

평면 부배열로 구성되는 컨포멀 송신 능동위상배열안테나의 설계 및 시험

Design and Implementation of a Conformal Tx Active Phased-Array Antenna Composed of Planar Subarrays

박상혁 · 김기태 · 서종우* · 주태환*

Sang-Hyuk Park · Ki-Tae Kim · Jong-Woo Seo* · Tae-hwan Joo*

요 약

본 논문에서는 평면형 부배열로 구성된 컨포멀 능동위상배열안테나의 설계와 구현 결과에 대하여 기술하였다. 설계된 Ku대역의 컨포멀 능동위상배열안테나는 64개의 평면형 부배열로 구성되며, 각각의 부배열은 8×8 평면형 마이크로스트립 배열안테나로서 총 4,096개의 안테나 소자로 이루어진다. 각각의 안테나 소자에는 증폭기와 4 bit 분해능의 위상천이기로 구성된 코어칩이 결합되고, 4×4 배열별로 100 psec 단위의 TTD (true time delay)를 배치하여 광대역 동작시 나타나는 빔 편이 (beam squint) 현상 없이 전자적인 광각 빔조향이 가능하도록 설계하였다. 설계된 컨포멀 능동위상배열안테나를 제작하여 시험한 결과, 500 MHz의 대역폭에서 약 1.5°의 빔폭을 가지고 ±60°의 광각 빔조향에 대하여 빔편이 현상없이 운용될 수 있음을 확인하였다. 그리고 구현된 컨포멀 송신 능동위상배열안테나의 운용을 위해 적용된 공랭식 방열 구조에 대한 해석 및 시험 결과를 간략하게 소개하였다.

Abstract

In this paper, we describe the design and test results of a conformal Tx active phased-array antenna composed of planar subarrays. The designed Ku-band conformal Tx active phased-array antenna consists of 64 planar subarrays, which are arranged as an 8×8 microstrip patch array antenna, with a total of 4,096 antenna elements. A total of 4,096 core chips, including amplifiers and phase shifters with 4-bit resolution are used, and true time delay (TTD) devices of 100 ps resolution are located once every 4×4 subarrays to remove the beam squint phenomenon manifesting at the off-broadside beam pointing region. The designed conformal Tx active phased-array antenna was fabricated and tested. The results show that the designed system could be operated without any beam squint for wide-angle beam steering of ±60°, with a 1.5° beam width at 500 MHz operating bandwidth. In addition, the analysis and test results of the air-cooled structure designed for system operation are described briefly.

Key words: Phased Array Antenna, Tile Type, Conformal Antenna, Antenna Cooling Structure, Antenna Measurement System

「이 연구는 국방과학연구소가 지원하는 사업의 일환으로 수행되었음.」

MTG(Microwave Technologies Group)

*국방과학연구소 제2기술연구본부(The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development)

· Manuscript received November 5, 2020 ; Revised November 15, 2020 ; Accepted November 30, 2020. (ID No. 20201105-094)

· Corresponding Author: Jong-Woo Seo (e-mail: jwseo@add.re.kr)

I. 서 론

다수의 복사 소자로 이루어진 배열안테나의 각 소자 사이의 상대 위상을 변화시켜 안테나 지향 방향이나 복사패턴을 변화시키는 위상배열안테나에서 각각의 모든 복사 소자 경로에 고전력 증폭기(HPA: high power amplifier) 혹은 저잡음 증폭기(LNA: low noise amplifier)와 위상천이기(phase shifter)와 같은 능동소자를 가지는 위상배열안테나 시스템을 능동 위상배열안테나라 한다. 능동위상배열안테나는 안테나 소자와 능동 소자간의 경로손실이 최소화되어 배열안테나 시스템의 효율이 증가할 뿐만 아니라, 적용된 능동 소자의 일부가 이상동작을 하더라도 전체 배열안테나의 성능에 미치는 영향이 작아 안정성이 뛰어나다는 장점이 있다.

위상배열안테나를 부배열 단위의 타일로 구성하는 경우 각각의 타일은 사각 평면배열이나 삼각 평면배열과 같은 주기적인 배열구조로 구성되지만, 여러 개의 타일형 부배열을 조합하여 하나의 능동위상배열안테나 시스템으로 구성하는 형태는 매우 다양할 수 있다. 사용 목적에 따라 여러 개의 타일이 동일 평면에 동일 간격으로 배치될 수도 있고, 동일 평면에 비균일 간격으로 배치될 수도 있으며, 특히 입체적으로 배치되어 곡면형을 가지는 컨포멀 배열안테나는 여러 시스템에서 응용성이 높아 많은 연구^[1-6]가 이루어져 왔다.

특히 공기역학적인 측면에서 장점인 컨포멀 배열안테나를 비행체에 탑재하여 위성통신에 적용하기 위한 유럽의 SANDRA(seamless aeronautical networking through integration of data links radios and antennas) 프로젝트^[6]의 경우, RF 대역의 위상천이기와 광학 링 공진기(optical ring resonator)로 동작하는 TTD(true time delay)를 동시에 사용하여 배열안테나의 광대역/광각 특성을 구현하였다. 그러나 시간 지연을 조절하기 위한 광 도파관(optical waveguide) 주변의 광학 링 공진기의 on/off가 온도로 제어되는 구조로 매우 많은 열이 발생하여 방열에 취약한 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 평면 타일형 부배열을 원통형 표면에 구성한 컨포멀 송신 능동 위상배열안테나를 위성통신에 적용 가능하도록 Ku 대역에서 설계 및 제작하고 검증하

였다. 설계된 Ku 대역의 컨포멀 능동위상배열안테나는 64개의 평면형 부배열로 구성되며, 각각의 부배열은 8×8 평면형 마이크로스트립 배열안테나로서 총 4,096개의 안테나 소자로 이루어진다. 특히 각각의 안테나 소자에는 증폭기와 4 bit 분해능의 위상천이기로 구성된 코어칩이 결합되고, 4×4 배열별로 100 psec 단위의 상용 TTD(true time delay) 소자를 배치하여 광대역 동작시 나타나는 빔편이(beam squint) 현상 없이 전자적인 광각 빔조향이 광대역에서 가능하도록 설계하였다. 2장에서는 위상천이기와 시간 지연 소자로 제어되는 컨포멀 위상배열안테나의 해석 및 수치해석 결과를 기술하고, 3장에서는 2장에서의 설계를 바탕으로 제작된 컨포멀 송신 능동 위상배열안테나의 구성 및 방열 구조와 관련된 사항을 기술하였으며, 4장에서는 제작된 시스템의 시험 구성과 시험 결과를 제시하고, 마지막 장에서는 결론으로 정리하였다.

