antenna, had the form of a bent dipole antenna with improved isolation from the adjacent antenna. Based on the system parameter analysis, 64 transmit/receive modules(TRMs) were designed. In particular, the TRMs have the function of phase/attenuation control, which plays a key role in the active phased array antenna. Measurement results of the 64-array active phased antenna, with a 20° beam steering angle with electronic control, showed the proper antenna gain, good beamwidth characteristics, and excellent radiation characteristics without distortion. These results indicate that the active phased array antenna can be applied to radar wind profilers

Key words: 64-Array Active Phased Array Antenna, Radar Wind Profiler, Bended Dipole Antenna, Transmit/Receive Modules(TRMs)

I. 서 론

연직바람관측장비는 고출력 RF신호를 송출하고, 고층에서 바람 및 강우에 의해 반사되는 전파신호를 수신하여 신호 분석을 통해 동적 대기 현상 정보를 수집하는 장비이다. 대기에서는 굴절지수의 불규칙 변동과 대기 중에

존재하는 비, 얼음, 우박과 같은 액체 또는 얼음 형태의 대기 수상체에 의해 전자파 반사가 이루어지며, 연직바람 관측장비는 그림 1과 같이 5개의 빔(연직/동/서/남/북 방향)을 순차적으로 송출하고, 대기에 의해 반사되는 각각의 도플러 편이 신호를 수신하여 기상 신호를 분석하는 원리^[1] 동작한다. 이때, 대부분의 기존 연직바람관측장

「본 논문은 민군협력진흥원 및 기상청의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 17-CM-SS-23, KMA2017-001-11).」

알에프코어 주식회사(RFcore Co., Ltd.)

*㈜국동통신(KUKDONG Telecommunication)

· Manuscript received November 19, 2019 ; Revised January 7, 2020 ; Accepted March 20, 2020. (ID No. 20191119-121)

· Corresponding Author: Jong-Hoon Chun (e-mail: jhchun@rfcore.com)

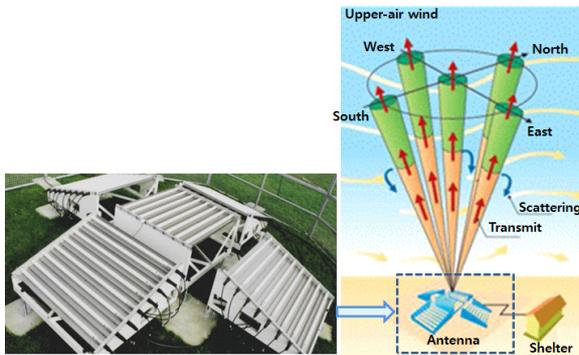


그림 1. 연직바람관측장비의 원리
Fig. 1. Principle of radar wind profiler.

비는 그림 1에서와 같이 5개의 배열 안테나를 동시 설치하여, 연직방향의 가운데 배열 안테나를 중심으로 4개의 인접 안테나에서 동/서/남/북 방향의 15°~20° 기울어진 전자파를 송수신하는 고정형 구조이다. 이에 반해 본 논문을 통해서 개발하는 연직바람관측장비에서는 전자적으로 빔의 방향을 제어하는 능동위상배열방식^[6]을 적용하고자 한다. 능동위상배열방식은 하드웨어 복잡성의 단점이 있지만, 바람장 기상정보를 산출하기 위한 다양한 신호처리 알고리즘 적용이 가능하며^[7], 장시간 연속 사용에 의한 일부 송수신 모듈 오작동에 의한 급격한 시스템의 성능 저하가 방지되며, 다른 기상 레이더와의 핵심 기술 확장이 가능하다는 개발의 필요성이 있다.

II. 능동위상배열안테나 연구

2-1 연구의 필요성

본 논문에서 개발하고자 하는 연직바람관측장비의 하드웨어 설계 사양은 표 1과 같다. 현재 국내 기상청 및 해외에서 가장 많이 운용되고 있는 제품^{[8],[9]}을 참조하여, L대역 1.29 GHz의 운용 주파수와 14 kW·m²의 안테나유효면적×최대RF출력을 중요 규격으로 우선 설정한다. 그 이외에, 그림 1에서의 해외 상용제품 형상과 배열안테나에서의 분배/결합 회로의 개발 편의를 동시에 고려하여 256개의 배열수를 결정하며, 단일 안테나 이득 6 dBi 및 256 배열의 Array factor의 이득 10log(256) dBi를 합하여 30 dBi 이상의 안테나 이득을 결정할 수 있다. 표 1과 같이

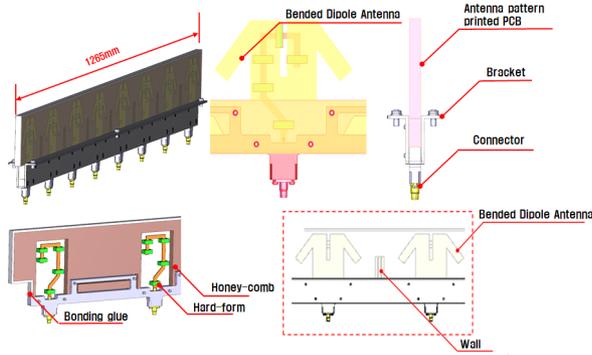
표 1. 연직바람관측장비 규격
Table 1. Radar wind profiler specification.

| | Specification | Remark |
|--|------------------------|---|
| Frequency | 1.29 GHz | BW: fc±5 MHz |
| Antenna effective aperture× Max. RF power | 14.0 kW·m ² | 13.86 kW·m ² (WINDAS corp./Japan) |
| Array number | 256개 | |
| Antenna gain | ≥ 30 dBi | |
| Number of beam | 5 EA | |
| Beam tilting angle | ±20° | Electronic control |

