

S/X 이중 대역 공통개구면 배열안테나의 고내구성 설계

Highly Durable Design of an S/X Dual-Band Shared Aperture Array Antenna

임은열 · 장도영* · 추호성 · 이준용**

En-yeal Yim · Doyoung Jang* · Hosung Choo · Jun-Yong Lee**

요 약

본 논문에서는 가혹한 해상 환경을 고려하여 고내구성 설계가 적용된 S/X 대역 공통개구면 배열 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 X 대역 소자 층 상단에 S 대역 소자 층이 적층되는 공통개구면 구성을 가지며, X 대역 소자는 향상된 내구성을 갖기 위해 고내구성 급전핀 구조를 포함한다. 고내구성 급전핀 구조는 도체 패드와 비아홀, 금속핀을 포함하며, 여러 방향에서 들어오는 외부 충격에 의해 안테나에 약간의 손상이 발생해도 이로 인한 안테나의 성능 변화를 방지한다. 안테나의 대역폭을 향상시키고 방사 패턴 왜곡을 방지하기 위해, 격자 구조 레진 프레임이 S 대역 소자 층 사이에 삽입되며, 이 구조는 견고하게 준 공기층을 형성한다. 또한, 안테나의 최외곽은 금속 프레임으로 둘러싸여 있어 안테나의 내구성을 더욱 향상시킨다. 제안된 안테나의 대역폭은 S 대역에서 13.3 %, X 대역에서 17.8 %로 나타났다. 추가적으로, LS-Dyna 시뮬레이터를 사용한 모의 충격 시험에서, 제안된 고내구성 안테나는 수직 또는 수평 방향에서 최대 1,250 MPa 과 1,400 MPa의 충격이 가해지더라도 대역폭 감소는 10 % 미만으로 나타났다.

Abstract

In this study, we proposed an S/X-band shared aperture array antenna with a highly durable design that considers the harsh maritime environment. The proposed antenna had a shared aperture configuration in which the S-band element layers were stacked on top of the X-band element layers, and the X-band element had a highly durable feed-pin structure to improve the antenna durability. The highly durable feed pin consisted of conducting pads, via holes, and an inner pin, which prevented antenna performance changes owing to slight deformations caused by external shocks from various directions. To improve the antenna bandwidth and prevent the antenna pattern distortion, a lattice-shaped resin frame structure was inserted between the S-band element layers, and this structure could form the solid quasi-air gap. Moreover, the outermost part of the antenna was surrounded by a metal frame, which further improved its durability. The bandwidths of the proposed antenna in the S and X bands were 13.3 % and 17.8 %, respectively. In addition, in a durability test using the LS-Dyna simulator, the proposed highly durable antenna had a bandwidth reduction of less than 10 % when external shocks of up to 1,250 and 1,400 MPa were applied in the vertical and horizontal directions of the antenna, respectively.

Key words: Radar Antennas, Microstrip Patch Antennas, Shared Aperture Array Antennas, High Durable Antennas

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*동양미래대학교 정보통신공학과 (Department of Information and Communication Engineering, Dongyang Mirae University)

**홍익대학교 컴퓨터공학과(Department of Computer Engineering, Hongik University)

· Manuscript received December 16, 2024 ; Revised January 13, 2025 ; Accepted February 11, 2025. (ID No. 20241216-134)

· Corresponding Author: Jun-Yong Lee (e-mail: jlee@hongik.ac.kr)

I. 서 론

최근, 해상 군사 작전 간에 장거리 및 근거리에서 위치한 다수의 표적에 대해서 동시에 탐지와 추적이 가능한 다기능 레이더의 수요가 높아짐에 따라, 다기능 레이더의 성능을 개선하기 위한 노력이 계속되고 있다^[1]. 이러한 다기능 레이더는 일반적으로 장거리 탐지를 위한 S 대역 레이더와 근거리 탐지를 위한 X 대역 레이더로 구성되며, 각 대역의 레이더들은 군함의 마스트 위에 개별적으로 각각 탑재된다^[2]. 이러한 구성은 넓은 탐재 면적을 요구하기 때문에, 마스트를 소형화하여 레이더 피탐지 면적을 줄이려는 최근의 함정 설계 방향에 부합하지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해, S 대역 및 X 대역 레이더가 하나의 개구면을 공유하여 탐재 면적이 감소된 이중 대역 공동개구면 배열 안테나에 대한 연구가 진행되고 있다^[3]. 공동개구면 배열 안테나에 대한 선행 연구를 살펴보면, 접지면에 수직으로 세워진 S 대역 안테나 소자 사이에 X 대역 배열 소자를 배치하는 방식을 사용한 연구가 수행되었으나^[4], 공동개구면 구성에서 설계가 복잡하고 내구성이 낮은 문제점이 있다. 따라서, 대부분의 공동개구면 배열 안테나 연구는 X 대역 배열 소자 위에 S 대역 소자를 적층하는 방식으로 설계되지만^[5], 이러한 방식은 S 대역 소자가 X 대역 소자의 방사 특성을 저하시키는 문제가 있다. 또한, 군용 함정에 탑재되는 안테나는 가혹한 작전 환경으로 인해 지속적으로 수직 또는 수평 방향으로 강한 외부 충격에 노출될 수 있으나, 종래의 연구는 이런 강한 충격에 안테나가 노출되었을 때의 안테나의 성능 특성 저하를 충분히 고려하지 않았다^{[6][7]}. 안테나의 내구성을 향상시키기 위해, 고강도 레이돔을 적용하는 방법^[8]이 보편적으로 레이더 시스템에 사용된다. 그러나, 이는 외부에서 들어온 한정된 강도의 직접적인 충격에 대해서만 안테나의 보호가 가능하며, 다양한 방향에서 함체에 가해지는 극도로 강한 외부 충격 또는 함체를 통해 전달되는 지속적인 간접 충격에 대해서는 충분히 고려되지 않았다. 안테나의 내구성을 향상시키기 위한 또 다른 방법으로, 금형 기술로 안테나 전체를 금속으로 제작하는 방식도 사용되지만^[9], 공동개구면 구성에서 충분한 내구성 및 방사 특성이 확보되는지를 살펴본 사례는 없다.

