

## 종이접기 방식을 사용한 방사패턴 가변형 종이 안테나 설계

박동국<sup>†</sup>

(Received August 2, 2016 ; Revised August 16, 2016 ; Accepted September 2, 2016)

### Design of a reconfigurable paper antenna using the origami method

Dong-Kook Park<sup>†</sup>

**요약:** 본 논문에서는 종이에 전도성 테이프를 이용하여 만든 웨어러블 안테나를 소개한다. 제안하는 안테나는 A4 복사 용지에 반과장 도체 다이폴 스트립과 기생 도체 스트립으로 구성이 되며, SMA 커넥터를 통해 다이폴의 중앙에 급전되는 구조이다. 제안하는 안테나의 모양은 종이 접기에 따라 모양이 달라지며, 따라서 종이를 접었을 때와 펼쳤을 때 안테나의 방사패턴이 가변된다. 이것은 안테나 방사패턴의 영점(null)에 의해 신호의 수신율이 낮아지는 문제점을 해결할 수 있다. 제안하는 안테나의 반사계수와 방사패턴을 900 MHz에서 시뮬레이션과 실험을 통해 제시하였고, 제안하는 종이 안테나가 900 MHz에서 종이접기 방식에 따라 재구성(reconfigurable) 특성이 있음을 보였다.

**주제어:** 종이 안테나, 종이 접기, 웨어러블, 재구성

**Abstract:** A wearable antenna made using conductive tape on paper is presented in this paper. The proposed antenna is composed of a half-wavelength conducting dipole strip and a parasitic conducting strip on the A4 copy paper. The antenna is fed at the center of the dipole strip by an SMA connector. The configuration of the proposed antenna changes according to the origami method. Therefore the radiation patterns of the antenna vary according to whether or not the paper is folded. This approach solves the problem that the reception ratio of the signal decreases because of null points in the antenna radiation pattern. The reflection coefficient and the radiation pattern of the proposed antenna at 900 MHz are evaluated using an EM simulation and measurements. It was shown that the proposed paper antenna has reconfigurable characteristics at 900 MHz when utilizing the origami method.

**Keywords:** Paper antenna, Origami, Wearable, Reconfigurable

### 1. 서 론

IoT 시대를 맞이하여 웨어러블 디바이스 시장이 발전하면서 많은 웨어러블 소자에 대한 관심이 많아지고 있으며, 특히 무선통신을 위해 꼭 필요한 안테나 분야에서도 웨어러블 안테나에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구들 중의 하나로 종이에 전도성 잉크를 사용하여 만든 종이 안테나에 대한 연구가 발표되고 있다[1]-[4].

종이 안테나에 대한 연구들 중 일부는 종이 접기 방식을 이용하여 재구성 안테나를 설계하는 방법에 대해 소개하고 있다[5]-[8]. 참고문헌 [7]에 종이접기 방식을 이용하여 다이폴 안테나와 루프 안테나로 변환이 가능한 패턴 가변형 안테나에 대한 연구가 발표되었는데, 안테나의 방사 패턴의 영점(null) 위치에서 신호가 수신될 경우, 신호의 수신율이 매우 낮기 때문에, 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 종이가 접힌 상태에 따라 패턴이 가변되는 안테나에 대해 소개하였다.

본 논문에서도 종이접기 방식을 사용하여 방사패턴이 가변되는 안테나를 제안하고자 한다. 또한 참고문헌 [7]의 경우 안테나가 접히는 부분에서 전도성 잉크로 구현된 안테나 부분의 잉크가 깨지는 현상이 있어 액체 금속을 사용하여 해결하는 번거로움이 있었다. 따라서 본 논문에서는 안테나의 구조를 A4 복사용지에 도체 테이프를 사용하여 안테나의 형상을 제작하였으며, 안테나 부분이 가능한 접히지 않도록 안테나를 설계하였다.

