

3D 프린팅 기술 적용 용이성을 위한 Ku-밴드 헬리컬 안테나 정합부 전기적 등가 변환 설계

Electrically Equivalent Model Design of a Ku-Band Helical Antenna Matching Section for Ease of 3D Printing Technology Use

한정운 · 김원교 · 신건영 · 박주민 · 장원석* · 윤익재

Jeongyun Han · Wonkyo Kim · Geonyeong Shin · Joomin Park · Wonsuk Chang* · Ick-Jae Yoon

요 약

본 논문에서는 3D 프린팅 기술을 활용한 수십 GHz 이상 주파수 대역에서의 안테나 제작 및 검증을 위해 Ku-밴드에서 동작하는 헬리컬 안테나를 설계, 제작하였다. 특히 금속 3D 프린팅 기술의 표면 거칠기로 인한 고주파에서의 도전을 감소를 개선하기 위한 방안으로써 면 형태의 정합 구조를 선 형태의 정합 구조로 등가화 할 수 있음을 보였다. 플라스틱과 금속 3D 프린팅 기술을 사용하여 Ku-밴드에서의 헬리컬 안테나 시작품을 제작, 측정하였다. 측정 결과, 접착을 위해 사용된 에폭시를 포함한 나선형 지지대의 정확한 물질 특성을 반영하지 못해 시뮬레이션에 비해 낮은 이득 특성을 얻었지만, 그 외 임피던스 특성 및 이득의 경향성은 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

In this study, we design and build a helical antenna operating at the Ku-band using a hybrid 3D printing technology. A non-uniform surface roughness can reduce the conductivity of printed metals. Therefore, through simulation and equations, we demonstrate that a triangular metallic matching section of a helical antenna can be equivalently replaced with a strip-line matching section. As the proposed antenna has fewer physically printed parts, the reduction in the conductivity of the printed metallic parts at high frequencies is avoided. The simulated results are verified experimentally. The impedance characteristics are well matched, whereas the absolute value of the gain is degraded. This might be owing to the non-exact expectation of the material characteristic of the immersed epoxy used for adhesion of the printed antenna part and connector in the simulation.

Key words: Helical Antenna, Ku Band, 3D Printing, Electrical Equivalence

I. 서 론

최근 5G 서비스의 개시 및 자율주행, 차량용 레이더에

서의 사용 주파수 대역폭 확장 요구 등과 함께 mmWave 대역에서의 소형, 고이득 안테나 설계 및 제작에 대한 수요가 증가하고 있다. 하지만 이 주파수 대역에서의 안테

「이 연구는 2018학년도 충남대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음(2018-1165-01).」

충남대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Chungnam National University)

*한국전기연구원 나노융합기술연구센터(Nano Hybrid Technology Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute)

· Manuscript received April 24, 2020 ; Revised June 9, 2020 ; Accepted July 3, 2020. (ID No. 20200424-037)

· Corresponding Author: Ick-Jae Yoon (e-mail: ijyoon@cnu.ac.kr)

나 및 RF 소자 시작품의 특성은 제작 오차, 소재 특성뿐 아니라, 압력, 장력, 온도 등의 사용 환경에 대해서도 민감하게 변화할 수 있다^[1]. 이를 극복하기 위한 방안으로써 초고주파 부품 설계시 전자파 외의 물리적인 특성을 고려할 수 있는 multi-physics 시뮬레이션 기법을 도입하거나, 새로운 제작 기법을 활용할 수 있는 설계 및 소재 특성에 대한 연구가 산업계, 학계의 주목을 받고 있다^{[2]~[4]}. 3D 프린팅 기술은 이 중 하나이며, 소재의 다양성, 공간 활용의 자유로움 및 제작 시간 단축 등의 특징으로 인해 전통적인 제작 방식을 대체할 수 있는 제작 기술로써 많은 주목을 받고 있다. 복잡한 나선형 구조로 인해 제작이 까다로운 전기적 소형 folded spherical helix(FSH) 다이폴 안테나의 경우^[5], 3D 프린팅 기술을 활용하여 기존 설계와 유사한 전기적 특성을 구현할 수 있음이 확인되었다^[6]. 또한 복잡한 구조의 제작 용이성을 높일 수 있는 3D 프린팅 기술의 장점을 활용한 소형 안테나 형상 역시 제안되었다^{[7],[8]}. 이들 구조는 3D 프린팅 기술이 아니었으면 샘플 제작을 통한 실험 검증이 어려웠을 것으로 판단된다.