본 논문에서는 가혹한 해상 환경을 고려한 S/X 대역 공동개구면 배열 안테나의 고내구성 설계를 제안한다. 제안된 안테나는 레이더의 탐재 면적을 감소시키기 위해 X 대역 소자 층 상단에 S 대역 소자 층이 적층되는 공동개구면 배열 안테나 구성을 가지며, 각 대역 소자는 넓은 대역폭을 갖는 이중 루프 및 이중 패치 구조를 갖는다^[10]. 이러한 적층형 공동개구면 배열 안테나는 가혹한 해상 환경에서 여러 방향으로 들어오는 외부 충격으로 인해 손상될 수 있어, 고내구성 설계가 안테나에 적용되었다. 제안된 안테나에서 X 대역 소자는 향상된 내구성을 갖기 위해 고내구성 급전핀 구조를 갖는다^[11]. 고내구성 급전핀의 구성 중, 도체 패드와 비아홀은 안테나 접지면의 수평 방향으로 들어오는 충격에 의한 층간 어긋남에도 불구하고 전기적 연결을 유지해 안테나의 성능 변화를 최소화한다. 또한, 양 끝이 납땜 처리된 비아홀 내부의 금속핀은 상하로의 충격에 의한 성능 변화를 방지한다. 제안된 안테나의 S 대역 소자는, 하부 X 대역 소자의 방사 특성 저하를 방지하고, 전체 소자의 대역폭을 향상시키기 위한 준 공기층을 형성하기 위해, 격자 구조 레진 프레임이 소자 층 사이에 삽입되어 있다. 안테나 하단의 최외곽은 금속 프레임으로 둘러싸여 있어, 전반적인 내구성을 더욱 향상시킨다. 마지막으로, 안테나 소자와 송수신 모듈 간의 연결을 강건하게 유지하는 인터페이스 층이 적용되었다^[12]. 안테나의 전기적 특성은 전파 무반향 챔버에서 안테나의 반사계수 및 방사 패턴을 측정하여 확인하였다. 또한, 안테나의 내구성 평가를 위해, 충격에 따른 안테나 구조의 변화를 해석하는 시뮬레이터인 ANSYS 사의 LS-Dyna^[13]를 사용해 외부 충격으로 인한 안테나의 변형과 이에 따른 성능 변화를 확인하였다.

II. 공동개구면 배열 안테나 설계 및 성능

그림 1은 고내구성 설계가 적용된 S/X 대역 공동개구면 배열 안테나의 형상을 나타낸다. 그림 1(a)에서 보듯이, 제안된 안테나는 레이더의 탐재 면적을 감소시키기 위해 X 대역 소자 층 상단에 S 대역 소자 층이 적층되어 두 대역의 소자가 공통된 개구면을 공유하는 구성을 갖는다. X 대역 소자는 넓은 대역폭을 얻기 위한 이중 패치

