

교차편파 격리도를 개선한 이중선형 편파 시뉴어스 안테나의 설계 및 제작

Design and Fabrication of a Dual Linear Polarization Sinuous Antenna with Improved Cross Polarization Isolation

김지흥 · 유홍균* · 채명호 · 김정훈 · 박범준 · 박영주

국방과학연구소

Jee-heung Kim · Hong-kyun Ryu* · Myung-ho Chae · Jung-hoon Kim · Beom-jun Park · Young-ju Park

Agency for Defense Development

[요 약]

본 논문에서는 교차편파 격리도(XPI; cross polarization isolation)를 개선한 이중선형 편파 시뉴어스 안테나를 설계 및 제작하였다. 제안된 시뉴어스 안테나는 이중선형 편파 발생을 위해 4개의 암(arm) 방사체로 구성되며, 클로펜스타인 테이퍼(Klopfenstein taper) 구조의 광대역 마이크로스트립 발룬을 통해 급전된다. 또한 후방 반사와 감소를 위해 2단 원통형 캐비티 구조를 적용하였다. 캐비티 내부에는 반사파에 의한 성능 저하를 감소시키기 위해 허니컴 형태의 흡수체를 삽입하였다. 설계된 시뉴어스 안테나는 저대역에서의 교차편파 격리도를 개선하기 위해 최외각 암패턴과 캐비티의 림(rim) 사이에 저항을 적용하였다. 제작된 안테나는 저대역에서 교차편파 격리도가 개선되어 편파 측정을 위한 안테나로 적용 가능성을 확인하였다.

[Abstract]

In this paper, we design and fabricate a dual linear polarization sinuous antenna with improved cross polarization isolation (XPI). The proposed antenna is composed of four arm radiators for generating dual linear polarization and excited by wideband microstrip balun with Klopfenstein taper structure. Also, two-step cylindrical cavity structure is applied to reduce back radiation. Honeycomb-typed absorbing material is inserted into the cavity to reduce performance degradation by reflected wave. To enhance cross polarization isolation in low frequency band, resistors are adapted between outer arm and the rim of cavity. We confirmed that the fabricated antenna can be applied for polarization measurement due to improved XPI in the low band.

Key word : Sinuous antenna, Cavity-back antenna, two-step cylindrical cavity, Cross polarization isolation (XPI), Dual linear polarization.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.2.123>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 26 March 2018; Revised 28 March 2018

Accepted (Publication) 9 April 2018 (30 April 2018)

*Corresponding Author; Hong-kyun Ryu

Tel: +82-10-6407-1950

E-mail: heung2gonzo@gmail.com

1. 서론

전자 지원 (ES; electronic support) 시스템에서 레이더 신호에 대한 편파 측정은 신호수집 및 재밍(jamming)의 효율을 증가시키기 위해 필요한 기능이다[1]. 일반적으로 전자전 시스템은 포착확률 (probability of intercept) 확보를 위해 광각 및 광대역 주파수 특성이 요구되며, 이에 따라 편파 측정을 위한 안테나는 광대역 및 넓은 빔폭이 필요하다. 또한 수신 신호가 갖는 수직과 수평 편파 성분의 진폭과 위상을 측정하여 편파를 판별해야 하기 때문에 이중선형 편파 특성과 수신 편파의 정확한 식별을 위해 우수한 교차편파 격리도 특성을 가져야 한다.

이러한 요구조건에 적합한 편파 측정용 안테나로는 동축 캐비티 안테나[2], 퀴드 릿지(ridge) 혼 안테나[3] 그리고 시뉴어스 안테나[4],[5]가 있다. 세 안테나 모두 광대역, 이중선형 편파 특성을 갖는다. 그러나 동축 캐비티 안테나는 광대역 특성을 위해 한 축을 기준으로 대역을 나누어 조립된 형태를 갖고 대역 선택을 위한 스위치가 장착되어 복잡한 급전 구조를 가진다. 또한 설계 주파수 범위가 넓어짐에 따라 안테나의 크기가 증가하는 단점이 있다. 퀴드 릿지 혼 안테나는 UHF 대역에서 설계시 안테나의 크기와 무게가 증가하고 고대역으로 갈수록 빔폭이 좁아진다는 단점이 있다. 한편, 시뉴어스 안테나는 전술된 안테나와 마찬가지로 광대역, 넓은 빔폭, 이중선형 편파 특성을 가지며, 앞에서 서술된 안테나들에 비해 경량 및 소형으로 설계 가능하기 때문에 UHF 및 L대역 편파 측정용 안테나로 적합하다.

시뉴어스 안테나의 암패턴은 최외각에서 내부로 향할수록 암패턴의 대상 주파수가 증가한다. 시뉴어스 방정식에 따라 시뉴어스 암패턴을 설계할 경우, 최외각 호의 길이가 최저 주파수의 반파장보다 짧게 구성되어 최저주파수에서 안테나의 이득이 저하되고 저대역의 교차편파 격리도 특성이 악화된다. 이를 위해 최저 설계 주파수를 확장하여 최외각 호의 길이를 증가시키는 방법이 있지만, 안테나의 크기를 증가시키게 된다.

본 논문에서는 0.5 ~ 2.0 GHz 주파수 대역(대역폭 4:1)에서 저대역 교차편파 격리도 특성을 개선한 시뉴어스 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 이중선형 편파 발생을 위해 4개의 암으로 구성되며 저대역 교차편파 격리도 특성을 개선하기 위해 각 암패턴의 종단에는 저항을 적용하였다. 시뉴어스 암패턴의 입력 임피던스를 50 Ω에 적합시키기 위해 클로웬스타인 테이퍼 구조의 광대역 마이크로스트립 발룬(이하 ‘발룬’)을 적용하여 급전부를 구성하였다. 후방 캐비티는 장착 공간의 제한으로 형상과 크기가 제한되어 2단 원통형 구조를 적용하였고, 캐비티 내부는 후방 반사파의 흡수와 시뉴어스 암패턴 기판을 지지하기 위해 허니컴 형태의 흡수체와 허니컴을 적용하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 기본적인 이중선형 편파를 발생하기 위한 시뉴어스 안테나의 설계 내용과 시뮬레이션 결과 그리고 저대역에서 발생하는 교차편파 격리도 특성 저하에 대한 원인을 분석하였다. 그리고 3장에서는 교차편파 격리도가 개선된 시뉴어스 안테나의 제작 및 측정결과에 대해 기술하였다.