다만 현재 3D 프린팅 기술 개발은 결과물의 강성, 유연성 등과 같은 물리적인 특성 개선에 집중되어 있으며, 초고주파 안테나, 부품 개발에 필요한 소재의 전도성, 유전손실 및 프린팅 해상도 등과 같은 전기적인 특성에 대한 연구는 상대적으로 깊이 있게 진행되지 않았다. 따라서 수십 GHz 주파수 대역 안테나 및 RF 소자 설계에서의 3D 프린팅 기술 활용은 여전히 제한적이라 할 수 있다. 뿐만 아니라, 스프레이 코팅 등의 도금 과정을 통해 얻어지는 도전율은 구리 덩어리(bulk copper)에 비해 20배 정도 낮고^[6], 선택적 도금 역시 절연 부분에 대한 마스크와 같은 추가 작업으로 인해 제작 시간이 길어지는 경향이 있다. 이와 같은 상황에서 3차원 구조 안테나의 임피던스 및 방사 특성을 유지하며, 그 형상을 선택적 도금에 적합하도록 변형한 연구 결과 또한 발표된 바 있다^[9].

본 논문에서는 금속과 플라스틱의 복합 3D 프린팅 기술을 활용하여 Ku-밴드에서의 헬리컬 안테나를 설계한다. 이때, 본 기술을 활용한 제작의 효용성을 높이기 위해 안테나 정합 부위에 대한 설계를 임피던스, 방사 패턴과 같은 전기적 특성 변화를 최소화하며 변형할 수 있음을 보인다. 또한 플라스틱 프레임의 제작과 선택적 도금의

일련 과정 없이 단일 공정을 통해 시작품 제작이 가능함을 보인다.

II. 본 문

2-1 헬리컬 안테나 설계

헬리컬 안테나는 축을 따라 나선형으로 감아 올라가는 도선으로 이루어져 있으며, 넓은 주파수 대역에서의 정합 특성을 갖고 있다. 또한 파장 대비 나선의 길이에 따라 축 모드(axial mode), 수직모드(normal mode)를 형성할 수 있고, 이는 각각 지향성, 무지향성 빔 패턴을 보인다. 그림 1은 금속 나선, 플라스틱 나선 지지대(supporter) 및 임피던스 정합부(matching section)로 구성되어 있는 축모드 Ku-밴드헬리컬 안테나의 구조를 보여준다. 지지대 상단의 원통 구조는 금속 압출식 3D 프린팅 기술을 활용하여 지지대 표면에 도선 부분을 프린팅시 본 지지대를 모터에 고정하기 위해 추가된 부분이다.

나선 지지대의 물질 특성은 유전율 측정 장비를 사용하여 3D 프린팅 샘플을 측정 후 $\epsilon_r=2.85$, $\tan\delta=0.0048$ 로 설정하였다. 그리고 그림 1과 같이 지지대 하단은 커넥터와 맞닿는 부분에 접착을 위한 에폭시가 스며드는 것을 감안하여 $\epsilon_r=4.4$, $\tan\delta=0.021$ 로 설정하였다. 또한 금속 압출식 프린터에서 지원되는 실버 나노입자를 활용한 실버 잉크($\sigma=2.16 \times 10^5$)의 물리적인 프린팅 해상도를 참고하여 나선형 도선의 단면은 직사각형 형태로 설계를 진행하였다(높이 $d=0.2$ mm, 폭 $t=0.05$ mm). 헬리컬 안테나의 접지면은 1λ (15 mm)의 지름을 갖는 원형 구리판과 임피던스 및 방사특성에 있어 큰 차이가 없는, 각 변의 길이가 0.85λ (12.8 mm)인 PKM-S03 커넥터로 대체하였다. 도선 간 간격 $g=3.4$ mm, 지지대의 반지름 $r=2.35$ mm, 지지대의 높이 $h=44.2$ mm이다. 마지막으로, 헬리컬 안테나의 넓은 주파수 대역폭을 만족하기 위한 정합 구조로써 그림 1(a) 삽입 그림에 보이는 바와 같이 점진적으로 폭이 좁아지는 삼각형 형태 스트립을 활용하였다^[10]. 그림 1(a)의 P 와 W 는 각각 삼각형 스트립이 차지하는 각도와 급전부와 맞닿는 스트립면의 높이를 나타내며, 임피던스 정합과 이득 특성을 고려하여 $P=135^\circ$, $W_{in}=1.3$ mm로 설정하였다. 본 논문에서의 모든 full-wave electromagnetic 시뮬

