

## 종이접기와 키리가미 이론에 기반한 3차원 T-자형 다이폴 안테나 설계

### Design of a 3D T-Shaped Dipole Antenna Inspired by Origami and Kirigami Theory

김도현 · 김경득 · 정현민 · 최우혁 · 하노겸 · 황명하 · 김상길\*

Dohyun Kim · Gyoungdeuk Kim · Hyunmin Jeong · Woohyeok Choi ·  
Nohgyeom Ha · Myeongha Hwang · Sangkil Kim\*

#### 요 약

본 논문은 종이접기와 키리가미 이론을 응용하여 단일 평면기판에 접을 수 있는 3차원 T-자형 다이폴 안테나를 설계했다. 종이접기와 키리가미 기술의 2차원 공간을 3차원으로 매핑하는 이론을 기반으로 하여 Lamina Emergent Torsional (LET) 관절 구조를 0.5 mm 두께의 FR4 기판에 적용하였으며, 단일 기판에 인쇄된 T-자형 다이폴 안테나를 접어서 세울 수 있도록 설계했다. 제안하는 T-자형 다이폴 안테나는 마이크로스트립 전송선로의 전기적 커플링을 통해서 급전되어 20 %의 대역폭(2.7~3.3 GHz)을 가지며, 상대적으로 높은 이득(6.5 dBi)을 가진다.

#### Abstract

In this study, the design of a 3D foldable T-shaped dipole antenna inspired by origami and kirigami theory is presented. The origami- and kirigami-inspired techniques map 2D to 3D space. Moreover, the lamina emergent torsional (LET) joint is designed to fold the planar structure. The proposed antenna, including the LET joint, is printed on a planar 0.5 mm thick FR4 substrate. The proposed antenna is fed by a capacitively coupled microstrip line to achieve a 20 % fractional bandwidth (2.7~3.3 GHz), with a measured antenna gain value of 6.5 dBi.

Key words: Origami, Kirigami, 3D Antenna, T-Shaped Dipole Antenna, LET Joint

#### I. 서 론

최근 6세대(6G) 통신을 비롯한 차세대 통신 기술의 핵심 기술로서 위성 통신 시스템이 주목받고 있다. 인공위성이 노출되는 극한의 우주 환경에 적용할 수 있으면서

도 신뢰도 높은 무선 통신 시스템을 설계하는 일은 매우 중요한 일이다<sup>[1],[2]</sup>. 관측이나 정찰 목적이 아니라, 지상 통신 네트워크의 확장과 유연성 증대라는 목적을 위해서는 정지궤도 위성(geostationary orbit, GEO)보다 저궤도 위성(low earth orbit, LEO)이 궤도에 올리기 위한 비용과 기

「본 연구는 2020학년도 부산대학교 BK21 FOUR 대학원혁신지원사업에 의한 연구임.」

부산대학교 전자공학과 (Department of Electronics Engineering, Pusan National University)

· Manuscript received June 22, 2021 ; Revised July 18, 2021 ; Accepted July 27, 2021. (ID No. 20210622-064)

· Corresponding Author: Sangkil Kim (e-mail: ksangkil3@pusan.ac.kr)

술적 도전성을 생각했을 때 적절한 방안으로 주목을 받고 있다. LEO 위성 기술 중에서도 CubeSat 기술은 경제적으로 우주 환경 속에서 통신, 감지, 관측 등 다양한 기술을 실험할 수 있어서 학계에서 많은 주목을 받고 있다.

CubeSat 기술은 LEO 위성 기술을 위한 하나의 플랫폼이며, 위성 연구를 위해서 학계와 산업계에서 널리 사용되고 있다. CubeSat의 크기는 표준화되어 있으며, 표준화된 기본 단위 부피의 크기(unit, U)는  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ 로 정해져 있다. CubeSat의 비교적 작은 부피 때문에 좁은 공간에 안정적이고 신뢰도 높은 통신 시스템을 탑재하는 것은 성공적인 CubeSat 설계를 위해서 매우 중요한 일이며, 주로 연구를 위한 목적으로 사용되기 때문에 ISM(industry-science-medical) 주파수 대역을 많이 사용한다. 제한된 공간과 비교적 낮은 송신 전력으로 200 km 이상의 장거리를 통신해야만 하는 CubeSat에는 높은 이득의 안테나가 필수이며, 높은 안테나 이득을 얻기 위해서는 안테나의 크기가 필연적으로 커지기 마련이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 최근 CubeSat 안테나에 관한 연구가 활발히 진행되었으며, 제한된 공간에 물리적으로 큰 부피의 안테나를 탑재하고 전개하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되었다<sup>[3]~[5]</sup>. 위성에 탑재되는 안테나의 물리적 크기를 효율적으로 관리하기 위해서 종이접기(origami)와 키리가미(Kirigami) 이론이 많이 적용되었다.