표 1. 시뉴어스 안테나의 설계 사양

Table 1. Design specifications of a sinuous antenna.

Characteristic	Design specification
Polarization	Dual linear Pol.
-5 dB bandwidth	4 : 1 (0.5 ~ 2.0 GHz)
Gain (dBi)	> - 5
XPI (dB)	> 10
HPBW (°)	> 60 Avg.
Size (mm)	< 265 (Diameter), < 125 (Height)

II. 기본형 이중선형편파 시뉴어스 안테나 설계 및 시뮬레이션

본 장에서는 시뉴어스 안테나의 암패턴, 발룬 설계에 대한 이론적 내용을 기술하였다. 그리고 기술된 내용을 바탕으로 설계한 기본형 이중선형 편파 시뉴어스 안테나의 시뮬레이션 결과에 대해 서술하고자 한다.

표 1에는 시뉴어스 안테나의 설계 사양을 제시하였다. 안테나의 편파는 편파 측정을 위해 수직과 수평편파 발생이 가능한 이중선형 편파 특성을 가져야하며, 대역폭은 수신용 안테나로 사용되는 점을 고려하여 - 5 dB 반사손실을 기준으로 4 : 1 (0.5 ~ 2.0 GHz)로 설정했다. 이득과 교차편파 격리도 특성은 시스템의 요구 사양에 따라 각각 - 5 dBi, 10 dB 이상으로 설정했다. 반전력 빔폭 (HPBW; half power beam width)은 넓은 범위를 수신하기 위해 60° 이상으로 설정했다. 안테나의 크기는 물리적 장착을 고려하여 직경 270 mm, 높이 125 mm 이하로 설정했다.

다음 절에서는 시뉴어스 암패턴, 발룬, 시뉴어스 안테나의 설계 및 시뮬레이션 결과에 대해 기술한다.

2-1 시뉴어스 암패턴 설계

그림 1은 시뉴어스 곡선과 암패턴 구조를 보여준다. 시뉴어스 암패턴은 $\pm \delta^\circ$ 의 오프셋 각(offset angle) 차이를 갖는 두 개의 시뉴어스 곡선을 연결하여 구성하며, 시뉴어스 곡선은 식 (1)과 같이 반지름 r 과 각도 ϕ 의 관계식으로 표현된다[4].

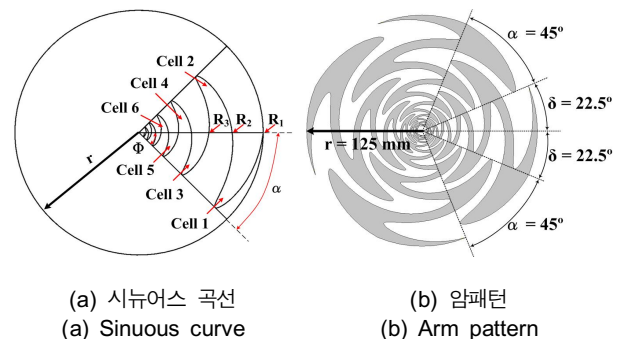


그림 1. 시뉴어스 곡선과 암패턴 구조

Fig. 1. Geometry of a sinuous curve and arm pattern.

$$\phi = (-1)^n \alpha \sin \left[\frac{\pi \ln(r/R_n)}{\ln \tau} \right] \pm \delta, \quad (R_{n-1} \leq r \leq R_n) \quad (1)$$

여기서 n 은 시뉴어스 곡선을 구성하는 셀(cell)의 개수, α 는 각 셀이 갖는 각도를 나타내는 각 너비(angular width), R_{n-1} 과 R_n 은 각각 $n-1$ 번째와 n 번째 셀의 반지름, τ 는 확장비(expansion ratio)이며, 인접한 셀의 반지름과 확장비 τ 는 식 (2)와 같은 관계식을 갖는다.

$$\tau = R_{n-1}/R_n \quad (2)$$

시뉴어스 암패턴의 방식은 각 셀이 구성하는 호의 길이가 대 상 주파수의 반파장과 일치할 경우 발생하며, 호의 길이는 셀의 반지름에 비례한다. 따라서 최외각 반경 R_1 과 급전점의 반경 R_{feed} 는 각각 최저·최고 주파수에 의해 결정되며, 식 (3), (4)와 같이 표현된다.

$$2R_1(\alpha + \delta) = \lambda_L/2 \quad (3)$$

$$4R_{feed}(\alpha + \delta) = \lambda_H/2 \quad (4)$$

여기서 λ_L , λ_H 는 각각 최저·최고 주파수의 파장이며 설계 사양에 의해 각각 600 mm, 150 mm의 값을 갖는다. 4개의 암으로 구성된 시뉴어스 암패턴은 실험적으로 각 너비 α 와 오프셋 각 δ 이 각각 45° , 22.5° 의 값을 가질 때 균일한 안테나의 이득과 빔 패턴 특성을 가지며, 본 연구에서도 해당 값을 적용하였다.

셀의 개수 n 은 시뉴어스 곡선이 구성하는 셀들 중, 셀의 반경이 식 (4)의 R_{feed} 와 크거나 같은 값을 갖는 셀에 의해 결정된다. 본 연구에서는 설계목표에 의해 $R_{feed} = 8$ mm 이고 약 7.1 mm의 반경을 갖는 10번째 셀이 조건을 충족하지만, 설계 마진을 위해 1개의 셀을 추가하여 설계하였다. 여기서 셀의 개수 n 과 확장비 τ 는 암패턴의 형상과 및 안테나의 성능과 관계되는데, 두 변수의 값이 클수록 방사소자가 증가하여 균일한 안테나 특성을 갖지만 패턴의 제작이 어렵게 된다. 따라서 셀의 개수 n 과 확장비 τ 는 제작성과 성능을 고려하여 신중하게 설정해야 한다.

본 연구에서 셀의 개수 n 은 11, 확장비 τ 는 0.75로 설정하고 설계를 진행하였다. 표 2에는 시뉴어스 암패턴 설계에 적용한 설계변수 값들을 정리하였다.

