

## 인공 유전체 슬랩을 활용한 소형 광대역 컨포멀 배열 안테나 설계

Design of Compact Broadband Conformal Array Antenna  
Using Artificial Dielectric Slabs

김상은 · 유태호 · 문효상\* · 조상왕\* · 변강일

Sangeun Kim · Taeho Yu · Hyosang Moon\* · Sangwang Cho\* · Gangil Byun

## 요 약

본 논문에서는 인공 유전체 슬랩을 활용한 소형 광대역 컨포멀 배열 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 보우타이형 슬롯 안테나 위에 선형 임피던스 곡선을 가지는 세 개의 인공 유전체 슬랩이 적층된 형태로, 슬롯 안테나로부터 자유 공간까지 광대역에 걸쳐 효율적인 임피던스 전환을 가능하게 한다. 각 인공 유전체 슬랩은 서브 파장의 정사각형 패치 배열 적층 구조로 구현되었으며, 이를 통해 6 GHz에서 18 GHz까지 3:1의 대역폭을 구현한다. 제안된 안테나의 높이와 배열 간격은 8.24 mm( $0.165 \lambda_{6\text{GHz}}$ ) 및 8.33 mm( $0.5 \lambda_{18\text{GHz}}$ )이며, H-평면에 대해 27.79°의 곡률을 가지는 컨포멀 배열로 설계되었다. 시뮬레이션 결과, 목표 대역에서 -10 dB 이하의 능동 산란계수를 만족하며, 중심 소자 기준으로 6 GHz에서 -4.88 dBi, 18 GHz에서 4.80 dBi의 전면 방향 이득을 가진다. 또한, 제안된 컨포멀 배열 안테나의 성능을 검증하기 위해, 급전 네트워크를 이용하여 E-평면 방향으로 결합된 8×1 배열 안테나 8개를 제작하였으며, 이는 곡률을 가지는 금속 실린더 표면에 장착되었다. 제작된 배열 안테나의 측정 결과, 능동 산란계수는 목표 대역에서 전반적으로 -10 dB 이하의 수준을 유지한다. 또한, 빔조향 패턴은 개별 소자 패턴을 후처리하여 생성하였으며, 빔조향 오차는 최대 3° 이내로 유지되는 것을 확인하였다.

## Abstract

In this study, we propose a compact broadband conformal array antenna using artificial dielectric slabs. The proposed antenna consists of three artificial dielectric slabs with a linear impedance distribution stacked on a bow-tie slot antenna. This enables an efficient impedance transition across a wide band from the slot to free space. Each slab is implemented using a sub-wavelength square patch array, achieving a 3:1 bandwidth from 6~18 GHz. The height of the proposed antenna is 8.24 mm ( $0.165 \lambda_{6\text{GHz}}$ ), with an array distance of 8.33 mm ( $0.5 \lambda_{18\text{GHz}}$ ). The conformal array was designed with a curvature of 27.79° in the H plane. Simulation results show that the proposed antenna maintains an active *S*-parameter below -10 dB across the target bandwidth and achieves a boresight gain of -4.88 dBi at 6 GHz and 4.8 dBi at 18 GHz. To validate its performance, eight 8×1 arrays were fabricated, combined in the E-plane with a corporate feeding network, and mounted on a curved metallic surface. The measurement results of the fabricated array confirmed that the active *S*-parameter remained below 10 dB across the target bandwidth. Additionally, post-processing of the measured active element patterns generated beam-steering patterns with a maximum error of 3°.

Key words: Broadband Antenna, Array Antenna, Conformal Array Antenna

「이 논문은 2021년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-21-033).」

울산과학기술원 전기전자공학부(Electrical Engineering, UNIST)

\*LIG 넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received August 23, 2024 ; Revised September 4, 2024 ; Accepted September 20, 2024. (ID No. 20240823-085)

· Corresponding Author: Gangil Byun (e-mail: byun@unist.ac.kr)