종이접기와 키리가미 이론은 수학 분야에서 많이 연구됐으며, 그 근본은 2차원 공간을 3차원 공간으로 변환(transformation) 혹은 매핑(mapping) 하는 것에 있다<sup>[6],[7]</sup>. 종이접기와 키리가미 이론은 평면 구조를 효율적으로 3차원 구조로 변형하거나 역으로 작용하는 기계적 방법(mechanism)을 설계하기 위한 훌륭한 이론적 근거이며, 제한된 공간에 최대한 많은 기능과 장치를 적재해야 하는 위성 분야에 매우 중요한 기술로 대두되었다. 이러한 공간 효율 극대화 특성 덕분에 일찍이 종이접기와 키리가미 기술은 태양광 패널이나 접시 반사판 안테나를 접거나 전개할 때 많이 사용됐다. 근래에는 안테나의 동작 모드를 전환하거나 배열 안테나의 방사 패턴을 조절하기 위해서도 사용되고 있다<sup>[8],[9]</sup>.

본 논문에서는 단일 평면 PCB(printed circuit board)에 인쇄된 다이폴 안테나를 종이접기와 키리가미 이론에 근

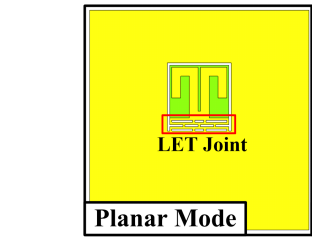
거하여 접을 수 있도록 설계한 안테나를 제안한다. 우주 공간에서도 사용할 수 있는 0.5 mm 두께의 FR4 PCB 공정을 활용하여 평면 다이폴 안테나를 설계하였으며, Lamina Emergent Torsional(LET) 관절을 사용하여 평면 구조를 3차원 구조로 변형할 수 있도록 설계되었다. 안테나의 접지판 크기를 CubeSat의 단위 크기에 맞춰서 설계했기 때문에 손쉽게 CubeSat과 통합될 수 있다. 반사 계수( $|S_{11}|$ ), 이득(gain), 방사 패턴과 같은 안테나 성능지표는 모두 무반향실(anechoic chamber)에서 측정되었다.

안테나를 접어서 위성에 탑재하고 정상 궤도에 진입한 후 우주 환경에서 활용하기 위해서는 안테나를 전개하기 위한 별도의 방안이 필요하다. 이를 위해서 기계·항공분야에서 많은 연구가 보고되었으며, 기체를 이용한 팽창, 기관의 장력을 이용한 전개, 우산과 같이 탄성이 있는 지지대(spoke)를 활용한 전개 등 많은 구조가 연구되었다<sup>[10]~[12]</sup>. 본 논문에서 소개된 안테나는 경성이 높은 FR4 기판에 기계적 피로(mechanical stress)를 효율적으로 분산시키기 위한 기계적 관절구조(LET joint)를 사용했기 때문에, 안테나에 지지대가 단단히 고정되어 서보모터와 같은 외부 동력원에 의해서 제어되는 위성 시스템을 상정하였다<sup>[13]</sup>. 지지대는 수직으로 꺾여야 하므로 탄성이 있어야 하며, 전파 방사에 영향을 최소한으로 주기 위해서 유전체로 제작되어야 한다. 키리가미 원리에 따라서 안테나가 전개된 곳은 비어 있기 때문에 전개를 위한 기계장치의 설치가 용이하다.

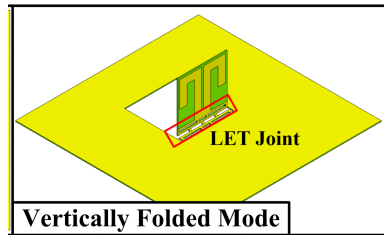
## II. 안테나 설계

### 2-1 제안하는 T-자형 다이폴 안테나 구조

제안하는 안테나는 그림 1(a)와 같이 하나의 기관에 인쇄되어 LET 관절구조를 활용하여 설계되었으며, 안테나의 동작을 위해서는 그림 1(b)와 같이 수직으로 접어서 사용하게 된다. 제안하는 안테나는 0.5 mm 두께의 일반적인 FR4 기판에 제작되었으며, 사용한 FR4 기판의 비유전율( $\epsilon$ )과 손실( $\tan \delta$ )은 각각 4.4와 0.025이다. 그림 1에서 보여주는 접힘 동작은 종이접기와 키리가미 이론에 기반을 둔 것이며, 연성이 낮고 접히지 않는 단단한 FR4 기판 소재에 기계적 부하(mechanical stress)를 분산하는