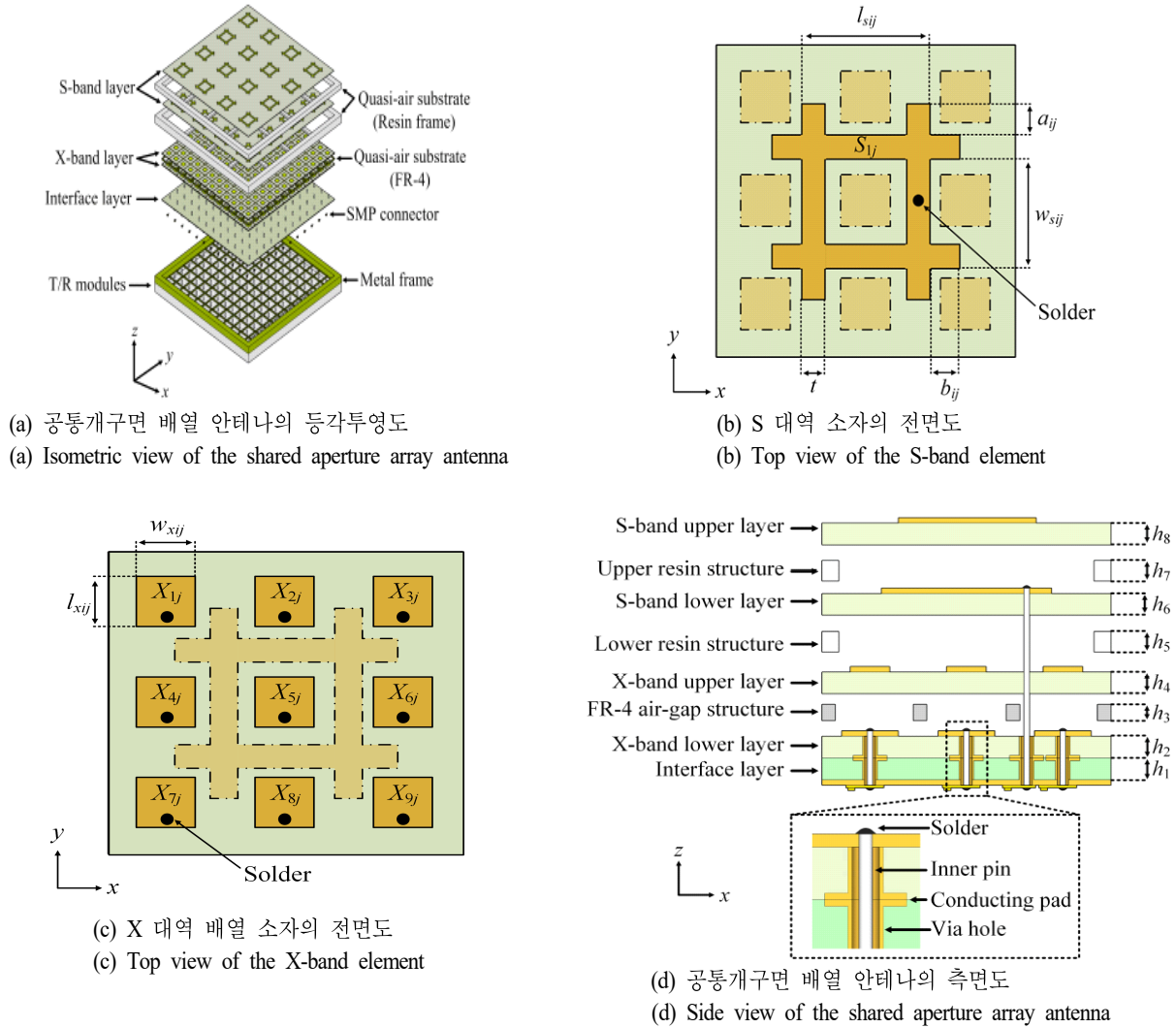


그림 1. 고내구성 설계를 포함하는 공동개구면 배열 안테나의 형상

Fig. 1. Geometry of the shared aperture array antenna including the high durable design.

구조를 가지며, 패치의 너비와 길이는 w_{xij} 및 l_{xij} 이다. 여기서 i 는 X 대역 단위셀 내에서 왼쪽 상단 소자로부터 아래쪽 하단 소자 순으로 증가하는 소자 번호를 의미하며, j 는 방사체가 인쇄된 층을 뜻한다. S 대역 소자는 X 대역 소자의 방사 특성을 저하시키지 않도록 폭이 t 인 얇은 루프 구조가 이중으로 적층된 구조를 사용하며, 루프 전체의 너비와 길이는 각각 w_{sij} , l_{sij} 이다. 여기서, 루프의 4개의 모서리에는 x 축과 y 축 방향으로 a_{ij} , b_{ij} 만큼의 크기를 갖는 돌출부를 가지며 이는 안테나의 대역폭을 더욱 향상

시킨다. 이러한 안테나 구성에서, 여러 방향으로 들어오는 외부 충격으로 인한 안테나 성능 저하를 방지하기 위해, 고내구성 설계가 제안된 안테나에 적용된다. 그림 1(d)에서 보듯이, X 대역 소자는 비아홀, 도체 패드, 그리고 금속 편으로 구성된 고내구성 급전편 구조를 갖는다. 여기서, 도체 패드와 비아홀은 안테나의 접지면의 수평 방향으로 들어오는 충격으로 인해 소자 층들이 어긋남에도 불구하고 전기적 연결을 유지하여 안테나의 성능 변화를 방지한다. 또한, 상하 방향에서의 충격으로 소자 층

이 서로 이격되어도, 양 끝이 납땜 처리된 비아홀 내부의 금속핀이 전기적 연결을 유지하여 안테나의 성능 변화를 최소화한다. 제안된 안테나의 S 대역 소자는 격자구조의 레진 프레임이 적용되어 두꺼운 준 공기층을 가지며, 이는 안테나의 대역폭을 더욱 향상시키고 X 대역의 방사특성 저하를 방지한다. 이러한 격자 구조 레진 프레임은 동일한 목적으로 사용되는 스티로폼 재질의 기관 대비 열과 충격에 대한 높이 변형이 적게 나타나는 특성을 갖는다. 안테나의 최외곽은 금속 프레임 구조로 둘러싸여 있으며, 제안된 안테나의 전반적인 내구성을 더욱 향상시킨다. 마지막으로, 안테나 소자와 송수신 모듈 단의 연결을 강건하게 유지하기 위해, 인터페이스 층이 적용된다. 안테나의 각 소자 층의 두께는 h_j 이며(j =안테나 소자 층), 배열 안테나의 설계 파라미터들은 전자기적 시뮬레이터인 CST^[14]를 사용해 최적화되었다. 상세한 설계 파라미터는 표 1에 기술되어있으며, X 대역 단위셀에서 상, 하에 위치한 $j=1, 2, 3, 7, 8, 9$ 소자들은 모두 같은 설계 파라미터가 적용되었다. 또한, $j=4, 5, 6$ 소자들도 서로 같은 설계 수치를 갖는다.