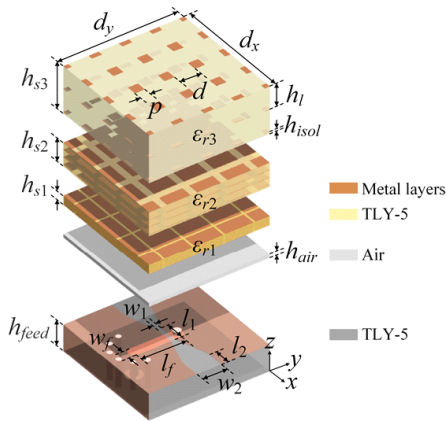
## I. 서 론

광대역 배열 안테나는 현대 전자전(EW) 시스템에서 필수적인 요소로, 다양한 무선 통신 및 레이더 시스템의 전자기 방출을 탐지할 수 있도록 한다. 이러한 시스템에서 사용되는 주파수는 광대역으로 분포되어 있으므로, 전파를 탐지하기 위해서 배열 안테나는 광대역에서 동작하여야 한다<sup>[1]~[3]</sup>. 특히, 저전력 방출을 탐지하기 위해서 높은 이득을 가지는 안테나 소자가 요구되며, 방향 탐지의 효율을 높이기 위해 빔형성이 가능한 광대역 배열 안테나 개발에 중점을 두고 있다<sup>[4]</sup>. 또한, 무인 항공기(UAV), 미사일, 드론과 같은 항공 우주 플랫폼에서 전파 방향 탐지 시스템 탑재의 중요성이 확대됨에 따라 효율적인 시스템 탑재를 위해 플랫폼에 통합 가능한 배열 안테나 설계가 요구되고 있다. 이동체에 배열 안테나를 통합하기 위해서는 배열 안테나의 물리적 부피와 무게를 고려하여야 하며, 특히 플랫폼 형상을 고려한 곡면을 가지는 배열 안테나 설계가 요구된다<sup>[5]</sup>. 광대역 방향탐지 어플리케이션에 주로 사용되는 대수주기 다이폴 배열(LPDA) 및 비발디 안테나와 같은 일반적인 광대역 안테나의 경우, 배열 방향을 따라 좁은 안테나 간격을 보장하여 효과적인 빔형성이 가능하다. 특히 비발디 안테나를 활용하여 곡률을 갖는 컨포멀 배열 안테나를 개발한 사례가 있으나, 지향 방향을 따라 상대적으로 큰 부피를 가진다<sup>[6]~[8]</sup>. 이는 항공우주 플랫폼 탑재 시 공력 특성에 의한 문제를 발생시킬 수 있다. 반면에 다층 유전체 기판에 서브 파장의 금속 패턴으로 구성된 인공 유전체 층(artificial dielectric layer)을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[9]~[11]</sup>. ADL을 활용할 경우 광대역 매칭특성을 유지하면서 종축 및 지향 방향으로 소형화 설계가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 곡률을 가진 표면적응형 배열에 인공 유전체 층을 활용한 안테나를 적용한 연구 사례는 보고된 바 없다. 본 논문에서는 6 GHz에서 18 GHz까지 3:1 대역폭 내에서 인공 유전체 슬랩을 활용한 광대역 컨포멀 슬롯 배열 안테나를 제안한다. 제안된 배열 소자는 캐비티 구조의 보우타이형 슬롯 안테나 위에 세 층의 인공 유전체 슬랩이 적층된 구조이다. 인공 유전체 슬랩은 상용 기판에 금속 패턴 배열이 인쇄된 다층 구조로 이루어지며, 패턴 간 간

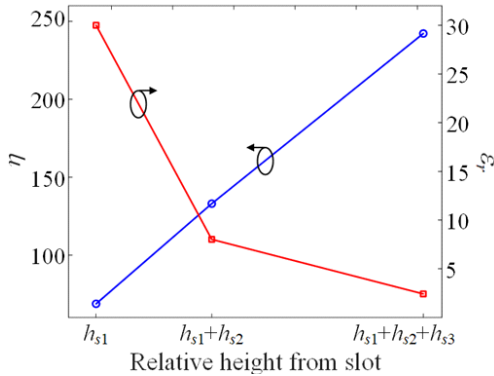
격 및 사이즈를 조절하여 원하는 유효 유전율을 구현할 수 있다. 각 슬랩의 유효 유전율은 슬롯 평면과 자유 공간 사이의 광대역 임피던스 매칭을 고려하여 최적화되었다. 또한, 제안된 단일 소자를 활용하여 H-평면에 대해 곡률을 가지는 8개의 능동 소자를 배열하였으며, E-평면 방향으로 무한 경계 조건을 적용하였다. 본 연구에서 제안된 배열 안테나의 곡률은 8×1 배열의 첫 번째 소자와 여덟 번째 소자의 법선 벡터 방향에 대한 각도 차이가 27.79°를 갖도록 설계하였다. 제안된 컨포멀 배열 안테나의 능동 산란계수(active S-parameter)와 개별 소자 패턴(active element pattern) 및 합성빔 패턴의 시뮬레이션 결과는 평면형 배열 안테나와 비교 분석되었다<sup>[12]</sup>. 또한, 안테나의 성능 검증을 위해 급전 네트워크를 이용하여 E-평면 방향으로 결합된 8×1 배열 프로토타입을 제작하였다. 제작된 8개의 8×1 배열은 곡률을 가지는 금속 실린더로 모사된 플랫폼에 장착되었으며, 총 64 소자 컨포멀 배열 안테나를 형성하였다. 제작된 프로토타입의 능동 산란계수 및 능동 소자 패턴은 측정을 통해 검증되었다.

## II. 안테나 설계 과정

그림 1은 제안된 배열 안테나의 단일 소자 형상을 나타내며, 그림 1(a)는 단일 소자의 적층 구조를 보여준다. 제안된 단일 소자는 보우타이형 슬롯 안테나와 인공 유전체 슬랩들로 구성된다. 대역폭 향상을 위해 안테나는 보우타이형 슬롯 형태로 설계되었으며, 캐비티 구조를 형성하기 위해  $h_{feed}=1.827$  mm의 높이를 갖도록 하였다. 개별 안테나는  $d_x \times d_y = 8.33 \times 8.33$  mm의 크기를 가지며, 이는 18 GHz의 반파장에 해당한다. 슬롯은 수직 핀과 50-Ω 전송선로로 급전되며, 신호 비아(signal via)를 통해 SMPM 커넥터에 수직으로 연결되도록 구성되었다. 보우타이 슬롯 안테나의 주요 설계 변수는 다음과 같다:  $w_1=0.3$  mm,  $l_1=1.4$  mm,  $w_2=1.7$  mm,  $l_2=1.4$  mm,  $w_f=0.75$  mm,  $l_f=3$  mm. 슬롯 평면과 인공 유전체 슬랩 사이에는 경계면 반사(boundary reflection)를 최소화하고 xy-평면 방향의 표면파를 억제하기 위해  $h_{air}=0.25$  mm 높이의 공기층이 포함되었다. 세 개의 인공 유전체 슬랩은 서로 다른 비유전율을 가지며, 각 슬랩의 비유전율 값은  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$ ,  $\epsilon_{r3}$ 로 표시된다. 광대역 임피던스 매칭을 위해, 서로 다른 슬랩의 고유



(a) 제안된 단일 소자의 적층 구조  
(a) Stacked structure of the proposed single element



(b) 인공 유전체 슬랩의 광대역 임피던스 매칭 설계 조건  
(b) Design conditions for broadband impedance matching of artificial dielectric slabs

그림 1. 제안된 배열 안테나의 단일 소자 형상  
Fig. 1. Unit cell of proposed antenna array.