(a) 평면형태  
(a) Planar mode and



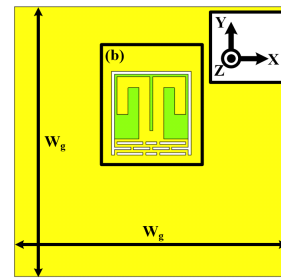
(b) 수직형태  
(b) Vertical mode

그림 1. Lamina Emergent Torsional(LET) 관절 구조를 이용한 종이접기 및 키리가미 이론의 적용

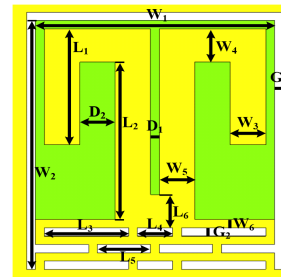
Fig. 1. Implementation of origami and kirigami theory using the Lamina Emergent Torsional(LET) joint.

LET 관절구조를 적용하여 기계적 운동성을 확보했다.

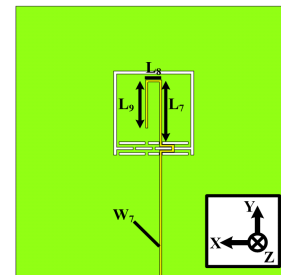
본 논문에서 설계된 T-자형 다이폴 안테나의 자세한 구조는 그림 2와 표 I에 정리되어 있다. 노란색은 동박(두께:  $16 \mu\text{m}$ )이며, 초록색은 FR4 기판을 나타낸다. 안테나 접지판의 크기( $W_g$ )는  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 이며, T-자형 다이폴 안테나는  $27 \times 27 \text{ mm}^2$ ( $W_1 \times W_1$ ) 안에 들어갈 수 있도록 설계되었다(그림 2(a)). T-자형 다이폴 안테나의 접지판은 안테나와 같은 평면 위에 인쇄되어 있으며(그림 2(a)), 뒷면에는 마이크로스트립 전송선로와 급전 회로가 인쇄되었다(그림 2(c)). LET 관절은 3층의 격자 모양으로 설계되어 있으며, 가로 방향( $x$ -축)으로 길고 수직 방향( $y$ -축)으로는 짧게 설계되었다(그림 2(b)). 안테나의 급전 구조는 뒷면에 인쇄되어 있으며, T-자형 다이폴 안테나의 중앙을 따라서 배치되었다. 정전식 커플링을 통해서 다이폴 안테나에 급전되며, 전송선로의 폭( $W$ )은  $0.9 \text{ mm}$ 로 임피던스는  $50 \Omega$ 이다(그림 2(c)). 제안하는 안테나가 접히게 되면  $z$ -축 방향으로 안테나가 향하게 되며, 편파는  $x$ -축 선형 편파를 가진다.



(a) 앞면  
(a) Front side



(b) LET 관절을 포함한 안테나  
(b) Antenna with the LET joint



(c) 뒷면  
(c) Rear side

그림 2. 제안하는 T-자형 다이폴 안테나

Fig. 2. Proposed T-shaped dipole antenna.

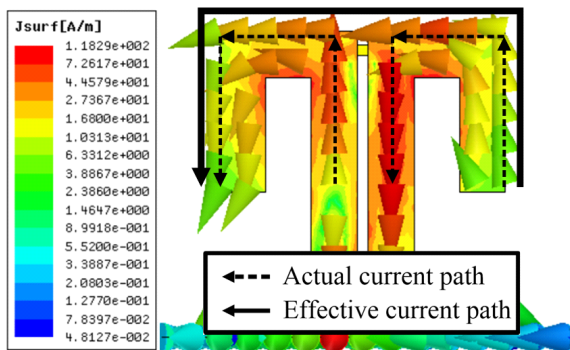
표 1. 안테나 설계 변수 (mm)

Table 1. Antenna design parameters in mm.

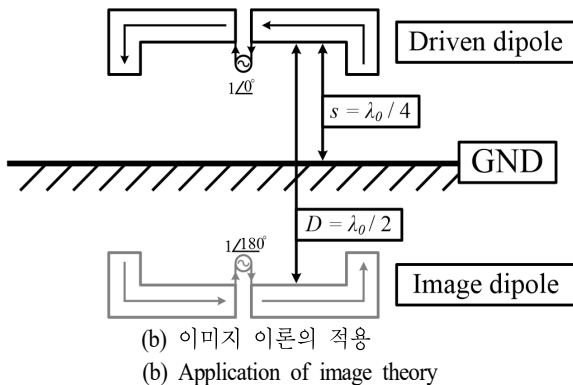
$W_g$	100	$W_1$	27	$W_2$	30	$W_3$	4
$W_4$	4	$W_5$	4	$W_6$	1	$W_7$	0.9
$L_1$	14	$L_2$	19	$L_3$	9.5	$L_4$	4
$L_5$	6	$L_6$	4	$L_7$	22.9	$L_8$	5.9
$L_9$	17.8	$D_1$	1	$D_2$	4	$G_1$	1
$G_2$	1						