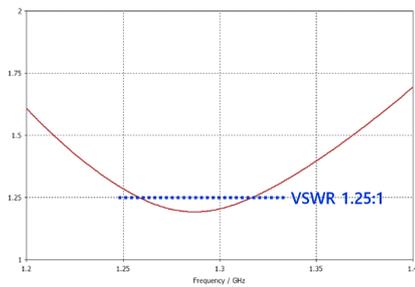
최종 개발하고자 하는 256배열의 연직바람관측장비는 64 배열의 능동위상배열안테나의 부배열(sub-array)로 구성되었으며, 이는 64배열 능동위상배열안테나의 하드웨어 확장 개념으로 최종의 256배열 능동위상배열안테나가 개발되어짐을 뜻한다. 따라서 안테나 64배열 능동위상배열 안테나를 개발하여 동작 특성을 확인하는 것은 최종의 연직바람관측장비 개발의 가장 중요한 핵심 과정이라 할 수 있다.

2-2 위상배열 안테나

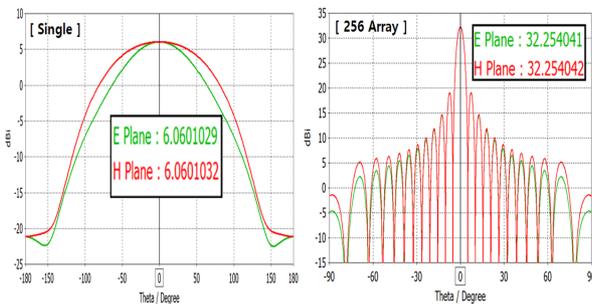
연직바람관측장비의 위상배열 안테나에는 그림 2(a)와 같이 PCB로 패턴이 구현된 Bended 다이폴 안테나의 형태이다. 개발하고자 하는 안테나는 단단한 기구 강도와 최소 유전율을 위해 별집 구조인 허니콤에 레진(resin)을 채워 넣었으며, 브래킷 상/하와 커넥터 블록 등이 추가된 기본 형상을 갖는다. 그리고 안테나는 허니콤 매질 내의 개방(open)된 에어-스트립 라인에 의한 자체 결합 방식으로 급전이 이루어지므로 복잡한 급전선의 물리적인 연결 없이 간단히 구현 가능하다. 또한 위상배열 안테나에서의 인접 안테나 격리도를 개선하기 위해 다이폴 방사체는 일직선이 아닌 기울어진 형태를 갖는 것과 동시에 금속 벽(wall)을 형성하였으며, 조립 및 편이성을 위해서 1×8 배열을 기본으로 제작된다. Bended 다이폴 안테나의 시뮬레이션 결과, 동작 주파수 1.29 GHz에서 우수한 정재파비 특성을 가지며, E면과 H면의 빔폭이 거의 비슷한 이상적인 단일소자 안테나의 방사패턴을 가진다. 그리고 256



(a) 형상
(a) Figureion



(b) VSWR 시뮬레이션
(b) VSWR simulation



(c) 방사패턴 시뮬레이션
(c) Radiation pattern simulation

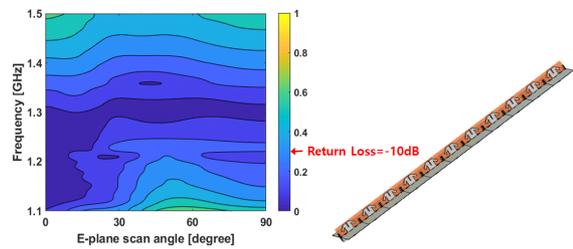
그림 2. 안테나 형상 및 설계
Fig. 2. Antenna figureion & design.

(16×16)배열에서는 4.5°의 전력반치각 및 32.3 dBi의 안테나 이득 특성으로 표 1에서 제시한 전체 연직바람관측장비의 위상배열 안테나 특성을 만족한다. 특히 연직바람관측장비가 동/서/남/북 방향으로 20°의 빔 조향각을 갖는 것을 고려하여, 아래 식에 의해서 빔 조향각 25° 이내에서 그레이팅 로브 (grating lobe)가 출현하지 않는 163 mm로 배

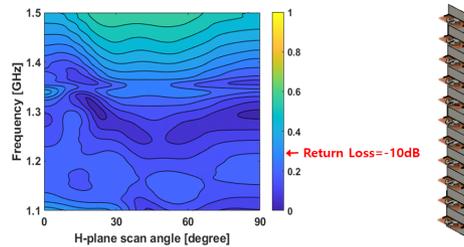
열간격을 설정하였다. 아래 식 (1)에서 D 는 배열 간격, λ_h 는 가장 높은 운용주파수이며, θ_m 은 최대 빔 조향각이다.

$$D \leq \frac{\lambda_h}{1 + \sin\theta_m} \quad (1)$$

위상배열 안테나와 같이 배열 안테나가 동시에 급전되는 배열 환경에서의 반사손실은 그림 2(b)에서와 같이 단일 안테나에서의 반사계수 및 VSWR이 아닌 주위로부터 결합되어 오는 모든 상호결합계수가 고려된 능동반사계수^[5] 정의 또한 필요하다. 능동반사계수는 단일 안테나가 E면 방향으로 배열되었을 경우와 H면 방향으로 배열되었을 경우의 2가지 경우로 정의되며, 단일 안테나를 E면과 H면 방향으로 여러 개 일직선 배열한 후, 전체 시뮬레이션 결과의 S-Parameter를 후-처리 계산하여 능동반사계수를 구할 수 있다. 그림 3의 능동반사계수 그림에서는 세로축의 동작 주파수와 가로축의 빔조향 각도에 대한 안테나의 반사계수를 표시하며, 파란 색깔에 가까울수록 반사계수가 0에 가까운 완전매칭의 경우이며, 노란색에 가까울수록 반사계수가 매우 나쁜 전반사의 경우이다. 그