또한 참고문헌 [7]의 경우는 종이접기 방식에 따라 다이폴 안테나와 루프(loop) 안테나로 동작하는 종이접기 안테나를 제안하였는데, 본 논문에서는 종이를 펼쳤을 때는 다이폴 안테나로 동작하며, 다이폴 축 방향으로 방사패턴의 null이 형성되고, 종이를 접었을 때는 다이폴에 부가적인 도체가 인가되어 다이폴의 축방향으로 형성되는 null을 제거할 수 있도록 안테나를 설계하였다. 따라서 종이를 펼치거나 접는 방식 따라 방사패턴이 가변되는 재구성

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8795-4066>): Division of Electronics and Electrical Information Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: [dkpark@kmou.ac.kr](mailto:dkpark@kmou.ac.kr), Tel: 051-410-4311

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.

(reconfigurable) 안테나로 동작하게 된다.

안테나의 동작 주파수는 물류 및 유통 분야에 사용되는 RFID 분야의 응용을 고려하여 900 MHz 대역으로 설정하여 설계하였다.

## 2. 안테나 설계

제안된 안테나의 최종 목표는 종이 접기에 따라 안테나의 방사패턴이 가변되며, 동일한 주파수 대역에서 동작하면서 이득이 0dBi 이상인 재구성 안테나를 설계하는 것이다. Figure 1에 제안하는 종이 안테나의 구조를 나타내었다. Figure 1 (a)는 종이를 펼쳤을 때의 모습으로, 왼쪽에 있는 반파장 다이폴의 중앙에서 급전을 하며, 오른쪽에 있는 기생소자는 반파장 다이폴과 일정 거리 떨어져 있어 다이폴 안테나와 전자기적 결합에 의해 신호가 인가되는 구조이다. Figure 1 (a)에 표시되어 있는 점선을 따라 종이를 접을 경우, Figure 1 (b)와 같은 구조가 된다. 이 때 기생소자는 반파장 다이폴과 접촉하게 되고 반파장 다이폴과 같이 직접적으로 신호가 급전되는 구조가 된다.

기생소자의 모양을 “ㄱ” 자 구조로 한 것은 수직방향의 길이를 줄이기 위해 끝 부분을 구불인 것이며, 공진 주파수는 “ㄱ” 자 구조의 전체 길이에 따라 달라진다. “ㄱ” 자 구조의 아래 부분에 수평 방향의 굵은 스테브는 안테나를 접었을 때, 반파장 다이폴과의 접촉 및 종이가 접혀진 안테나의 임피던스 정합을 위한 목적을 갖고 있어, 이후 본 논문에서 ‘임피던스 정합부’라고 명명하고자 한다.

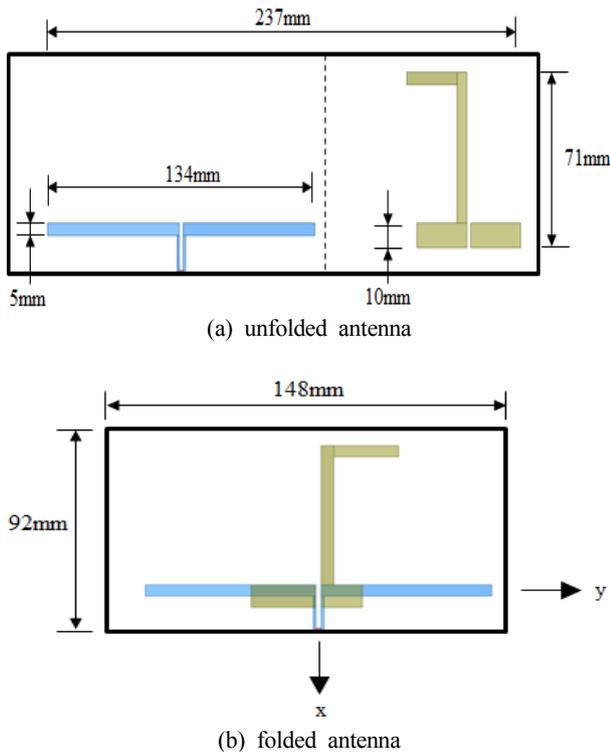
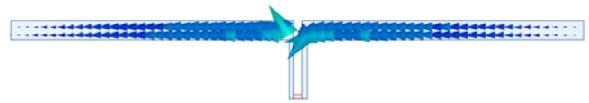
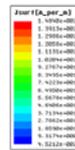
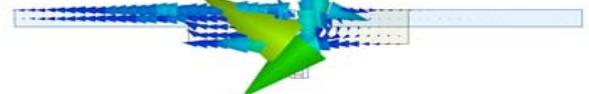
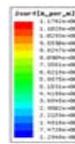