## 2-2 안테나 동작 원리

제안하는 안테나는 넓은 접지판 위에 놓인 다이폴 안테나로 생각할 수 있다. 다이폴 안테나와 접지판의 거리는 약  $\lambda_0/4$  ( $\sim 25$  mm)이기 때문에 접지판에 반사된 전자기파는 보강 간섭을 일으켜서 안테나 이득이 일반적인 다이폴 안테나의 이득(2.15 dBi) 보다 높은 이득을 가지게 된다. 안테나의 자세한 동작 원리는 그림 3에 나타난 전류 분포와 이미지 이론을 통해서 살펴볼 수 있다. 3 GHz에서 T-자형 다이폴 안테나가 가지는 전류 분포는 일반적인 다이폴 안테나의 전류 분포와 일치한다(그림 3(a)). 가운데 위치한 마이크로 스트립라인의 길이는 T-자형 다이폴에 차동 모드(differential mode) 신호를 급전하기 위해서 개방 스티브(open stub)의 길이( $L_0$ )를 조절하여 설계하



(a) 3 GHz에서의 T-자형 다이폴 안테나의 전류 분포  
(a) Current distribution of the proposed T-shaped antenna at 3 GHz



(b) 이미지 이론의 적용  
(b) Application of image theory

그림 3. 제안하는 안테나의 동작 원리  
Fig. 3. Operation principle of the proposed antenna.

였다. 다이폴 안테나로 급전되는 전류가 차동 모드임을 확인할 수 있으며, 전류가 흐르는 유효 경로(effective current path)는 3 GHz의 반파장 ( $\lambda_0/2$ )과 일치함을 볼 수 있다.

T-자형 다이폴 안테나의 방사패턴(radiation pattern)과 이득(gain)은 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 이미지 이론(image theory)을 사용하여 설명할 수 있다. 다이폴 안테나를 급전하는 차동 마이크로 스트립 전송선로를 제외하면, 넓은 접지판에 수직으로  $\lambda_0/4$  떨어진 지점에 다이폴 안테나가 놓여 있는 것과 같다. 이미지 이론을 적용하여 접지판을 제거하면, 2개의 다이폴 안테나가 1x2 배열을 이루고 위상이  $180^\circ$  차이 나는 상태로 동작하는 것을 볼 수 있다. 이러한 구조는 널리 알려진 다이폴 안테나 배열이며, 식 (1)과 같은 방사 패턴을 가진다.

$$F(\theta, \phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin(\theta) \cos(\phi)\right)}{\sqrt{1 - \sin^2\theta \cos^2\phi}} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right) \quad (1)$$

이때, 안테나의 지향성(directivity, D)는 정의에 의해서  $D = 4\pi/\Omega_A$ 로 표현될 수 있으며, 이때  $\Omega_A$ 는 식 (1)을 적분하여 얻을 수 있는 입체각(solid angle)이다. 이론상으로 얻어지는 T-자형 다이폴 안테나의 지향성은 7.5 dB이며, 안테나의 방사 효율과 FR4 기판 손실을 고려하면 이론치보다 조금 낮은 안테나 이득을 예상할 수 있다. 실제 측정된 안테나 이득과 방사 패턴은 후에 기술할 2-4 안테나 측정 항목에서 확인할 수 있으며, 이론적으로 계산된 패턴과 이득과 매우 유사한 값을 가진다.

## 2-3 종이접기 및 키리가미 이론과 Lamina Emergent Torsional (LET) 관절

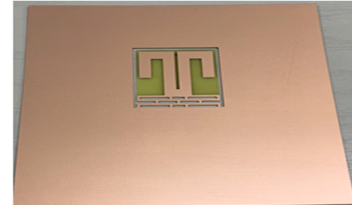
종이접기와 키리가미 기술의 수학적 기작은 2차원 실수 공간 ( $R^2$ )을 3차원 실수 공간 ( $R^3$ )으로 매핑하는 것이다. 예를 들어서, 평평한 2차원 공간에 놓인 종이를 접는 다거나 오려서 회전시킨다면 이는 모두 공간 변환 행렬로 표현할 수 있다. 예를 들어, 2차원 공간에 있는 평면  $A(x, y)$ 을 3차원 공간으로 함수  $u(\cdot)$ 를 통해서 매핑한다면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$u(\cdot) : A \subset R^2 \rightarrow R^3 \quad (2)$$