(a) E면 방향
(a) E plane direction



(b) H면 방향
(b) H plane direction

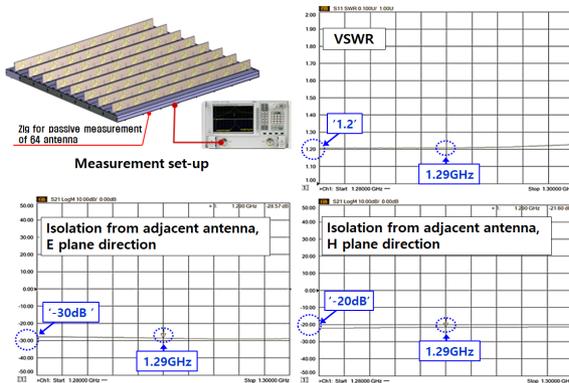
그림 3. 능동 반사계수
Fig. 3. Active reflection coefficient.

림 3의 설계된 Bended 다이폴 안테나 능동반사계수는 E면/H면의 모든 배열 방향과 0°~90°의 모든 빔조향 각도에서 우수한 반사특성이 유지되는 것이 확인되며, 이는 인접 안테나 사이의 격리도가 매우 우수한 시뮬레이션 결과에 따른 능동반사계수의 계산 결과이다.

그림 4는 제작된 배열 안테나의 형상과 주요 측정 결과이다. 전체 안테나의 자체 특성을 측정하기 위하여, 실제 구현하고자 하는 능동위상배열안테나와 똑같은 배열 간격을 가지도록 거치 지그를 제작하여 전체 배열 중에서 가운데 부분에서의 측정 결과를 그림 4(b)에 나타내었다. 그림 4(b)에서는 1.2:1 정도의 우수한 VSWR 측정값과 더불어 인접 안테나의 E면과 H 면 방향으로 -20 dB 이하의 격리도 특성이 확인된다. 또한 그림에서는 표시하지 않았지만 64개 전체 단일 안테나는 그림 4(b)와 대체로 비슷한 VSWR 측정 결과를 가지며, 모든 개별 소자간 조합에서의 수많은 측정의 경우는 그림 3의 능동반사계수의 계산에 이미 반영되었으므로 추가적인 기술은 생략하



(a) 제작 형상
(a) Fabrication figuration



(b) 측정 결과
(b) Measurement results

그림 4. 배열 안테나 제작 및 측정
Fig. 4. Array antenna fabrication & measurement.

도록 한다.

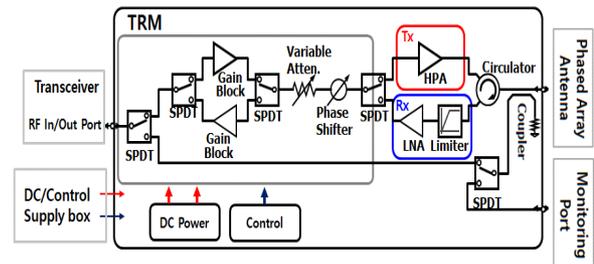
2-3 송수신 모듈

최종 개발 256배열 연직바람관측장비의 안테나 최소 이득 규격 30 dBi에 대한 안테나 유효면적은 식 (2)에 의해서 4.3 m²이며, 이와 함께 14 kW·m²의 안테나 유효면적×최대RF출력 규격으로부터 256배열의 최대RF출력은 3.25 kW로 계산되며, 이로부터 하나의 단일 송수신모듈의 출력전력 41 dBm이 정의된다.

$$A = \frac{G \times \lambda^2}{4\pi}$$

(A: 안테나유효면적, G: 안테나이득) (2)

그림 5는 개발하고자 하는 송수신 모듈의 구성도이다³⁾. 그림의 구성도에서 가운데 부분의 위상 변위기와 가변 감쇄기는 송신경로와 수신경로가 서로 공유하는 형태이며, 운용 및 점검 모드의 여러 가지 경우를 모두 반영하는 다수개의 스위치와 송수신 구분을 위한 Circulator 등이 존재한다. 특히 각각의 송수신 모듈에는 전기적으로 위상제어가 가능한 위상천이기가 내장되어 능동위상배



[RF power budget]

| | SPD T | SPDT | Gain Block | SPDT | Atten. | Phase Shifter | SPDT | HPA | Circulator | Coupler | Total | |
|------------|-----------|------|------------|------|--------|---------------|------|------|------------|------------|---------|----------|
| | Tx path → | | | | | | | | | | | |
| Gain [dB] | -0.6 | -0.6 | 15 | -0.6 | -1.6 | -5.4 | -0.6 | 21 | -0.5 | -0.4 | 42.5 | |
| Power[dBm] | -0.6 | -1.2 | 12.2 | 11.6 | 10 | 4.6 | 4 | 43.4 | 42.9 | 42.5 | 42.5 | |
| | ← Rx Path | | | | | | | | | | | |
| Total | SPDT | SPDT | Gain Block | SPDT | Atten. | Phase Shifter | SPDT | LNA | Limiter | Circulator | Coupler | Gain[dB] |
| 26.6[dB] | -0.6 | -0.6 | 20 | -0.6 | -1.6 | -5.4 | -0.6 | 20 | -0.5 | -0.5 | -0.4 | Gain[dB] |
| 2.42[dB] | 1.2 | 1.2 | 0.7 | 0.6 | 1.6 | 5.4 | 1.6 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | NF[dB] |

그림 5. 송수신 모듈 구성도 및 버짓 설계
Fig. 5. Block diagram and budget design of TRM.

