

낮은 안테나 높이 및 균일한 이득 특성을 갖는 초광대역 네 개의 팔을 갖는 후방 공동 시뉴어스 안테나

Ultra-Wideband Cavity-Backed Four-Arm Sinuous Antenna with Low Height and Uniform Gain Characteristics

김동현 · 박찬영 · 김영완* · 김현* · 윤영중

Donghyun Kim · Chan Yeong Park · Youngwan Kim* · Hyun Kim* · Young Joong Yoon

요 약

본 논문에서는 낮은 안테나 높이 및 넓은 이득 대역폭을 가지는 초광대역(ultra-wideband) 네 개의 팔을 갖는 후방 공동 시뉴어스 안테나(sinuous antenna)를 설계한다. 낮은 안테나 높이를 위해서 급전 구조(feeding structure)는 동축선 다발(coaxial cable bundle) 및 이중 입력 포트 발룬(balun)을 적용한다. 또한, 단방향성 방사 패턴(uni-directional radiation pattern), 초광대역에서 안정된 동작 특성 및 작은 도체 공동(metallic cavity) 크기를 위해 적층형 전파 흡수체(radio absorber)를 적용한다. 추가적으로, 넓은 이득 대역폭을 위해 낮은 입력 임피던스를 갖는 방사체 구조를 적용한다. 제안된 안테나를 통해 기존의 네 개의 팔을 갖는 후방 공동 시뉴어스 안테나에서 요구되는 큰 안테나 높이, 좁은 이득 대역폭 및 높은 임피던스 변환 단점을 완화할 수 있다. 제안된 안테나는 0.4~6 GHz에서 동작하며 측정 결과와 이전에 연구된 안테나들과의 성능을 비교해 상대적으로 작은 높이를 갖고 넓은 이득 대역폭을 가진다.

Abstract

In this study, an ultra-wideband cavity-backed four-arm sinuous antenna with low height and wide gain bandwidth is proposed. To reduce the antenna height, a feeding structure is applied with a coaxial bundle and two-port balun. In addition, a multi-layer radio absorber and metallic cavity are applied to obtain certain characteristics, such as a unidirectional radiation pattern, low profile, and stable reflection coefficient. Additionally, a radiator with low input impedance is applied for a wide gain bandwidth. The proposed antenna operates at 0.4~6.0 GHz and has a relatively low height and large gain bandwidth compared to the performance of previously studied antennas.

Key words: Cavity-Backed Four-Arm Sinuous Antenna, Coaxial Bundle, Balun, Radio Absorber

I. 서 론

입력 임피던스(input impedance), 방사 패턴(radiation

「This research has been supported by the Defense Challengeable Future Technology Program of Agency for the Defense Development, Republic of Korea.」
연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical Electronic Engineering, Yonsei University)

*LIG넥스원 레이더연구소(Radar R&D Laboratory, LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received June 23, 2021 ; Revised July 12, 2021 ; Accepted July 16, 2021. (ID No. 20210623-065)

· Corresponding Author: Young Joong Yoon (e-mail: yjyoon@yonsei.ac.kr)

pattern), 편파(polarization) 및 이득과 같은 안테나 성능이 넓은 주파수 범위에서 거의 일정한 특성을 가진 주파수 독립(frequency independent) 안테나는 초광대역, 방향 탐지 및 고속 무선 통신과 같은 다양한 응용 분야에서 사용된다^{[1],[2]}. 특히, 전자전(electronic warfare) 시스템에서 편파 적합도를 높여 수신확률을 높이기 위해서 광대역, 넓은 빔폭(beamwidth) 및 이중 선형 편파의 안테나 특성이 요구된다^[3]. 주파수 독립 안테나들 중 가장 최근에 개발된 시뉴어스 안테나(sinuous antenna)는 광대역에서 이중 선형 편파를 생성할 수 있는데, 이는 동일한 유형의 스파이럴 안테나(spiral antenna)에는 없는 특성이다^{[4],[5]}. 일반적으로 네 개의 팔을 갖는 시뉴어스 안테나의 입력 임피던스는 267 Ω으로 기존의 두 개의 팔인 경우보다 188 Ω보다 높다^[6]. 이러한 높은 입력 임피던스는 급전을 위한 발룬(balun)의 길이를 증가시켜 전체 안테나 높이를 증가시키고 손실을 야기하여 안테나 이득을 낮게 만들어 넓은 주파수 대역에서의 동작에 적합하지 않다^[7]. 특히, 기존의 높은 입력 임피던스를 갖는 네 개의 팔을 갖는 시뉴어스 안테나는 높은 동작 주파수 대역에서 상대적으로 낮은 이득을 나타낸다^{[8]~[10]}. 일반적으로 사용되는 입력 임피던스 저감 방법은 높은 유전 상수를 갖는 인쇄 회로 기판(printed circuit board)에 설계하는 것이다^{[11]~[13]}. 하지만, 유전 상수(dielectric constant)가 높은 기판을 사용하면 기판 모드(substrate mode)가 생성되고, 고주파 대역에서 안테나 이득이 감소한다^[13]. 최근 이러한 단점을 극복하기 위해, 병렬 방사체 구조 및 부분 금속 폭 조정 구조를 적용해 간단한 구조로 입력 임피던스를 저감하고 넓은 이득 대역폭을 갖는 방법도 연구되었다^[14].