임피던스( $\eta$ ) 분포는 선형 함수를 가져야 한다. 유전체 슬랩의 선형 임피던스 분포는 경계면 반사(boundary reflection)를 최소화하여 동작 대역폭을 향상시킨다. 그림 1(b)는 제안된 광대역 임피던스 매칭 설계 조건을 나타내며, 슬롯으로부터의 상대적 높이에 따른 각 슬랩의 임피던스 및 유효 유전율 값을 나타낸다. 슬롯 안테나에서 가장 가까운 첫 번째 슬랩의 비유전율  $\epsilon_{r1}$ 은 슬롯 안테나와의 임피던스 매칭을 위해  $\epsilon_{r1}=30$  및  $\eta_1=68.8 \Omega$ 으로 설계되었다. 세 번째 슬랩의 비유전율  $\epsilon_{r3}$ 은 자유 공간 임피던스를 고려하여 가장 낮은 값인  $\epsilon_{r1}=2.4$ , 즉  $\eta_3=242.2 \Omega$ 을 갖도록 하였다. 이는 상업용 기판 TLY-5( $\epsilon_r=2.2$ ,  $\tan \delta=$

0.0009)를 사용하여 구현할 수 있는 인공 유전체 슬랩의 최소 비유전율 상수이다. 두 번째 슬랩은 광대역 임피던스 매칭을 위해 슬랩 1~3의 임피던스가 선형 분포를 갖도록  $\epsilon_{r2}=8.03$ ( $\eta_2=133.06 \Omega$ )으로 설계되었다. 각 인공 유전체 슬랩은 서브 파장 길이의 정사각 패치 배열이 적층된 구조이다. 주요 설계 변수인 패치 간 간격  $d$ 와 패치 사이 크기  $p$ 를 통해 타겟 유효 유전율을 구현할 수 있으며, 이때 공정 요건에 따라 패치 간 간격은 0.1 mm 이상을 갖도록 하였다. 각 패치 층은  $h_1=0.127$  mm, 0.508 mm, 1.575 mm 두께의 TLY-5 기판( $\epsilon_r=2.2$ ,  $\tan \delta=0.0009$ )에 인쇄되었으며, 0.06 mm의 접착층( $\epsilon_r=3.7$ ,  $\tan \delta=0.016$ )을 사용하여 적층되었다. 각 슬랩의 하단에는  $h_{isol}=0.127$  mm 두께의 절연층이 추가되어 인접한 금속 패치 간 단락을 방지하였다. 각 슬랩의 총 두께  $h_s$ 는  $h_s=(h_l+0.06) \times (N_l-1)+h_{isol}$ 에 의해 결정되며,  $N_l$ 은 패치 층 수를 나타낸다. 기판의 두께와 층 수는 슬랩의 두께( $h_s$ )가 증가함에 따라 공진에 의해 목표 대역에서 유전율 변화가 급격해지는 것을 고려하여 최적화되었다. 슬랩의 유효 유전율은 NRW (Nicolson-Rose-Weir) 방법을 통해 계산되었으며, 이는  $xy$ -평면을 따라 무한 경계 조건을 사용한 플로켓 포트(floquet port) 시뮬레이션에서 얻어진 산란 매개변수를 이용한 것이다<sup>[13]</sup>. 표 1은 세 가지 유전체 슬랩의 설계 변수를 나타내며, 각 슬랩의 주파수에 따른 유효 유전율 결과를 그림 2에 나타내었다.

그림 3은 제안된 개별 소자를 활용한 컨포멀 배열 안테나의 형상을 나타낸다. 제안된 배열 안테나는  $x$ -축 방향(H-평면)의 곡면을 따라 8개의 능동 소자로 구성되며, 각 소자는 모두 다른 법선 벡터 방향을 따라 지향하도록 설계되었다. 평면 배열의 경우  $x$ -축 방향으로 슬롯 평면이 연결된 구조를 가지지만, 컨포멀 배열 시 각 소자의 슬

표 1. 제안된 인공 유전체 슬랩의 주요 설계 변수

Table 1. Design parameter of proposed artificial dielectric slabs.

Slab	$d$ (mm)	$p$ (mm)	$h_l$ (mm)	$h_s$ (mm)	$N_l$	$h_{isol}$ (mm)
1	0.17	1.9125	0.127	0.748	5	0.127
2	0.49	1.5925	0.508	1.891	4	
3	1.44	0.6425	1.575	3.457	3	

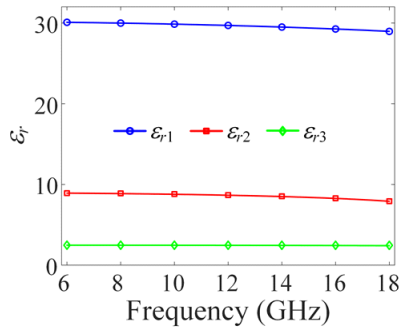


그림 2. 각 인공 유전체 슬랩의 주파수에 따른 유효 유전율

Fig. 2. Effective permittivity of each slab according to frequency.