II. 위상천이기와 시간 지연 소자로 제어되는 컨포멀 배열안테나의 설계

컨포멀 위상배열안테나에 있어 디지털 위상천이기와 시간 지연 소자를 동시에 사용하는 경우에 전자적인 빔지향을 위한 제어값 생성의 이해를 돕기 위하여 그림 1에 임의의 위치에 놓인 2개의 안테나 소자를 도시하였다. 그림 1에서 소자 #1은 원거리에서 입사하는 신호가 도달하는 경로가 가장 긴 위치에 있는 안테나 소자를 나타내고, 소자 #m는 임의의 위치의 안테나 소자를 의미한다.

안테나 소자 #1의 중심을 원점으로 하고, 입사 방향으

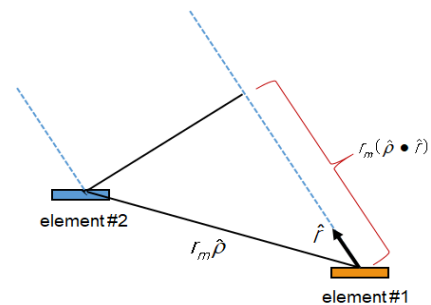


그림 1. 두 안테나 소자간의 경로차

Fig. 1. Propagation delay between two antenna elements of arbitrary location.

로의 단위벡터를 \hat{r} , 원점에 대한 안테나 소자 # m 으로의 위치벡터를 $r_m \hat{\rho}_m$ 라 하면 두 안테나 소자 간의 경로 차이는 그림 1에서와 같이 $r_m(\hat{\rho}_m \cdot \hat{r})$ 이 된다. 두 개의 안테나에 도달하는 신호를 동위상으로 만들기 위해서는 안테나 소자 # m 에 경로 차이를 보상할 시간 지연을 주어야 하며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_m(\hat{r}) = \left\lfloor \frac{r_m(\hat{\rho}_m \cdot \hat{r})}{c\tau_{TTD}} \right\rfloor \tau_{TTD} \quad (1)$$

식 (1)에서 c 는 빛의 속도이고, τ_{TTD} 는 시간 지연 소자의 분해능을 의미하며, $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 소수점 내림을 나타낸다. 본 논문에서는 자유 공간에서 Ku 대역의 한 파장을 진행하는데 걸리는 전파 시간(약 70 psec)과 상용 시간 지연 소자의 선택도를 고려하여 시간 지연 소자의 분해능을 100 psec로 결정하였다. 또한 최대 지연 경로는 설계하고자 하는 위상배열안테나 개구면의 장축 길이와 최대 빔 지향 각도의 사인 함수의 곱으로 구할 수 있으며, 개구면 장축의 길이를 800 mm, 최대 빔 지향 각도를 60도로 가정할 때 약 2.8 nsec 정도의 최대 지연 시간이 필요하다.

전체 지연 경로에서 시간 지연 소자에 의해 보상되는 경로를 제외한 나머지 경로는 위상천이기로 보상되어야 하며, 다음과 같이 구해진다.

$$\phi_m(\hat{r}) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (r_m(\hat{\rho}_m \cdot \hat{r}) - cT_m(\hat{r})) \quad (2)$$

그림 2에 평면형 타일 부배열을 원통형 표면에 구성한

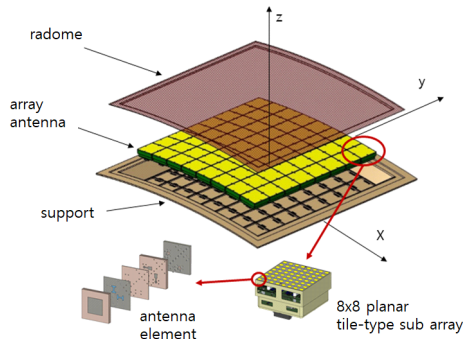


그림 2. 평면형 타일로 구성된 원통형 능동 위상배열안테나의 형상

Fig. 2. Conformal active phased array antenna composed of planar sub-arrays.

위상배열안테나의 형상을 나타내었다. 안테나 소자간의 거리가 10.57 mm인 8×8 마이크로스트립 안테나 타일형 부배열^[7]을 반경 3.5 m의 원통형 표면에 64개 배치한 형상이며, 진동이나 변형에 의한 타일 간의 충돌을 방지하기 위하여 y축 방향으로 1 mm, x축 방향으로 1.5 mm 정도의 이격을 타일과 타일 사이에 두었다. 평면형 타일 부배열과 레이돔이 정위치에 고정될 수 있도록 지지구조를 설계하였으며, 안테나 표면과 레이돔 간의 이격은 21.76 mm이다. 레이돔은 Quartz/Cyanate ester 재질의 표면과 Honeycomb 코어를 사용하여 A-sandwich 형상으로 제작되었다.