본 논문에서는 낮은 안테나 높이 및 넓은 이득 대역폭을 위해 기존에 연구된 낮은 입력 임피던스를 가진 네 개의 팔을 갖는 시뉴어스 안테나에 동축선 다발(coaxial cable bundle) 및 발룬을 수평 형태의 급전 구조로 설계하고, 적층형 전파 흡수체(radio absorber)를 도체 공동(metallic cavity) 내에 설계해 초광대역에서 단방향성 방사패턴을 얻는다. 제안된 안테나는 상대적으로 높고 균일한 이득과 대역폭을 가지며, 14:1의 비율 대역폭(ratio bandwidth)에서 동작한다.

II. 시뉴어스 안테나 설계

본 논문에서는 균일한 안테나 이득을 위해 상대적으로 낮은 유전 상수를 갖는 기판을 사용한다^[13]. 설계하는 안테나는 유전 상수가 2.2이고 유전 손실(loss tangent)이 0.0009인 Taconic 社 TLY-5 기판 위에 설계되었다. 기판의 두께는 0.5 mm, 안테나의 직경은 300 mm이다. 본 논문에서 시뮬레이션은 CST Microwave Studio를 통해 수행되었다.

2-1 시뉴어스 안테나의 원리 및 기본 구조

그림 1은 대수 주기적 구조와 switch-backed arm의 가장 자리를 가지는 시뉴어스 안테나 구조 및 설계 변수들을 보여준다. DuHamel^[15]에 의해 제안된 시뉴어스 곡선은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = (-1)^p \cdot \sin \left[\pi \cdot \frac{\ln(r/R_p)}{\ln \tau} \right] \pm \delta \quad (1)$$

식 (1)에서 ϕ 와 γ 은 극좌표이며, R_p 는 내부 반지름이다. p_{th} cell의 $p=1,2,\dots,P$ 이다. τ 는 연속 셀의 확장 비율로 $R_{p+1}=\tau R_p$ 와 같이 나타낼 수 있다. 시뉴어스 곡선은 α 와 δ 에 의해 회전하여 그림 1과 같이 팔을 형성한다. 시뉴어스 안테나는 N 개의 팔로 구성되며, $2\pi/N$ 으로 회전

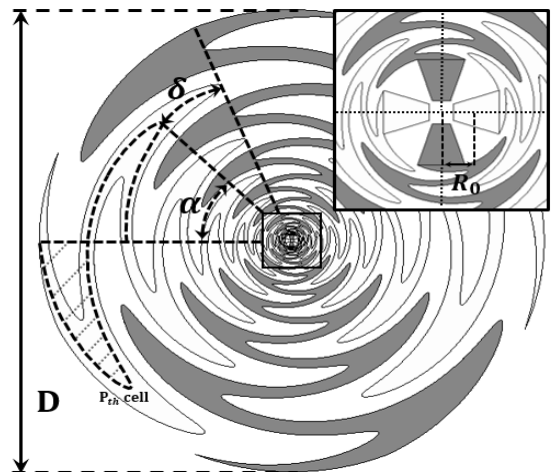
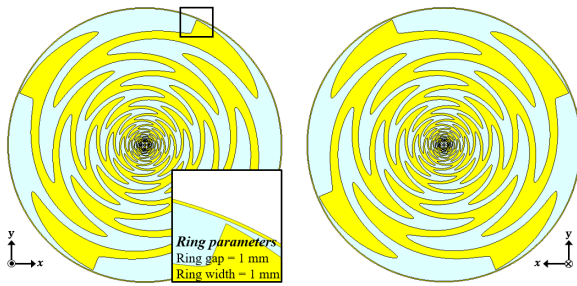


그림 1. 네 개의 팔을 갖는 시뉴어스 안테나 설계 변수
Fig. 1. Design parameters of the four-arm sinuous antenna.

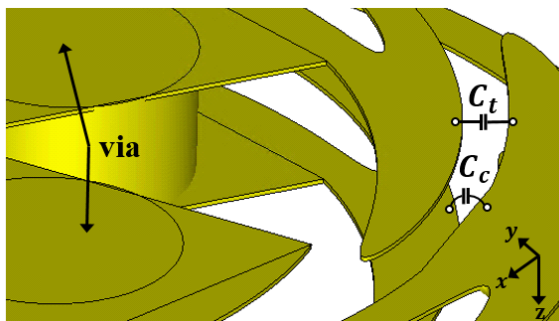
할 때 N 회 복사되어 구성된다. 일반적으로 N 의 수는 필요한 안테나 편광에 따라 다르다. 자기상보(self-complementary) 구조를 가지기 위해, δ 는 $\pi/2N$ 으로 설정한다.