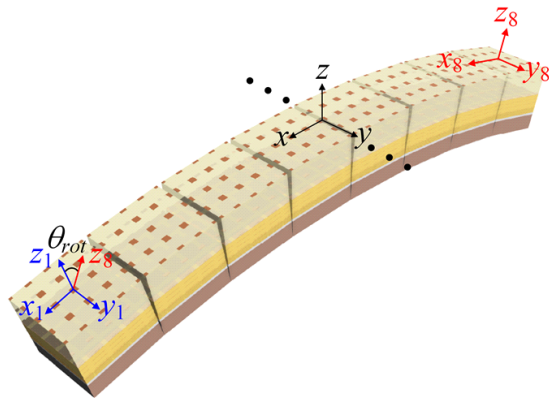


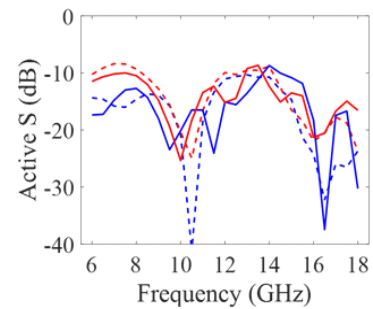
그림 3. 제안된 컨포멀 배열 안테나 형상

Fig. 3. Geometry of conformal antenna array models.

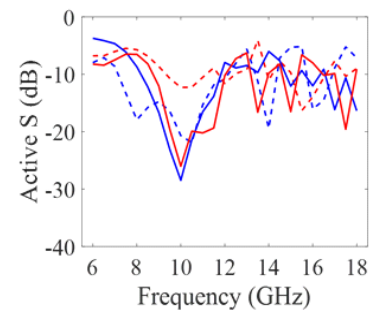
롯 평면 사이에 이격이 존재하며, 이로 인한 영향성과 곡률에 대한 분석을 위해  $y$ -축 방향( $E$ -평면)으로 무한 경계 조건을 적용하였다. 곡면에 따라 각 능동 소자는 서로 다른  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ 와 같은 로컬 좌표계를 가지며, 곡률은 첫 번째 소자와 여덟 번째 소자의 법선 벡터 방향인  $z_1$ 과  $z_8$ 의 각도 차이( $\theta_{rot}$ )로 표시된다. 제안된 컨포멀 배열 안테나는  $\theta_{rot}=27.79^\circ$ 의 각도를 갖는 곡률로 설계되었으며, 이는 평면형 배열( $\theta_{rot}=0^\circ$ )과 비교 분석되었다.

### III. 안테나 성능 분석

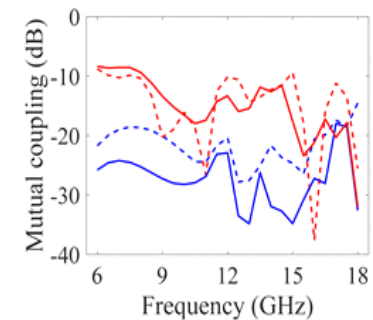
평면형 배열과 컨포멀 배열의 산란 계수( $S$ -parameter) 특성을 그림 3에 나타내었다. 그림 4(a)는 배열 안테나가



(a) 능동 산란 계수(조향각:  $0^\circ$ )  
(a) Active S (steering angle:  $0^\circ$ )



(b) 능동 산란 계수(조향각:  $45^\circ$ )  
(b) Active S (steering angle:  $45^\circ$ )

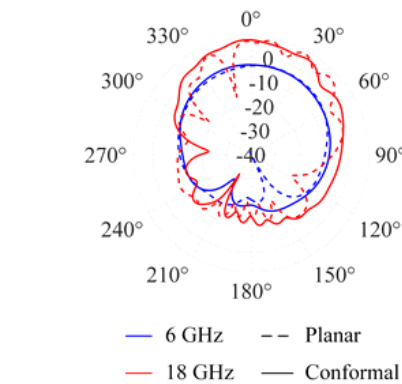


(c) 상호 결합 (dB)  
(c) Mutual coupling (dB)

그림 4. 평면형 배열과 컨포멀 배열의  $S$ -parameter 특성 비교  
Fig. 4. Comparison of  $S$ -parameter characteristic between planar and conformal array.

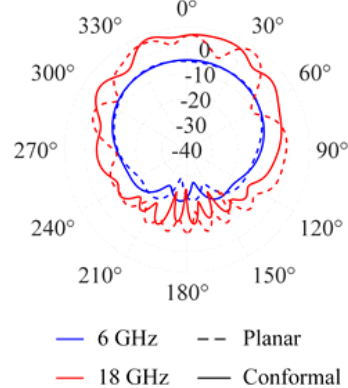
전면 방향을 지향할 경우의 가장자리 소자인 1번 소자와 중심 위치의 4번 소자의 능동 산란 계수를 나타낸다. 평면형 배열에서 1번 소자와 4번 소자의 능동 산란 계수의 최댓값은 각각  $-10.61$  dB,  $-8.37$  dB이며, 6~18 GHz 내에서 평균  $-15.71$  dB,  $-12.92$  dB를 가진다. 또한 컨포멀 배열의 경우, 1번 소자와 4번 소자의 능동 산란 계수의 최댓값은 각각  $-8.69$  dB,  $-8.66$  dB이나 평균  $-15.36$  dB,  $-13.61$  dB를 가진다. 또한  $45^\circ$ 를 빔조향 할 경우의 능동 산란 계수를 그림 4(b)에 나타내었으며, 평면형 배열에서 1번, 4번 소자의 평균 능동 산란 계수는  $-10.4878$  dB,  $-8.84$  dB이며, 컨포멀 배열에서  $-10.07$  dB,  $-10.54$  dB를 가진다. 추가적으로 그림 4(c)에서 배열 안테나 간의 간섭 정도를 분석하기 위해 1번 소자와 8번 소자의 상호 결합( $S_{18}$ )과 4번 소자와 5번 소자의 상호 결합( $S_{45}$ )을 분석하였다.  $S_{45}$ 의 경우, 평면형 배열과 컨포멀 배열 간의 차이가 크지 않으나,  $S_{18}$ 의 경우 컨포멀 배열에서 각 소자의 법선 벡터 방향 차이로 인해 두 소자 간의 상호 간섭이 감소하였다.