Figure 1: Proposed origami antenna

Figure 2에 안테나 도체면에 흐르는 전류의 방향과 크기를 HFSS를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 나타내었다. 종이를 펼쳤을 때 급전에 의해 수평 다이폴 안테나에 대부분의 전류가 흐르고 기생소자에는 전류가 거의 흐르지 않는 것을 시뮬레이션으로 확인하였고, Figure 2 (a)에는 수평 다이폴 안테나에 흐르는 전류의 방향과 크기만을 나타내었다. 반면에 종이를 접었을 때 Figure 2 (b)에서 보듯이 수직 방향의 기생소자에도 전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 수평 방향으로의 다이폴의 왼쪽 도체에만 전류가 크게 흐르고, 오른쪽 도체로는 미미하게 흐르는 것을 볼 수 있다. 아마도 임피던스 정합부에 의해 오른쪽 도체로 흐르는 전류의 대부분이 수직방향의 스트립 도체로 흐르게 되어, 수평 방향으로의 전류가 미미하게 된 것으로 사료된다. 따라서 안테나를 접었을 때 수직 방향과 수평 방향으로 흐르는 두 개의 전류가 생기므로 방사패턴이 종이를 펼쳐져 있을 때와 다른 형태가 됨을 알 수 있다.



(a) dipole element of unfolded antenna

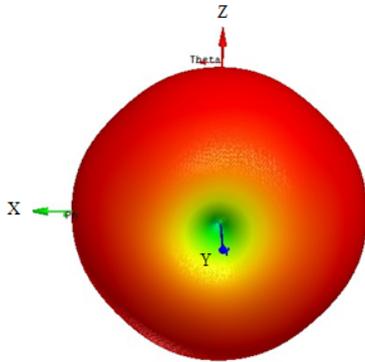


(b) folded antenna

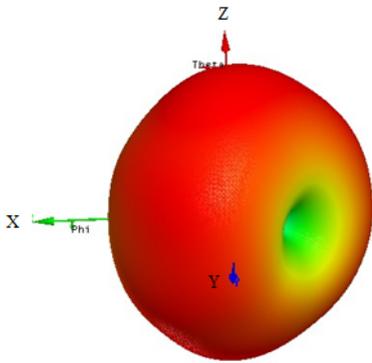
Figure 2: Current distributions of proposed origami antenna

Figure 3에 시뮬레이션한 3차원 방사패턴을 나타내었다. Figure 3 (a)에서 종이가 펼쳐져 있을 때는 y 축 방향에서 방사패턴의 영점(null)이 생기는 것을 볼 수 있으나 Figure 3 (b)와 같이 종이를 접었을 때는 y 축 방향이 아닌 다른 방향에서 null이 생기는 것을 볼 수 있다. 이것은 수직 방향의 전류에 의한 현상으로, 종이를 접었을 때 안테나의 방사패턴이 종이를 펼쳤을 때와 다른 모양이 되어, 재구성(reconfigurable) 안테나로서의 역할을 하고 있음을 확인할 수 있다.

또한 시뮬레이션으로 구한 안테나의 이득은 900 MHz에서 종이 접기 방식에 무관하게 동일하게 3 dBi가 되는 것을 확인하였다.



(a) unfolded antenna



(b) folded antenna

Figure 3: Simulated radiation pattern of proposed origami antenna

한편 종이를 접거나 펼쳤을 때 안테나의 동작주파수는 변화가 없어야 한다. 이러한 점을 고려하여 반파장 다이폴 안테나의 경우 급전점에서 다이폴 스트립과 연결되는 2선 스트립 선로의 폭과 간격을 조절하였으며, 종이를 접었을 때 임피던스 매칭을 위해 기생소자와 다이폴 스트립이 접촉되는 임피던스 정합부의 면적을 적절히 조절하여 임피던스 정합을 구현하였다.