열안테나의 핵심 기능을 담당한다. 또한 송수신 모듈은 앞단에서의 위상배열 안테나 및 뒷단에서의 송수신부와 연결되는 RF 포트와 더불어서 장비의 상태모니터링 RF 포트를 함께 갖고 있다.

그림 5의 버짓에서는^[4], 앞서 계산한 단일 송수신 모듈의 송신경로 출력 전력 41 dBm에 여유분(margin)을고려하여 42.5 dBm의 출력이 되도록 전력 증폭 소자를 선정하고, 그에 따른 버짓을 설계한다. 수신경로에서도 시스템에서 필요로 하는 이득과 잡음지수에 맞는 저잡음 증폭소자를 선정하고, 수신단 버짓을 설계한다. 그림 5는 연직바람관측장비에서 송수신 모듈과 연결되는 송수신부의 이득 및 입출력 전력 등의 전체 시스템을 고려하여 설계된 버짓이나, 본 논문에서는 송수신부 등의 다른 시스템 구성부 설계에 대해서는 구체적으로 논하지 않았다. 따라서 개발하고자 하는 송수신 모듈은 그림 5에 표시한 송신 경로에서의 42.5 dBm의 출력 전력 및 42.5 dB의 이득, 수신 경로에서의 26.6 dB의 이득 및 2.42 dB이 잡음 지수에 대해서만 송수신 모듈의 개발 목표 항목으로 한다. 표 2는 송수신 모듈에 사용된 주요 소자에 대한 정리이며, 능동 위상배열안테나를 위한 위상 천이기는 0°~360°/6 bit로 위상 제어 가능한 Macom社 제품을 사용하였다. 참고로, 송수신부에서는 연직바람관측장비의 적합한 펄스 신호

표 2. 송수신 모듈 주요 소자
Table 2. Main component of TRM.

| | Part no./ manufacture | Main characteristics (F=1.29 GHz) |
|------------------------------------|--|---|
| Tx final stage amplifier | MRFE6VS25NR1/ RichardsonRFPD  | <ul style="list-style-type: none"> • Pout: 25 W • Power gain: 20 dB |
| Rx 1 st stage amplifier | TQL9092/Quervo  | <ul style="list-style-type: none"> • Small signal gain :20 dB • Noise figure: 0.65 dB |
| Phase shifter | MAPS-011007 /Macom  | <ul style="list-style-type: none"> • 6 Bit, 360°coverag |

를 생성 및 압축하여 상향 변환하고, 수신된 펄스 신호를 하향 변환하여 디지털 IQ 신호로 변환하는 역할을 한다.

그림 6은 송수신 모듈의 제작 형상이며, 이에 대한 주요 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)의 송신경로에서는 45 dB 내외의 소신호 이득과 함께 +5 dBm 크기의 317 ns 펄스폭 파형에 대해서 평균 43.75 dBm의 출력 전력이 측정되었다. 그림 6(b)의 수신경로에서는 32 dB 내외의 소신호 이득 특성과 함께 1.367의 잡음지수 특성이 측정하였다. 또한 그림 7(c)에는 송수신 모듈의 주 제어 비트에 대해서 0°~360°의 위상변위 범위와 0 dB~32 dB의 감쇄 제어 범위를 확인할 수 있다. 최종 개발된 송수신 모듈의 규격은 표 3과 같다.

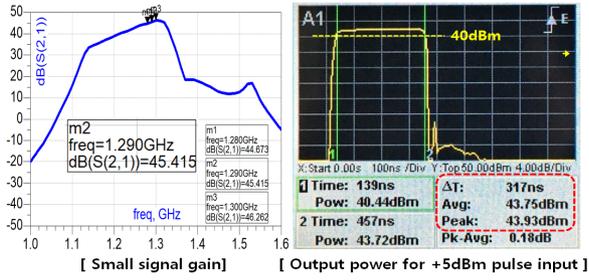
2-4 64배열 능동위상배열안테나

이제껏 설명한 안테나와 송수신 모듈을 이용하여 그림 8과 같은 64배열 능동위상배열안테나를 구현하였다. 그림 8에서 64배열 능동위상배열안테나는 1×8배열의 안테나 기구물 프레임 8개를 중심으로 제작된다. 그림 8(a)에서 하나의 프레임 상단에는 안테나 8개가 조립되고, 하단에는 송수신 모듈이 8개가 함께 조립되며, 프레임의 내부에 8-분배/결합기에서 64채널 RF 신호의 분배 및 결합이 이루어진다. 단지 그림 5의 송수신 모듈의 구성도와 같이 레이다 RF 신호의 분배/결합기뿐만이 아니라, 시스템 감시 및 점검을 위한 8-분배/결합기도 함께 존재한다.

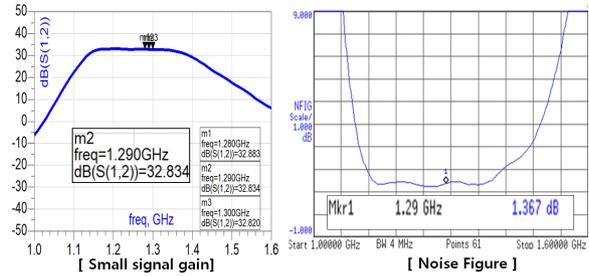
그림 8(b)는 최종 제작된 64배열 능동위상배열안테나 형상이며, 전면에 위상배열안테나와 후면에 64개의 송수신 모듈 조립 형상을 확인할 수 있다. 그리고 64개의 송수신 모듈에 전원공급과 제어 신호 연결을 위한 사각 모양



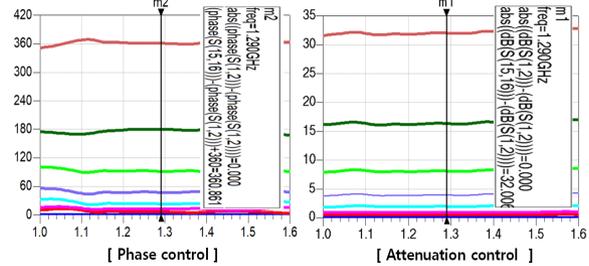
그림 6. 송수신 모듈 제작 형상
Fig. 6. Figuration of TRM fabrication.