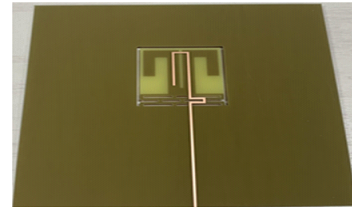
여기서,  $u(\cdot)$ 는 2차원 공간위의 점을 3차원 공간으로 매핑해 주는 일대일대응함수(one-to-one function)이며,  $3 \times 2$  행렬로 표현될 수 있다. 본 논문은 종이접기의 가장 기본 형인  $90^\circ$  접는 기작을 응용했으며, 공간 변형을 실제로 구현하기 위해서 LET 관절을 사용하였다. 식 (2)의 공간 매핑 함수,  $u(\cdot)$ , 를 사용하여 2차원  $x$ - $y$  좌표 평면 위에 있는 평면  $S_0$ 에 포함된 점  $\mathbf{v}(\mathbf{v} \in S_0)$ 를 수직인  $x$ - $z$  좌표 평면위의 평면  $S_1$ 으로 매핑( $S_0 \rightarrow S_1$ ) 한다면,  $S_1 = u(\mathbf{v}) = [0 \ 0 \ 1; 0 \ 1 \ 0]^T \mathbf{v}$ 로 표현될 수 있다.

제안하는 안테나는 0.5 mm 두께의 FR4 기판에 제작되었으며, 제작된 안테나는 그림 4에 나타나 있다. 접기 전의 안테나 모습은 그림 4(a)와 그림 4(b)에 나타나 있으며, 접은 후의 모습은 그림 4(c)와 그림 4(d)에서 보여주고 있다. 하나의 평판에서 제작된 안테나가 LET 관절에 의한 기계적 하중 분산과 뒤틀림 덕분에 전기적 특성을 잃지 않고  $90^\circ$ 로 접힐 수 있었다. 이때, 설계된 LET 관절의 구조와 기계적 용수철 모형은 그림 4(e)에 나타나 있다. 어긋난 격자구조를 이용해서 수직 방향에 걸리는 힘을 수평의 뒤틀림으로 분산하여 접히지 않는 평판 구조를 접힐 수 있도록 설계되었다. 이때,  $k_t$ 는 뒤틀림 용수철 상수(torsional spring constant)이며,  $k_b$ 는 굽힘 용수철 상수(bending spring constant)이다. LET 관절에서 이 두 용수철 상수의 배분은 매우 중요한 역할을 하며, 기판의 두께와 기계적 특성에 따라서 LET 관절의 홈( $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$ )과 두께( $W_6$ ,  $G_2$ )를 정해야 한다<sup>[10]</sup>. 접힐 때 부하를 적절히 분산시키지 못한다면, 그림 5(a)~그림 5(c)에서 볼 수 있듯이 하중이 집중된 곳의 유전체가 부서지게 되며, 금속 패턴이 끊어져서 안테나의 기능을 상실하게 된다. 접었을 때 부러진 LET 구조를 용수철 등가 모델로 표현하면 그림 5(d)와 같다. 빨간색 동그라미로 표시한 부분에서 굽힘을 담당하는  $k_b$ 가 층별로 분산되어 배치되지 못하고 직렬로 연결되면서, 접었을 때 가해지는 부하를 수평 뒤틀림 성분( $k_t$ )으로 분산할 수 없는 구조이다.

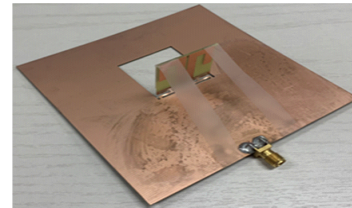
설계된 LET 관절은 그림 4와 그림 5에서 볼 수 있듯이 드릴을 이용하여 평판에 직사각형 모양으로 구멍을 뚫어서 제작하였다. 안테나가 접힐 때는 FR4 기판이 접히게 되면서 동박이 같이 접히게 된다. 이때, LET 관절을 구성하는 평판 스프링에 가해지는 기계적 피로를 적절히 분



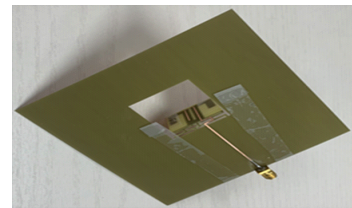
(a) 평면 형태 앞면  
(a) Planar mode front-side



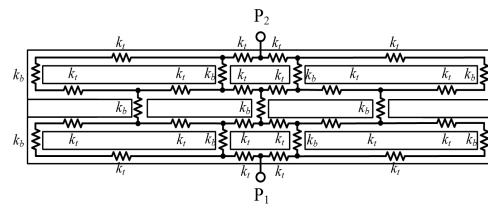
(b) 평면 형태 뒷면  
(b) Planar mode rear-side