그림 2는 4×4 단위셀 배열로 구성된 제안된 공통개구면 배열 안테나의 제작 사진을 보여준다. 그림 2(a) 및 그

표 1. 제안된 안테나의 설계 파라미터

Table 1. Design parameters of the proposed antenna.

Parameters	Dimension (mm)	Parameters	Dimension (mm)
w_{s11}	19.7	l_{s11}	27.7
w_{s12}	26.2	l_{s12}	16.2
w_{x11}	6.2	l_{x11}	8.4
w_{x41}	5.9	l_{x41}	8.4
w_{x12}	12	l_{x12}	8.6
w_{x42}	10.8	l_{x42}	8.3
a_{11}	1.25	b_{11}	0.75
a_{12}	1.25	b_{12}	0.75
h_1	0.8	h_5	3.4
h_2	0.8	h_6	0.5
h_3	1.6	h_7	4.6
h_4	0.8	h_8	0.5
t	1		

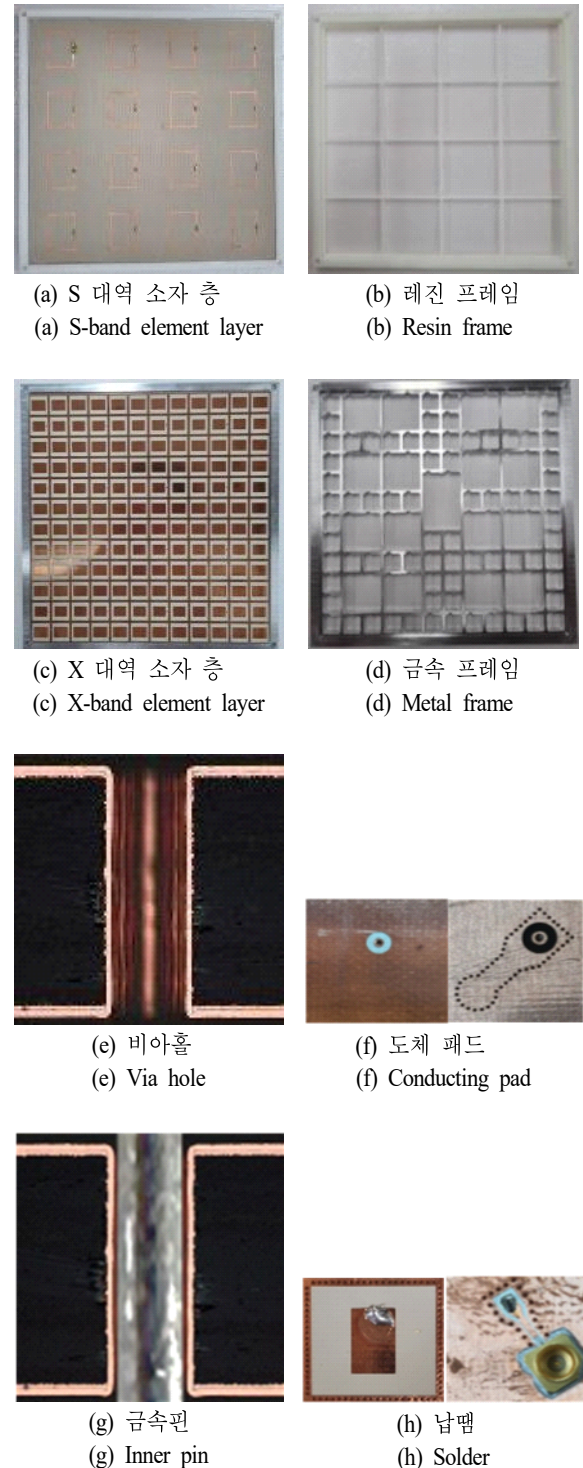


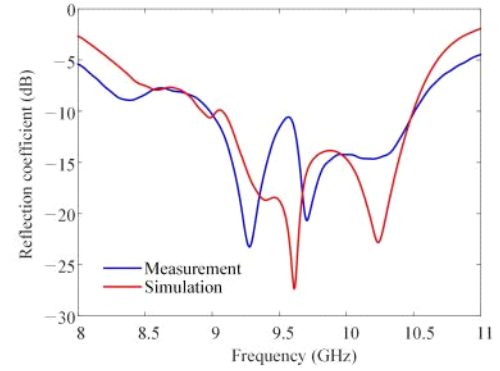
그림 2. 공통개구면 배열 안테나의 제작 사진

Fig. 2. Photograph of the fabricated shared aperture array antenna.