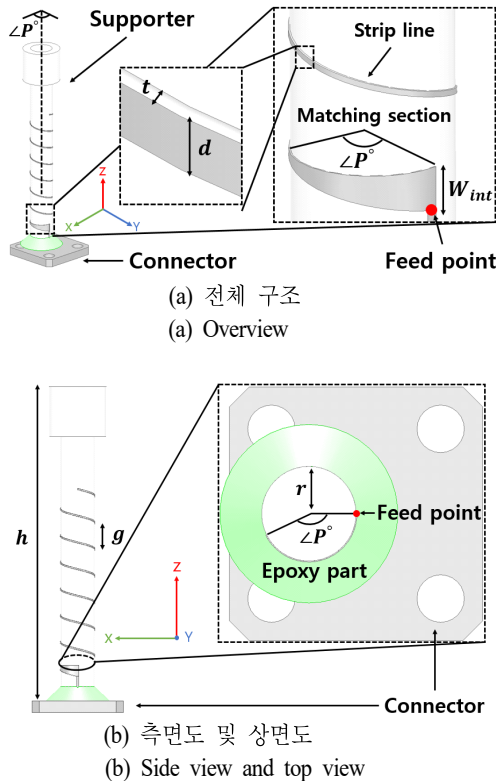


그림 1. 기준 헬리컬 안테나 설계
Fig. 1. Reference helical antenna design.

레이션은 Ansys사의 HFSS를 활용하였다.

그림 2에 파란 실선으로 그림 1에 제시된 헬리컬 안테나의 주파수에 따른 이득 및 임피던스 정합 특성을 나타

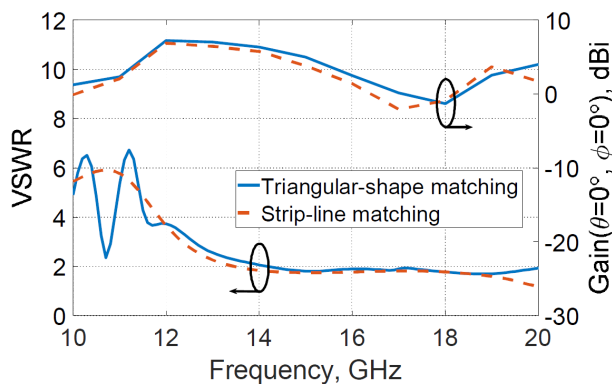


그림 2. 임피던스 정합 구조에 따른 헬리컬 안테나의 VSWR 및 gain 시뮬레이션 특성 비교
Fig. 2. Simulated VSWR and gain characteristics according to different shape of the matching sections.

표 1. 그림 1 헬리컬 안테나의 설계 변수에 따른 주파수 및 대역폭 특성

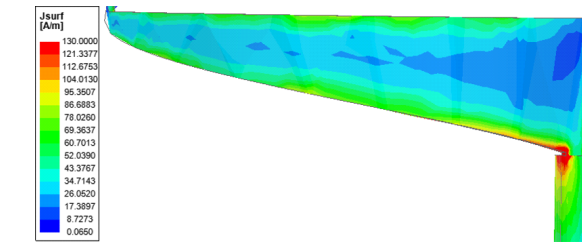
Table. 1. Parametric study results on VSWR and gain for the antenna design in Fig. 1.

ϵ_r	P [°]	W [mm]	Bandwidth ratio (VSWR)	Bandwidth ratio (gain)
1.00	90	1.3	N/A	1:1.31
1.00	90	1.8	N/A	1:1.21
1.00	135	1.3	N/A	1:1.68
1.00	135	1.8	N/A	1:1.32
2.85	90	1.3	1:1.21	1:1.25
2.85	90	1.8	1:1.11	1:1.19
2.85	135	1.3	1:1.77	1:1.34
2.85	135	1.8	1:1.19	1:1.27

내었다(triangular-shape matching). 안테나 이득 5 dBi 및 임피던스 정합 $VSWR < 2$ 를 기준으로 했을 때 이득 대역폭이 VSWR 대역폭에 비해 상대적으로 좁은 것을 확인할 수 있는데, 이는 나선형 지지대 유전율의 영향으로 헬리컬 안테나의 이득 대역폭이 감소하기 때문이다. 표 1을 통해 지지대의 상대유전율을 1로 변경하였을 경우 시뮬레이션 이득 대역폭이 5 dBi 이득값을 기준으로 1.34:1에서 1.68:1로 늘어나는 것을 확인할 수 있다.