그림 1의 좌표계를 참고하여 4,096개 배열에 대한 단위벡터 \hat{r} 방향으로의 array factor(AF)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$AF(\hat{r}) = \sum_{m=1}^{4096} a_m e^{j\{k_0 r_m(\hat{\rho}_m \cdot \hat{r}) + \beta_m\}} \quad (3)$$

식 (3)에서 a_m 과 β_m 은 각각 m 번째 안테나 소자에 인가되는 신호의 크기와 위상이고, k_0 는 자유 공간의 파수(wave number)이다. 본 논문과 같이 시간 지연 소자와 위상천이기를 모두 사용하여 단위벡터 \hat{r}_o 방향으로 지향하는 경우 식 (3)의 β_m 은 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$AF(\hat{r}) = \sum_{m=1}^{4096} a_m e^{jk_0\{r_m(\hat{\rho}_m \cdot \hat{r}) - cT_m(\hat{r}_o) - \phi_m(\hat{r}_o)/k_0\}} \quad (4)$$

시간 지연 소자와 위상천이기를 사용하여 설계된 원통형 컨포멀 위상배열안테나의 array factor를 식 (4)에서 $a_m=1$ 인 uniform 배열인 경우를 모의분석하여 그림 3에 나타내었다. Z축 방향의 정면 빔 조향의 경우, 3 dB 빔 폭이 Ku 대역의 중심주파수(f_c)에서 y축을 따라 약 1.45°, x축을 따라 약 1.5°로 분석되었고, x축 및 y축을 따라 60° 각도로 빔 지향을 할 경우의 빔폭이 각각 약 3°와 약 2.9°로 나타났으며, 대역폭 500 MHz의 가장 낮은 동작 주파수(f_L)와 가장 높은 동작 주파수(f_h)에서 빔 편이 없이 동일한 지향 방향을 가짐을 확인할 수 있다.

그림 2에 주어진 컨포멀 배열안테나를 구성하는 안테나 소자의 설계 파라미터를 그림 4에 나타내었다. 설계된

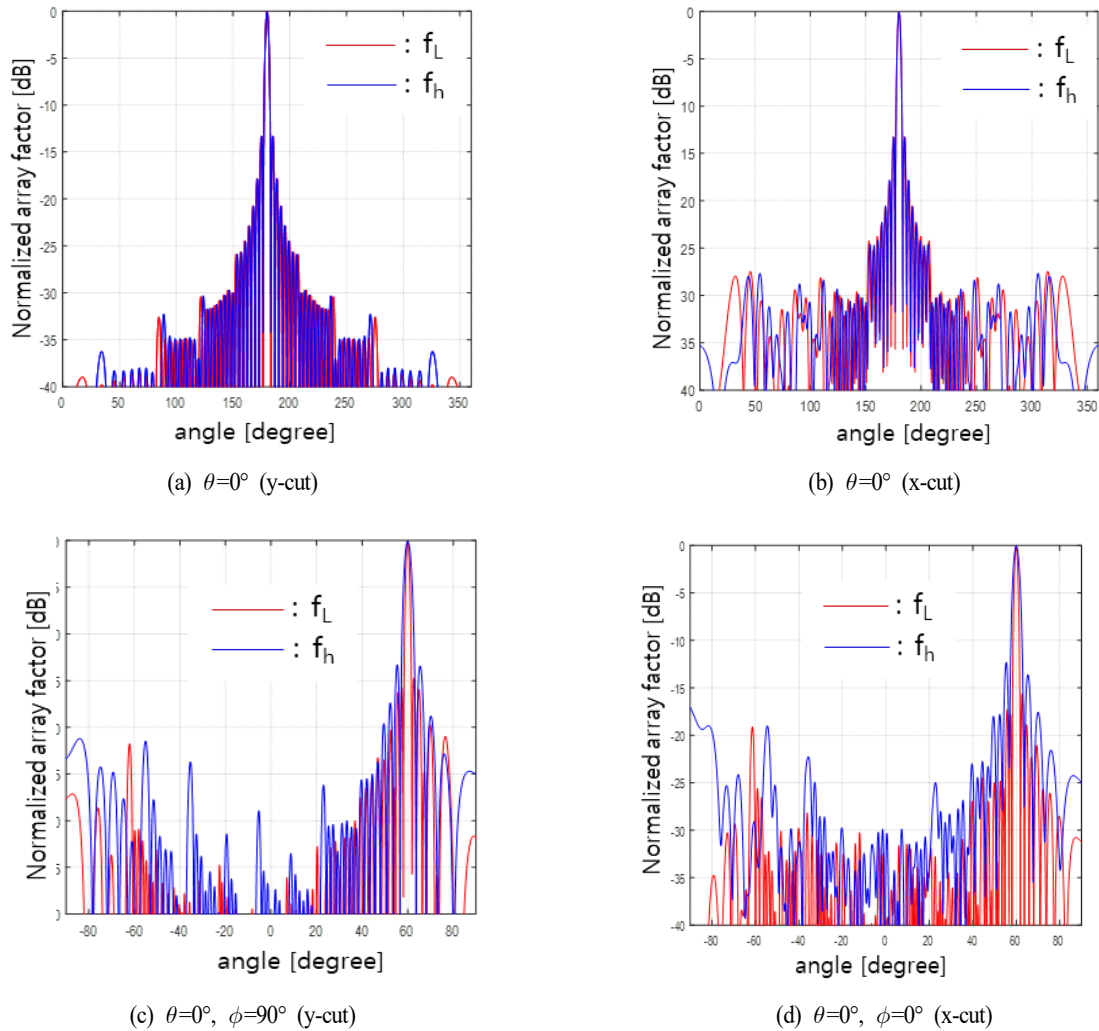


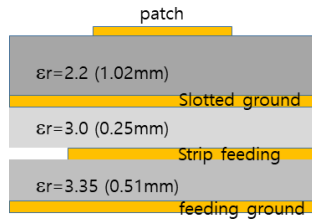
그림 3. 평면형 부배열로 구성된 컨포멀 능동위상배열안테나의 array factor

Fig. 3. Array factor of conformal active phased array antenna composed of planar sub-arrays.