2-2 병렬 방사체 및 부분적인 도체 폭 조절 구조

본 논문에서는 0.4 GHz 이상부터 동작하는 시뉴어스 안테나를 설계하고자 한다. 또한, 저주파 대역의 안테나 이득 열화를 방지하기 위해 공진을 일으키는 부분인 sharp-end 제거^[5] 및 저주파 대역의 임피던스 변동을 최소화하기 위한 gap-loading^[16]을 적용한다. 입력 임피던스 저감을 위해서, 이전에 연구되었던 병렬 방사체 구조를 시뉴어스 안테나에 적용한다^[14]. 병렬 구조의 시뉴어스 안테나는 그림 2(a)와 그림 2(b)에서와 같이 기판의 양쪽 면에 대칭적으로 구성한다. 자기상보 특성을 유지하기 위해 병렬 관계에 있는 두 방사체 구조를 가능한 가깝게 만들어



(a) 앞면
(a) Top view
(b) 뒷면
(b) Bottom view



(c) 확대된 중심 부분
(c) Magnified center view

그림 2. 병렬 방사체 구조

Fig. 2. Parallel radiator structure.

야 하므로, 양면의 방사체는 사이의 간격을 최소화하도록 한 기판의 양면에 설계한다. 또한, 그림 2(c)와 같이 방사체의 중심에서 병렬 구조는 via를 통해 연결한다.

시뉴어스 안테나의 입력 임피던스는 아르키메디안 스파이럴 안테나(archimedean spiral antenna)와 유사한 CPS (coplanar stripline)로 볼 수 있으며^[17], 전송선 정전용량(capacitance) C_t 는 동일한 평면의 인접한 팔들 사이에서 발생한다. 병렬 구조의 시뉴어스 안테나는 서로 대칭하는 다른 평면의 방사체와의 사이에서 결합(coupling) 정전용량 C_c 가 발생하게 된다. 이러한 결합 효과는 그림 3에서와 같이 팔의 최외곽에서 전류의 반사에 의한 저주파 대역에서의 큰 임피던스 변동(fluctuation)과는 다르게 고주파 대역에서 임피던스 변동을 증가시킨다. 따라서, 이러한 임피던스 변동을 억제하기 위해, 병렬 구조는 두 CPS가 서로 가깝게 위치한 결합선(coupled line)으로 간주한다. 결합선 이론에서, 전송선 정전용량이 결합 정전용량보다 상대적으로 더 커지면 유사한 짝수홀수 모드(even-odd mode) 임피던스가 발생하고 결합 계수(coupling coefficient)가 감소한다^[7]. 따라서, 팔의 폭을 증가시키는 부분적인 도체 폭 조절 방법은 전송선 정전용량 C_t 를 증가시키는 데 사용한다. 팔의 폭은 고주파 대역의 활성 영역(active region)을 고려하여 그림 4와 같이 기법이 적용되는 반경 R_a 내에서 설계 변수 δ_{in} 으로 조절한다. 평균 입력 임피던스는 동일한 동작 주파수 내에서 기존의 방사

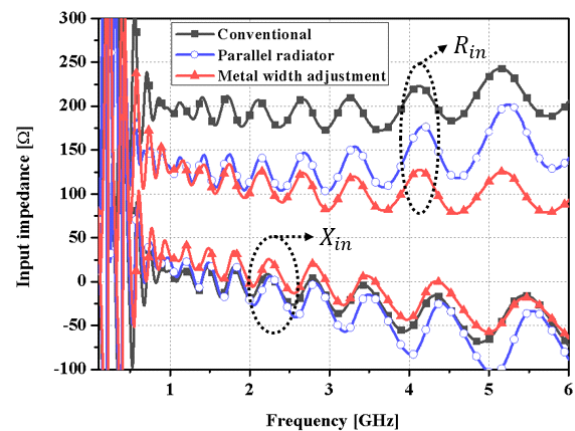


그림 3. 안테나 입력 임피던스 비교

Fig. 3. Comparisons of the antenna input impedance.

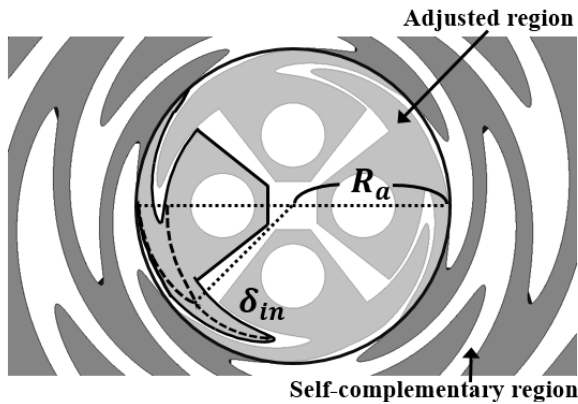


그림 4. 부분적인 도체 폭 조절이 적용된 병렬 방사체 구조

Fig. 4. Configuration of the parallel radiator with the partial metal width adjustment structure.

