

잉크젯 프린팅 기술을 이용한 종이 기반의 방사패턴 가변 안테나

Paper-Based Pattern Switchable Antenna Using Inkjet-Printing Technology

엄 승 현 · 임 성 준

Seung Hyun Eom · Sungjoon Lim

요 약

본 논문에서는 잉크젯 프린팅 기술을 이용한 새로운 종이 기반의 방사패턴 가변 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 2개의 bow-tie 안테나와 스위칭 네트워크로 구성되어 있다. 2개의 bow-tie 안테나는 종이의 앞면과 뒷면에 일반 가정용 잉크젯 프린터로 인쇄되었고, 스위칭 네트워크는 PCB 기판에 SPDT와 발룬으로 제작하였다. 복잡한 신호 인가와 발룬 소자의 사용 대신 두 개의 마이크로스트립 선로를 평행하게 위치시킴으로 불 평형 신호를 평형 신호로 바꿔주는 발룬의 역할을 대신하였다. 2개의 bow-tie 안테나에 다른 방향으로 반사체를 추가함으로써 각각의 방사패턴을 서로 다르게 하였다. 제안된 가변형 안테나는 EM 시뮬레이션과 측정 결과를 통해 성공적으로 방사패턴이 가변됨을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we proposed a paper-based pattern-switchable antenna using inkjet-printing technology. The proposed antenna is composed of two bow-tie antennas and a switching network. The bow-tie antennas are inkjet-printed on paper using a low cost home printer. The switching network is built on a printed-circuit-board(PCB) and consists of a single-pole-double-throw(SPDT) switch and balun element. A double-sided parallel-strip line(DSPSL) can convert the unbalanced microstrip mode to the balanced strip mode. Two bow-tie antennas have different radiation patterns because of the different orientation of the reflectors. It is demonstrated from EM simulation and measurement that the radiation patterns of the proposed antenna are successfully switched by the SPDT.

Key words: Pattern-Switchable Antenna, Reconfigurable Antenna, Paper-Based Antenna, Inkjet-Printing Technology, Bow-Tie Antenna

I. 서 론

최근 적은 비용, 유연한 기판에 대한 수요는 계속 증가하고 있다. 이에 따라 유연성 기판의 제작이 용이한 잉크젯 프린팅 기술에 대한 관심도 높아지고 있다. 잉크젯 프린팅은 비접촉식 프린팅 기술이다. 노즐로부터 분사된 액적으로 기판에 패턴을 직접 인쇄하게 된다. 잉크젯 프린팅 기술과 비교해 기존 포토리소그래피 기술은 높은 노

광 설비비용, 복잡한 과정, 환경오염, 공정 중 발생하는 많은 양의 재료 손실 등의 문제점으로 대체 공정이 요구되어 왔다. 잉크젯 프린팅 기술의 직접인쇄공정 방식은 프린팅 공정과 소결 공정만으로 구성되어 복잡한 공정 없이 패턴 형성이 가능하여 시간이나 공정비용 면에서도 효율적이고, 친환경적이다^[1].

잉크젯 프린팅 방법은 다양한 기판들에 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다^{[2]-[4]}. 폴리에틸렌, 테레프탈레이

「본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2015-H8501-15-1007).」

중앙대학교 전자전기공학부(School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University)

· Manuscript received June 9, 2015 ; July 7, 2015 ; Accepted July 14, 2015. (ID No. 20150609-042)

· Corresponding Author: Sungjoon Lim (e-mail: sungjoon@cau.ac.kr)

트, 폴리이미드, 사진 종이 등의 유연한 기판들이 존재한다. 그 중 사진 종이는 사진 유체에 의해 코팅되어 다른 유연한 기판들과 비교할 때 환경 친화적 소재이다. 사진 유체 제조 공정은 유해 화학 물질, 폐놀성 화합물 등을 포함하지 않아, 가열될 때 환경 호르몬을 방출하지 않는다. 또한, 사진 용지는 재활용이 가능하며, 나무가 들어가지 않는 종이기도 존재한다.