림 2(b)에서 보듯이, S 대역 방사체는 RF-35 유전체 기판 ($\epsilon_r=3.5$, $\tan\delta=0.0008$)에 인쇄되며, 격자구조의 레진 프레임($\epsilon_r=2.8$, $\tan\delta=0.005$)과 결합해 소자를 구성한다. X 대역의 방사체 또한 마찬가지로 RF-35 기판 위에 인쇄되어 있으며, 그림 2(c) 및 그림 2(d)와 같이 외곽은 금속 프레임으로 둘러 쌓여있다. 금속 프레임은 밀링 가공 방식으로 제작되어 정교하면서도 튼튼한 내구성을 갖는다. 추가적으로, X 대역 소자는, 내구성 향상을 위해 고내구성 급전편 구조가 적용된다. 이러한 고내구성 급전편 구조는 다음과 같은 공정을 통해 안테나 소자에 적용된다. 먼저, 그림 2(e) 및 그림 2(f)에서 보듯이, 안테나 급전편 위치에 비아홀이 타공되고, 타공된 비아홀 양 끝에는 원형 도체 패드가 형성된다. 이러한 비아홀과 도체 패드는 수평 방향에서의 충격으로 소자 층이 어긋나더라도 안테나의 전기적 연결을 유지한다. 다음으로, 그림 2(g) 및 그림 2(h)에서 보듯이, 타공된 비아홀에 유연한 재질의 금속편이 삽입되고, 금속편의 양 끝은 납땜 처리되어 안테나 방사체와 인터페이스 층과 견고하게 연결된다. 이러한 구성에서, 금속편은 상하 방향에서 발생한 충격으로 소자 층이 이격되어도 안테나 방사체와 인터페이스 층 사이의 전기적 연결을 유지한다.

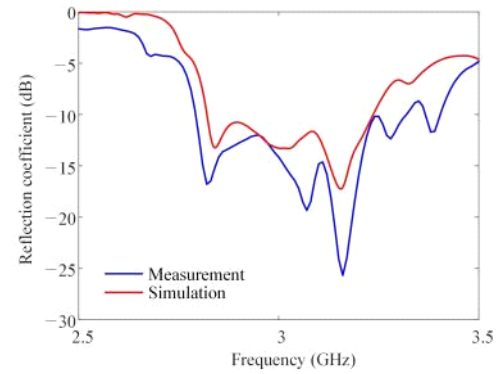
그림 3은 제안된 공통개구면 배열 안테나의 반사계수를 나타낸다. 이때, 파란선과 붉은선은 각각 측정된 반사계수와 시뮬레이션에서 확인된 반사계수를 나타낸다. S 대역 소자의 측정된 대역폭은 -10 dB를 기준으로 13.3% ($2.8\sim 3.2$ GHz)로 나타나며, 시뮬레이션에서 대역폭은 10.6% ($2.91\sim 3.23$ GHz)로 확인된다. X 대역 소자의 경우 대역폭이 동일한 기준에서 17.8% ($9\sim 10.7$ GHz)로 나타나며, 시뮬레이션에서 확인되는 대역폭인 16.8% ($9.1\sim 10.7$ GHz)와 유사한 값을 갖는다.

그림 4는 제안된 공통개구면 배열 안테나의 배열 이득을 나타낸다. 배열 이득을 확인하기 위해, 4×4 단위셀 배열로 제작된 공통개구면 배열 안테나의 능동 개별소자 방사패턴(AEP, active element pattern)을 측정하고, 측정된 모든 능동 개별소자 방사패턴을 합성하였다. 개별소자의 방사패턴을 측정할 때, 측정 포트를 제외한 모든 포트를 중단시키고, 이를 모든 복사 소자(S 대역 16개, X 대역 144개)에 대하여 반복한다. 측정된 능동개별소자 방사패



(a) S 대역 소자의 반사계수

(a) Reflection coefficient of the S-band element



(b) X 대역 소자의 반사계수

(b) Reflection coefficient of the X-band element

그림 3. 제안된 공통개구면 배열 안테나의 반사계수 및 방사패턴

Fig. 3. Reflection coefficient and radiation pattern of the proposed shared aperture array antenna.

턴을 바탕으로 합성된 방사 패턴을 도출하는 방정식은 식 (1)과 같다^[15].

$$P_{array}(\theta, \phi) = \frac{\sum_{n=1}^N \overline{w_n v_n}(\theta, \phi)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |w_n|^2}} \quad (1)$$

여기서, v_n 과 w_n 은 각각 n 번째 소자의 복소 능동 개별소자 방사 패턴의 벡터와 가중치 벡터를 나타낸다. S 대역에서, 측정과 시뮬레이션 상에서 나타난 제안된 S 대역 소자의 전면 방향 배열 이득은 각각 14.9 dBi와 14.6 dBi로 나타난다. 여기서 가중치 벡터의 위상값을 조절하면 빔 조향된 전체 배열 안테나의 방사 패턴을 얻을 수 있으