표 1. 시뉴어스 안테나 설계 변수

Table 1. Design parameters of the sinuous antenna.

Parameter	Description	Value
P	The number of cells	17
τ	Scale factor	1.238
α	Angular width	$\pi/4$
δ	Rotation angle	$\pi/8$
δ_{in}	Inner rotation angle	$\pi/6$
N	The number of arms	4
D	Diameter	286.4 mm
R_0	Minimum radius	3.8 mm
R_a	Metal width adjustment radius	4.7 mm
Ring gap	Distance between antenna and ring	1 mm
Ring width	Ring width	1 mm

체 구조의 약 200 Ω 에 비해 병렬 방사체 및 부분적인 도체 폭 조절 기법이 적용된 구조는 약 110 Ω 으로 작은 변동을 가지며 저감된다. 표 1은 설계된 안테나의 모든 설계 변수를 보여준다.

III. 급전 구조 및 공동 설계

3-1 발룬 및 동축선 다발 구조

시뉴어스 안테나와 같은 주파수 독립 안테나들은 임피던스

스 변환을 포함하는 급전을 위한 발룬 구조가 필요하다. 발룬을 통한 급전 구조는 수직 급전^[9]과 수평 급전 구조^[10]가 있다. 수직 급전 구조의 경우, 두 개의 발룬을 사용하는 구조로 안테나 전체 높이를 증가시킬 뿐만 아니라, 안테나 중심의 연결 부분에서 교차로 인한 결합이 발생해 포트 간 격리도(isolation) 특성이 좋지 않다. 따라서, 작은 안테나 높이 및 포트 간 격리도 특성이 우수한 수평 급전 구조를 적용한다. 수평 급전 구조는 수직 급전 구조와는 다르게 추가적인 동축선 다발 구조가 필요하다^[18]. 그림 5는 제안된 시뉴어스 안테나와 수평 급전 구조를 위한 상용 동축선 UT-047 4개와 공통 접지로 구성된 동축선 다발 구조이다. 네 개의 동축선과 외부 도체 사이는 대부분 납(lead)으로 채워져 있어 단락(short)된다. 그림 6(a)는 본 논문의 2장에서 설계된 안테나 및 임피던스 천이

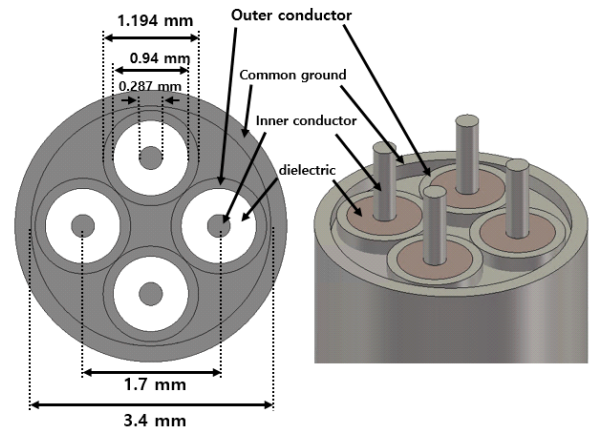
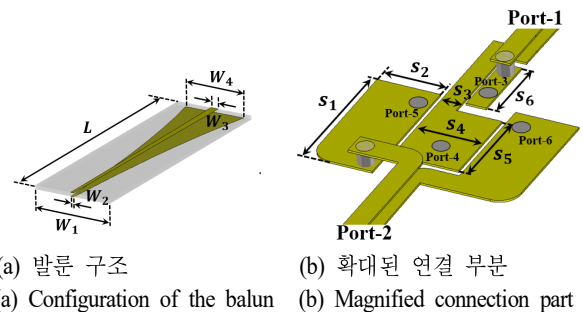


그림 5. 동축선 다발 구성도

Fig. 5. Configuration of the coaxial cable bundle.



(a) 발룬 구조

(b) 확대된 연결 부분

(a) Configuration of the balun

(b) Magnified connection part

그림 6. 이중 입력 포트 발룬

Fig. 6. Two-port balun.

(impedance transition) 이론을 기반으로 0.4 GHz부터 동작 하도록 설계된 테이퍼형 발룬(tapered balun)이다. 네 개의 팔을 갖는 시뉴어스 안테나의 경우, 이중 선형 편파 생성을 위해 두 개의 입력 포트가 필요하다. 따라서, 그림 6(b)와 같이 동축선 다발의 내부 도체들과 연결될 수 있도록 설계되어야 하므로 발룬의 좁은 도체 폭을 위해 비교적 낮은 유전율 및 높이를 갖는 Taconic社 TLY-5 기판 두께 0.25 mm 위에 설계된다. 특히, 높은 주파수 대역에서 리액턴스(reactance)를 줄이고, 내부 도체와의 물리적인 결합을 위해 도체 면적을 넓게 설계한다. 그림 7은 설계된 이중 입력 포트 발룬의 반사 및 투과계수를 나타내며, 0.5~6 GHz 대역에서 -15 dB 이하의 반사계수와 -4 dB 이상의 투과계수를 나타낸다.