(a) 송신 경로 측정
(a) Tx path measurement



(b) 수신 경로 측정
(b) Rx path measurement

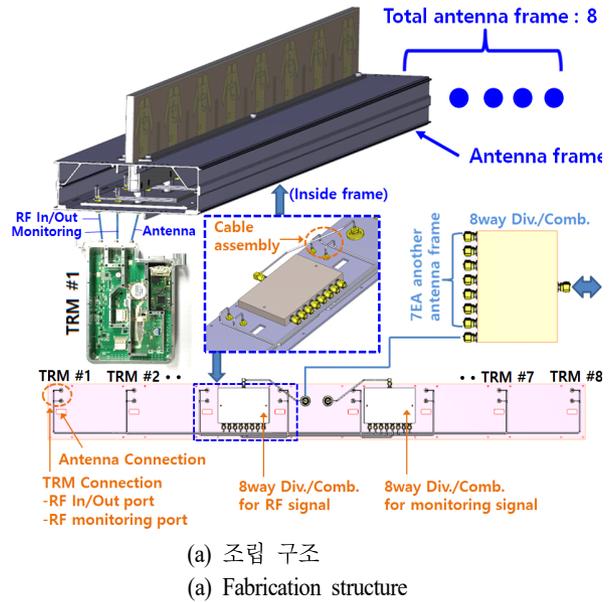


(c) 주 제어 비트에 대한 위상 및 감쇄 제어
(c) Phase & attenuation control for main control bit

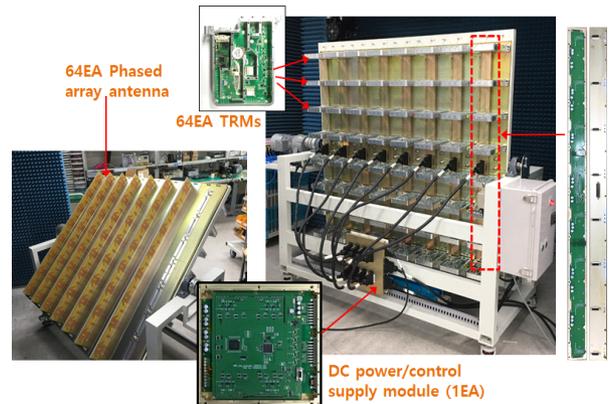
그림 7. 송수신 모듈 측정
Fig. 7. Measurement of TRM.

표 3. 송수신 모듈 규격
Table 3. TRM specification.

| | | Unit | Specification |
|----------------------------|--------------|---------|-----------------|
| Frequency | | MHz | 1,280 ~ 1,300 |
| Tx path | Gain | dB | > 43.0 |
| | Output power | dBm | > 42.0 |
| Rx path | Gain | dB | > 27.0 |
| | Noise figure | dB | < 2.5 |
| Phase variable range | | deg (°) | 0 ~ 360(6 bit) |
| Attenuation variable range | | dB | 0 ~ 32.0(6 bit) |



(a) 조립 구조
(a) Fabrication structure



(b) 제작 형상
(b) Figuration of fabrication

그림 8. 64배열 능동위상배열안테나 제작
Fig. 8. Fabrication of 64 active phased array antenna.

전원/제어모듈 1개와 길쭉한 모양의 전원/제어모듈 8개 또한 그림에서 확인할 수 있다.

Ⅲ. 능동위상배열안테나 시험

제작된 능동위상배열안테나의 64개 송수신 모듈은 이득 및 위상의 전달 특성이 모두 동일하지 않으며, 각각의 채널에 특성 차이가 존재한다. 따라서 시스템의 방사특성 및 정확한 빔 제어를 위해서는 각 채널간 위상 및 이득에

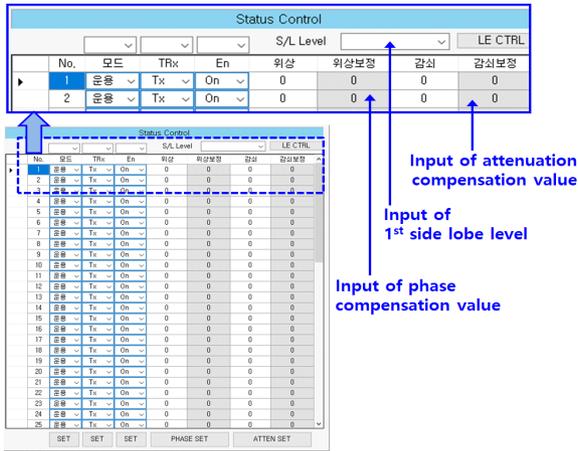


그림 9. GUI 화면
Fig. 9. Screen of GUI.

대한 보정 과정이^[2] 필요하다. 보정 작업은 각 채널별 위상 및 이득을 측정하는 보정 측정과 측정된 데이터를 기반으로 각 채널별 위상 및 이득의 보정값을 입력하는 보정 장치의 과정이 있으며, 그림 9는 보정 장치를 위한 GUI 화면을 보여준다. 보정 작업을 위해서는 그림 8(a)에서 위상배열안테나를 제거한 후, 64개 송수신 모듈의 RF 입출력포트에 직접 회로망 분석기를 연결하여 각각 송수신 모듈의 이득과 위상을 모두 측정 기록한다.