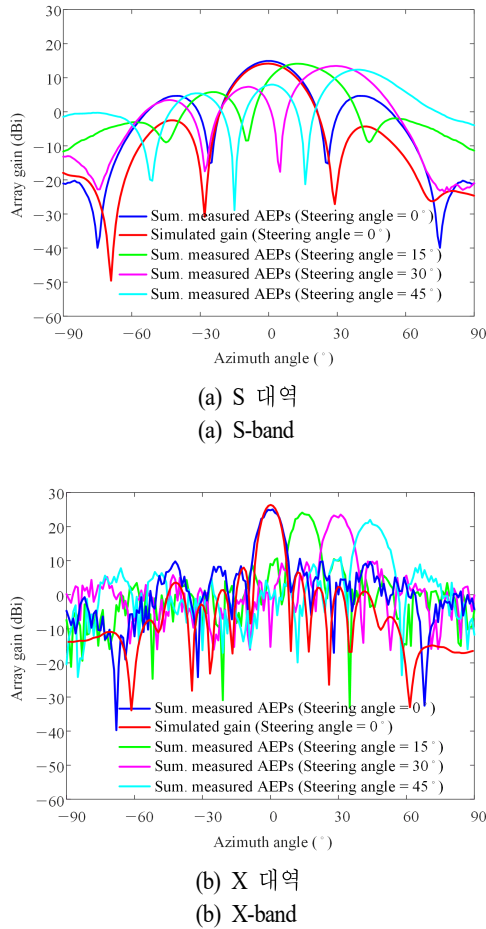


그림 4. 제안된 공통개구면 배열 안테나의 배열 이득
Fig. 4. Array gain of the proposed shared aperture array antenna.

며, S 대역 배열 소자의 빔조향 방향이 0° 에서 45° 로 변화하는 경우, 최대 이득은 14.9 dBi에서 10.4 dBi로 변화하고, SLL(side lobe level)은 10.2 dB에서 4.4 dB로 감소한다. X 대역 소자의 경우, 측정된 X 대역 배열 소자의 배열 이득은 24.8 dBi로 나타나며, 이는 시뮬레이션에서의 결과인 26.6 dBi와 유사하다. 이때, 동일한 빔 조향 조건에서, X 대역 배열 소자의 최대 이득은 24.8 dBi에서 20.7 dBi로 감소하며, SLL은 14.4 dB에서 9.1 dB로 변화한다. 마찬가지로, 빔 조향 방향이 0° 부터 45° 까지 조정될 때, 제안된 안테나의 직교 편파 레벨(cross-polarization level)은 S 대역에서 -0.17 dBi 부터 -3.35 dBi로 변화하며, X 대역에서는 13.4 dBi에서 9.9 dBi로 나타난다. 이는 전면 방향을 기

준으로 각 대역에서 확인한 최대 이득 대비 각각 15.1 dB, 11.4 dB의 차이를 갖는다. 이는 제안된 공통개구면 안테나가 레이더 시스템에서 요구하는 빔 조향 성능을 만족함을 보여준다.

III. 공통개구면 배열 안테나의 내구성 모의 시험

그림 5는 LS-Dyna를 사용한 안테나 충격 시뮬레이션 환경을 나타낸다. 제안된 고내구성 급전핀의 내구성을 확인하기 위해, 시뮬레이션 환경상에서 제안된 안테나 소자에 수직 방향과 수평 방향에 충격을 가하고 물리적 변화를 확인하였다. 안테나 소자에 수직 방향 충격을 가하기 위해, 그림 5(a)에서 보듯이 안테나 소자는 소자 전면이 노출되는 지그와 결합되고, 안테나와 결합한 지그는 원형 기둥으로 구성된 레일에 결합된다. 이때, 레일에 결합된 지그는 하강하고, 노출된 안테나 소자의 전면은 하단의 질량체와 충돌하게 된다. 수평 방향에 충격을 가하는 경우, 동일한 시뮬레이션 조건에서 안테나 소자는 소자의 측면이 노출되는 지그와 결합한다. 이러한 시뮬레이션 조건에서, 소자가 하강하는 속도를 조절하여 충격량을 변화

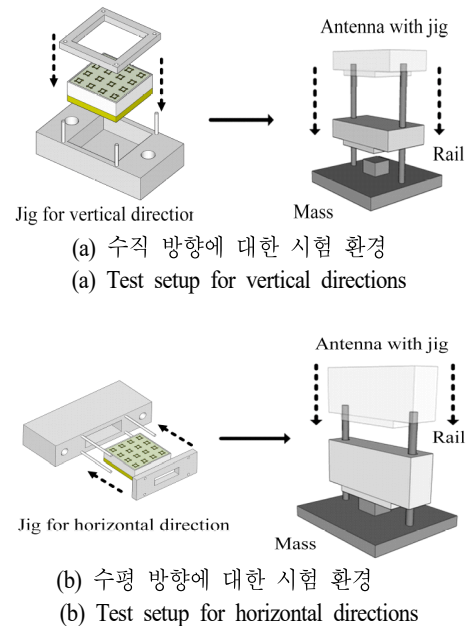
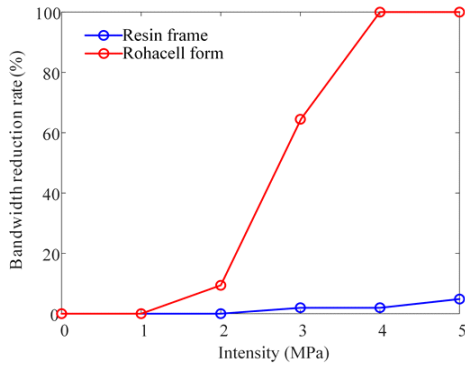
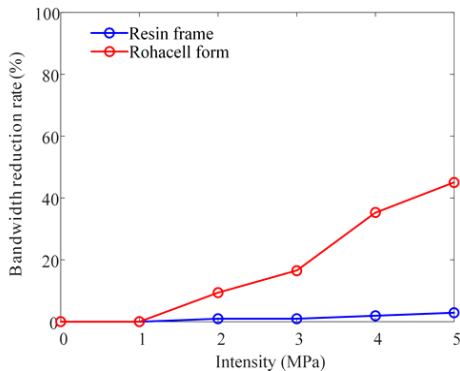