2-2 광대역 발룬 설계

표 2. 시뉴어스 암패턴의 설계변수

Table 2. Design parameters of the sinuous arm pattern.

Design parameter	Value	Design parameter	Value
α	45°	δ	22.5°
τ	0.75	n	11 개
Min. Frequency	0.5 GHz	λ_L	600 mm
Max. Frequency	2.0 GHz	λ_H	150 mm

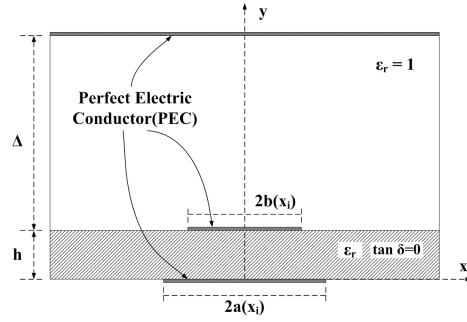


그림 2. 비대칭 평면 스트립 선로의 단면[6]

Fig. 2. Cross section of asymmetrical parallel strip line[6].

본 연구에서 설계한 시뉴어스 암패턴의 급전부의 입력 임피던스는 100 Ω이기 때문에 안테나의 입력 임피던스인 50 Ω에 정합을 위해 발룬을 적용하였다. 설계된 발룬은 주어진 길이에서 통과대역 내 반사계수 특성이 가장 우수한 클로펜스타인 테이퍼를 사용하였으며, 0.5 ~ 2.0 GHz 주파수 대역에서 100 Ω과 50 Ω을 정합시킬 수 있는 광대역 특성을 갖는다. 본 논문의 발룬 구조는 그림 2와 같이 비대칭 평행 스트립 선로 구조를 가지며, 다음 과정에 따라 설계하였다[7], [8].

먼저 발룬에 요구되는 입력포트의 임피던스(Z_{MS})와 시뉴어스 암패턴 급전부의 임피던스(Z_{PSTL})를 이용하여 각 종단의 상단 금속 패턴의 폭(W_{MS} , W_{PSTL})을 계산한다. 다음으로 발룬의 총 길이가 최소한 최저 설계 주파수의 1/4 파장 길이를 갖도록 설정 후, 각 단의 개수와 길이를 결정한다.

본 연구에서는 총 길이는 120 mm, 총 6개의 단이 각각 20 mm를 갖도록 설계하였다. 다음으로 각 단의 상단 도체의 폭 $b(x_i)$ 는 각 단의 길이방향 위치(x_i)에 따라 $b(x_i) = Mx_i + N$ 의 관계를 갖는 선형 테이퍼(linear taper)를 적용하였으며, 수식을 구성하는 상수 M 과 N 은 다음 식 (5), (6)과 같다.

$$b(0) = \frac{W_{MS}}{2}, \quad b(L) = \frac{W_{PSTL}}{2} \quad (5)$$

$$M = \frac{W_{PSTL} - W_{MS}}{2L}, \quad N = \frac{W_{PSTL}}{2} \quad (6)$$

이후, 계산된 각 단의 상단 도체 폭 $b(x_i)$ 을 이용하여 각 단(x_i)의 임피던스 $Z(x_i)$ 를 계산하고, 두 값과 아래 식 (7)-(12)를 이용하여 각 단의 하단 도체 폭 $a(x_i)$ 을 구한다.

$$Z(x) = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left(\frac{K(\vartheta')}{K(\vartheta)} + \frac{K(\alpha')}{K(\alpha)} \right)} \quad (7)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{C}{C_0} = \frac{\frac{K(\vartheta')}{K(\vartheta)} + \epsilon_r \frac{K(\alpha')}{K(\alpha)}}{\frac{K(\vartheta')}{K(\vartheta)} + \frac{K(\alpha')}{K(\alpha)}} \quad (8)$$

$$K(\kappa) = \int_0^{\pi/2} \frac{dx}{\sqrt{1-\kappa^2 \sin^2 x}} \tag{9}$$

$$\vartheta = \operatorname{sech}\left(\frac{\pi b(x_i)}{2\Delta}\right), \vartheta' = \sqrt{1-\vartheta^2} \tag{10}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{2(x_a+x_b)}{(1+x_b)(1+x_a)}}, \alpha' = \sqrt{1-\alpha^2} \tag{11}$$

$$x_a = \cosh\left(\frac{a(x_i)\pi}{h}\right), x_b = \cosh\left(\frac{b(x_i)\pi}{h}\right) \tag{12}$$

이러한 과정으로 설계된 발룬의 구조를 그림 3에 나타내었고, 표 3에는 각 단의 폭과 길이를 정리하였다. 발룬은 수직과 수평 임피던스의 급전부와 연결을 위해 두 개의 발룬을 동일한 기판에 설계하였고, 장착을 위해 크기와 형상에 대한 최적화를 수행하였다. 발룬의 균형 선로(balance line) 단은 시뉴어스 임피던스 급전부와 연결을 위해 굽은(bent) 형태를 갖도록 했다. 또한 장착가능 공간의 길이에 맞추기 위해 불균형 선로(unbalance line) 최종 단의 길이를 축소하였다. 설계된 발룬은 Taconic TLY-5A($\epsilon_r = 2.17, h = 1.57 \text{ mm}$) 기판을 사용하였으며, 길이 110.6 mm, 폭 36.1 mm의 크기를 갖는다.

그림 4에는 광대역 발룬의 반사계수(S_{11}), 전달계수(S_{21}), 두 개의 발룬간 격리도(S_{41}) 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션은 CST사의 MWS 2013을 이용하였고 입력포트는 50 Ω ,

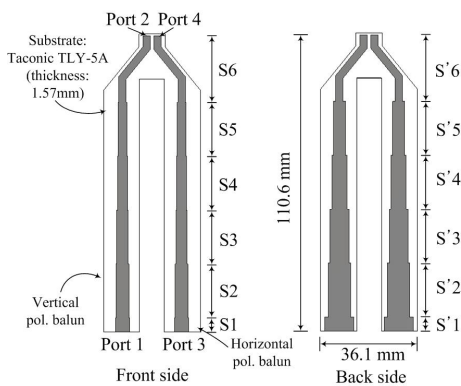


그림 3. 설계된 발룬 구조
Fig. 3. Structure of the designed balun.