평면형 배열 안테나와 컨포멀 배열 안테나의 AEP (active element pattern) 분석 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 평면형 배열과 컨포멀 배열 모두, 상대적으로 18 GHz가 6 GHz보다 높은 이득을 가진다. 이는 6 GHz에서 안테나 면적이 약  $0.17 \times 0.17 \lambda$ 인 반면, 18 GHz에서는  $0.5 \times 0.5 \lambda$ 으로 전기적으로 크기 때문이다. 그림 5(a)는 1번 소자에 해당하는 안테나의 AEP 패턴을 나타낸다. 6 GHz에서 평면형 배열과 컨포멀 배열에 대한 전면방향 이득은 각각  $-2.66$  dBi,  $-3.44$  dBi를 나타내며, 18 GHz에서는  $6.01$  dBi,  $6.84$  dBi로 두 배열의 전면 방향 이득은 유사한 값을 갖는다. 그림 5(b)는 4번 소자에 위치한 안테나의 AEP 패턴을 나타내며, 각각 6 GHz에서  $-5.40$  dBi,  $-4.88$  dBi, 18 GHz에서  $4.8$  dBi의 동일한 값을 갖는다. 두 소자에서 도출한 6 GHz의 방사 패턴은 평면형과 컨포멀 배열에서 유사한 경향을 갖는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 18 GHz에서는 평면형 배열에서 나타나는 리플(ripple)이 컨포멀 배열에서는 사라지는 현상이 발생한다. 이는 평면형 배열의 슬롯 평면은 모두 연결되어 있는 반면, 컨포멀 배열에서는 슬롯 간 이격이 존재하기 때문이며, 그 결과 상대적으로 파장이 짧은 18 GHz에



(a) 1번 위치 안테나의 AEP

(a) The active element pattern of the antenna at 1



(b) 4번 위치 안테나의 AEP

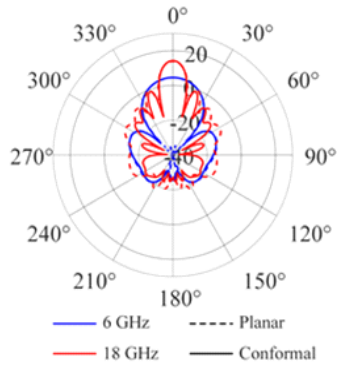
(b) The active element pattern of the antenna at 4

그림 5. 평면형 배열과 컨포멀 배열의 active element pattern 비교

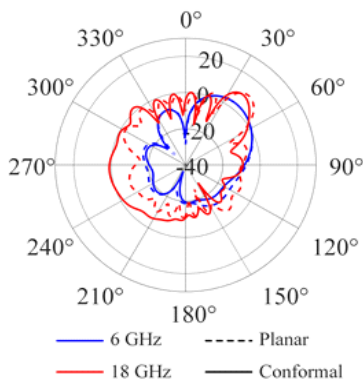
Fig. 5. Comparison of active element patterns between planar and conformal array.

서 평면형과 컨포멀 배열의 AEP 차이가 발생하였다.

6 GHz와 18 GHz에서 배열 형상에 따른 합성빔 패턴을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 전면 방향을 지향한 경우를 나타내며, 6 GHz에서는 두 배열 형상에서 다른 패턴이 유사하다. 이때, 두 배열 형상에서 전면 방향 이득은  $4.56$  dBi, HPBW(half-power beam width)는 동일하게  $36^\circ$ 를 가진다. 18 GHz의 경우, 평면형 배열과 컨포멀 배열에서 전면 방향 이득은 각각  $14.25$  dBi,  $13.84$  dBi이며, HPBW은 두 배열 형상 모두  $12^\circ$ 로 동일하다. 반면 부엽의 크기는 평면형 배열 형상에서  $-0.41$  dB이고 컨포멀 배열 형상에서  $-1.21$  dB로 컨포멀 배열 형상에서 더 낮은 부엽



(a) 합성빔 패턴(조향각: 0°)  
(a) The synthesis beam pattern (steering angle: 0°)



(b) 합성빔 패턴(조향각: 45°)  
(b) The synthesis beam pattern (steering angle: 45°)

그림 6. 배열 안테나 합성빔 패턴 특성 비교  
Fig. 6. Comparison of synthesis beam pattern characteristics of array antenna.

을 가진다. 또한 45°로 빔조향한 경우의 합성빔 패턴을 그림 6(b)에 나타내었다. 6 GHz에서는 합성빔 패턴은 전면 방향을 지향한 경우와 같이 패턴이 유사하며, 전면 방향 이득과 HPBW는 두 배열 형상 모두 2.94 dBi, 42°이다. 18 GHz의 경우, 평면형 배열에서 전면 방향 이득과 HPBW는 10.46 dBi, 15°, 컨포멀 배열에서 전면 방향 이득과 HPBW는 7.70 dBi, 15°로 컨포멀 배열에서 전면 방향 이득이 다소 감소하였다. 또한 부엽과 FNBW(first-null beam width)는 평면형 배열에서 2.23 dB, 35°, 컨포멀 배열에서 0.10 dB, 49°로 빔조향 시 컨포멀 배열에서 낮은 부엽과 넓은 주빔을 가지는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 각 배열 형상에서 주파수에 따른 전면 방향