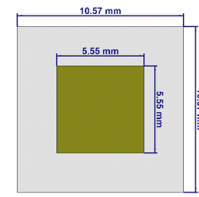
안테나 소자는 슬롯 커플링을 이용한 마이크로스트립 패치 안테나 형태이며, 급전부는 스트립라인으로 구성하였다. 그리고 이중 급전 구조를 구성하여 수직/수평 편파와 같은 선형 편파뿐만 아니라, 두 개의 급전 라인에 인가되는 신호의 상대적인 위상에 따라 원형 편파로도 동작할 수 있도록 하였다. 안테나의 급전은 그림 4(a)에 나타난 feeding ground에 위치하는 RF via를 통하여 이루어지며, 두 개의 급전 라인 간의 격리도를 향상하기 위하여 그림 4(d)와 스트립 라인층에 via를 이용한 격리벽을 추가하였다.

그림 4에 나타난 패치안테나 설계 파라미터로 8×8 배

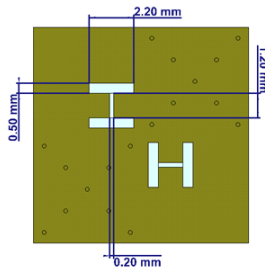
열을 구성하여 모의분석하고, 배열안테나의 중심부에 위치하는 안테나 소자에 대한 형상을 유전체를 제거하여 그림 5(a)에 도시하였고, 모의분석 결과를 그림 5(b)~그림 5(d)에 나타내었다. 그림 5(b)와 같이 반사손실은 동작 주파수대역에서 -10 dB 이하로 유지되는 것을 확인할 수 있고, 그림 5(c)는 중심주파수에서 구해진 패치 안테나 소자의 안테나 패턴으로서 배열안테나의 최대 빔 조향각인 60° 까지 비교적 평탄한 이득 특성을 나타내고 있으며, 최대 이득은 5.1 dBi이다. 그림 5(d)에는 수직/수평 편파 급전 간 격리도 향상을 위하여 삽입된 via 격벽의 유무에 따



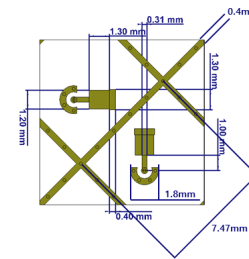
(a) Layer stack 구조
(a) Layer stack structure



(b) 패치 파라미터
(b) Patch parameter

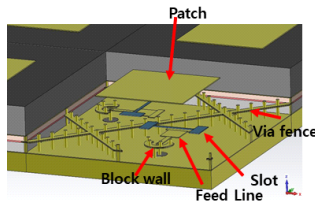


(c) 슬롯 파라미터
(c) Slot parameter

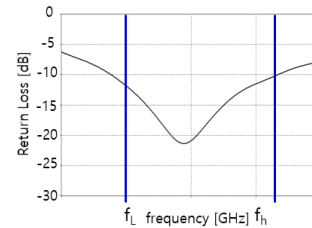


(d) 급전부 파라미터
(d) Feed line parameter

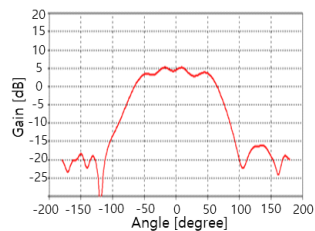
그림 4. 마이크로스트립 패치 안테나 소자의 설계 파라미터
Fig. 4. The design parameter of microstrip patch antenna element.



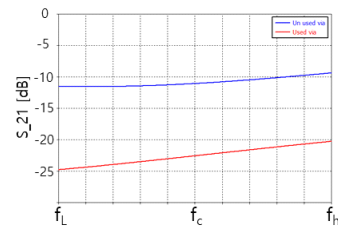
(a) 안테나 구조
(a) Antenna structure



(b) 반사손실
(b) Return loss



(c) 안테나 패턴
(c) Antenna pattern



(d) 격리도
(d) Antenna isolation

그림 5. 8×8 배열 내 마이크로스트립 패치 안테나 소자의 설계 결과
Fig. 5. The simulation results of microstrip patch antenna element in 8×8 array.

른 격리 성능을 비교하였다. via 격벽을 추가함으로써 두 개의 급전 포트 간 격리도가 약 10 dB 정도 개선되었으며, 동작 주파수대역에서 -20 dB 이하의 격리 성능을 보여주고 있다.

Ⅲ. 컨포멀 송신 능동 위상배열안테나의 구성 및 방열 구조

64개의 타일형 평면 부배열로 구성된 컨포멀 송신 능동위상배열안테나의 구성과 구성품별 세부 기능을 그림 6에 나타내었다. 송신 타일형 평면 부배열에 대한 상세한 구성 및 성능은 참고 문헌^[7]에 주어져 있으며, 16개의 타일형 평면형 부배열을 L대역 신호 및 Ku 대역 LO로 급전하는 4개의 섹터와 전자적인 빔 조향 제어를 담당하는 BSU(Beam steering unit)로 구성하였다. 64개 타일의 8,192개의 위상천이기와 512개의 시간 지연 소자를 제어하는 신호는 BSU에서 생성되어 LVDS(low voltage differential signaling)를 통하여 4개의 섹터로 전달되고, 재분배된 후 RS-422를 통하여 64개의 타일형 평면 부배열로 전송되도록 하였다.

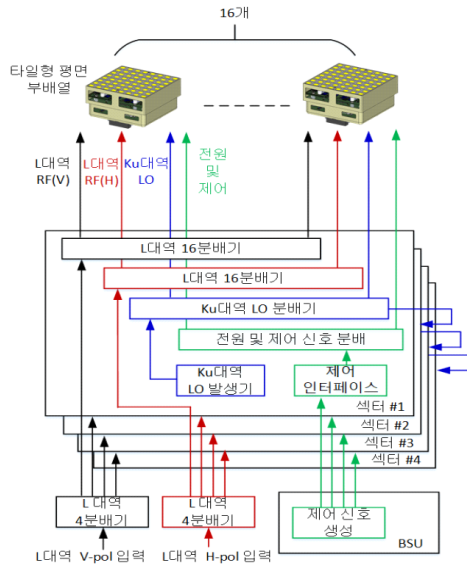


그림 6. 원통형 송신 능동위상배열안테나 구성

Fig. 6. Configuration of the conformal Tx active phased array antenna.