표 3. 발룬의 설계 변수

Table 3. Design parameters of the balun.

Section	Width (mm)	Section	Width (mm)	Height (mm)
S1	5.1	S'1	10.8	5.25
S2	4.7	S'2	8.32	20.0
S3	4.2	S'3	7.0	20.0
S4	3.7	S'4	5.7	20.0
S5	3.2	S'5	4.4	20.0
S6	2.7	S'6	2.7	24.65

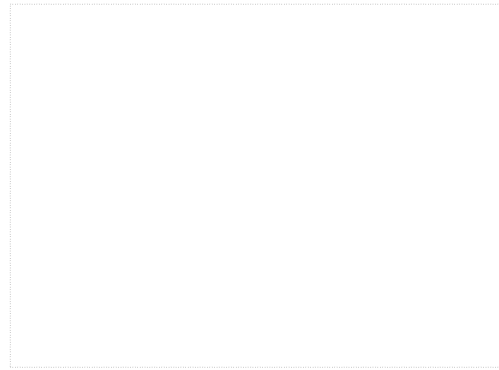


그림 4. 설계된 발룬의 특성
Fig. 4. Characteristics of designed balun.

출력포트는 100 Ω 의 임피던스를 갖도록 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 입력포트에 대한 반사계수는 설계 대역 내에서 -13.3 dB 이하로 임피던스 매칭이 잘 되었으며 전달계수는 -0.8 dB 이상, 두 개의 발룬간의 격리도는 -13.4 dB 이하의 값을 갖는다. 따라서 설계된 발룬을 이중선형 편파 시뉴어스 안테나 급전부로 사용가능함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2-3 이중선형 편파 시뉴어스 안테나 시뮬레이션 결과

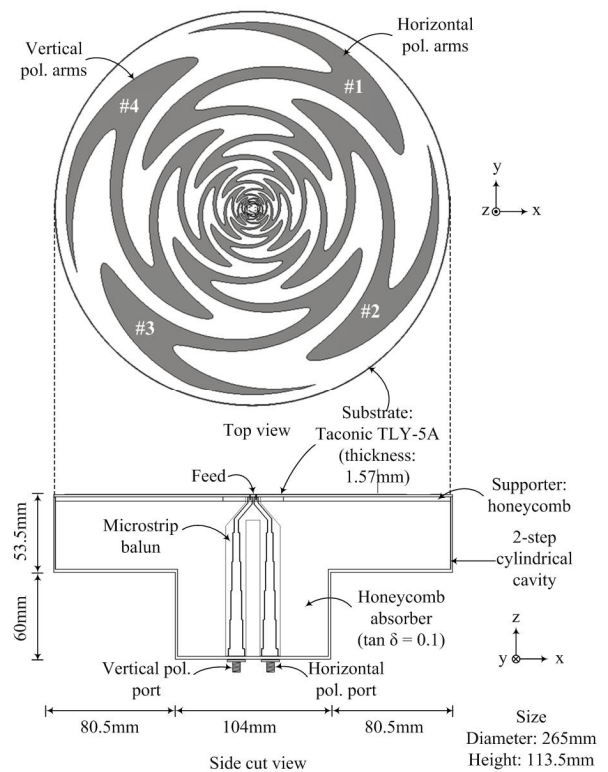
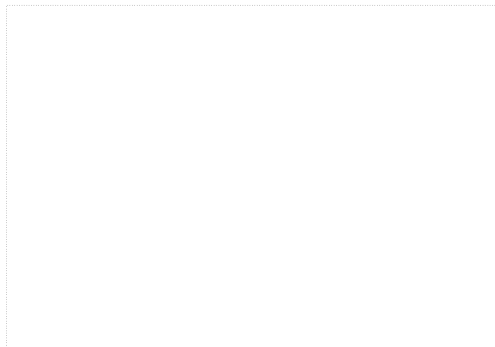


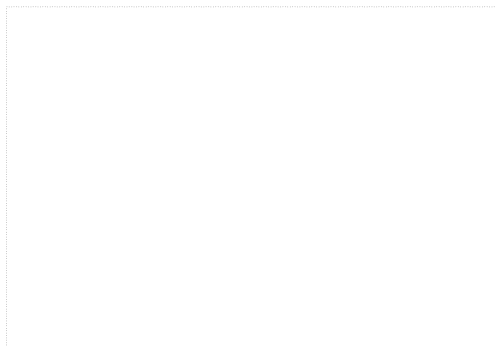
그림 5. 설계된 이중선형 편파 시뉴어스 안테나 구조
Fig. 5. Structure of designed dual linear polarization sinuous antenna.

그림 5는 설계된 이중선형 편파 시뉴어스 안테나의 구조를 보여준다. 시뉴어스 암페턴은 이중선형 편파 특성을 위해 4개로 구성하였으며, 인쇄 기판은 Tacconic사의 TLY-5A($\epsilon_r = 2.17$, $h=1.57\text{mm}$)를 이용하였다. 4개의 시뉴어스 암페턴은 기판의 동일한 면에 인쇄했고, 1, 3번 암페턴은 수평편파, 2, 4번 암페턴은 수직편파를 발생한다. 후방 캐비티는 안테나가 장착될 공간의 제약을 고려하여 서로 다른 직경을 갖는 2단 원통형 캐비티 구조를 적용하였다. 그리고 캐비티 내부에는 암페턴 기판을 지지하기 위한 허니컴과 후방 반사판을 감쇄시키기 위한 허니컴 형태의 흡수체를 적용하였다. 발룬은 앞 절에서 설계한 발룬을 적용하였고, 시뉴어스 암페턴 기판과 직교하도록 후방 캐비티 내부에 설치하여 시뉴어스 암페턴에 대한 급전이 용이하도록 하였다. 그리고 발룬과 시뉴어스 암페턴은 기판을 관통하는 비아(via)로 연결하여 급전부를 구성하도록 하였다[9].