(c) 접힌 형태 앞면  
(c) Folded mode front-side

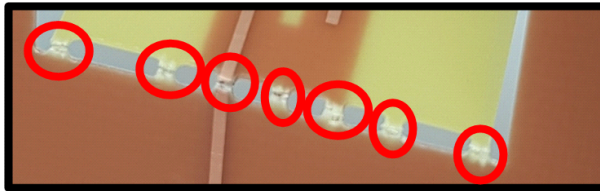


(d) 접힌 형태 뒷면  
(d) Folded mode rear-side

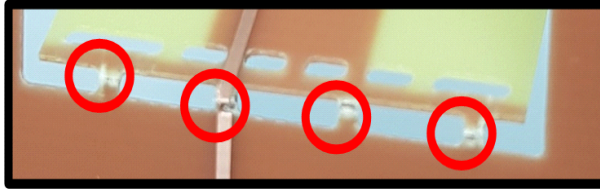


(e) 설계된 LET 관절 기계적 용수철 등가 모형  
(e) Mechanical spring model of the designed LET joint

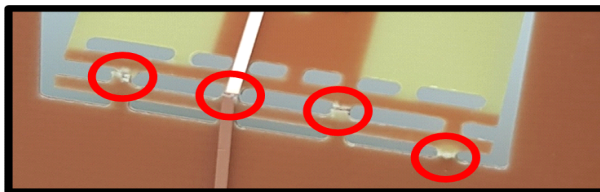
그림 4. 제작된 안테나  
Fig. 4. Fabricated antenna.



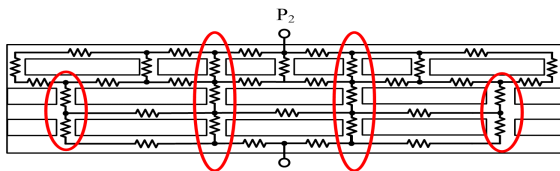
(a) 1단 구조  
(a) 1-layer



(b) 2단 구조  
(b) 2-layer structures



(c) 3단 구조  
(c) 3-layer structures



(d) 용수철 등가 모형  
(d) Its mechanical spring equivalent model

그림 5. 비효율적으로 기계적 부하가 분산된 LET 관절  
Fig. 5. Inefficient stress distribution of LET joint.

산하고 기판이 손상되지 않도록 그림 4(e)와 같은 관절구조를 설계하였다. 그림 5(e)와 같이 하중이 특정 지점에 집중된다면 FR4 기판이 부서지게 되고, 동박이 함께 끊어지면서 안테나의 기능을 상실한다.

본 논문에서 적용한 LET 관절을 확장한다면, 정육면체나 정사면체와 같이 더욱더 복잡한 형태의 구조를 하나의 기판을 사용하여 구현할 수 있다. 반대로, 3차원 구조를 2차원 구조나 더욱 작은 부피 안에 접어서 수납할 수

있어서 공간 효율이 매우 중요한 위성 통신 시스템에 큰 도움이 될 수 있다.

## 2-4 안테나 측정

제작된 안테나(그림 4)는 무반향실(anechoic chamber)에서 반사 계수 ( $|S_{11}|$ ), 안테나 이득(gain), 그리고 방사 패턴(radiation pattern)을 측정했다. 측정값은 모의실험 결과와 매우 유사했음을 확인할 수 있다. 측정된  $-10$  dB 동작 대역폭은  $2.7 \sim 3.3$  GHz이며(그림 6), 안테나 이득은 동작 대역폭에서  $6.0 \sim 6.5$  dBi로 측정되었다(그림 7). 안테나의

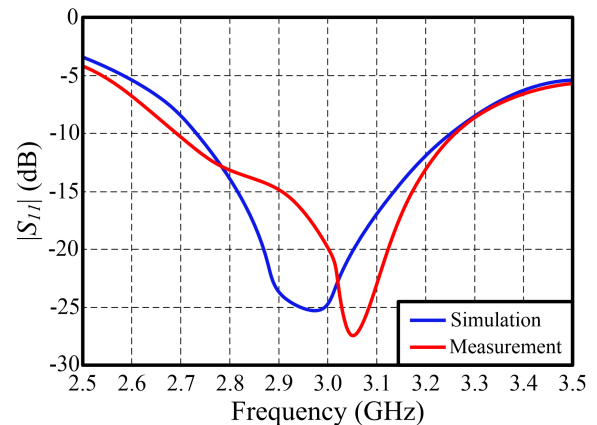


그림 6. 안테나의 반사 계수 ( $|S_{11}|$ )  
Fig. 6. Measured reflection coefficient ( $|S_{11}|$ ).