무선 통신에서의 또 다른 이슈는 다중경로 페이딩 문제이다. 전자파를 이용하여 통신을 할 때 장애물로 인하여 서로 다른 경로를 따라 수신된 신호의 크기가 변하게 되는 현상이다. 다중 경로 페이딩을 감소하기 위한 방법으로 방사패턴 가변에 대한 관심이 증가하고 있다^{[5],[6]}. 방사패턴 가변 안테나는 혼잡한 환경에서 다중경로 페이딩에 의한 문제를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 스펙트럼 재사용과 에너지 효율을 증대시킬 수 있다.

본 논문에서는 잉크젯 프린팅 기술을 활용해 다중경로 페이딩 문제를 감소시킬 수 있는 방사패턴 가변 안테나를 구현하였다. 제안된 안테나는 일반 인쇄 기판(Printed Circuit Board; PCB) 상의 스위칭 네트워크와 2개의 서로 다른 방사패턴을 가진 Bow-tie 안테나로 구성되어 있다. 스위칭 네트워크는 SPDT(Single-Pole Double-Throw) 스위치를 이용하여 방사패턴을 가변하도록 설계하였다. 2개의 서로 다른 방사패턴을 가진 Bow-tie 안테나를 사진 종이 위에 인쇄하였고, 이득을 높이기 위해 반사체를 추가하였다. 잉크젯 프린팅 기술을 활용하였기 때문에 사진 종이 위에 안테나 패턴을 짧은 시간에 제작할 수 있으며, Bow-tie 안테나와 PCB 기판의 접촉으로 제안된 방사패턴 가변 안테나가 완성된다.

특히 저렴한 비용을 달성하기 위한 방법으로 고가의 산업용 프린터 대신 가정용 프린터를 사용하였다. 저렴하고 환경 친화적인 목적으로 사진 종이를 Bow-tie 안테나의 기판으로 사용하였다.

II. Bow-Tie 안테나 설계

Bow-tie 안테나를 인쇄하기 위하여 일반 가정용 프린터와 전도성 실버 잉크를 사용하였다. 인쇄하기 위한 전도성 실버 잉크로는 Novacentrix사의 JS-B25P를 사용하였

다. JS-B25P는 실버 함량 25 %의 잉크이며, 일반 가정용 프린터의 빈 카트리지에 채운 후 종이 위에 Bow-tie 안테나를 인쇄하였다. 인쇄 후 실버 잉크의 전도성을 높이기 위하여 사진 종이가 최대로 견딜 수 있는 온도 조건을 찾아 180도씨 온도의 오븐에서 5분간의 소결 과정을 거쳤다.

모의실험 시에 JS-B25P의 Data Sheet를 참조하여 실버 잉크의 표면 저항 값을 적용하여 설계를 진행하였다.

본 논문의 안테나는 총 2개의 Bow-tie 안테나로 구성되어 있고, 각각의 Bow-tie 안테나의 공진 주파수는 다음 식 (1)~(5)에 의해 결정된다^{[7]-[9]}.

$$f_r = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_e}L} \left(\frac{1.152}{R_t} \right) \quad (1)$$

$$R_t = \frac{L}{2} \frac{(W+2\Delta l) + (W_c+2\Delta l)}{(W+2\Delta l)(S+2\Delta l)} \quad (2)$$

$$\Delta l = h \frac{0.412(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{W_i}{h} + 0.262 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{W_i}{h} + 0.813 \right)} \quad (3)$$

$$\epsilon_e = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \left(1 + \frac{12h}{W_i} \right)^{-1/2} \quad (4)$$

$$W_i = \left(\frac{W + W_c}{2} \right) \quad (5)$$

설계 식에서 기판의 두께, 상대 유전율, 유효 유전율, 공진 주파수는 각각 기호 h , ϵ , ϵ_e , f_r 로 표시하고 있다. 다른 기하학적 변수들은 그림 1에 정의되어 있다. 설계 식을 바탕으로 최초 Bow-tie 안테나를 설계하였으며, 최종적으로 모의실험을 통해 표 1과 같이 안테나를 설계하였다. 2개의 안테나는 1.8 GHz에서 공진하도록 설계되었으며, 서로 다른 방사패턴을 가지기 위해 서로 직교하는 방향으로 배치가 되어 있다. 또한, 이득을 높이기 위해 그림 1에서와 같이 반사체를 형성하였다.