그림 6은 설계된 시뉴어스 안테나의 반사계수와 교차편파 격리도 시뮬레이션 결과를 보여준다. 반사계수는 설계 대역내에서 -7.1 dB 이하, 이득은 -0.3 dBi 이상, 반전력 빔폭은 63.1° 이상으로 설계 사양을 충족하였다. 그러나 교차편파 격리도(그림 6(b))는 0.7 GHz 이하의 저대역에서 10 dB 이하로 설계 사양을 충족하지 못하였다.

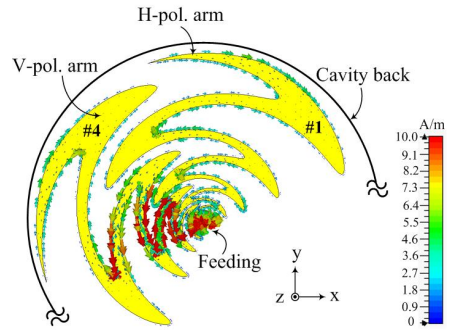


(a) 반사계수
(a) Return loss

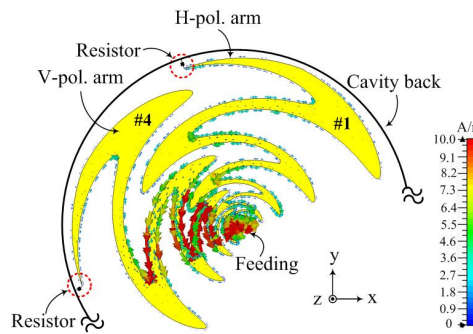


(b) 교차편파 격리도
(b) XPI

그림 6. 시뉴어스 안테나의 반사계수 및 교차편파 격리도
Fig. 6. Return loss and XPI of sinuous antenna.



(a) 저항 미적용
(a) without resistor



(b) 저항 적용
(b) with resistor

그림 7. 저항에 장착 따른 시뉴어스 안테나의 전류 분포 (0.7GHz)
Fig. 7. Current distribution of the sinuous antenna according to installation of resistor (0.7GHz).

교차편파 격리도 저하 원인을 확인하기 위해 교차편파 격리도 특성이 가장 낮은 0.7 GHz 의 표면 전류분포를 시뮬레이션을 수행하였으며, 그림 7(a)에 수평과 수직편파 성분에 대응되는 1번과 4 암페턴의 전류분포를 나타내었다. 수직편파 암페턴으로 급전된 전류는 해당 주파수에 대응하는 암페턴으로 이동하여 수직편파를 방사한다. 이때 경로상 인접한 수평편파 암페턴과 커플링(coupling)이 발생하여 수평편파 암페턴에도 전류 분포가 발생한다. 커플링에 의해 발생된 전류는 주파수에 대응하는 외각의 암페턴에서 교차편파를 방사한다. 이는 저대역의 교차편파 격리도 특성을 저하시키는 원인이 된다. 이러한 현상은 수평편파 암페턴 급전시에도 동일하게 발생한다.

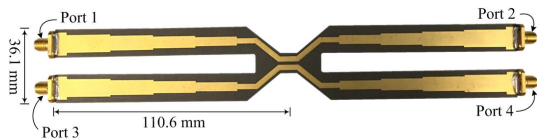
수직 및 수평 암페턴 사이의 커플링에 의한 교차편파 격리도 저하 현상을 개선하기 위해 본 연구에서는 저대역 방사에 대응하는 최외곽 암페턴과 후방 캐비티 사이에 저항($100\ \Omega$)을 삽입하여 전류분포를 감소시킴으로써 교차편파 격리도를 개선하였다. 그림 7(b)는 저항을 적용한 경우의 수직·수평 편파 암페턴의 전류분포를 보여준다. 저항이 적용되지 않은 경우(그림 7(a))와 비교하여 외각에 형성되는 전류분포가 감소했음을 확인할 수 있으며, 이로 인해 저항에 의해 급전된 수직편파의 이득도 감소하지만, 동시에 교차편파 이득도 감소함을 예상할 수 있다.

III. 교차편파 격리도 개선 이중선형 편파 시뉴어스 안테나 설계 및 제작

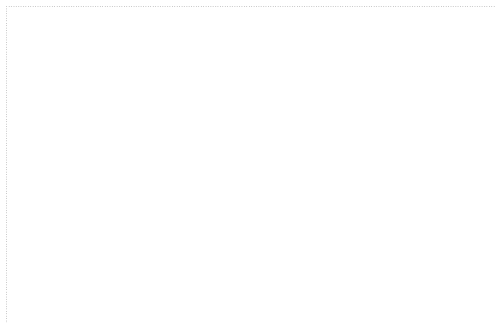
본 장에서는 설계 및 제작한 발룬과 교차편파 격리도가 개선된 시뉴어스 안테나의 측정결과에 대해 기술하였다.

먼저 그림 8에는 제작된 발룬의 구조와 측정결과를 나타내었다. 발룬은 측정을 위해 시뉴어스 암페턴 급전부를 기준으로 대칭인 back to back 구조로 제작했고 폭 36.1 mm, 길이 221.2 mm의 크기를 갖는다. 발룬은 입력 임피던스가 50 Ω 인 4개의 포트를 가지며 1번 포트를 기준으로 측정했고 사용되지 않은 포트들은 50 Ω 으로 정합하였다. 측정결과 대역 내 반사계수 (S_{11})는 -10.3 dB 이하, 전달계수(S_{21})는 -1.1 dB 이상, 두 발룬 간의 격리도(S_{41})는 -23.2 dB 이하의 값을 갖는다. 이때 제작된 발룬은 2개의 발룬이 연결된 구조를 갖기 때문에 발룬 1개의 전달계수는 측정치의 절반인 -0.55 dB 로 감소하게 된다.

표 4에는 발룬의 설계 목표 대비 시뮬레이션 및 측정결과를 나타내었다. 두 결과는 다소 차이를 갖지만 모두 설계 목표를 충족한다. 두 결과의 차이는 시뮬레이션 급전은 discrete 포트를 사용했고, 제작품의 급전은 SMA 커넥터를 사용하여 급전구조가 다르기 때문이다.



(a) 구조
(a) Structure



(b) 측정결과
(b) Measurement result.