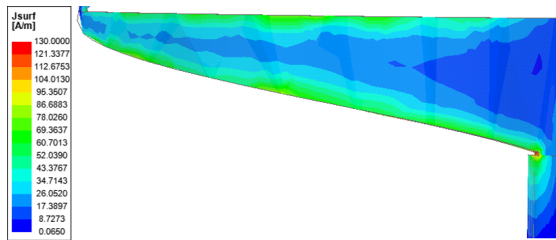
2.2 임피던스 정합 구조 변환

10 GHz 이상의 주파수 대역에서 3D 프린팅 시작품의 금속 표면 거칠기는 도전을 저하의 원인이 될 수 있다^[11]. 앞서 정합 구조로 활용한 삼각형 스트립의 경우, 제작 시 상대적으로 넓은 면이 금속으로 프린트 되어야 하고, 이에 따른 표면 거칠기의 증가는 정합 및 방사 특성의 열화를 초래할 수 있다^{[12]~[14]}. 10 GHz 이상의 주파수 대역에서의 금속 표면 거칠기와 산화에 따른 전기적 성능 저하를 해소하기 위한 방안으로써 금속면을 코팅하는 방안이 제시되고 있으나^[15], 많은 비용과 추가적인 공정을 필요로 한다. 따라서 본 절에서는 금속 압출식 3D 프린팅 기술의 물리적 해상도에 따른 표면 거칠기를 줄이기 위한 방안으로써 면 형태의 삼각형 스트립 정합 구조에 대하여 상대적으로 면적이 작은 선 형태로의 구조 변경을 진행한



(a) 14 GHz에서의 전류 분포

(a) Current distribution at 14 GHz



(b) 18 GHz에서의 전류 분포

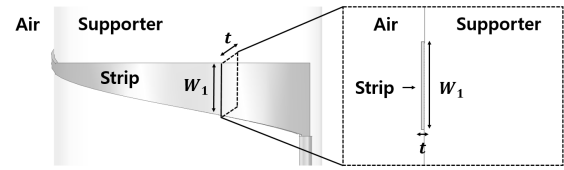
(b) Current distribution at 18 GHz

그림 3. 삼각형 매칭 스트립에서의 전류 분포

Fig. 3. Current distribution on the triangular-shape matching section.

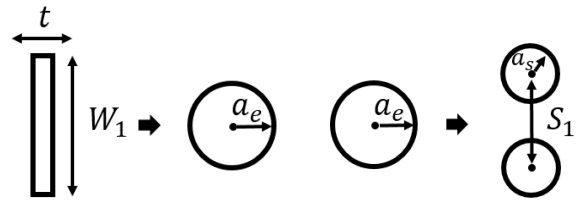
다. 그림 3은 그림 1안테나의 14 GHz와 18 GHz에서의 삼각형 매칭 스트립에 대한 전류 분포를 보여준다. 전류가 삼각형 정합 구조의 외곽에 집중되어 있고, 내부에는 상대적으로 적은 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 면 형태의 삼각형 스트립의 전류 밀도가 높은 부분만 추출하여 선 형태의 정합 구조로 등가화 할 수 있다.

이와 같은 변환 과정의 타당성은 수식을 통한 해당 스트립 구조의 전기적 등가화 과정을 통해서도 보일 수 있다. 그림 4에 본 논문에서 진행한 삼각형 매칭 스트립에 대한 전기적인 등가화 과정을 표현하였다^{[16][17]}. 그림 4(a)는 삼각형 매칭 스트립의 폭이 1 mm인 위치에서의 단면을 나타낸 것으로 W_1 과 t 는 각각 단면의 높이와 앞에서 언급된 직사각형 스트립의 폭이다. 따라서 $W_1=1$ mm, $t=0.05$ mm이다. 우선, 식 (1)을 통해 그림 4(a)의 사각형 형태의 단면을 그림 4(b)와 같이 원 형태의 단면으로 전기적 등가화를 할 수 있다^[17]. 이는 높은 주파수에서의 전류 분포가 낮은 penetration depth로 인해 대부분 도선의 표면에 집중되어 분포하기 때문이다^[7]. 그리고 식 (2)를