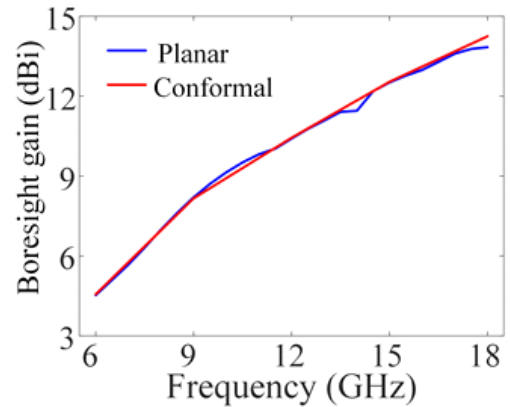
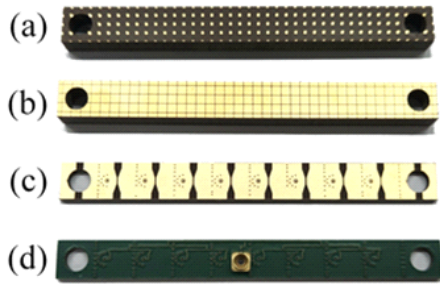


그림 7. 전면 방향 이득 비교  
Fig. 7. Boresight gain comparison.

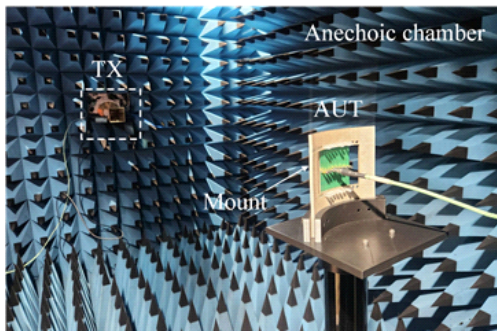
이득을 나타낸다. 평면형 배열 형상의 경우 최솟값은 6 GHz에서 4.53 dBi, 최댓값은 18 GHz에서 13.84 dBi를 가지나, 컨포멀 배열 형상의 경우 6 GHz에서 4.46 dBi, 18 GHz에서 13.32 dBi를 나타낸다. 컨포멀 배열 형상의 경우, 빔이 넓어짐으로 인한 전면 방향이득 감소가 발생하며 주파수가 높아질수록 이러한 특성이 두드러지는 것을 확인할 수 있다.

안테나의 성능 검증을 위해, 급전 선로를 통해 E-평면 방향으로 결합된 8×1 평면 배열 프로토타입을 제작하였으며, 이는 그림 8(a)에 나타내었다. 그림 8(a)는 인공 유전체 슬랩의 최상단 슬랩의 평면도를, 그림 8(b)는 최하단 슬랩의 저면도를 나타낸다. 그림 8(c) 및 그림 8(d)는 각각 슬롯 안테나의 슬롯평면과 급전 선로단을 나타낸다. 슬롯 적층 구조와 슬롯 안테나 사이에는 0.25 mm 두께의 와셔를 배치하여 공기 층을 구성하였다. 배열 프로토타입은 총 8.24 mm의 높이를 가지며, 이는 6 GHz의 0.165  $\lambda$ 에 해당하는 크기이다. 제작된 8개의 8×1 배열은 곡률을 가지는 금속 실린더 표면에 장착되어 총 64개의 소자로 구성된 컨포멀 배열 안테나를 형성한다. 안테나의 매칭 및 방사 특성 검증을 위해 완전 무반사 챔버에서 측정되었으며, 측정 환경을 그림 8(b)에 나타내었다.

그림 9는 제작된 컨포멀 안테나의 능동 산란계수 측정값을 나타낸다. 능동 산란 계수는 배열 안테나에서 특정 소자에 대해 다른 소자들과의 상호작용을 고려한 산란계수로, 식 (1)을 통해 계산된다.



(a) 8×1 배열 제작 형상  
(a) Photographs of fabricated 8×1 array



(b) 안테나 측정 환경 사진  
(b) Antenna measurement environment

그림 8. 제안된 컨포멀 배열 안테나 제작 및 측정 환경  
Fig. 8. Photographs of the fabricated conformal antenna array and measurement environment.

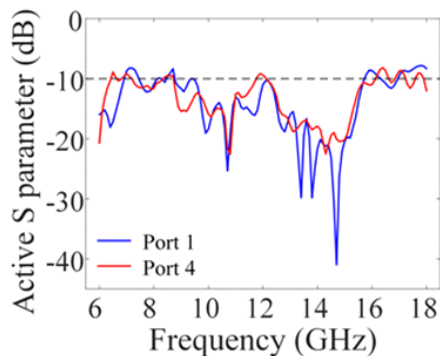


그림 9. 측정된 능동 산란계수(dB)  
Fig. 9. Measured active  $S$ -parameter (dB).

$$\Gamma_m = \frac{\sum_{n=1}^N S_{mn} e^{-j(n-1)u}}{e^{-j(m-1)u}}, u = k d \sin \theta \quad (1)$$

이때,  $n, m$ 은 소자 번호를 나타내며,  $d=0.5 \lambda_{18\text{GHz}}$ 는 배

열 간격,  $\theta=0^\circ$ 는 조향 각도를 의미한다. 50-Ω 로드를 사용하여 8개 포트에 대한  $S_{mn}$ 과  $S_{mm}$ 에 해당하는 36개의 값을 측정하였으며, 해당 결과들을 활용하여 능동 산란 계수를 계산하였다. 배열의 대칭성을 고려하여, 중앙 소자와 측면 소자에 해당하는 1번 소자와 4번 소자의 값을 표시하였으며, 두 포트는  $yz$ -평면을 기준으로  $+x$ -축 방향에 위치한 소자이다. 제안된 안테나는 목표 대역에서 전반적으로  $-10$  dB 이하의 수준을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 1번 소자의 경우, 평균  $-13$  dB, 4번 소자의 경우 평균  $-12.6$  dB의 값을 가지며, 각 소자는 유사한 경향성을 갖는다. 7.1 GHz와 17.8 GHz에서 약  $-8$  dB 수준의 값을 가지지만, 이는 무한 배열에서 최적화된 안테나를 유한 배열로 검증하는 과정에서 발생한 에지 효과(edge effect)에 의한 것으로, 배열 소자 개수의 확장으로 개선될 수 있다. 또한, 0.25 mm 두께의 와서를 사용해 공기층을 구성하는 과정에서 발생한 두께 오차가 매칭 성능에 영향을 미쳤으며, 이는 보다 정밀한 공정을 통해 개선할 수 있다.