하나의 타일형 평면 부배열 동작을 위한 전력 소모량은 약 31 W^[7]이며, 64개의 타일을 동작시키기 위한 전력 소모량이 거의 2 kW에 달하기 때문에 타일 내에서 발생하는 열 문제를 해결하기 위하여 그림 7과 같은 공랭식 방열 구조를 적용하였다. 그림 7과 같이 송신 능동위상배열안테나의 지지구조 외부에서 공급된 저온의 건조한 바람이 에어 덕트를 거쳐 4개의 공기 인입구로 분할된 후, 타일 내의 4층의 MLB(multi layer board)와 안테나/RF 보드 사이의 공간을 통하여 지나면서 방열이 될 수 있도록 설계하였다.

총 8개의 공기 인입구가 존재하며, 각각의 공기 인입구로 유입된 공기는 원통형 배열구조에서 선형으로 배열되는 타일 축을 따라 일직선으로 흘러 반대편 동일 구조의 흡입구로 배출되도록 설계하였다. 각각의 공기 인입구에 약 8℃의 공기가 10 m/sec의 속도로 유입되는 경우를 가정하여 열 해석을 진행한 결과, 공기 통로를 벗어난 일부 MLB PCB의 모서리 온도를 제외한 대부분의 내부 동작 온도가 62℃ 이하로 유지됨을 확인하였다. 그림 8은 128개의 송신 코어칩이 장착된 안테나/RF 보드 중에서 동작 온도가 가장 높게 나타난 공기 흡입구 부근의 6개의 안테

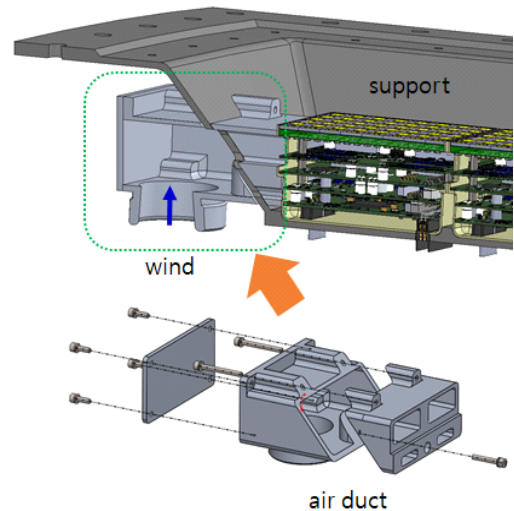


그림 7. 송신 능동위상배열안테나에 적용된 공랭식 방열 구조

Fig. 7. Air-cooling structure designed for the Tx active phased array operation.

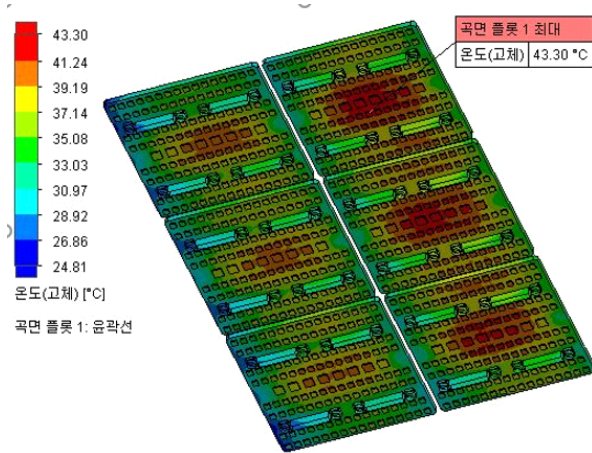


그림 8. 적용된 공랭식 방열 구조의 안테나/RF 보드 열 해석 결과

Fig. 8. Thermal analysis results of the conformal Tx active phased array antenna with the proposed air-cooling structure.

나/RF 보드의 열 해석 결과이며, 최고 온도는 약 43.3도로 나타났다.

IV. 컨포멀 송신 능동 위상배열안테나의 제작 및 측정

2장과 3장의 설계를 바탕으로 제작한 원통형 컨포멀 송신 능동위상배열안테나를 그림 9에 나타내었다. 제작된 능동위상배열안테나의 개구면의 크기는 약 $70 \times 70 \text{ cm}^2$ 이며, 가장자리에 위치하는 타일형 평면 부배열의 빔조향 각도를 확보하고, 레이돔을 고정하기 위한 면적을 고려하

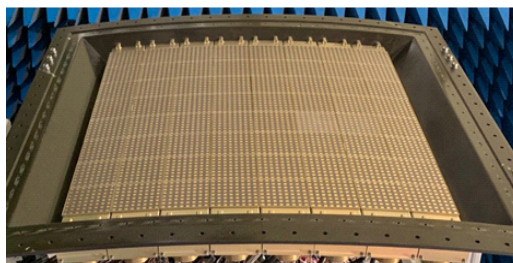


그림 9. 제작된 원통형 컨포멀 송신 능동위상배열안테나
Fig. 9. Fabricated conformal Tx active phased array antenna.

여 지지구조는 약 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 의 크기로 제작되었다.

3장에 기술된 바와 같이 사용된 타일형 평면 부배열 내에서 L 대역에서 Ku 대역으로의 주파수 변환이 이루어지기 때문에 평면형 근접전계 측정장치와 연동되는 네트워크 분석기를 이용하기 위하여 그림 10과 같이 믹서와 LPF(low pass filter)로 구성되는 주파수 변환 모듈을 추가하여 위상배열안테나와 LO(local oscillator)를 공유하도록 시험 구성을 하였다. 섹터 #1에서 생성된 Ku 대역 LO 신호는 나머지 섹터와 주파수 변환 모듈의 믹서로 순차적으로 전달되어 주파수 동기가 이루어진다.