안테나 #1과 안테나 #2는 비전도성 접착제를 이용하여 양면을 서로 접착하였고, 부착 방향은 좌표축을 통해 확인할 수 있다. 한편, 상대적으로 안테나 #1에 비해 좁은 10 dB 임피던스 대역폭을 가지는 안테나 #2의 대역폭을

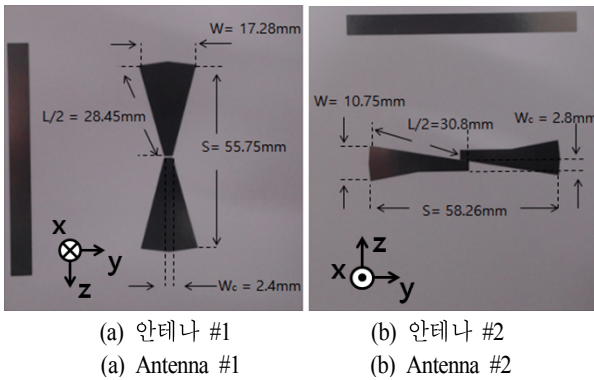


그림 1. 인쇄된 2개의 Bow-tie 안테나 사진
Fig. 1. Pictures of two inkjet-printed Bow-tie antennas.

표 1. 모의 실험에 사용된 Bow-tie 안테나 파라미터 값
Table 1. Dimension of Bow-tie antenna.

	W	S	$L/2$	W_c
안테나 #1	17.28 mm	55.75 mm	28.45 mm	2.4 mm
안테나 #2	10.75 mm	58.26 mm	30.8 mm	2.8 mm

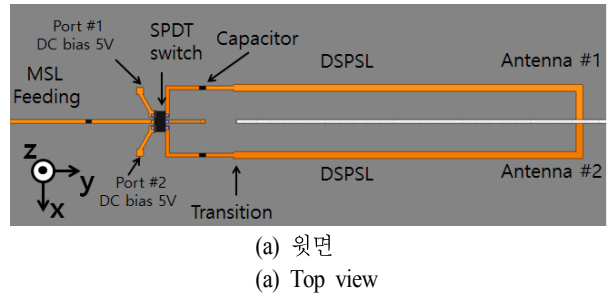
늘리기 위하여 W_c 의 폭을 조절하여 10 dB 임피던스 대역 폭은 안테나 #1은 1.69~2.07 GHz, 안테나 #2는 1.69~2.19 GHz를 만족하도록 설계하였다^[10].

평형 신호로 인가해야 하는 Bow-tie 안테나의 급전구조와 방사패턴을 가변하기 위한 SPDT 스위치를 포함한 스위칭 네트워크의 도면이 그림 2에 도시되어 있다.

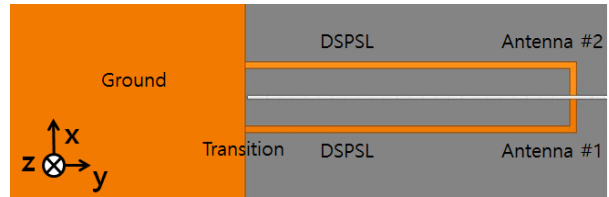
Bow-tie 안테나는 평형 신호가 필요하며, 평형 신호를 인가하기 위한 방법으로 DSPSL(Double-Sided Parallel-Strip Line)을 사용하였다^{[11][12]}. DSPSL은 그림 2에서와 같이 두 개의 동일한 마이크로스트립 라인을 기판의 위와 아래로 평행하게 위치시켜 불평형 신호를 평형 신호로 바꾸는 역할을 한다.

마이크로스트립 라인의 폭은 2.35 mm이며, DSPSL의 폭은 2.4 mm이다. 구리로 구성된 두 선의 폭이 다른 이유는 그림 2(b)에서와 같이 아랫면의 구리 패턴의 차이에 기인한다. 기판의 높이가 동일할 때 DSPSL은 마이크로스트립 라인보다 더 높은 특성 임피던스를 가지게 된다. 따라서 폭을 더 넓힘으로써 50옴의 임피던스를 가지도록 설계하였다.