그림 10은 제작된 컨포멀 배열 안테나의 소자별 AEP 측정 결과를 나타내며, 해당 결과를 시뮬레이션과 비교하였다. AEP는 배열 안테나의 각 개별 소자 패턴을 의미하며, 측정하는 포트를 제외한 나머지 소자에 50-Ω 로드를 연결하여 챔버실에서 측정되었다. 그림 10(a)와 그림 10(b)는 각각 1번과 4번 배열 소자에 대한 AEP로, 6 GHz, 18 GHz에서의 정규화된 패턴(normalized pattern)을 나타낸다. 측정된 안테나 패턴은 전반적으로 시뮬레이션과 유사한 경향성을 가진다. 두 소자는  $+x$ -축 방향에 위치한 소자로, 각 소자의 법선 벡터 방향에 따라 개별 패턴 또한  $+\theta$  방향을 지향하는 것을 확인할 수 있다.

또한 측정된 8개의 AEP를 바탕으로 MATLAB을 활용하여 후처리를 통해  $0^\circ$ 부터  $45^\circ$ 까지 배열 안테나의 빔조향 성능을 분석하였으며, 분석 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)는 6 GHz에서의 빔조향 분석 결과이며, 빔조향 오차는 각각  $0^\circ, 1^\circ, 3^\circ, 3^\circ$ 이고 빔폭은 각각  $37^\circ, 38^\circ, 45^\circ, 51^\circ$ 이다. 그림 11(b)는 18 GHz에서의 빔조향 분석 결과이며, 빔조향 오차는 각각  $0^\circ, 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 이며, 빔폭은 각각  $14^\circ, 13^\circ, 16^\circ, 17^\circ$ 를 나타낸다. 이를 통해 두 주파수에서 모두  $3^\circ$  이내의 오차로 안정적인 빔조향 성능을

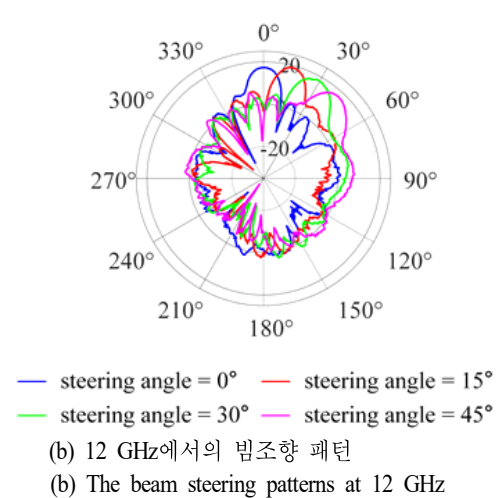
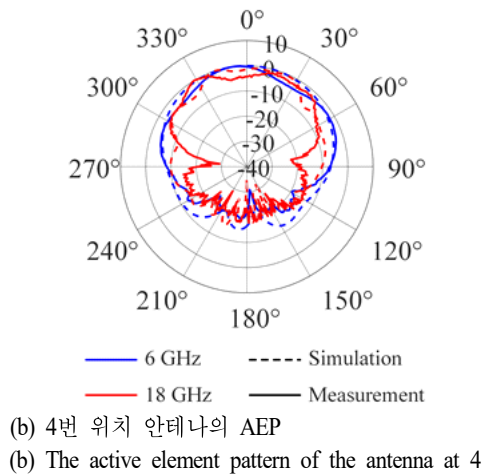
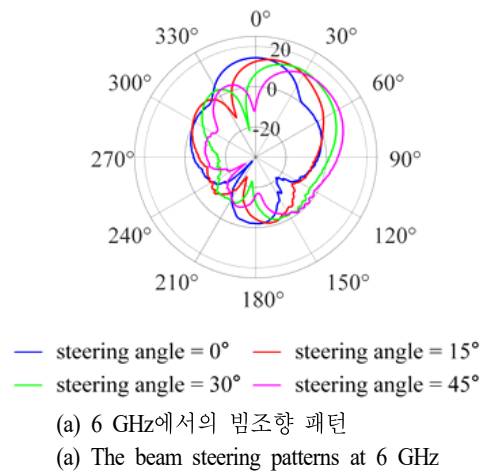
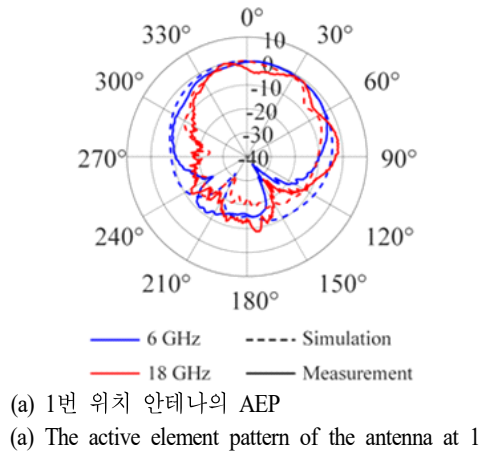


그림 10. 제작된 안테나의 AEP 측정 결과  
Fig. 10. The measured active element pattern of the fabricated antenna.