그림 5. 충격 테스트 환경
Fig. 5. Test setup of the dynamic simulation.



(a) 수직 방향에서의 충격
(a) External shocks from vertical directions

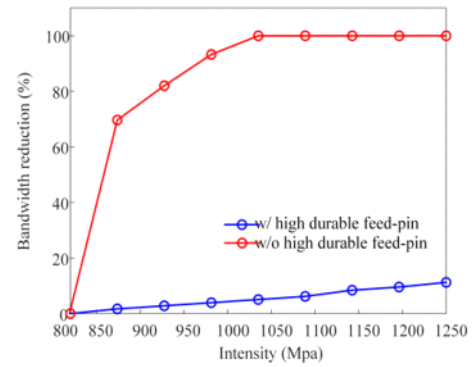


(b) 수평 방향에서의 충격
(b) External shocks from horizontal direction

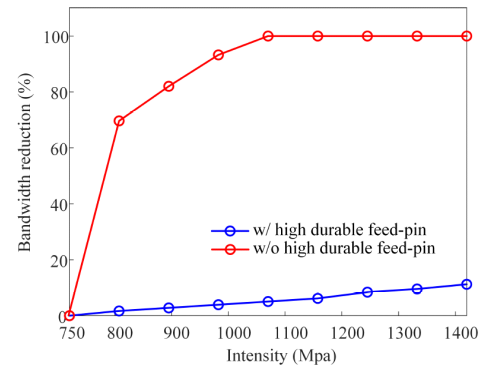
그림 6. S 대역 소자의 내구성 시험 결과
Fig. 6. Durability test result of S-band element.

시켰다.

그림 6은 제시된 시험 환경에 대해 S 대역 소자의 준공기층이 격자구조의 레진 프레임으로 적용된 경우와 로하셀 기판이 사용되었을 경우를 비교 분석한 결과를 나타낸다. 외부 충격이 안테나로 전해질 때, 로하셀 기판을 사용한 안테나는 기판 형상의 큰 변형이 발생하며, 5 MPa 충격이 가해지면 기판의 전체 두께는 80 % 가까이 변화한다. 특히, 수직 방향에서 4 MPa 이상의 충격이 가해지는 경우, S 대역 소자는 동작하지 않는다. 반면, 레진 프레임이 적용된 안테나는 동일한 충격에서 성능 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 수평 방향으로의 충격 시험 결과에서는 안테나 소자 층의 높이 변형은 상대적으로 적게 나타나, 로하셀 기판을 사용한 경우 대역폭 감소는



(a) 수직 방향에서의 충격
(a) External shocks from vertical directions



(b) 수평 방향에서의 충격
(b) External shocks from horizontal direction

그림 7. X 대역 소자의 내구성 시험 결과
Fig. 7. Durability test result of X-band element.

최대 45 % 정도 나타나고, 레진 프레임을 사용한 경우 안테나 성능에 큰 변화가 없었다.

그림 7은 동일한 시험에 대한 X 대역 소자의 결과를 나타낸다. 안테나 소자가 수직 및 수평 방향에서 받은 충격이 각각 982 MPa와 1,035 MPa인 경우, 고내구성 급전핀이 적용되지 않은 X 대역 소자는 동작하지 않는다. 반면에, 제안된 고내구성 급전핀이 적용된 X 대역 소자는 수직 및 수평 방향에서 최대 1,250 MPa와 1,400 MPa의 충격이 가해지더라도 대역폭 감소는 10 % 미만으로 나타난다. 이는 제안된 고내구성 설계를 통해, 수직 및 수평 방향에서의 충격으로 소자 층이 변형되어도 안테나의 성능을 유지할 수 있음을 나타낸다.