64개 타일형 평면 부배열에 포함된 512개의 TTD 소자의 시간 지연 특성은 구성품 단위에서 네트워크 분석기로 측정하여 목록화하였고, 8,192개의 위상천이기의 특성은 평면형 근접전계 측정장치에서 백 프로젝션^[8](back projection) 방법과 근접전계에서의 프로젝션 방법^[9](projection method)을 병행하여 사용함으로써 위상을 보정하였다. 보정된 원통형 송신 능동위상배열안테나의 수직 편파와 수평 편파에 대한 broadside 3D 빔 패턴을 그림 11에 나타내었다.

그림 11에 주어진 바와 같이 정면 방향으로 빔의 정렬이 잘 이루어졌음을 관찰할 수 있으며, 측정된 3 dB 빔 폭은 동작 중심주파수(f_c)에서 x축을 따라 1.51° , y축을 따

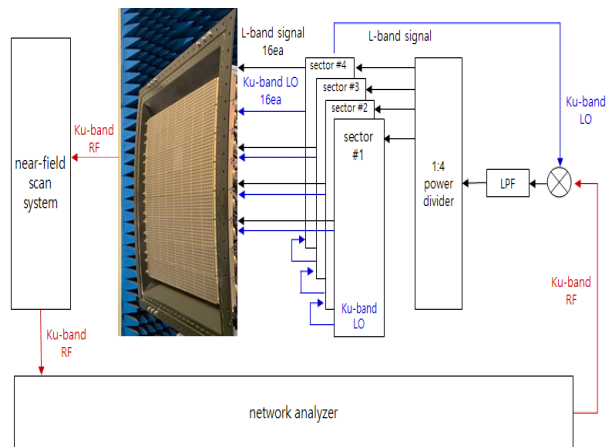


그림 10. 제작된 능동위상배열안테나의 근접전계 시험 구성

Fig. 10. Near filed measurement test setup for the fabricated conformal Tx active phased array antenna.

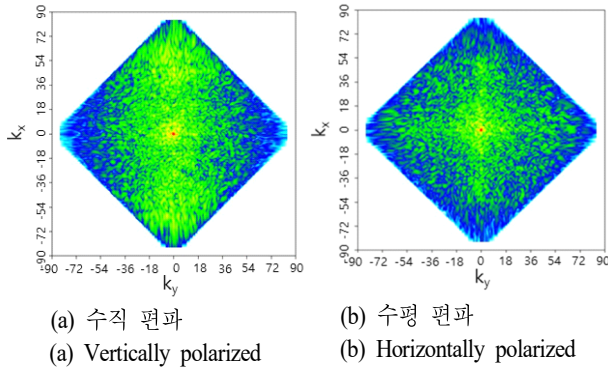


그림 11. 정면 조향 측정 3D 빔패턴

Fig. 11. Measured broadside 3D pattern of the fabricated conformal Tx active phased array antenna.

라 1.47° 정도로 array factor로 분석한 그림 3의 결과와 거의 일치하였다. 그리고 그림 10의 시험 구성에서 주파수 변환 모듈과 컨포멀 안테나 배열의 이득은 중심주파수에서 수직 편파의 경우 39.27 dBi, 수평편파의 경우 40.85 dBi로 측정되었다. 편파 간의 이득 차이에 대한 원인으로 는 사용된 8,192개의 코어칩 이득의 편차, 22.5° 단위의 위상천이기 분해능에서 기인하는 위상제어의 오차 및 배열안테나의 보정 과정에서 발생한 오차 등이 복합적으로 작용한 것으로 보인다.

그림 12에는 수직 편파에 대해 $\theta=60^\circ$ 로, $\phi=0^\circ$ 로 원통형 축을 따라 빔을 지향한 경우, 측정된 안테나 패턴을 나타내었다. 2장에서 분석된 결과와 같이 전체 500 MHz의 동작 대역폭에 대하여 빔 편이 현상 없이 동일한 지향 방

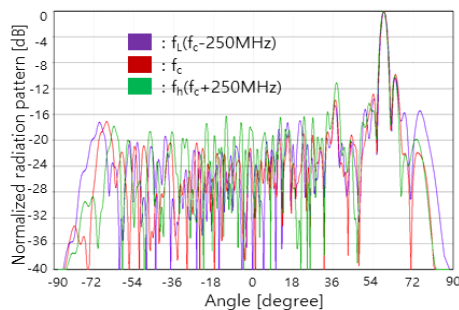
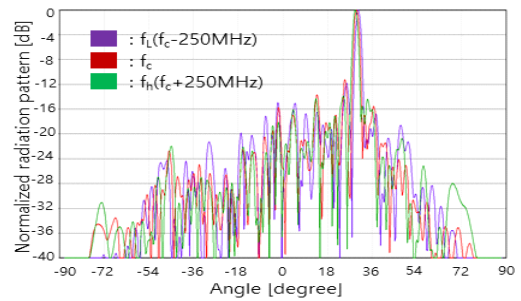


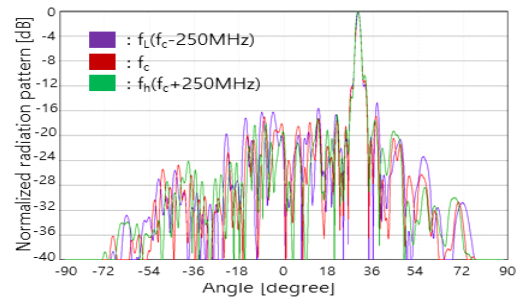
그림 12. $\theta=60^\circ$, $\phi=0^\circ$ 로 지향한 경우 측정된 안테나 패턴
Fig. 12. Measured off-broadside antenna pattern of the fabricated conformal Tx active phased array antenna ($\theta=60^\circ$, $\phi=0^\circ$).

향을 가지고 있음을 관찰할 수 있으며, 측정된 주 빔의 지향 방향은 58.7° 로 나타났다. 지향한 주 빔 방향과 측정된 주 빔 방향 간의 오차는 마이크로스트립 패치 안테나 소자의 단일패턴의 영향으로 판단되며, 3 dB 빔 폭은 약 2.98° 로 측정되어 array factor로 분석한 결과인 3° 에 거의 일치하였다. 그러나 제작된 송신 코어칩이 이득 조절 기능을 보유하지 않아 배열 소자 간의 이득 편차에 의해 해석 결과보다 부엽 레벨이 전체적으로 높게 측정되었다.