방사체와 급전 구조의 전체 결합 구조는 그림 8에 나타

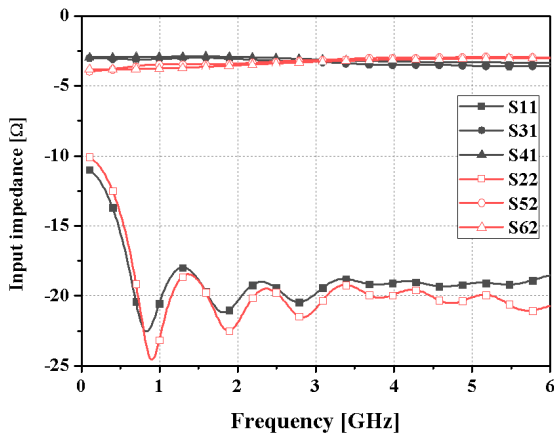


그림 7. 이중 입력 포트 발룬의 반사 및 투과계수 특성
Fig. 7. Reflection and transmission coefficient of the two-port balun.

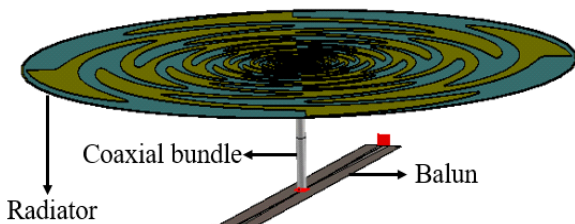


그림 8. 급전 구조가 결합된 안테나
Fig. 8. Antenna with the feeding structure.

표 2. 발룬 설계 변수

Table 2. Design parameters of the balun.

Parameter	Value	Parameter	Value
W_1	20 mm	s_2	1.1 mm
W_2	0.35 mm	s_3	0.4 mm
W_3	0.73 mm	s_4	1.15 mm
W_4	5.35 mm	s_5	1.87 mm
L	100 mm	s_6	1.18 mm
s_1	2.27 mm		

낸다. 급전 구조가 결합된 안테나의 전체 높이는 동축선 다발의 길이에 따라 달라진다. 또한, 수평 급전 구조는 발룬이 안테나와 수평하게 위치하므로 도체 공동 구조가 없이 동작하게 되면 산란(scattering) 및 재방사(re-radiation) 등에 의해 주파수에 따른 반사계수 특성에 변동이 발생하게 된다. 따라서, 도체 공동 구조의 높이를 결정한 후 동축선 다발의 길이를 결정한다. 표 2는 제안된 발룬의 모든 설계 변수 값들을 보여준다.

3-2 전파 흡수체 및 도체 공동 구조

주파수 독립 안테나는 기본적으로 양방향성 방사 패턴을 갖는다. 이러한 방사 패턴은 안테나 주변의 전자기기에 영향을 주기 때문에 여러 가지 시스템 응용에 불리하다. 따라서, 단방향성 방사 패턴을 만들기 위해 도체 공동 구조가 필요하다. 하지만, 시뉴어스 안테나는 도체 공동 구조에 매우 민감하다^[7]. 또한, 일정한 높이의 도체 공동 구조는 안테나 이득을 매우 불균일하게 만들기 때문에 전파 흡수체와 같이 사용되어야 한다. 하지만, 일반적인 상용 전파 흡수체는 주파수에 따라 다른 유전율 및 투자율을 가지기 때문에 단일 매질만을 사용하면 매질의 표면에 반사가 발생한다. 따라서, 낮은 높이의 흡수체를 사용해 광대역에서 동작하기 위해서는 적층형 전파 흡수체 구조가 필요하다^[19]. 그림 9는 Laird社의 상용 전파 흡수체 ECCOSORB 후보 매질들의 일정 두께에서 주파수에 따른 반사계수 특성을 나타낸다. 두 매질(ES-18, ES-24)을 이용한 35 mm 두께의 적층형 구조가 단일 매질의 경우보다 좋은 반사특성을 나타낸다. 그림 10은 설계된 안테나, 급전 구조, 적층형 전파 흡수체 및 도체 공동이 결합된 안테나를 나타낸다. 안테나의 전체 직경은 $0.4\lambda_c$ 이고, 높이

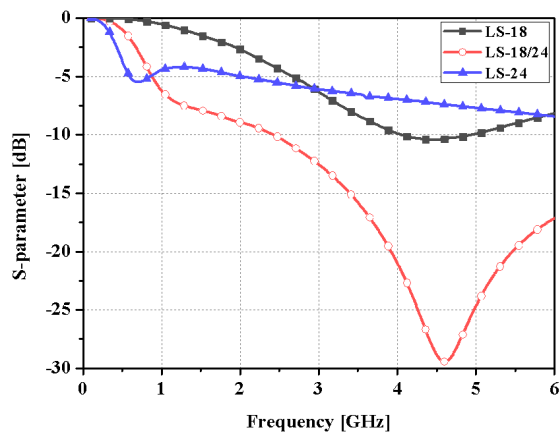


그림 9. 전파 흡수체 반사계수 비교

Fig. 9. Reflection coefficient comparisons of the absorbing material.