마이크로스트립 라인으로 인가된 신호는 SPDT(Sin-

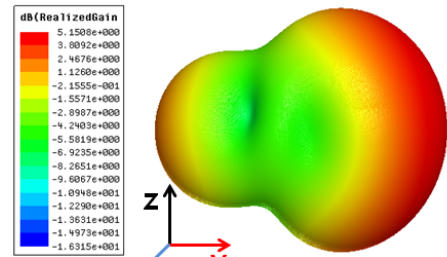


(a) 윗면
(a) Top view

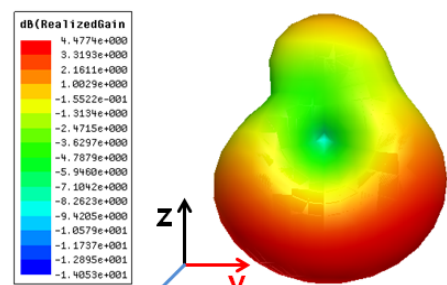


(b) 아랫면
(b) Bottom view

그림 2. 스위칭 네트워크 도면
Fig. 2. Layout of the switching network.



(a) 안테나 #1 ON
(a) Antenna #1 is ON



(b) 안테나 #2 ON
(b) Antenna #2 is ON

그림 3. 설계된 안테나의 3D 방사패턴 모의실험 결과
Fig. 3. Simulated 3D radiation patterns.

gle-Pole Double-Throw) 스위치를 통해 안테나 #1, 안테나 #2를 선택하여 가변된다. 가변된 신호는 DSPSL로 변환되어 평행 신호를 각각의 안테나에 선택적으로 인가하게 된다. SPDT 스위치는 5 V DC 전압을 어떤 편에 인가하느냐에 따라 2개의 신호 경로 중 하나를 선택함으로써 급전하는 안테나를 선택할 수 있다.

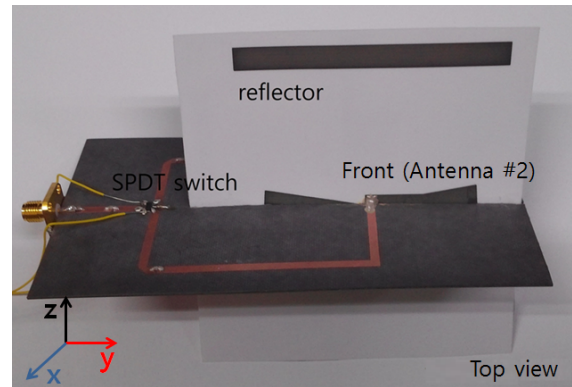
그림 1의 안테나와 그림 2의 스위칭 네트워크를 결합한 최종 가변 안테나를 모의 실험하였으며, 그림 3은 안테나 #1을 선택한 경우와 안테나 #2를 선택한 경우의 3D 방사 패턴을 보여준다. 모의실험 환경에서 SPDT 스위치는 간단히 구리도선으로 반영하였다. 안테나 #1로 스위칭되었을 경우의 최대 이득은 5.15 dBi, 안테나 #2로 스위칭되었을 경우의 최대 이득은 4.47 dBi를 얻을 수 있었다. 두 안테나의 이득이 차이 나는 이유는 두 개의 안테나가 앞뒷면에 형성되어 있고, 안테나 간의 간섭을 최소화하기 위해 서로 다른 형상으로 안테나를 설계하였다. 이로 인해 이득의 차이가 발생하였다.

III. 제작 및 결과

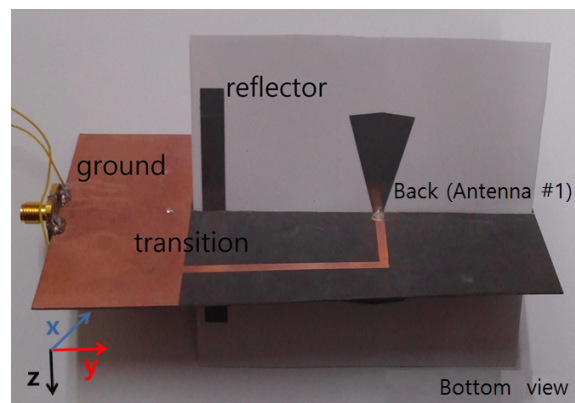
2개의 Bow-tie 안테나는 그림 4의 가정용 프린터(Epson WF7011)를 사용하여 2개의 사진 종이에 각각 인쇄하였다. 인쇄한 2개의 Bow-tie 안테나는 비전도성 접착체를 사용하여 양면을 서로 접착하였고, 신호 선은 상대 유전율을 2.33, 유전 손실 0.0012, 두께 0.78 mm의 Duroid-5870 기판 위에 제작하였다. 그림 5는 제작된 안테나의 모습을



그림 4. 인쇄에 사용한 가정용 EPSON WF-7011 잉크젯 프린터
Fig. 4. EPSON WF-7011 home inkjet printer.