제작된 원통형 컨포멀 송신 능동위상배열안테나에서 빔 편이 현상을 없애기 위하여 포함된 TTD의 영향성을 살펴보기 위하여 TTD에 대한 제어를 수행하지 않고 위상 천이기로만 전자적인 빔 조향을 실행한 경우와 TTD와 위상천이기를 모두 제어한 경우의 수평 편파에 대한 안테나 패턴을 측정하여 그림 13에 나타내었다. 빔 조향 방향은 $\theta=30^\circ$, $\phi=90^\circ$ 이다. TTD를 제어하지 않고 위상천이기로만 빔 조향을 수행한 그림 13(a)의 경우, f_c 의 지향 방



(a) Measured pattern without TTD control



(b) Measured pattern with TTD control

그림 13. $\theta=30^\circ$, $\phi=90^\circ$ 로 지향한 경우 측정된 안테나 패턴
Fig. 13. Measured off-broadside antenna pattern of the fabricated conformal Tx active phased array antenna ($\theta=30^\circ$, $\phi=90^\circ$).

향(29.7°)을 기준으로 f_L 의 지향 방향은 $+0.7^\circ$, f_h 의 지향 방향은 -0.6° 정도의 빔 편이가 발생하는 것으로 측정되었다. 이에 반해 TTD의 제어를 포함하여 동일한 방향으로 지향한 경우, 그림 13(b)와 같이 f_c 의 지향 방향(29.8°)을 기준으로 f_L 의 지향 방향은 $+0.03^\circ$, f_h 의 지향 방향은 -0.03° 정도의 오차로 사실상 500 MHz의 주파수 동작 대역 내에서 빔 편이가 발생하지 않았다.

그림 14에는 선형 배열측과 원통형 배열측을 따라 여러 방향으로 조향한 경우에 f_c 에서 측정된 수직 편파에 대한 3D 안테나 패턴을 나타내었다. 측정된 데이터로 3D 안테나 패턴을 그리는데 사용된 소프트웨어는 (주)엠티지의 VWNF로서 가로축과 세로축은 각각 k_x 와 k_y 에 해당한다. 예를 들어 그림 14(d)와 같이 입사 각도가 $\theta=45^\circ$, $\phi=270^\circ$ 인 경우, $k_y=90 \sin(45^\circ)\sin(270^\circ)$ 로 계산되어 -63.6 도에 주 빔이 나타나게 된다. 설계에서 목표한 $0\sim60$ 도의 앙각과 $0\sim360$ 도 방위각 범위에서 정상적으로 빔 지향이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다.

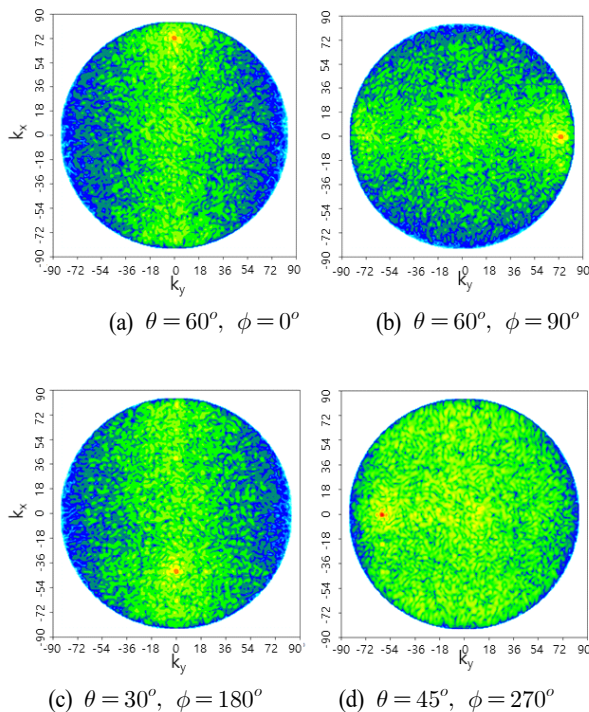


그림 14. 정면 조향 측정 3D 빔패턴

Fig. 14. measured broadside 3D pattern of the fabricated conformal Tx active phased array antenna.

제작된 원통형 컨포멀 송신 능동위상배열안테나의 동작을 위하여 제안된 공랭식 방열 구조의 열 해석 결과를 검증하기 위하여 배열안테나 중심부의 y축을 따른 8개 타일의 안테나 표면에 열전대(thermocouple)를 부착하고 측정한 후, 해석 결과와 비교하여 그림 15에 나타내었다. 8°의 공기가 유입될 경우, 공기 흡입구에 인접한 타일의 안테나 표면에서의 온도는 측정결과, 45°로 열 해석 결과인 42.1°와 큰 차이가 없었지만, 공기 인입구에 인접한 타일의 안테나 표면에서의 온도는 각각 18.5°와 34.4°로 약 16°의 차이가 났다. 이는 그림 7에서 첫 번째 타일과 붙어 있는 에어 덕트(air duct)가 열 해석에 포함되어 있지 않아 에어 덕트의 전도를 통한 방열이 생략된 결과로 판단된다.