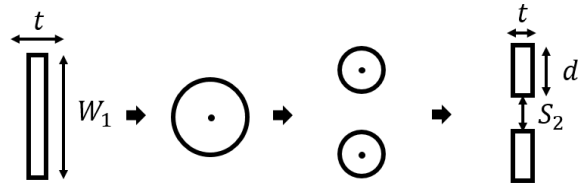
(a) 삼각형 매칭 스트립의 단면

(a) Cross sectional view of the triangular-shape strip matching section



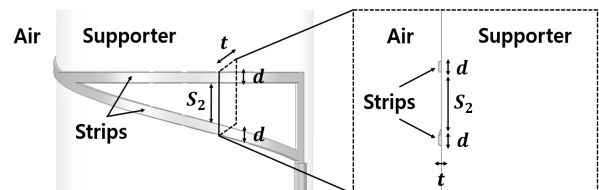
(b) 사각형 스트립의 등가화
(b) Electrical equivalence of the rectangle strip

(c) 원형 스트립의 등가화
(c) Electrical equivalence of the circular strip



(d) 삼각형 스트립의 전기적인 등가화 전체 과정 (단면)

(d) Electrical equivalence procedure of the triangular-shape strip matching section (cross sectional view)



(e) 전기적으로 등가화된 스트립 선로의 단면

(e) Cross sectional view of the strip-line matching section

그림 4. 전기적인 등가화 과정

Fig. 4. Electrical equivalent process.

통해 그림 4(b)에서 구한 원 형태의 단면을 그림 4(c)와 같이 간격 $S_1=1.06$ mm를 갖는 두 원 형태의 단면으로 전기적인 등가화를 이어갈 수 있다. 이와 같이 면 형태의 스트립 단면을 두 개의 스트립으로 이루어진 단면으로 전기

적으로 등가화 하는 전체 과정을 그림 4(d)에 도식화하였다. 본 등가화 과정을 식 (1), 식 (2)으로 계산한 결과, 두 개의 사각형으로 이루어진 단면의 변수들은 $t=0.05$ mm, $d=0.2$ mm, $S_2=0.9$ mm가 된다(그림 4(d)). 여기서 t 와 d 는 앞에서 설명했던 직사각형 스트립의 폭과 높이와 동일하기 때문에 W_1 에 따라 두 개의 사각형의 간격 S_2 가 정해짐을 알 수 있다. 이와 같이 수식에 의한 결과를 토대로 매칭단의 변환 설계를 진행하였다. 그림 4(e)는 이와 같은 등가화 과정을 통해 얻어낸 스트립 선로 매칭단을 보여준다.

$$a_e = 0.25 W_1 + 0.34 t \quad (1)$$

$$\ln a_e = \frac{\ln a_s S_1}{2} \quad (2)$$

그림 5는 표면 거칠기를 줄이기 위해 삼각형 매칭 스트립을 두 개의 매칭 스트립 라인으로 이루어진 선 형태의 정합 구조로 변경한 안테나 최종 형상을 나타낸다. 기존 설계의 W_{in} 은 두 스트립 라인의 단면 사이의 간격($S_2=0.9$ mm)에 맞춰 미세 조정된 결과 $W_{fin}=1.6$ mm로 설정되었다. 이 외의 설계 변수는 그림 1의 안테나와 동일하다. 그림 2에서 보이듯, 정합단 변환 설계를 거친 그림 5의 안테나는 주파수에 따른 VSWR 및 이득에 있어 그림 1의 안테나와 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있다. 하지만 17 GHz에서 정합단 변환 설계를 거친 그림 5의 안테나가 그림 1의 안테나에 비해 최대 2.2 dB 만큼 이득이 낮을

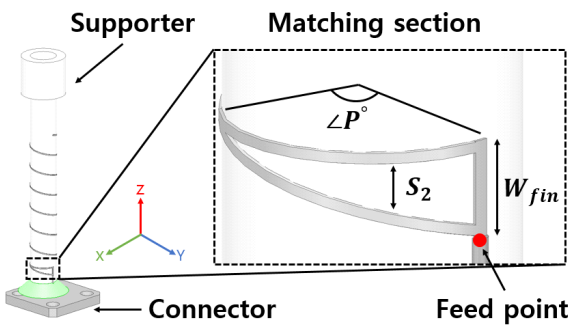


그림 5. 두 개의 매칭 스트립 라인으로 이루어진 임피던스 정합 구조를 사용한 헬리컬 안테나

Fig. 5. Helical antenna with strip-line impedance matching section.