Figure 1 (b)에 표시된, 종이를 접었을 때 수평 다이폴과 접촉되는 도체 스트립의 길이  $w$ 에 따른 반사계수 특성의 변화를 Figure 4에 나타내었다. Figure 4로부터  $w = 25\text{mm}$  일 때 가장 좋은 특성이 나타나므로 이후에는 이 수치를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

종이를 접었을 때와 펼쳤을 때의 안테나의 입력 반사계수를 Figure 5에 제시하였다. 동작 주파수는 900 MHz를 고려하였고, 동작 주파수에서 반사계수가  $-10\text{ dB}$  이하가 되도록 설계하였다. Figure 5에서 동작주파수 900 MHz에서 종이가 접혀 있거나 펼쳐져 있을 때 모두 900 MHz에서 반사 손실이  $-10\text{ dB}$  이하가 되는 것을 확인할 수 있다.

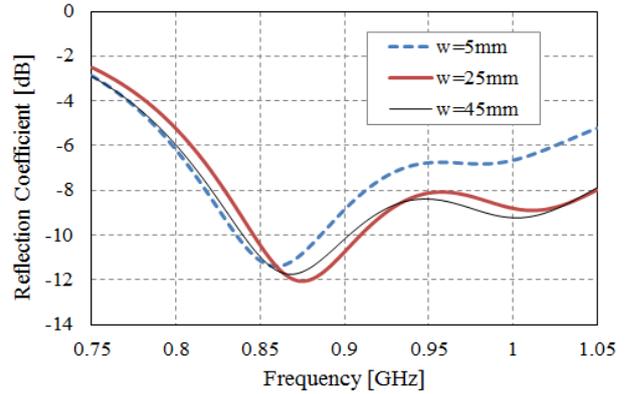


Figure 4: Simulated reflection coefficient of proposed origami antenna according to the length of  $w$

Figure 5에서 임피던스 대역폭은 반사계수  $-10\text{ dB}$  이하 기준으로 종이가 펼쳐진 경우 102 MHz (871 ~ 973 MHz), 종이를 접힌 경우 63 MHz (846 ~ 909 MHz)로 확인 되었다.

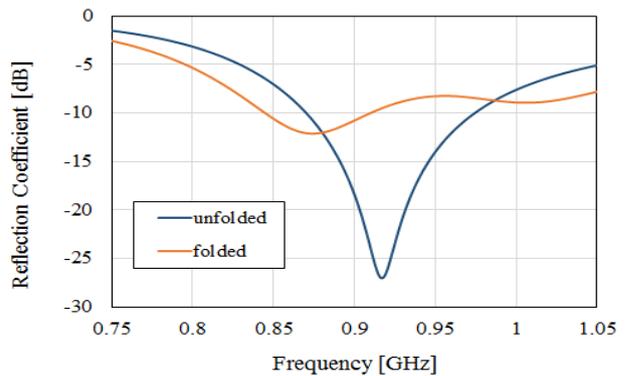


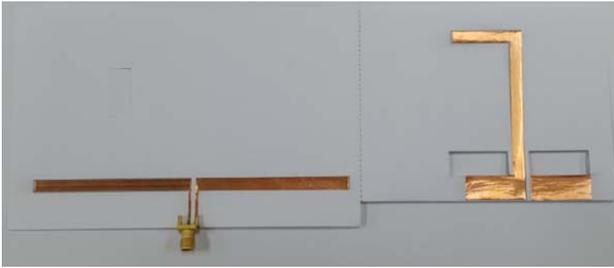
Figure 5: Simulated reflection coefficient of proposed origami antenna

### 3. 안테나 측정 결과

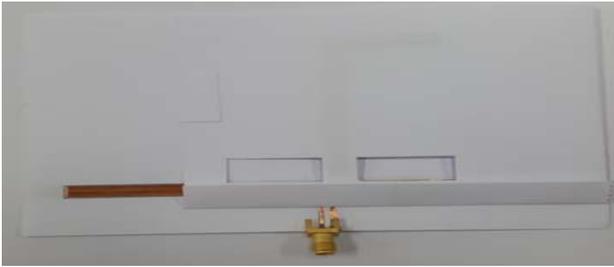
Figure 6에 제작한 안테나를 나타내었다. A4 복사용지에 구리 도체 테이프를 이용하여 안테나를 제작하였다. 안테나의 급전점에는 SMA 커넥터를 전도성 에폭시를 이용하여 종이 안테나에 연결하였다.

Figure 6에서 기생소자 근처의 종이를 접거나 사각형 홈을 파놓은 것은 종이를 접었을 때 기생소자와 다이폴간의 접촉이 확실히 될 수 있도록 종이 접착제를 부착하였는데, 이러한 접착제 부착이 용이하게 하게 위해서이다.