송신 능동 위상배열안테나를 동작시키면서 배열안테나의 정면에서 열화상 카메라로 안테나 표면 온도의 시간적인 변화를 관찰한 결과, 약 15분이 지나면 거의 정상 상태(steady state)에 도달하였으며, 그때의 열화상 화면을 그림 16에 나타내었다. 화면의 오른쪽이 공기 인입구에 해당하며, 중심부의 y축을 따라 각 타일의 중심 표면을 십자로 마크하여 화면 오른쪽에 측정된 온도를 나타내었다. 배열안테나의 중심부는 열전대로 측정한 그림 15와 유사한 결과가 나타났지만, 화면 왼쪽 상단부의 타일 표면에

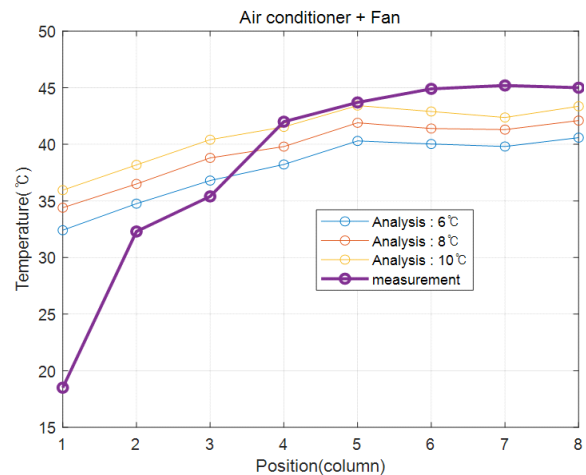


그림 15. 배열안테나 중심부에서 y축을 따라 측정된 안테나 표면 온도와 예측된 안테나 표면 온도 비교

Fig. 15. Analyzed and measured antenna surface temperature along y-axis at center column.

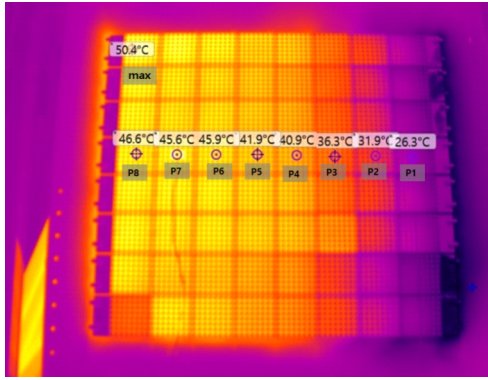


그림 16. 열화상 카메라로 측정한 안테나 표면 온도

Fig. 16. The antenna surface temperature measured by thermal imaging camera in steady state.

서 50.4°C의 최고 온도가 관찰되었다. 이는 지지구조에 장착되는 타일의 위치 오차로 인한 공기 통로의 비균일성과 8개 공기 인입구로 유입되는 공기의 양이 균등하게 배분되지 않아 발생하는 문제로 판단된다.

V. 결 론

본 논문에서는 평면형 8×8 마이크로스트립 배열안테나 64개로 이루어진 Ku 대역의 원통형 컨포멀 능동위상 배열안테나를 설계 및 제작하고, TTD와 위상천이기를 이용하여 빔 편이 현상 없이 광대역에서 광각의 전자적인 빔 조향이 가능하다는 것을 실험을 통하여 검증하였다. 본 논문의 결과로부터 비콘 채널과 데이터 통신 채널의 주파수 이격이 큰 위성통신 분야에서 ESA(electronically scanned array) 시스템으로 광대역 다중채널의 통신이 가능하며, 반사판 형태의 안테나와 마찬가지로 비콘(beacon) 채널의 추적만으로 위성통신이 가능함을 확인하였다.

References

[1] H. Schippers, J. H. van Tongeren, P. Knott, and T. Deloues, et al., "Vibrating antennas and compensation techniques research in NATO/RTO/SET 087/RTG 50," in *2007 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, Mar. 2007, pp. 1-13.

[2] K. Wincza, S. Gruszczynski, "Influence of curvature radius

on radiation patterns in multibeam conformal antennas," in *2006 European Microwave Conference*, Manchester, Sep. 2006, pp. 1410-1413.

[3] C. Loecker, P. Knott, R. Sekora, and S. Algermissen, "Antenna design for a conformal antenna array demonstrator," in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP)*, Prague, Mar. 2012, pp. 151-153.

[4] H. Schippers, J. Verpoorte, P. Jorna, A. Hulzinga, A. Meijerink, and C. Roeloffzen, et al., "Conformal phased array with beam forming for airborne satellite communication," in *2008 International ITG Workshop on Smart Antennas*, Vienna, Feb. 2008, pp. 343-350.

[5] T. Bertuch, P. Knott, H. Wilden, and O. Peters, "SAR experiments using a conformal antenna array radar demonstrator," in *8th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Aachen, pp. 1-4, Jun. 2010.

[6] J. Verpoorte, H. Schippers, P. Jorna, A. Hulzinga, C. G. H. Roeloffzen, and D. A. I. Marpaung, et al., "Development of the SANDRA antenna for airborne satellite communication," in *2011 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, Mar. 2011, pp. 1-15.

[7] T. Joo, K. Kim, Y. Kim, C. Hwang, and J. Seo, "Design of a conformal Rx phased array antenna system for Ku-band satellite communications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 6, pp. 495-509, Jun. 2020.

[8] H. Chae, H. S. Kim, D. K. Lee, M. D. Jeong, and J. Park, "Transmit-beam pattern measurement of the active phased-array antenna using near-field measurement facility," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 12, pp. 1155-1164, Dec. 2011.

[9] I. Chiba, K. Hariu, S. Sato, and S. A. Mano, "A projection method providing low sidelobe pattern in conformal array antenna," in *Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium*, San Jose, CA, Jun. 1989, vol. 1, pp. 130-133.

박 상 혁 [엠티지/주임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5650-9792>



2014년 3월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2016년 8월~현재: 엠티지 주임연구원
[주 관심분야] RF System, Embedded System

서 중 우 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6784-2745>



2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2002년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2017년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
2002년 1월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원 (2본부 1부)
[주 관심분야] 널링 안테나, 패턴합성 알고리즘, 컨포멀 안테나

김 기 태 [엠티지/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2564-7313>



2018년 2월: 전북대학교 전자공학부 (공학사)
2020년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학석사)
2019년 11월~현재: 엠티지 연구원
[주 관심분야] 임베디드 시스템, 전자통신 시스템

주 태 환 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8750-9779>



2008년 2월: 부산대학교 전기 및 전자공학부 (공학사)
2010년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
2014년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원
[주 관심분야] RF Transceiver, 데이터링크 시스템