것을 확인할 수 있다. 이러한 이득 크기의 차이는 정합 구조의 변경으로 인한 방사 효율과 지향성의 감소로 인해 발생한다. 그림 6에 보이듯이, 그림 1과 그림 5의 안테나는 17 GHz에서 각각 84 %, 70 %의 방사 효율을 보이며, 이는 0.8 dB의 이득 차이로 환산된다. 이는 금속 면으로 이루어진 triangular-shape matching 구조와 달리 두 개의 strip-line으로 구성된 matching 구조에서 금속이 제거된 면적만큼 늘어난 나선형 지지대로의 전류누설을 원인으로 생각할 수 있다. 이와 함께 triangular-shape matching은 면 전체를 활용하는 정합 방식이기 때문에 선 형태의 strip-line matching에 비해 전류가 분포되는 면적이 넓은데, 이로부터 그림 6에 보이듯 1.4 dB의 추가적인 지향성 차이가 발생한 것으로 판단한다. 비록 정합 구조 변경 후에 특정 주파수 이상에서 약간의 이득 감소가 초래되었지만, Ku-band에서 3D 프린팅 및 도금 기술을 활용한 안테나 시작품에서 표면 거칠기에 따른 이득 저하가 있음을 보았을 때^{[12]~[14]}, 프린팅 금속의 사용면적을 물리적으로 줄이는 것은 실제 제작 과정에서 발생 가능한 성능 열화를 최소화하는 효과적인 방안이 될 수 있다. 또한 표면 거칠기의 비균등성 때문에 계산과 시뮬레이션을 통해 이러한 특성 열화의 정도를 정확하게 파악하기에는 어려움이 있기 때문에^[18], 정합단 변환 설계로 인해 발생하는 이득 특성의 저하보다는 물리적인 표면 거칠기 면적을 줄임으로써 얻는 제작상의 이점이 클 수 있을 것으로 판단한다.

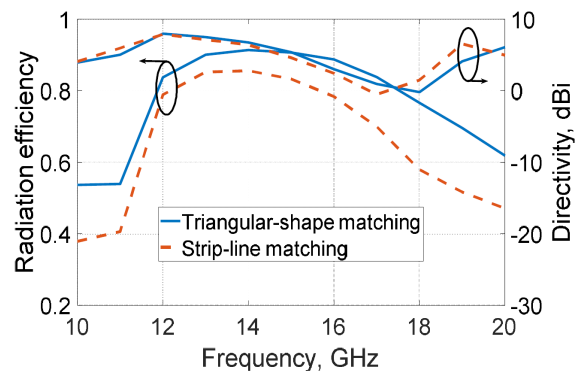


그림 6. 임피던스 정합 구조에 따른 헬리컬 안테나의 방사 효율 및 지향성 시뮬레이션 특성 비교

Fig. 6. Simulated radiation efficiency and directivity according to the shape of the matching sections.

2-3 안테나 제작 및 실험 검증

시작품 제작 시, 멀티젯(multi-jet) 방식의 Project MJP-2500 프린터를 사용하여 도선을 지지하기 위한 나선형 지지대를 제작하였다. 이후 한국전기연구원에서 자체 제작한 금속 압출식 프린터를 사용하여 그림 7과 같이 지지대 표면에 실버 잉크로 이루어진 도선을 프린팅하였다. 이를 활용하여 앞선 절에서 제안한 두 개의 스트립 라인으로 이루어진 정합 구조를 갖는 헬리컬 안테나 시작품을 제작하였다. 그림 8은 제작된 헬리컬 안테나의 시작품을 보여준다.