IV. 결 론

본 논문에서는 군용 함정의 가혹한 해상 환경을 고려한 고내구성 설계가 적용된 S/X 대역 공통개구면 배열 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나의 내구성을 향상시키기 위해서 X 대역 소자에는 고내구성 급전핀과 금속 프레임이 적용되었으며, S 대역 소자에는 레진 프레임으로 만든 격자구조의 준 공기층이 적용되었다. 제안된 안테나의 S 대역 소자 대역폭은 13.3 %로 나타나며, X 대역 소자의 경우 대역폭은 17.8 %로 나타났다. 제안된 안테나의 내구성은 LS-Dyna 시뮬레이터를 사용한 모의 충격 시험을 통해 조사되었다. S 대역 소자의 준 공기층에 수직 방향에서 4 MPa의 충격이 가해지는 경우, 로하셀 폼이 적용된 S 대역 소자의 경우 동작하지 않지만, 레진 프레임이 적용된 S 대역 소자의 성능 변화는 거의 나타나지 않았다. X 대역 소자의 경우, 안테나 소자가 수직 및 수평 방향에서 받은 충격이 각각 982 MPa와 1,035 MPa일 때, 고내구성 급전핀이 적용되지 않은 X 대역 소자는 동작하지 않았다. 반면에, 제안된 고내구성 급전핀이 적용된 X 대역 소자는 수직 및 수평 방향에서 최대 1,250 MPa와 1,400 MPa의 충격이 가해지더라도 대역폭 감소는 10 % 미만으로 나타났다.

References

- [1] F. Y. Kuo, R. B. Hwang, "High-isolation X-band marine radar antenna design," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 5, pp. 2331-2337, May 2014.
- [2] G. C. Tavik, C. L. Hilterbrick, J. B. Evins, J. J. Alter, J. G. Crnkovich, and J. W. de Graff, et al., "The advanced multifunction RF concept," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 3, pp. 1009-1020, Mar. 2005.
- [3] C. X. Bai, Y. R. Cheng, Y. R. Ding, and J. F. Zhang, "A metamaterial-based S/X-band shared-aperture phased-array antenna With wide beam scanning coverage," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 4283-4292, Jun. 2020.
- [4] S. Wang, H. Kim, D. Kim, and H. Choo, "Multi-band array antenna sharing a common aperture with heterogeneous array element," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 18, p. 9348, Sep. 2022.
- [5] J. Park, D. Jang, H. Choo, and S. Wang, "Design of a dual-band shared-aperture array antenna composed of array elements with high electromagnetic transparency," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 137533-137541, Jul. 2024.
- [6] E. Y. Yim, D. Jang, C. H. Lee, and H. Choo, "Design of an S/X-band single-layer shared-aperture array antenna using a mutual complementary configuration," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, p. 4379, Mar. 2023.
- [7] J. Cho, T. H. Lim, Y. Kim, and H. Choo, "Design of a wideband printed patch dipole antenna with a balanced on-board feeding network," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 6, pp. 631-637, Nov. 2022.
- [8] S. S. Fidon, R. Ünal, "A survey on ceramic radome failure types and the importance of defect determination," *Engineering Failure Analysis*, vol. 149, no. 1, p. 107234, Jul. 2023.
- [9] D. Jang, T. H. Lim, S. Park, and H. Choo, "Broadband all-metal Vivaldi array antenna with pyramidal-shaped wings for LEO satellite applications," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 5, pp. 405-411, Sep. 2023.
- [10] D. Jang, S. Wang, H. Kim, and H. Choo, "Design of a shared-aperture dual-loop antenna using a mutual complementary shape to improve an electromagnetic transparent characteristics between S/X-band elements," *IEEE Access*, vol. 12, no. 1, pp. 21199-21206, Jan. 2024.
- [11] D. Jang, T.H. Lim, D. Kim, S. Wang, and H. Choo, "Design of a high-durability X-band patch antenna with a CPW feeding network based on a durability evaluation analysis," *Electronics*, vol. 11, no. 4, p. 553, Feb. 2022.
- [12] J. Cho, D. Jang, C. H. Lee, and H. Choo, "Design of

an interface layer using CPW between an array antenna and TRM in X-band radar systems to minimize leakage fields and improve transmission characteristics," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 17, p. 8514, Aug. 2022.

[13] Ansys, "LS-Dyna." Available: <https://lsdyna.ansys.com>

[14] Dassault Systems, "CST Studio Suite." Available: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>

[15] L. Stark, "Microwave theory of phased-array antennas: A Review," *IEEE*, vol. 62, no. 12, pp. 1661-1701, Dec. 1974.

임 은 열 [홍익대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0009-0008-1202-3484>



2022년 8월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2023년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 석박사통합과정

[주 관심분야] 안테나 소자, 배열 안테나, 레이다 안테나

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과(공학사)

2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)

2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)

2003년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나

장 도 영 [동양미래대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5629-8294>



2015년~2018년: 모아소프트 RF/EMC 사업부 연구원

2018년 2월: 동양미래대학교 정보통신공학과 (공학사)

2023년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2023년~2024년: 홍익대학교 메타물질전

자소자연구센터 연구 교수

2024년~2025년: 한화시스템 레이다연구소 전문연구원

2025년~현재: 동양미래대학교 정보통신공학과 조교수

[주 관심분야] 안테나 및 배열안테나, 레이다, 전파환경 분석

이 준 용[홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-4041-9565>



1986년 2월: 서울대학교 전파공학과 (공학사)

1988년 2월: 미국미네소타주립대 EECS (공학석사)

1996년 5월: 미국미네소타주립대 EECS (공학박사)

1997년 3월~현재: 홍익대학교 컴퓨터공

학과 교수

[주 관심분야] 컴퓨터시스템 응용, 임베디드 시스템, 실시간 프로세싱 등