제작한 안테나의 반사계수 측정은 네트워크 분석기 ZVH4를 사용하였고, 측정 결과를 Figure 7에 나타내었다. 동작주파수 대역인 900 MHz에서 반사계수가  $-10\text{ dB}$  이하가 됨을 확인할 수 있었고, 시뮬레이션 결과인 Figure 5와 유사하게 종이가 펼쳐져 있을 때가 종이가 접혀졌을 때보다 반사계수 특성이 더 좋은 것을 볼 수 있다. 이것은 시뮬레이션을 할 때 종이의 손실 특성이 고려가 되지 않아서 생긴 현상으로 사료된다.



(a) unfolded antenna



(b) folded antenna

Figure 6: Fabricated proposed origami antenna

또한 Figure 5와 Figure 7을 비교해보면, 시뮬레이션과 실험치의 공진주파수에서 차이가 있는데, 이것은 구리 도체 테이프를 칼로 잘라 안테나를 제작하는 과정에서 발생한 제작 오차에 기인한 것으로 사료된다.

Figure 7에서 측정된 임피던스 대역폭은 반사계수 -10 dB 이하 기준으로 종이가 펼쳐진 경우 146 MHz (837 ~ 983 MHz), 종이를 접힌 경우 119 MHz (864 ~ 983 MHz)로 시뮬레이션 결과보다 더 광대역 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상 또한 시뮬레이션을 할 때 종이의 손실 특성이 고려가 되지 않아서 생긴 현상으로 사료된다.

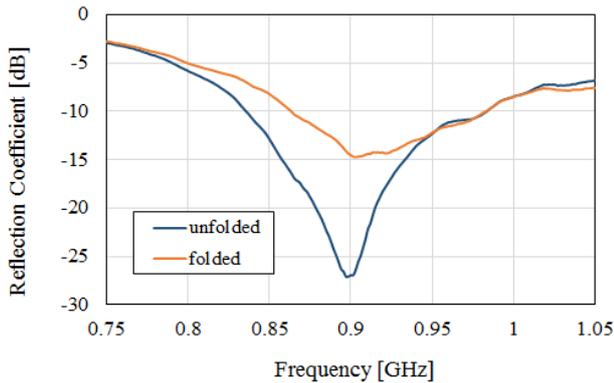
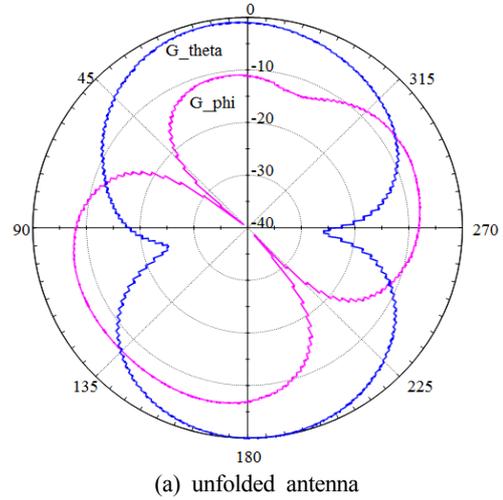


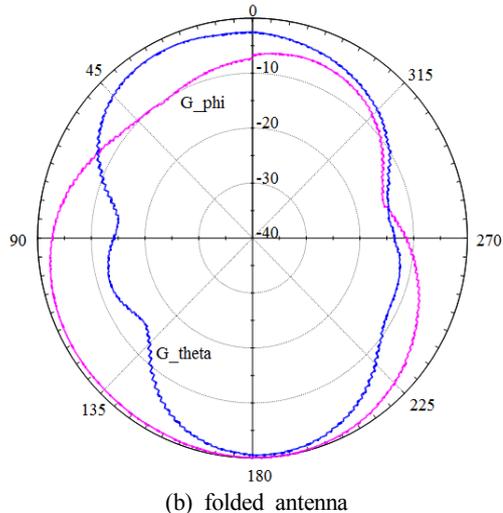
Figure 7: Measured reflection coefficient of proposed origami antenna