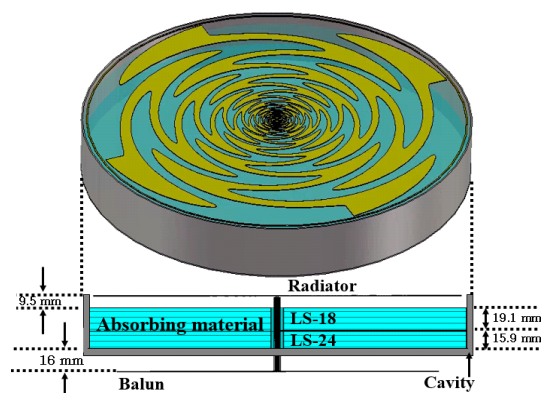


그림 10. 후방 공동 시뉴어스 안테나

Fig. 10. Cavity-backed sinuous antenna.

는 $0.08\lambda_L$ 이다.

IV. 안테나 제작 및 측정

그림 11은 제작된 안테나의 사진을 보여준다. 그림 12에 나타나는 정재파비는 시뮬레이션 및 측정된 반사 계수에 기반해 계산되었으며, 0.4~6 GHz의 대역폭 범위에서 2.5:1 미만의 비율을 나타낸다. 그림 13은 0.5, 1.5, 3, 6 GHz에서 시뮬레이션 및 측정된 방사 패턴을 보여준다.

측정된 결과는 시뮬레이션 결과와 매우 유사하게 단방향성 방사 패턴으로 나타난다. 또한, 그림 14는 브로드사

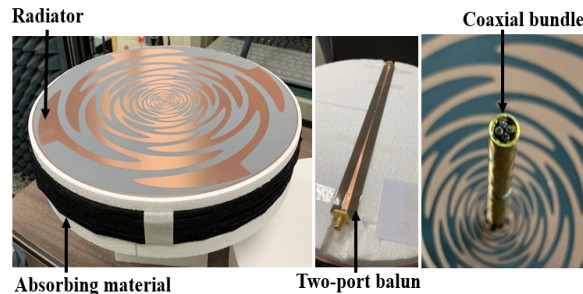
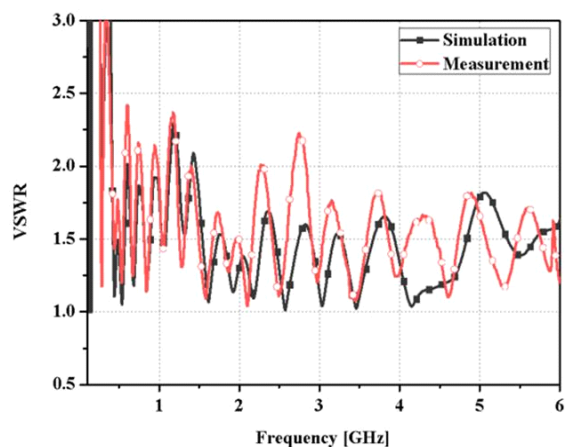


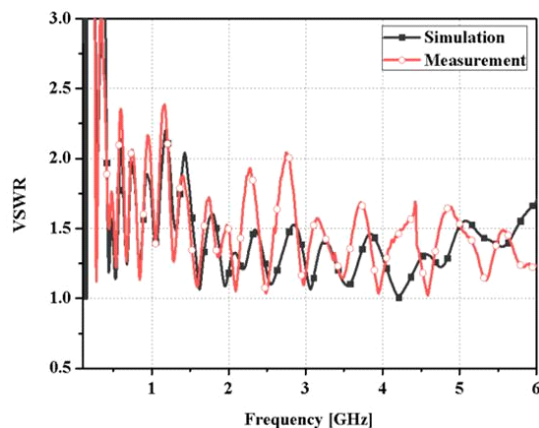
그림 11. 제작된 안테나

Fig. 11. Fabricated antenna.



(a) 1번 입력 포트

(a) Input port-1



(b) 2번 입력 포트

(b) Input port-2

그림 12. 측정된 정재파비 결과

Fig. 12. Measured VSWR result.