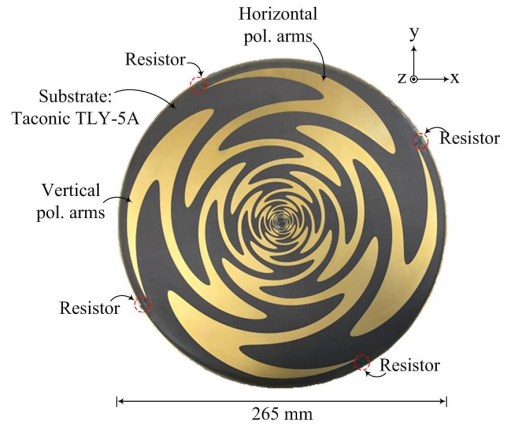
그림 8. 제작된 발룬의 구조 및 특성

Fig. 8. Structure and measurement result of the fabricated balun.

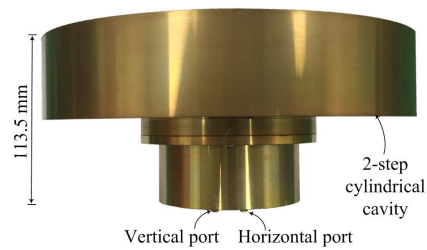
표 4. 제작된 발룬의 특성 비교

Table 4. Characteristics comparison of the fabricated balun.

Characteristic	Design purpose	Simulation	Measurement
S_{11} (dB)	< -10	-13.3	-10.3
S_{21} (dB)	> -1.0	-0.8	-0.55
S_{41} (dB)	< -20	-20	-23.2



(a) 정면도
(a) Front view



(b) 측면도
(b) Side view

그림 9. 제작된 시뉴어스 안테나의 형상

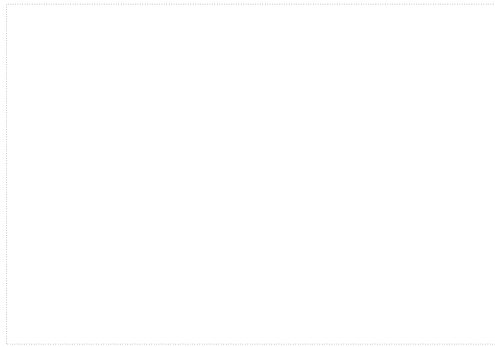
Fig. 9. Configuration of the fabricated sinuous antenna.

제작된 발룬은 전기적 특성과 크기 모두 목표를 충족하기 때문에 시뉴어스 안테나 급전부에 적용 가능할 것으로 판단된다.

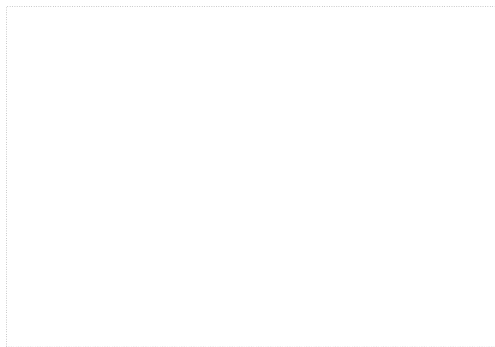
그림 9는 제작한 시뉴어스 안테나의 형상을 보여준다. 제작된 시뉴어스 안테나는 교차편파 격리도를 개선하기 위해 시뉴어스 암페턴의 종단과 2단 원통형 캐비티 사이에 저항을 삽입하였다. 크기는 설계목표 이하인 직경 265 mm, 높이 113.5 mm로 제작되어 장착이 유리할 것으로 판단된다.

그림 10은 시뉴어스 안테나의 반사계수와 이득에 대한 시뮬레이션 및 측정결과를 보여준다. 반사계수(그림 10(a)) 시뮬레이션 결과는 수직·수평편파 포트 각각 -7.9 dB 이하, -7.2 dB 이하이다. 그리고 측정 결과는 수직·수평편파 포트 각각 -6.7 dB 이하, -5.7 dB 이하로 두 결과 모두 설계 사양을 충족함을 확인할 수 있다. 이때 측정결과에서 수평편파 포트의 반사계수가 수직편파 포트 반사계수에 비해 다소 열화되었다. 이는 발룬과 시뉴어스 암페턴을 연결하는 비아(via)의 제작상 오차로 인해 발생한 임피던스의 변화 때문으로 판단된다.

이득은 그림 10(b)에 나타낸바와 같이 수직·수평편파 포트의 시뮬레이션 결과는 모두 -1.9 dBi 이상이고, 측정 결과는 수직 포트 -3.3 dBi 이상, 수평 포트는 -4.5 dBi 이상으로 두 결과 모두 설계 사양을 충족함을 확인할 수 있다. 여기서 시뮬레이션과 측정결과는 0.5 ~ 1.8 GHz 에서 평균 2.0 dB 의 차이를 갖는다.



(a) 반사계수
(a) Return loss



(b) 이득
(b) Gain

그림 10. 제작된 시뉴어스 안테나의 반사계수 및 이득
Fig. 10. Return loss and gain of the fabricated sinuous antenna.

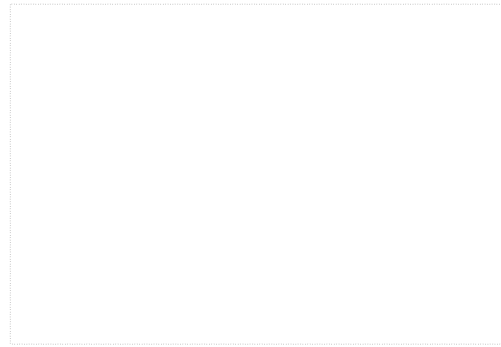
이는 시뮬레이션시 적용한 후방 캐비티 내부의 허니컴 형 흡수체의 손실($\tan \delta$) 값이 제조사에서 주파수별로 제공되지 않아 설계 대역에 대해 단일 값으로 적용했기 때문으로 판단된다.

그림 11(a)와 표 5는 시뉴어스 안테나의 반전력 빔폭 시뮬레이션 및 측정 결과를 보여준다. 반전력 빔폭은 시뮬레이션과 측정결과 모두 유사한 특성을 보여주며, 두 결과 모두 설계 대역 내에서 설계 사양인 60° 이상을 충족함을 확인할 수 있다.