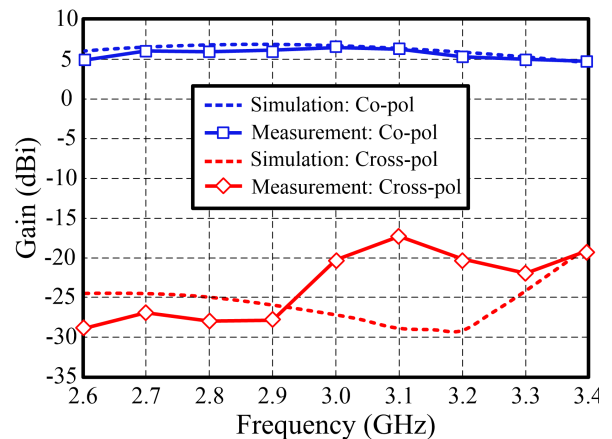


그림 7. 안테나 이득 측정  
Fig. 7. Measured antenna gain.



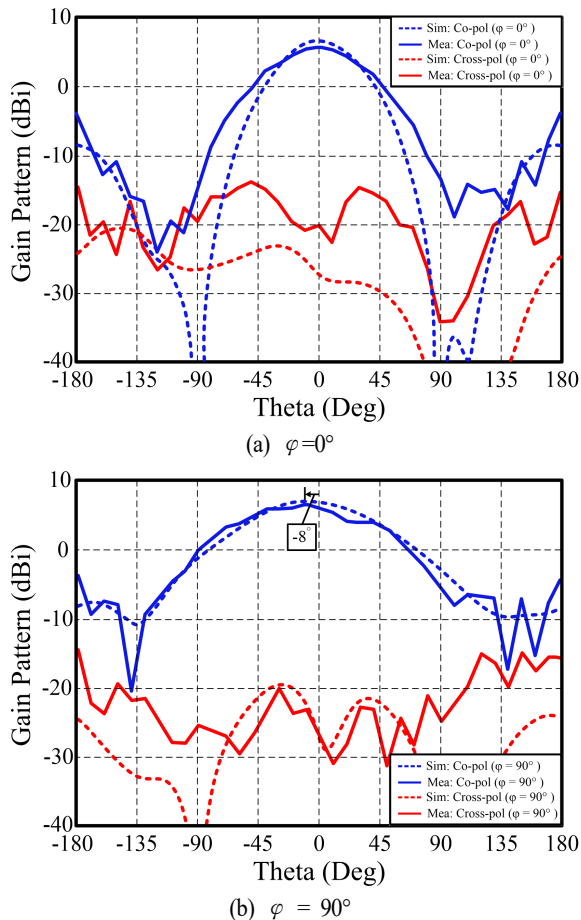


그림 8. 안테나 방사 패턴

Fig. 8. Radiation patterns.

방사 패턴은 동작 대역폭에서 거의 변화 없이 나타났으며, 중심 주파수인 3 GHz에서 측정된 방사 패턴은 그림 8에서 보여주고 있다. 안테나는 선형 편파를 가졌으며, 교차 편파 분리도(cross-pol isolation)는 약 27 dB로 매우 높게 나타났다(그림 8). 그림 8(b)에 나타나 있는 H-평면( $\phi=90^\circ$ )상에서의 방사 패턴은 약  $-8^\circ$  가량 치우쳐서 방사됐으며, 이는 키리가미 원리에 따라 안테나가 꺾여 올라가면서 생성된 빈자리 때문에 대칭성이 손상되면서 나타난 현상이다.

### III. 결 론

본 논문은 종이접기와 키리가미 이론을 바탕으로 접을

수 있는 T-자형 다이폴 안테나의 설계를 제안했다. LET 관절을 이용해서 기판에 가해지는 기계적 부하를 효율적으로 분산하였고,  $90^\circ$ 의 가변 범위를 가지는 안테나를 제안했다. 제안하는 안테나는 0.5 mm 두께의 FR4 기판 양면을 사용하여 설계되었으며, 마이크로스트립 전송선로와 전기적 커플링을 통해서 급전된다. 제안하는 안테나는 3 GHz에서 약 20 %의 비대역폭 (2.7~3.3 GHz)을 가지고, 6.5 dBi의 선형 편파 이득을 가진다. 본 논문에서 제안된 종이접기와 키리가미 개념은 공간 효율성을 획기적으로 개선할 수 있어서 CubeSat과 같은 소형 위성이나, 차량용 상어 지느러미(shark-fin) 안테나와 같이 입체적 구조를 가지는 구조에 응용될 수 있다.