64개 송수신 모듈의 보정 과정을 마친 후, 그림 10과 같이 근접전계측정 방식^[12]에 의한 64배열 능동위상배열안테나의 방사패턴 시험을 진행하였다. 이 때, 능동위상배열 안테나의 E면과 H면은 각각 방위각과 고각 방향에 맞

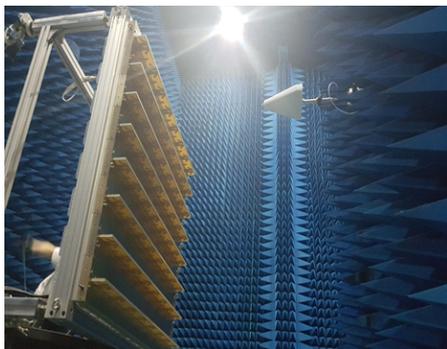
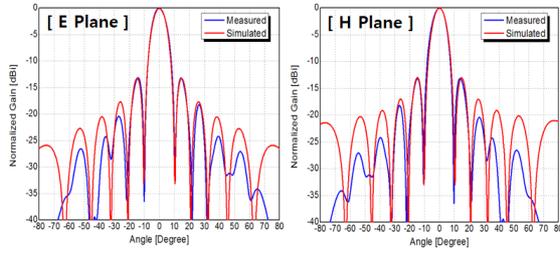


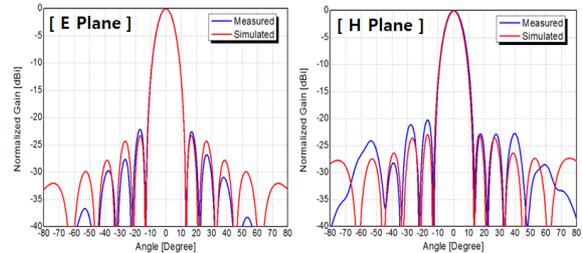
그림 10. 근접 전계 측정 사진
Fig. 10. Picture of near field measurement.

쳐 거치하였으며, 송신 모드 상태에서 64개 송수신 모듈의 이득은 모두 같은 균일배열(uniform array) 상태에서 방사패턴 측정을 하였다. 그림 11의 방사패턴 측정 결과, 64배열 능동위상배열 안테나는 시뮬레이션과 대체로 일치하는 빔폭과 함께 방위각/고각 방향의 $\pm 20^\circ$ 각도 빔 조향 시에도 왜곡 없는 우수한 방사패턴이 측정되어, 전기적인 제어에 의해서 빔의 방향이 바뀌는 능동위상배열안테나로의 핵심 기능을 확인할 수 있다. 그리고 그림 11(d)의 사선 방향 빔 조향에서는 고각/방위각 방향으로 각각 14.2° 의 빔 조향 각도가 서로 합성되어 20° 빔 조향 각도를 형성한다. 또한 그림으로 설명하지 않았지만, 그림 11의 송신 모드가 아닌, 64배열 능동위상배열안테나의 수신 모드에서도 그림 11과 거의 똑같은 왜곡 없는 방사특성을 확인하였다. 단지 그림 11에서는 1st Side lobe의 비대칭 발생 및 광각(wide angle)에서 시뮬레이션과의 오차를 확인할 수 있는데, 이는 근접전계 측정 장비에서 프로브 안테나의 Scan 면적이 제한되는 점, 능동위상배열안테나의 정확한 전기적 중심이 조금 불명확한 점, 안테나의 좌/우/위/아래에 대한 정렬 오차의 영향이라 생각된다.

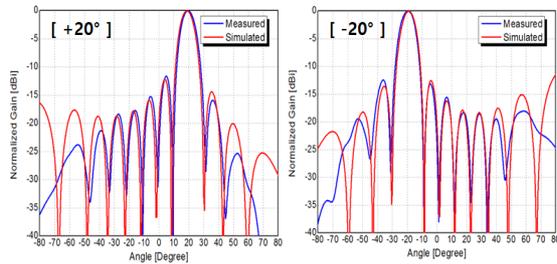
그림 11에서는 균등배열(uniform array)에 의하여 전형적인 -13 dBc의 1st Side lobe 레벨 방사패턴 특성을 확인할 수 있는데, 개발된 능동위상배열안테나에서는 64개 각각의 송수신 모듈의 감쇄값 제어에 의한 비균등 배열(non-uniform array) 기능을 추가하였으며, 이는 그림 9의 GUI 화면에서도 확인이 가능하다. 제작된 64배열 능동위상배열안테나는 -15 dBc부터 -30 dBc까지의 1st Side lobe 억압(suppression)에 대한 테일러 함수의 가중치 값이 시스템의 GUI에 내장되어 있으며, 시스템 운용 시에 1st Side lobe 레벨이 선택 가능하도록 하였다. 그림 12는 1st Side lobe의 레벨이 -23 dB가 되는 [0.5, 0.62, 0.87, 1, 1, 0.87, 0.62, 0.5]의 테일러 분포 비균등 배열에 의한 측정 결과이다. 측정 결과, 시뮬레이션과 대체로 일치하는 -23 dBc의 1st Side lobe 측정 결과 및 약간 넓어진 빔폭 측정 결과를 확인할 수 있으며, 고각 방향으로의 빔 조향 시에서 동일한 수준의 1st Side lobe 레벨이 유지됨이 확인된다. 참고로, -20 dBc의 1st Side Lobe를 확보하기 위한 여유분(margin)까지 고려하여 -23 dBc 1st Side lobe의 테일러 분포값을 선정하였는데, 실제 측정값에서도 -20 dBc의