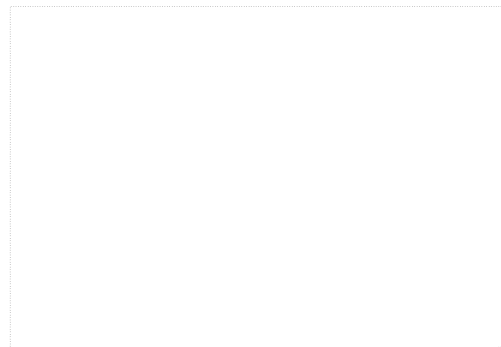
그림 11(b)는 교차편파 격리도에 대한 시뮬레이션 및 측정결과를 보여주며, 두 결과 모두 11.5 dB 이상으로 설계 사양을 충족한다. 특히 $0.5 \sim 0.7 \text{ GHz}$ 의 저대역에서 교차편파 격리도는 저항이 적용되지 않은 경우의 시뮬레이션 결과를 기준으로 저항이 적용된 시뮬레이션 결과는 평균 7.4 dB , 저항이 적용된 경우의 측정결과는 평균 6.3 dB 개선되었다.

표 5. 제작된 시뉴어스 안테나의 반전력 빔폭
Table 5. HPBW of the fabricated sinuous antenna.

Polarization and plane		Simulation ($^\circ$)	Measurement ($^\circ$)
V-Pol.	E-plane	64.3	74.0
	H-plane	63.1	60.4
H-Pol.	E-plane	65.4	72.4
	H-plane	64.5	60.2



(a) 반전력 빔폭 (방위각 방향)
(a) HPBW (azimuth plane)



(b) 교차편파 격리도
(b) XPI

그림 11. 제작된 시뉴어스 안테나의 반전력 빔폭(방위각 방향)과 교차편파 격리도

Fig. 11. HPBW(azimuth plane) and XPI of the fabricated sinuous antenna.

그림 12는 저항이 적용된 시뉴어스 안테나의 동일·교차편파에 대한 방사패턴 시뮬레이션 및 측정결과를 보여준다. 시뉴어스 안테나의 방사패턴은 방위각 방향과 고각 방향의 방사패턴 특성이 유사하기 때문에, 시스템의 주 사용 평면인 방위각 방향의 방사패턴에 대한 시뮬레이션과 측정결과를 비교하였다. 두 결과는 모두 요구 대역 내에서 넓은 빔폭의 지향성 방사패턴 특성을 보이며, 수직과 수평편파 모두 유사한 특성을 나타내었다.

표 6은 설계 및 제작된 시뉴어스 안테나의 특성을 설계 사양과 함께 비교하여 보여준다. 시뮬레이션 결과는 저항이 적용되지 않은 경우와 적용된 경우의 결과를 함께 정리하였다. 편파는 설계 및 제작된 안테나 모두 수직과 수평편파 발생이 가능한 이중선형 편파 사양을 충족했다. -5 dB 대역폭은 시뮬레이션과 측정 모두 $4 : 1 (0.5 \sim 2.0 \text{ GHz})$ 이상을 충족함을 확인하였다. 이득은 -5 dBi 이상을 충족했고, 반전력 빔폭 특성도 모두 60° 이상으로 설계 사양 이상의 결과를 갖는 것을 확인하였다.

교차편파 격리도는 저항이 적용되지 않은 시뮬레이션 결과는 설계 사양을 만족하지 못했지만, 저항이 적용된 시뮬레이션 및 측정결과는 모두 11.5 dB 이상으로 개선된 결과를 갖는 것을 확인했다. 특히 저대역에서 저항이 적용되지 않은 시뮬레이션

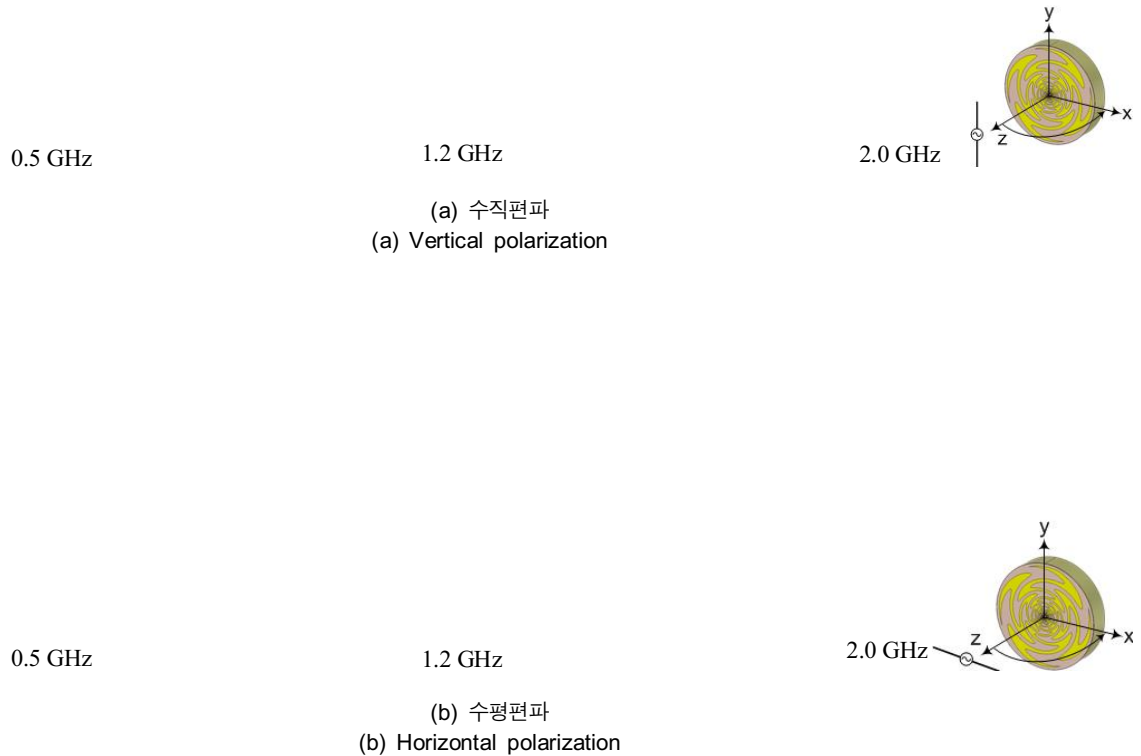


그림 12. 제작된 시뉴어스 안테나의 방위각 방향 방사패턴

Fig. 12. Radiation pattern of the fabricated sinuous antenna in azimuth plane.