낮은 안테나 높이 및 균일한 이득 특성을 갖는 초광대역 네 개의 팔을 갖는 후방 공동 시뉴어스 안테나

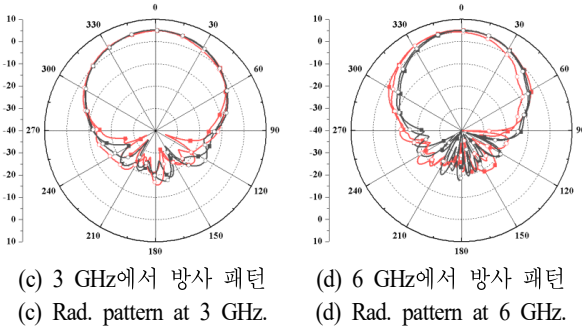
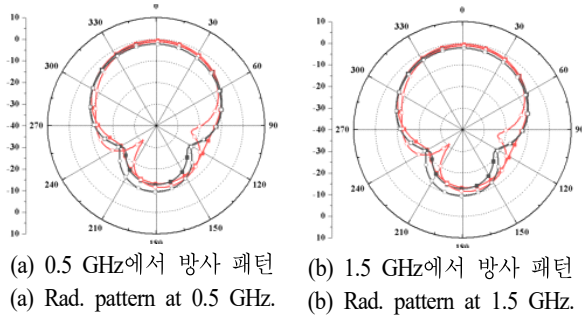


그림 13. 측정된 안테나 방사 패턴 결과
Fig. 13. Measured radiation pattern result.

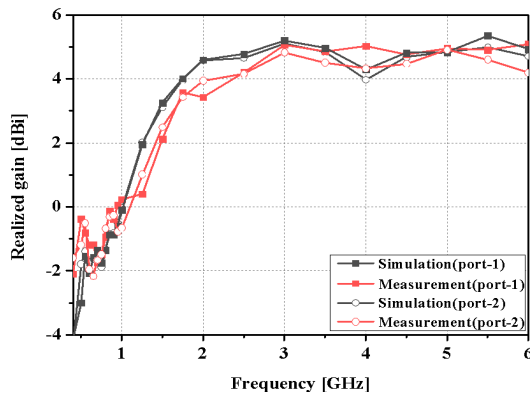


그림 14. 측정된 브로드사이드 방향 안테나 이득
Fig. 14. Measured antenna gain in broadside direction.

이드(broadside) 방향에서 측정된 안테나 이득을 나타낸다. 동작하는 대역 내에서 시뮬레이션 결과 수치와 거의 유사하다. 특히, 높은 주파수 대역에서 제안한 안테나의 이득은 높고 균일하게 나타난다. 표 3에서는 제작된 안테나의 크기 및 성능 측정 결과를 비슷한 직경을 갖는 안테나들과 비교한다. 본 논문에서 제안한 안테나는 유사하게

표 3. 유사 연구들과의 비교

Table 3. Comparisons with similar works.

Ref.	Size (diameter/height)	Bandwidth (VSWR, 2.5:1)	3 dB gain bandwidth	Peak gain
[10]	$0.35\lambda_L/0.21\lambda_L$	1.6~7 GHz	2.3~5.1 GHz	5 dBi
[20]	$0.41\lambda_L/0.27\lambda_L$	2~18 GHz	3~18 GHz	3 dBi
This work	$0.4\lambda_L/0.08\lambda_L$	0.4~6 GHz	1.5~6 GHz	5 dBi

흡수체를 포함한 후방 공동 안테나들인 참고문헌 [10], 참고문헌 [20]과 비교해 전기적 길이로 거의 비슷한 직경을 가지고 있지만, 제안한 안테나의 브로드사이드 방향 최대 이득을 기준으로 하는 이득 대역폭은 1.5~6 GHz로 같은 최대 이득을 가지는 참고문헌 [10]에 비해 매우 넓고 참고문헌 [20]과 비교하면 제안한 안테나의 3 dB 이득 대역폭은 좁지만 모든 동작 대역 내에서 더 높은 이득을 갖는다. 따라서, 설계된 동작 대역 내에서 유사한 안테나들보다 균일한 이득을 가지며, 적층형 흡수체 및 수평 급전 구조를 적용해 안테나 전체 높이의 전기적 길이가 절반 이상 낮다.

V. 결 론

본 논문에서는 낮은 입력 임피던스의 방사체, 수평 급전 구조 및 적층형 전파 흡수체를 통해 안테나 높이 및 이득 대역폭 관점에서 개선된 안테나 성능을 가질 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 낮은 안테나 높이를 위해 동축선 다발 및 발륜을 이용한 수평 급전 구조를 설계하였고, 적층형 전파 흡수체를 적용해 단방향성 방사 패턴과 작은 도체 공동을 크기를 얻는다. 또한, 낮은 입력 임피던스를 갖는 안테나를 적용해 높은 주파수 대역에서 개선된 이득 특성을 가진다. 설계된 안테나는 유사한 연구들에 비해 상대적으로 낮은 안테나 높이 및 높고 넓은 이득 대역폭을 가지며, 14:1의 비율 대역폭에서 동작한다.