### References

- [1] E. Yaacoub, M. S. Alouinia, "Key 6G challenge and opportunity-connecting the base of the pyramid: A survey on rural connectivity," *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, no. 4, pp. 533-582, Apr. 2020.
- [2] S. Chen, S. Sun, G. Xu, X. Su, and Y. Cai, "Beam-space multiplexing: practice, theory, and trends, from 4G TD-LTE, 5G, to 6G and beyond," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 162-172, Apr. 2020.
- [3] M. Hwang, G. Kim, S. Kim, and N. S. Jeong, "Origami-inspired radiation pattern and shape reconfigurable dipole array antenna at C-band for CubeSat applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 5, pp. 2697-2705, May. 2021.
- [4] M. Sakovsky, S. Pellegrino, and J. Costantine, "Rapid design of deployable antennas for CubeSats," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, no. 2, pp. 50-58, Apr. 2017.
- [5] N. Chahat, R. E. Hodges, J. Sauder, M. Thomson, E. Peral, and Y. Rahmat-Samii, "CubeSat deployable ka-band mesh reflector antenna development for earth science missions," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2083-2093, Jun. 2016.
- [6] T. Kanade, "A theory of origami world," *Artificial Intelli-*

- gent, vol. 13, no. 3, pp. 279-311, May. 1980.
- [7] B. Dacorogna, P. Marcellini, and E. Paolini, "Origami and partial differential equations," *Notices of American Mathematical Society*, vol. 57, no. 5, pp. 598-606, May. 2010.
- [8] D. Lee, Y. Seo, and S. Lim, "Dipole- and loop-mode transformable origami paper antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 1, pp. 8-13, Jan. 2016.
- [9] J. G. Hester, S. Kim, J. Bito, T. Le, J. Kimionis, and D. Revier, et al., "Additively manufactured nanotechnology and origami-enabled flexible microwave electronics," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 4, pp. 583-606, Apr. 2015.
- [10] S. A. Zirbel, R. J. Lang, M. W. Thomson, D. A. Sigel, P. E. Walkemeyer, and B. P. Trease, et al., "Accommodating thickness in origami-based deployable arrays," *Journal of Mechanical Design*, vol. 135, no. 11, p. 111005, Oct. 2013.
- [11] M. Schenk, A. D. Viquerat, K. A. Seffen, and S. D. Guest, "Review of inflatable booms for deployable space structures: Packing and rigidization," *Journal of Spacecraft and Rocket*, vol. 51, no. 3, pp. 762-778, Jun. 2014.
- [12] G. Kiper, E. Soylemez, "Deployable space structures," in *2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, Istanbul, Jun. 2009, pp. 131-138.
- [13] J. O. Jacobsen, G. Chen, L. L. Howell, and S. P. Magleby, "Lamina emergent torsion(LET) Joint," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, no. 11, pp. 2098-2109, Nov. 2009.

김 도 현 [부산대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8274-3574>



2021년 2월: 부산대학교 전자공학과(공학사)  
2021년 3월~현재: 부산대학교 전기전자공학부 석사과정  
[주 관심분야] 안테나, RF회로 및 시스템, 위성통신용 안테나 및 시스템

정 현 민 [부산대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0003-1728-2684>



2016년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 학부생  
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 레이더 시스템, 전파응용

김 경 득 [부산대학교/석사과정]

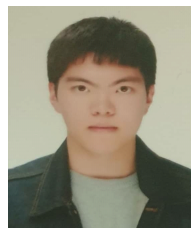
<https://orcid.org/0000-0003-2752-1087>



2020년 2월: 부산대학교 전자공학과(공학사)  
2020년 3월~현재: 부산대학교 전기전자공학부 석사과정  
[주 관심분야] 안테나, RF회로 및 시스템, 전파응용

최 우 혁 [부산대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1816-1342>

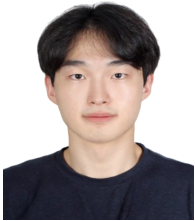


2021년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)  
2021년 3월~현재: 부산대학교 전기전자공학부 석사과정  
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용



하 노 겐 [부산대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-4827-6877>



2019년 8월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)

2019년 9월~현재: 부산대학교 전기전자공학부 석사과정

[주 관심분야] 초고주파 안테나 및 전자기파 흡수체

김 상 길 [부산대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1720-2410>



2010년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

2011년 12월: 조지아공과대학 전자공학 (공학석사)

2014년 12월: 조지아공과대학 전자공학과 (공학박사)

2015년 1월~2018년 2월: Qualcomm Inc.

2018년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용

황 명 하 [부산대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2517-9698>



2020년 2월: 부산대학교 전자공학과(공학사)

2020년 3월~현재: 부산대학교 전자전기공학부 석사과정

[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 위성통신용 안테나 및 시스템