(a) 윗면과 안테나 #2를 앞면으로 한 모습
(a) Top view with front side of antenna #2



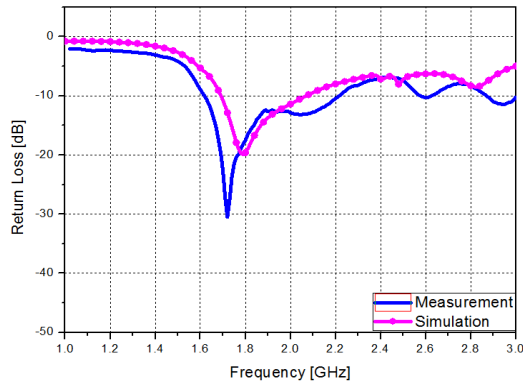
(b) 뒷면과 안테나 #1을 앞면으로 한 모습
(b) Bottom view with back side of antenna #1

그림 5. 제작된 안테나
Fig. 5. Fabricated antenna prototype.

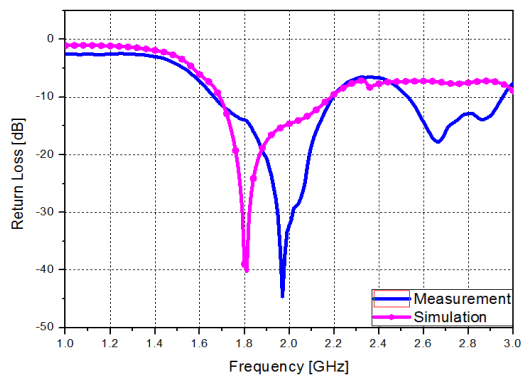
나타낸다.

Duroid-5870 기판과 안테나의 접착은 비전도성 순 에폭시를 사용하였으며, 신호 선과 방사체 간의 접착은 전도성 실버 에폭시 CW2400을 이용하여 신호가 흐르도록 접착하였다. CW2400의 경우, Volume Resistivity가 0.001 ohm-cm보다 작으며, 신호를 전달하기에 충분한 전도성을 가지고 있다. 또한, 반사체를 사용하여 최대 이득이 증가하도록 있도록 하였다^{[13],[14]}.

제안된 안테나의 측정을 위하여 Vector Network Analyzer를 이용하였다. 그림 6은 모의 설계 값과 측정값의 반사 손실을 나타내었다. 측정된 10 dB 임피던스 대역폭은 안테나 #1은 1.61~2.22 GHz, 안테나 #2는 1.66~2.2



(a) 안테나 #1 ON
(a) Antenna #1 is ON



(b) 안테나 #2 ON
(b) Antenna #2 is ON

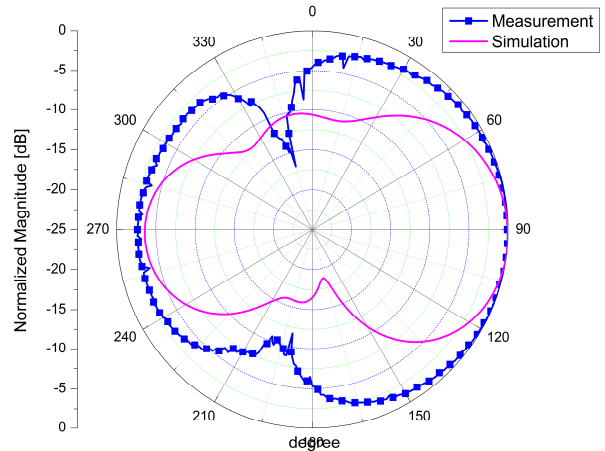
그림 6. 제안된 안테나의 반사 손실 모의실험 및 측정 결과

Fig. 6. Simulated and measured return losses of the proposed antenna.