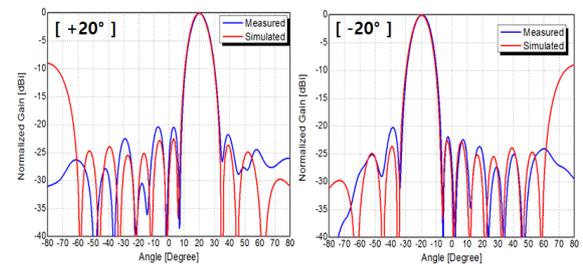
(a) 정면 빔
(a) Bore-sight beam



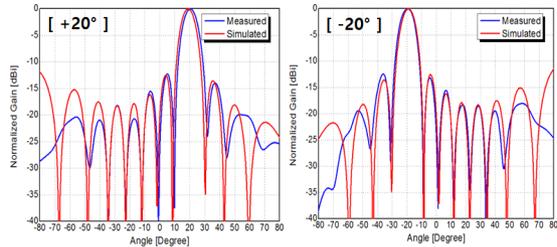
(a) 정면 빔
(a) Bore-sight beam



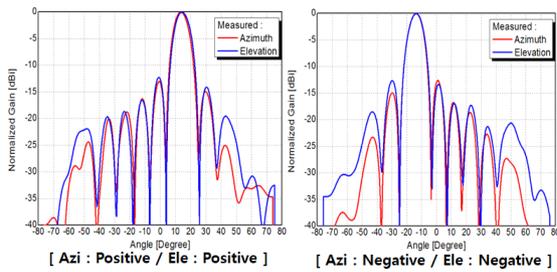
(b) 방위각 방향 빔 조향
(b) Azimuth direction beam tilt



(b) 고각 방향 빔 조향
(b) Elevation direction beam tilt



(c) 고각 방향 빔 조향
(c) Elevation direction beam tilt



(d) 45° 사선 방향 빔 조향
(d) 45° slanted direction beam tilt

그림 11. 방사패턴 측정(균등 배열)

Fig. 11. Radiation pattern measurement(uniform array).

가장 나쁜 Side Lobe 레벨이 측정되었다.

그림 11과 그림 12에서의 64배열 능동위상배열안테나

그림 12. 방사패턴 측정(비균등 배열)

Fig 12. Radiation pattern measurement(non-uniform array).

의 측정 결과는 표 4에 정리하였다. 참고로, 시뮬레이션 구좌표에서 2D 방사패턴으로 표현되지 못하는 비스듬한 방향의 절단면에 대한 빔폭은 기입하지 못하였으며, 같은 이유로 그림 11(d)에서는 시뮬레이션 방사패턴을 표기하

표 4. 방사패턴 측정 정리

Table 4. Radiation pattern measurement summary.

| Excitation form | Beam angle | | Simulation | | Measurement | |
|-----------------|------------|---------|------------|------------|-------------|------------|
| | Azi (°) | Ele (°) | HPBW (°) | Gain (dBi) | HPBW (°) | Gain (dBi) |
| Uniform | 0 | 0 | 9.0/9.0 | 26.5 | 9.4/9.2 | 26.2 |
| | 20 | 0 | 9.6/— | 25.8 | 9.7/9.3 | 26.1 |
| | -20 | 0 | 9.6/— | 25.8 | 9.7/9.4 | 26.0 |
| | 0 | 20 | -9.6 | 25.5 | 9.8/9.9 | 25.8 |
| | 0 | -20 | -9.6 | 25.5 | 9.7/10.1 | 25.7 |
| | 14.2 | 14.2 | -9.8 | 26.0 | 9.7/9.7 | 25.9 |
| | -14.2 | -14.2 | -9.8 | 26.0 | 9.6/9.5 | 26.0 |
| Non-uniform | 0 | 0 | 10.6/10.6 | 25.1 | 10.6/10.8 | 25.0 |
| | 0 | 20 | -11.3 | 24.2 | 11.3/11.5 | 24.5 |
| | 0 | -20 | -11.3 | 24.2 | 11.3/11.2 | 24.6 |

지 않았다. 64배열 능동위상배열 안테나는 Bore-Sigthe 상태에서 고각과 방위각 방향으로 20° 빔 조향에 따라 약 0.2 dB~0.5 dB 정도의 미약한 이득 감소 수준과 1st Side lobe -23 dBc의 테일러 분포 비균등 급전에 의해서 약 -1.2 dB의 이득 감소를 확인할 수 있다.

IV. 결론 및 계획

본 논문에서는 해외 개발품의 연직바람관측장비 규격을 바탕으로 Bended 다이폴 안테나와 송수신 모듈 및 64배열의 능동위상배열안테나의 개발에 대해 구체적으로 기술하였다. 개발된 64배열 능동위상배열안테나의 방사 특성 측정 결과, 20° 빔조향 각에서 왜곡 없는 우수한 방사 특성 및 비균등 급전에 의한 1st Side Lobe 억압 특성을 확인할 수 있었으며, 이는 기존 고정빔 방식의 연직바람관측장비보다 운용 효율성을 극대화 할 수 있는 능동위상배열 방식의 연직바람관측장비 핵심 기술을 확보하였음을 의미한다. 현재 개발 완료된 64배열의 개발 경험과 하드웨어 확장 개념으로 그림 13과 같은 256배열의 능동위상배열안테나가 개발 중이며, 향후 해외 상용제품에 준하는 연직바람관측장비 전체 시스템 개발을 완료할 예정이다.