맞는 것을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 인공 유전체 슬랩을 활용한 소형 광대역 컨포멀 배열 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 보우타이형 슬롯 안테나 위에 선형 임피던스 곡선을 갖는 서로 다른 세 개의 인공 유전체 슬랩이 적층된 형태이다. 이는 슬롯 안테나로부터 자유 공간까지 넓은 대역폭에 걸쳐 효율적인 임피던스 변환을 가능하게 한다. 각 인공 유전체 슬랩은 서브 파장의 정사각형 패치 배열 적층

그림 11. 제작된 안테나의 빔조향 패턴  
Fig. 11. The beam steering pattern of the fabricated antenna.

구조로 구현되었다. 제안된 안테나는 6 GHz에서 18 GHz까지 3:1의 대역에서 동작하며, 총 8.24 mm 및  $0.165 \lambda_{6\text{GHz}}$ 에 해당하는 높이를 갖는다. 또한, 설계된 단일 소자를 활용하여  $H$ -평면에 대해  $27.79^\circ$ 의 곡률을 가지는 컨포멀 배열을 설계하였으며, HFSS E&M 시뮬레이션 툴을 통해 평면형 배열과 성능을 비교 분석하였다. 제안된 컨포멀 배열 안테나의 성능을 검증하기 위해, 급전 네트워크를 이용하여  $E$ -평면 방향으로 결합된 8개의  $8 \times 1$  배열 프로토타입을 제작하였으며, 이는 곡률을 가지는 금속 실린더 표면에 장착되었다. 제작된 배열 프로토타입 측정 결과, 능동 산란계수의 경우 6~18 GHz 대역에서 전반적으로

-10 dB 이하의 특성을 만족한다. 또한 여덟 개의 포트에서 측정된 능동 소자 패턴의 후처리를 통해 빔조향 패턴을 생성하였으며, 빔조향 오차는 최대 3° 이내로 유지된다.

## References

- [1] H. Holter, "Dual-polarized broadband array antenna with BOR-elements, mechanical design and measurements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 2, pp. 305-312, Feb. 2007.
- [2] R. W. Kindt, W. R. Pickles, "Ultrawideband all-metal flared-notch array radiator," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 11, pp. 3568-3575, Nov. 2010.
- [3] M. Kuosmanen, S. E. Gunnarsson, J. Malmstrom, J. Holopainen, J. Ala-Laurinaho, and V. Viikari, "Dual-polarized 6~18-GHz antenna array with low-profile inverted BoR elements," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 4, pp. 3-11, Dec. 2022.
- [4] S. Zhu, H. Liu, and P. Wen, "A new method for achieving miniaturization and gain enhancement of Vivaldi antenna array based on anisotropic metasurface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1952-1956, Mar. 2019.
- [5] P. Khanal, J. Yang, M. Ivashina, A. Höök, R. Luo, and P. Hallander, et al., "A wide-scanning array antenna of connected vertical bowtie elements structurally integrated within an aircraft fuselage," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 5, pp. 4216-4227, May 2023.
- [6] H. Zhou, N. A. Sutton, and D. S. Filipovic, "Surface micromachined millimeter-wave log-periodic dipole array antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 10, pp. 4573-4581, Oct. 2012.
- [7] R. W. Kindt, B. T. Binder, "Dual-polarized Vivaldi array on a triangular lattice," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 4, pp. 2083-2091, Apr. 2021.
- [8] C. Pfeiffer, J. Massman, "An UWB hemispherical Vivaldi array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 10, pp. 9214-9224, Oct. 2022.
- [9] W. H. Syed, D. Cavallo, H. Thippur Shivamurthy, and A. Neto, "Wideband, wide-scan planar array of connected slots loaded with artificial dielectric superstrates," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 2, pp. 543-553, Feb. 2016.
- [10] W. H. Syed, A. Neto, "Front-to-back ratio enhancement of planar printed antennas by means of artificial dielectric layers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 11, pp. 5408-5416, Nov. 2013.
- [11] W. H. Syed, A. Neto, and D. Cavallo, "Connected-slot array with artificial dielectrics: A 6 to 15 GHz dual-pol wide-scan prototype," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 6, pp. 3201-3206, Jun. 2018.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, Wiley-Blackwell, 2016.
- [13] R. W. Ziolkowski, "Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 7, pp. 1516-1529, Jul. 2003.

김 상 은 [울산과학기술원/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0009-5549-7935>



2023년 2월: 울산과학기술원 전기전자공학과 (공학사)  
2023년 2월~현재: 울산과학기술원 전기전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] Antenna, Broadband Array Antenna, Beamforming and Metamaterial 등

조 상 왕 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8799-1684>



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)  
2007년 12월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원  
[주 관심분야] RF 수신기, 재밍 시스템, 전자전 시스템 등

유 태 호 [울산과학기술원/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1015-0112>



2020년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)  
2020년 2월~현재: 울산과학기술원 전기전자공학과 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] Antenna, Array Antenna, Direction Finding Antennas 등

변 강 일 [울산과학기술원/부교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9388-9205>



2010년 2월: 홍익대학교 전자전기공학 (공학사)  
2012년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)  
2015년 8월: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 (공학박사)  
2018년 2월~현재: 울산과학기술원 전기전자공학과 부교수

[주 관심분야] Antenna, Array Antenna, Metasurface, Bio EM Sensor 등

문 호 상 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1128-7249>



2006년 8월: 경희대학교 전파통신공학과 (공학사)  
2008년 8월: 경희대학교 전파공학과 (공학석사)  
2008년 7월~현재: LIG넥스원 수석연구원  
[주 관심분야] 전자전 시스템, 안테나, EM 시뮬레이션 등