References

- [1] C. J. Park, Y. J. Yoon, "Miniaturization of Archimedean spiral antenna for wideband beamforming arrays," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, no. 1, pp. 125-

- 130, Jan. 2019.
- [2] J. Kaiser, "The Archimedean two-wire spiral antenna," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 8, no. 3, pp. 312-323, May. 1960.
- [3] J. H. Kim, H. K. Ryu, M. H. Chae, J. H. Kim, B. J. Park, and Y. J. Park, "Design and fabrication of a dual linear polarization sinuous antenna with improved cross polarization isolation," *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 123-132, Apr. 2018.
- [4] K. S. Saini, R. F. Bradley, "The sinuous antenna-a dual polarized element for wideband phased array feed application," *National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, WV, Electronic Division Internal Report No. 301*, Feb. 1996.
- [5] Y. Kang, K. Kim, and W. R. Scott, "Modification of sinuous antenna arms for UWB radar applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 5229-5234, Nov. 2015.
- [6] G. Deschamps, "Impedance properties of complementary multiterminal planar structures," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 7, no. 5, pp. 371-378, Dec. 1959.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2011.
- [8] X. Zhang, G. Fu, and Z. Zhang, "A planer sinuous antenna and the relevant balun," in *2013 International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology(MMWCST)*, Chengdu, Oct. 2013, pp. 109-112.
- [9] D. A. Crocker, W. R. Scott, "On the design of sinuous antennas for UWB radar applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 1347-1351, Jul. 2019.
- [10] I. M. Alotaibi, J. Hong, and S. K. Almorqi, "Cavity-backed dual linear polarization sinuous antenna with integrated microstrip balun feed," in *2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium(MMS)*, Lecce, Nov.-Dec. 2015, pp. 1-4.
- [11] J. M. Edwards, R. O'Brien, A. T. Lee, and G. M. Rebeiz, "Dual-polarized sinuous antennas on extended hemispherical silicon lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 9, pp. 4082-4091, Sep. 2012.
- [12] T. K. Nguyen, T. A. Ho, and I. Park, "Numerical study of a log-periodic antenna on an extended hemispherical lens," in *Proceedings of 2012 5th Global Symposium on Millimeter-Waves(GSMM)*, Harbin, May. 2012, pp. 567-569.
- [13] M. McFadden, W. R. Scott, "Analysis of the equiangular spiral antenna on a dielectric substrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 11, pp. 3163-3171, Nov. 2007.
- [14] D. Kim, S. K. Cha, S. H. Kim, and Y. J. Youn, "Four-arm sinuous antenna with parallel structure for low input impedance," in *2019 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KIEES) Summer Conference*, Aug. 2020, vol. 8, no. 1, p. 666.
- [15] R. H. DuHamel, "Dual polarized sinuous antennas," US Patent 4,658,262, Apr. 1987.
- [16] Q. Liu, C. L. Ruan, L. Peng, and W. X. Wu, "A novel compact archimedean spiral antenna with gap-loading," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 3, pp. 169-177, 2008.
- [17] T. K. Chen, G. H. Huff, "On the constant input impedance of the Archimedean spiral antenna in free-space," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3869-3872, Jul. 2014.
- [18] K. Kim, N. Kefauver, M. Buck, and D. S. Filipovic, "Single-layer and bilayer four-arm mode 1 spiral antennas and their feed structures," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 22, no. 6, pp. 652-662, 2012.
- [19] Y. Yuan, Q. Cao, "Microwave absorbing properties of sinuous antenna filled with absorbing material," in *2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, Sep. 2010, vol. 1, pp. 1-4.
- [20] Randtron Antenna Systems, *2.4 Diameter: Dual Output E/J Band Sinuous Antenna*, Menlo Park, CA, 1999.

낮은 안테나 높이 및 균일한 이득 특성을 갖는 초광대역 네 개의 팔을 갖는 후방 공동 시뉴어스 안테나

김 동 현 [연세대학교/석·박사 통합 과정]

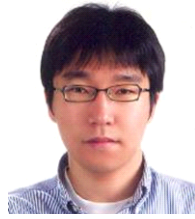
<https://orcid.org/0000-0002-9085-5509>



2018년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2018년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합 과정
[주 관심분야] 광대역 안테나 및 방향 탐지

김 현 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5130-5865>



2002년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2011년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2011년~현재: LIG넥스원 레이더연구소

수석연구원

[주 관심분야] 안테나 및 능동위상배열 레이더, 마이크로파 수치해석 및 탄도학

박 찬 영 [연세대학교/석·박사 통합 과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3056-884X>



2019년 8월 : 서경대학교 전자공학과(공학사)
2019년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합 과정
[주 관심분야] 홀로그래픽 안테나 및 메타 표면

윤 영 중 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-9585-9867>



1981년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)
1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위

성통신기술연구원 선임연구원

1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

2011년: 한국전자과학회 학회장

[주 관심분야] 광대역 안테나, 고출력 안테나, 의료용 안테나, reflectarray 및 전파전파

김 영 완 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6404-8335>



2005년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2007년~현재: LIG넥스원 레이더연구소 수석연구원
[주 관심분야] 위상배열 안테나 및 메타

물질