그림 9에 시뮬레이션과 측정값의 주파수에 따른 VSWR 및 정규화된 이득(normalized gain)을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 VSWR에 대한 시뮬레이션값과 측정값이 Ku-밴드에서 잘 일치함을 확인할 수 있

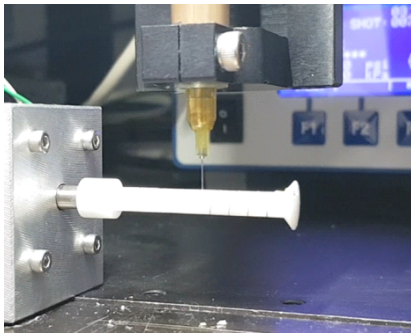


그림 7. 금속 압출식 프린터를 사용한 나선형 도선의 제작 과정
Fig. 7. Fabrication of the spiral structure using metal-extrusion 3D printer..

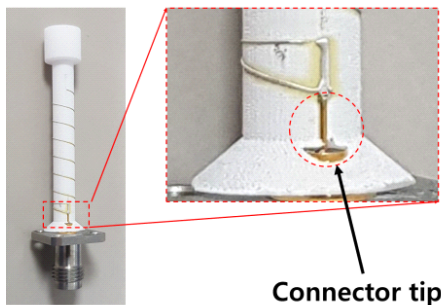


그림 8. 헬리컬 안테나 시작품 사진
Fig. 8. Photo of the fabricated prototype.

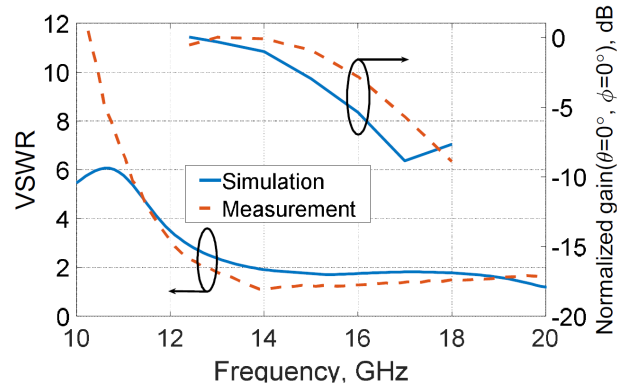


그림 9. 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 9. Simulated and measured results.

다. 이득의 경우, 측정값과 시뮬레이션 결과값의 경향성은 유사하지만, 크기에 있어서 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션 설계시 접지면과 나선형 지지대의 접착을 위한 에폭시가 그림 5와 같이 하단의 원뿔대 모양의 지지대만큼 차지하도록 설정하였으나, 실제 에폭시가 나선형 지지대에 스며들어 있는 정도를 정확하게 반영하지 못해 생긴 물질 특성의 차이에서 발생한 것으로 판단한다.

III. 결 론

본 논문에서는 일련의 3D 프린팅 기술을 활용하여 Ku-밴드에서 동작하는 헬리컬 안테나를 설계, 제작할 수 있음을 보였다. 특히 도선을 저하를 초래하는 매칭단의 표면 거칠기를 줄이기 위해 면 형태의 매칭단을 두 개의 매칭 스트립 라인으로 변환하는 것을 제안하여, Ku-band에서 3D 프린팅 기술의 활용도를 높이기 위해 설계 구조의 변형이 가능함을 보였다. 제안된 변환 과정은 수식과 전류 분포 시뮬레이션을 통해 검증되었다. 최종 프로토타입 측정 결과, 임피던스는 시뮬레이션 예측값과 유사하였으나, 이득 특성의 절대값은 낮게 측정됨을 확인하였다. 이는 제작시 사용된 에폭시의 침습 정도를 정확히 파악하지 못함에 따라 나타난 결과로 판단한다. 이는 면에서 선으로의 금속 프린팅 면적을 줄이는 정합단 구조 변경에서 발생 가능한 약간의 이득 저하에 대한 개선 방법과 함께 향후 연구를 통해 보완되어야 할 부분이다.