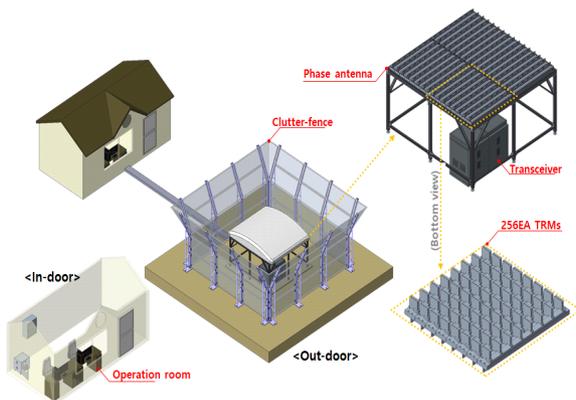


그림 13. 연직바람관측장비의 최종 개발 형상
Fig. 13. Final figuration of radar wind profiler.

References

- [1] B. H. Heo, *Wind Profiler and Atmospheric Sounding*, Seoul, Hongneung Science Publisher, 2014.
- [2] J. Y. Choi, H. S. Lee, T. O. Kong, and J. H. Chun, "Development of polarization-controllable active phased array antenna for receiving satellite broadcasting," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 9, pp. 325-335, May 2018.
- [3] B. J. Kang, T. O. Kong, J. H. Lee, and J. H. Chun, "Transmit/receive modules development for active phased array type radar wind profiler," in *2019 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (KIEES) Summer Conference*, 2019, pp. 536.
- [4] J. H. Chun, K. Y. Park, and J. H. Lee, "Radar wind profiler system budget design," in *2018 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (KIEES) Summer Conference*, 2018, pp. 174.
- [5] J. Y. Kim, "Design and radiation characterization of ridged tapered slot phased array antenna," Ph.D. dissertation, University of Seoul, Seoul, Aug. 2008.
- [6] P. Srinivasulu, P. Yasodha, P. Kamaraj, T. N. Rao, and A. Jayaraman, "1,280-MHz active array radar wind profiler for lower atmosphere: System description and data validation", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 29, no. 10, pp. 1455-1470, Oct. 2012.
- [7] B. B. Balsley, K. S. Gage, "On the use of radars for operational wind profiling," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 63, no. 9, pp. 1009-1018, Sep. 1982.
- [8] Naoki Tsukamoto, "Wind profiler radars," in *the ITU/WMO Seminar on Use of Radio Spectrum for Meteorology*, Sep. 2009.

[9] VAISALA, "Vaisala lower troposphere wind profiler LAP-3000," Vaisala, Vantaa, Finland, 2007.[10] V. Lehmann, "Operational ground-based remote sensing of wind: Radar wind profilers," in *the CIMO/WIGOS Exploratory Workshop*, Langen, Germany, 2014.
 [10] B. J. Lindseth, "A 449 MHz modular wind profiler radar system," Ph.D. dissertation, University of Colorado at

Boulder, Boulder, CO, 2012.
 [11] 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", in *2001 31st European Microwave Conference*, London, Sep. 2001, pp. 1-5.

강 병 주 [알에프코어(주)/주임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3211-0146>



2011년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부(공학사)
 2013년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과(공학석사)
 2012년12월~현재: 알에프코어(주) 주임연구원
 [주 관심분야] RFIC, 능동위상배열안테나

시스템

이 호 선 [알에프코어(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7208-0631>



1998년 2월: 충남대학교 전파공학과(공학사)
 2000년 2월: 충남대학교 전파공학과(공학석사)
 2000년 2월~2005년 2월: 쌍신전자통신(주) 전문연구요원
 2005년 3월~2007년 7월: LG전자 단말연

구소 선임연구원

2007년 8월~2014년 12월: 인텔리안테크놀로지스 책임연구원
 2015년 1월~현재: 알에프코어(주) 수석연구원
 [주 관심분야] 안테나 및 수동소자

정 우 재 [알에프코어(주)/이사]

<https://orcid.org/0000-0002-1908-852X>



2004년 2월: 광운대학교 전자공학과(공학사)
 2006년 2월: 광운대학교 전자공학과(공학석사)
 2008년~현재: 광운대학교 전자공학과 박사과정
 2010년~2013년: (주)지아이블루 연구소장

2014년~2015년: (주)경우 연구소장
 2015년~2019년: (주)에이트 연구소장
 2019년~현재: 알에프코어(주) 이사
 [주 관심분야] RF, 레이더 시스템

공 동 욱 [알에프코어(주)/이사]

<https://orcid.org/0000-0003-2620-969X>



1995년 8월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 2000년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
 2000년 4월~2004년 11월: 텔레포스(주) 제품개발부 선임연구원
 2005년 1월~현재: 알에프코어(주) 이사

[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, EMC 등

김 재 영 [알에프코어(주)/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6585-562X>



2017년 2월: 경북대학교 전자공학부(공학사)
2019년 8월: 과학기술연합대학원대학교 (공학석사)
2019년 9월~현재: 알에프코어(주) 연구원
[주 관심분야] RF, 레이다 시스템

전 중 훈 [알에프코어(주)/연구소장]

<https://orcid.org/0000-0002-6471-0138>



1982년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
2012년 3월~현재: 알에프코어(주) 연구소장

[주 관심분야] 능동위상배열안테나 시스템, 레이다 시스템

전 정 익 [(주)극동통신/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1621-6722>



2007년 2월: 단국대학교 전자공학과(공학사)
2007년 2월~2011년 10월: (주)텔콤코리아 선임연구원
2011년 9월: 단국대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2011년 10월 ~ 2014년 2월: (주)하이계인안

테나 선임연구원

2014년 2월~현재: (주)극동통신 책임연구원
[주 관심분야] 안테나 및 수동소자