표 6. 설계 및 제작된 시뉴어스 안테나의 특성

Table 6. Characteristics of the designed and fabricated sinuous antenna.

Characteristic	Design specification	Simulation		Measurement (with resistor)	
		without resistor	with resistor		
Polarization	Dual linear Pol.	Dual linear Pol.			
-5 dB bandwidth	4 : 1 (0.5 ~ 2.0 GHz)	> 4 : 1 (0.5 ~ 2.0 GHz)	> 4 : 1 (0.5 ~ 2.0 GHz)	> 4 : 1 (0.5 ~ 2.0 GHz)	
Gain (dBi)	> - 5	> - 0.3	> - 1.9	> - 4.5	
HP BW (°)	> 60	V-Pol. E	> 64.3	> 64.4	> 74.0
		V-Pol. H	> 63.1	> 64.9	> 60.4
		H-Pol. E	> 65.4	> 65.2	> 72.4
		H-Pol. H	> 64.5	> 64.7	> 60.2
XPI (dB)	> 10	> 4.6	> 11.5	> 11.5	
Size (mm)	< 265 (Diameter), < 125 (Height)	265(Diameter), 113.5(Height)			

결과대비 저항이 적용된 시뮬레이션 및 측정결과는 각각 평균 7.4 dB, 평균 6.3 dB 개선되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 0.5 ~ 2.0 GHz 주파수 대역에서 교차편파 격리도가 개선된 시뉴어스 안테나를 설계 및 제작하였다. 안테나는 이중선형편파 형성을 위해 4개의 암으로 구성하고, 클로펜스타인 테이퍼 구조의 광대역 마이크로스트립 발룬을 이용하여 급전부를 구성하였다. 안테나의 후방 캐비티는 장착공간의 물리적 제한을 고려하여 최적화된 2단 원통형 구조를 갖도록 설계했으며, 후방 캐비티 내부에는 후방 반사와 흡수와 임피던스 기판의 지지를 위해 허니컴 형태의 흡수체와 허니컴을 적용하였다. 설계 및 제작된 안테나의 전기적 성능은 시뮬레이션과 측정결과를 통해 설계 사양을 충족함을 확인하였다. 특히 기본형 설계시 저대역에서 설계 사양을 충족하지 못했던 교차편파 격리도 특성은 최외각 임피던스와 후방 캐비티 림 사이에 저항을 적

용하여 저대역 압패턴에서 발생하는 교차편파 성분을 저하시킴으로서 설계 사양 이상으로 개선하였다. 따라서 제작된 안테나는 광대역 편파 측정용 안테나로 사용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Mohinder Singh, *Electronic warfare*, New Delhi, India: Defence Scientific Information & Documentation Centre, 1988.
- [2] T. Holzheimer, "The low dispersion coaxial cavity as an ultra wideband antenna," in *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, Baltimore: MD, pp. 333-336, 2002.
- [3] T. H. Kim, C. S. Lee, and K. S. Lee, "Research of horn antenna for ELINT direction finding," in *13th Communication and Electronics Conference*, Daejeon, Korea, pp. 322-324, 2012.
- [4] R. H. DuHamel, Dual polarized sinuous antennas, US Patent Number 4,658,262, Apr. 1987.
- [5] J. H. Kim, H. K. Ryu, D. K. Ra, I. H. Han, B. J. Park, Y. J. Park, and K. S. Lee, "Dual polarized Sinuous antenna with improved cross polarization isolation," in *Conference on Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Seoul: Korea, pp. 66, 2014.
- [6] P. L. Carro Ceballos, J. de Mingo Sanz, "Analysis and synthesis of double-sided parallel-strip transitions," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 58, No. 2, pp. 372-380, Feb. 2010.
- [7] P. L. Carro J. de Mingo, P. Garcia-Ducar, and C. Sanchez, "Synthesis of hecken-tapered microstrip to parallel strip baluns for UHF frequency band," in *IEEE MTT-S Microwave symposium Digest*, Baltimore: MD, pp. 1-4, 2011.
- [8] H. S. Lee and T. H. Yoo, "A ultra-wideband two-arm self-complementary sinuous antenna," *The Journal of Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 26, No. 3, pp. 257-267, Mar. 2015.
- [9] A. Jafargholi and M. Kamyab, "A new approach for feeding sinuous antenna," *International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 65, No. 4, pp. 312-319, Apr. 2011.



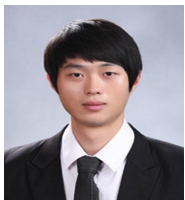
김 지 흥 (Jee-Heung Kim)

2009년 8월 : 한국항공대학교 항공전자 및 전자공학과 (공학사)
 2012년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
 2012년 3월 ~ 9월 : 한국항공대학교부설 항공전자연구소 연구원
 2012년 10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
 ※관심분야 : 초고주파 수신기, 안테나 및 레이돔, EMI 등



유 흥 균 (Hong-Kyun Ryu)

2005년 2월 : 목원대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2007년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2012년 8월 : 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
 2012년 10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
 ※관심분야 : 안테나 및 레이돔



채 명 호 (Myung-Ho Chae)

2012년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학사)
 2014년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2014년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
 ※관심분야 : 주파수 합성기, 광대역 수신기 등



김 정 훈 (Jung-Hoon Kim)

2010년 8월 : 한양대학교 전자전기제어 계측공학과 (공학박사)
2010년 9월 ~ 2012년 8월 : 한국산업기술기협원 위촉연구원
2012년 10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
※관심분야 : 초고주파 수신기, 주파수 합성기, EMI 등



박 범 준 (Beom-Jun Park)

1994년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2015년 8월 : 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
2001년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
※관심분야 : 초고주파 수신기, 주파수 합성기 등



박 영 주 (Young-Ju Park)

1993년 2월 : 성균관대학교 전기공학과 (공학사)
1997년 2월 : 성균관대학교 전기공학과 (공학석사)
2017년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
※관심분야 : 초고주파 소자 및 증폭기, 전자전용 광대역 안테나 등