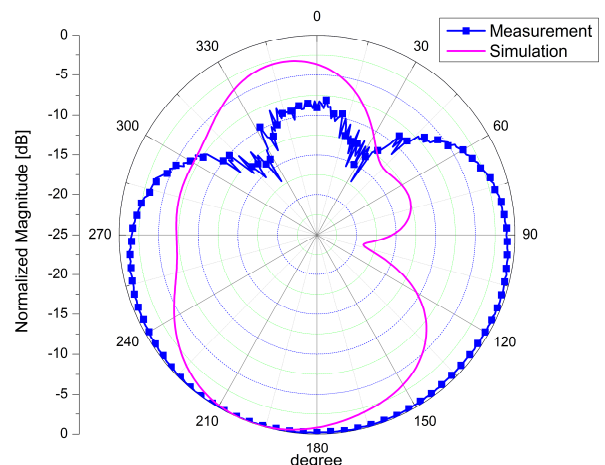
GHz의 결과를 보이며, 약 600 MHz의 대역폭을 가진다. 이는 모의 실험값과 비교할 때 매우 유사한 결과 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 안테나 #2로 스위칭 되었을 경우, 공진 주파수의 이동을 확인할 수 있으며, 이는 종이 위의 안테나와 스위칭 네트워크 간의 접착 시 발생한 오차

표 2. 제안된 안테나 성능을 요약한 표
Table 2. Performance of proposed antennas.

	10 dB 임피던스 대역폭		최대 방사 이득	
	안테나 #1 선택	안테나 #2 선택	안테나 #1 선택	안테나 #2 선택
모의실험	1.69~2.07 GHz	1.69~2.19 GHz	5.15 dBi	4.47 dBi
측정	1.61~2.22 GHz	1.66~2.2 GHz	3.96 dBi	4.72 dBi



(a) 안테나 #1 ON
(a) Antenna #1 is ON



(b) 안테나 #2 ON
(b) Antenna #2 is ON

그림 7. 제작된 안테나의 yz-평면 방사 패턴 측정 결과
Fig. 7. Measured yz-plane radiation patterns of the fabricated antenna.

로 예상된다.

제안된 안테나는 SPDT 스위치를 이용하여 방사 패턴

을 가변하게 된다. SPDT 스위치는 1.0~2.0 GHz에서 평균 0.45 dB의 삽입 손실, 평균 19 dB의 격리도, 1.0~2.5 GHz에서 평균 1.3:1의 VSWR(Voltage Standing Wave Ratio)를 가지는 AS193-73LF(Skyworks Solution, Inc.)를 사용하였다. SPDT 스위치를 사용하기 위해 DC 전압을 5 V 인가하여 각각의 안테나가 선택적으로 동작할 수 있도록 하였다. DC 전압이 스위치에만 인가될 수 있도록 100 pF의 DC Block 커패시터를 사용하였다.

방사 패턴의 가변을 실험적으로 확인하기 위해 무반향실에서 방사패턴을 측정하였다. 그림 7은 모의실험과 측정을 통해 얻은 2D 방사 패턴의 정규화된 결과 값을 도시하였다. 측정된 방사패턴이 성공적으로 가변됨을 확인할 수 있으며, 측정된 안테나 #1의 최대 이득은 3.96 dBi, 안테나 #2의 최대 이득은 4.72 dBi를 얻을 수 있었다. 측정된 방사패턴의 빔 폭이 모의실험치보다 넓은 이유는 PCB 상에 구현된 스위칭 네트워크 회로와 SPDT, 커패시터 등의 칩 소자로 인한 오차로 보여진다.