Figure 8에 900 MHz에서 측정된 제작한 안테나의 방사패턴을 나타내었다. 측정은 y-z 평면에서 수평( $G_{\theta}$ ) 및 수직( $G_{\phi}$ ) 방향 편파의 방사패턴을 측정하여 제시하였다. Figure 8에서 수평( $G_{\theta}$ ) 방향 편파의 방사패턴은 일반적인 반파장 다이폴 안테나의 E-면 방사패턴과 같이 다이폴의 축 방향, 즉 여기서는  $\pm 90^\circ$  방향에서 null이 생기는 것

을 볼 수 있다. 그리고 종이를 접었을 때 Figure 2 (b)와 같이 수직 방향의 전류에 의해 수직방향 편파의 방사패턴 ( $G_{\phi}$ )이 원형에 가깝게 무지향성으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 Figure 3을 보면 y 축 방향의 영점이 안테나가 접힌 경우  $\phi$  방향으로 회전하여 나타나므로 y-z 평면에서 무지향성에 가까운 방사패턴을 갖기 때문이다.



(a) unfolded antenna



(b) folded antenna

Figure 8: Measured radiation pattern of proposed origami antenna at 900 MHz

#### 4. 결론

본 논문에서는 일반 복사용지인 A4용지에 구리 도체 테이프를 이용하여 안테나를 제작하고, 종이접기 방식에 따라 방사패턴이 가변되는 종이 안테나를 제안하였다. 종이를 접었을 때 부가 소자가 반파장 다이폴 안테나에 첨가되어 안테나의 방사패턴이 가변되는 것을 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다. 제작한 종이 안테나의 임피던스 대역폭은 반사계수 -10 dB 이하 기준으로 종이가 펼쳐진 경우 146 MHz (837 ~ 983 MHz), 종이가 펼쳐진 경우 119 MHz (864 ~ 983 MHz)이며, 시뮬레이션한 안테나의 이득은 3dBi

를 갖는 안테나를 설계하였다.

실험에서는 SMA 커넥터를 사용하여 측정하였으나 실제 웨어러블 안테나로 송수신 모듈과 연결될 때는 송수신 모듈의 기판에 바로 연결이 되거나 전도성 실 등 웨어러블 전송선로를 이용하여 직접 연결이 가능할 것이며, 특히 종이 안테나는 제작이 매우 간단하며, 제작 비용이 매우 저렴하므로 대량으로 생산하여 안테나를 일회용으로 사용하는 곳에 응용이 가능할 것으로 생각된다.

본 논문에서 제안하는 안테나는 필요에 따라 종이를 접거나 펼쳐서 사용하므로 해서 안테나 방사패턴의 영점(null)을 피해 신호의 수신율 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

### References

- [1] G. Shaker, S. Safavi-Naeini, N. Sangary, and M. M. Tentzeris, "Inkjet printing of ultrawideband(UWB) antennas on paper-based substrates," *IEEE Antennas and Propagation Letters*, vol. 10, pp. 111-114, 2011.
- [2] S. Kim, B. Cook, T. Le, J. Cooper, H. Lee, V. Lakafosis, R. Vyas, R. Moro, M. Bozzi, A. Georgiadis, A. Collado, and M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed antennas, sensors and circuits on paper substrate," *IET Microwave Antennas Propagation*, vol. 7, pp. 858-868, 2013.
- [3] G. J. Hayes, Y. Liu, J. Genzer, G. Lazzi, and M. D. Dickey, "Self-folding origami microstrip antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 10, pp. 5416-5419, 2014.
- [4] M. Marroncelli, D. Trincherro, and M. M. Tentzeris, "Paper-based, inkjet-printed, text-meandered UHF resonant antennas for RFID applications," *General Assembly and Scientific Symposium, URSI*, pp. 1-4, 2011.
- [5] S. Yong and J. T. Bernhard, "A pattern reconfigurable null scanning antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 10, pp. 4538-4544, 2012.
- [6] S. Yao, X. Liu, S. V. Georgakopoulos, and M. M. Tentzeris, "A novel reconfigurable origami spring antenna," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 374-375, 2014.
- [7] 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, 2016 (in Korean).
- [8] S. H. Eom and S. Lim, "Paper-based pattern switchable antenna using inkjet-printing technology," *The*

*Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 7, pp. 613-619, 2015 (in Korean).