References

- [1] A. Schiessl, S. S. Ahmed, A. Genghammer, and L. P. Schmidt, "Temperature sensitivity of large digital- beam-forming multistatic mm-wave imaging systems," in *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Seattle, WA, vol. 2013, pp. 1-3.
- [2] M. Henry, C. E. Free, B. S. Izqueirdo, J. Batchelor, and P. Young, "Millimeter wave substrate integrated waveguide antennas: Design and fabrication analysis," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 32, no. 1, pp. 93-100, Feb. 2009.
- [3] A. Kawakami, S. Saito, and M. Hyodo, "Fabrication of nano-antennas for superconducting infrared detectors," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 632-635, Jun. 2011.
- [4] H. R. Khaleel, "Design and fabrication of compact inkjet printed antennas for integration within flexible and wearable electronics," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 4, no. 10, pp. 1722-1728, Oct. 2014.
- [5] S. R. Best, "The radiation properties of electrically small folded spherical helix antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 4, pp. 953-960, Apr. 2004.
- [6] O. S. Kim, "Rapid prototyping of electrically small spherical wire antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3839-3842, Jul. 2014.
- [7] M. Kong, G. Shin, S. H. Lee, and I.-J. Yoon, "Electrically small folded spherical helix antennas using copper strips and 3D printing technology," *Electronics Letters*, vol. 52, no. 12, pp. 994-996, Jun. 2016.
- [8] M. Kong, S. H. Lee, G. Shin, J. Nah, and I.-J. Yoon, "Investigation of 3-D printed, electrically small, and thin magnetic dipole antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 4, pp. 654-657, Apr. 2018.
- [9] S. M. Radha, G. Shin, P. Park, and I.-J. Yoon, "Realization of electrically small, low-profile quasi-isotropic antenna using 3D printing technology," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 27067-27073, Feb. 2020.
- [10] V. Wongpaibool, "Improved axial-mode-helical-antenna impedance matching utilizing triangular copper strip for 2.4-GHz WLAN," in *2008 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Crete Island, Aug. 2008, pp. 869-873.
- [11] G. Gold, K. Helmreich, "A physical surface roughness model and its applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 10, pp. 3720-3732, Oct. 2017.
- [12] C. R. Garcia, R. C. Rumpf, H. H. Tsang, and J. H. Barton, "Effects of extreme surface roughness on 3D printed horn antenna," *Electronics Letters*, vol. 49, no. 12, pp. 734-736, Jun. 2013.
- [13] M. M. Honari, R. Mirzavand, H. Saghlatoon, and P. Mousavi, "Investigation of the 3D printing roughness effect on the performance of a dielectric rod antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 11, pp. 2075-2079, Nov. 2018.
- [14] G. L. Huang, S. G. Zhou, T. H. Chio, and T. S. Yeo, "Fabrication of a high-efficiency waveguide antenna array via direct metal laser sintering," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 622-625, 2015.
- [15] E. Usta, N. T. Tokan, "Effects of surface finish material on millimeter-wave antenna performance," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 9, no. 5, pp. 815-821, May 2019.
- [16] S. V. Savić, M. M. Ilić, and A. R. Djordjević, "Design of internal wire-based impedance matching of helical antennas using an equivalent thin-wire model," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 12, p. 7365793, 2017.
- [17] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 504-506, 2016.
- [18] S. P. Morgan Jr., "Effect of surface roughness on eddy current losses at microwave frequencies," *Journal of Applied Physics*, vol. 20, pp. 352-362, 1949.

한 정 윤 [충남대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-4800-5233>



2014년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 학사과정
[주 관심분야] 안테나

박 주 민 [충남대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-3127-3012>



2016년 2월: 공주대학교 전파공학과 (공학사)
2019년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 석사과정
[주 관심분야] 안테나, EMI/EMC

김 원 교 [충남대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3748-9562>



2017년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 학사과정
[주 관심분야] 안테나, EMI/EMC

장 원 석 [한국전기연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6497-0642>



1997년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 8월: 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
2018년 8월: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 (공학박사)
1999년 9월~현재: 한국전기연구원 책임연구원
[주 관심분야] 3D 프린팅, 3D 프린팅 RF 소자, EMI/EMC

신 건 영 [충남대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5161-8685>



2017년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2019년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학석사)
2019년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 안테나, 초고주파 회로, 전자기 이론

윤 익 재 [충남대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9623-2612>



2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
2005년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학석사)
2012년 8월: University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2005년 7월~2008년 8월: 삼성종합기술원 연구원
2012년 9월~2013년 12월: Technical University of Denmark 전기공학과 Electromagnetic Systems group 박사후연구원
2014년 1월~2014년 8월: Technical University of Denmark 전기공학과 조교수
2014년 9월~현재: 충남대학교 전기공학과 부교수
[주 관심분야] 안테나, 초고주파회로, EMI/EMC