제작된 안테나의 10 dB 임피던스 대역폭과 방사 이득의 모의실험 결과와 측정 결과를 표 1에 요약 정리하였다. 2개의 방사모드 모두 10 dB 임피던스 대역폭이 1.66 GHz에서 2.2 GHz까지 만족하는 것을 확인할 수 있으며, 제작 상의 오차로 인해 안테나 #1의 측정결과는 모의실험에서 얻은 성능보다 다소 낮은 결과를 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 잉크젯 프린팅 기술을 이용한 종이 기반의 방사패턴 가변 안테나를 제안하였다. 저렴한 가격과 접근성, 친환경에 중점을 두어 일반 가정용 프린터와 종이를 이용하여 제작하였다. SPDT 스위치를 활용하여 2개의 서로 다른 방사패턴을 가변함으로써 다이버시티 환경에서 활용 가능성을 보였다. 2개의 방사모드에서 공통적으로 1.66 GHz에서 2.2 GHz까지 10 dB 임피던스 대역폭을 만족함을 확인하였다. 2개의 방사모드에서 4.72 dBi와 3.96 dBi의 최대이득을 얻으며, 방사패턴이 성공적으로 가변됨을 확인하였다. 추후 PCB 기판에 구현된 스위칭 네트워크를 종이 위에 안테나와 함께 일체화하여 3차원 구조가 아닌 평면 구조로 연구할 예정이다.

References

- [1] Takeo Kawase, et al., "Inkjet printing of polymeric field-effect transistors and its applications", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 44, pp. 3649, Jun. 2005.
- [2] Benjamin S. Cook, et al., "Multilayer inkjet printing of millimeter-wave proximity-fed patch arrays on flexible substrates", *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 12, pp. 1351-1354, Oct. 2013.
- [3] S. Ahmed, F. A. Tahir, A. Shamim, and H. M. Cheema, "A compact kapton-based printed multiband antenna for flexible wireless devices", *Applied Surface Science*, vol. 261, pp. 554-560, Nov. 2012.
- [4] Khelifa Hettak, et al., "Flexible plastic substrate-based inkjet printed CPW resonators for 60 GHz ISM applications", *European Microwave Conference(EuMC), 44th. IEEE*, Oct. 2014.
- [5] Konstantinos A. Gotsis, Katherine Siakavara, and John N. Sahalos, "On the direction of arrival(DoA) estimation for a switched-beam antenna system using neural networks", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 1399-1411, May 2009.
- [6] 하상준, 정창원, "의복용 U-슬롯을 갖는 빔 조향 마이크로스트립 안테나", *한국전자과학회논문지*, 22(8), pp. 754-760, 2011년 8월.
- [7] Ahmet Cemal Durgun, et al., "Design, simulation, fabrication and testing of flexible bow-tie antennas", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 59, pp. 4425-4435, Dec. 2011.
- [8] J. George, M. Deedukumar, C. Aanandan, P. Mohanan, and K. Nair, "New compact microstrip antenna", *AEElectron, Lett.*, vol. 32 no. 6, pp. 508-509, Mar. 1996.
- [9] B. Garibello, S. Barbin, "A single element compact printed bowtie antenna enlarged bandwidth," *Microwave and Optoelectronics, 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference on, IEEE*, pp. 354-358, Jul. 2005.
- [10] Beatriz E. G. Garibello, Silvio E. Barbin, "A single element compact printed bowtie antenna enlarged band-

width", *Microwave and Optoelectronics, 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference on, IEEE*, Jul. 2005.

[11] Sang-Gyu Kim, Kai Chang, "Ultrawide-band transitions and new microwave components using double-sided parallel-strip lines", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 52 pp. 2148-2152, Sep. 2004.

[12] Harold A. Wheeler, "Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet", *Microwave*

Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 13, no. 2, pp. 172-185, Mar. 1965.

[13] Lotfollah Shafai, "Low-cost, microstrip-fed printed dipole for prime focus reflector feed", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 11, pp. 5428-5433, Nov. 2012.

[14] G. Zheng, et al., "Simplified feed for modified printed Yagi antenna", *Electronics Letters*, vol. 40, no. 8, pp. 464-466, Apr. 2004.

엄 승 현



2013년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2015년 2월 ~ 현재: 중앙대학교 전자전기공학과 석사 과정
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 센서

임 성 준



2002년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월: University of California Los Angeles 전기공학과 (공학석사)
 2006년 2월: University of California Los Angeles 전기공학과 (공학박사)
 2006년 ~ 2007년: University of California, Irvine Post-Doc.

2007년 3월 ~ 현재: 중앙대학교 전자전기공학부 부교수
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 안테나