

다이폴 상태와 루프 상태로 변환 가능한 종이접기 방식의 종이 안테나

Dipole- and Loop-Mode Transformable Origami Paper Antenna

이 동 주 · 서 윤 식 · 임 성 준

Dongju Lee · Yunsik Seo · Sungjoon Lim

요 약

본 논문에서는 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 종이 필름 위에 전도성 잉크를 인쇄하여 방사 패턴 변환이 가능한 종이접기 형태의 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 접었을 때와 펼쳤을 때 각각 다이폴 안테나와 루프 안테나로 동작하며, 종이 필름을 접고 펼치는 방식에 따라 상호 변환될 수 있다. 제안된 안테나는 다이폴 상태와 루프 상태일 때 모두 동일하게 1.85 GHz에서 동작하도록 설계되었다. 종이 필름을 접었을 때 종이 필름의 코팅과 그 위에 인쇄된 전도성 잉크가 깨짐 현상을 해결하기 위해 액체금속(liquid metal) 중 하나인 EGaln(Eutectic Gallium Indium)을 사용하였다. 제안된 안테나의 성능은 시뮬레이션과 실제 측정 결과로 확인할 수 있으며, 다이폴 상태와 루프 상태일 때 안테나 이득은 각각 -4 dBi, -5 dBi이다. 또한, 측정 결과, 다이폴 상태와 루프 상태일 때 서로의 Null 부분을 서로 상호 보완해 주는 것을 확인할 수 있다.

Abstract

A pattern-switchable origami antenna is designed with paper using inkjet-printing technology. The proposed antenna can be switched between loop and dipole antenna modes by folding and unfolding the paper, respectively. The proposed antenna is designed for the resonant frequencies of both modes to be 1.85 GHz. Eutectic gallium-indium liquid metal is introduced in order to avoid cracks in the conductive ink when the paper is folded. The performance of the proposed antenna is demonstrated through simulation and measurement results and antenna gain of dipole-mode and loop-mode are -4 dBi and -5 dBi, respectively. Also, the nulls of both dipole and loop modes compensate nulls from each mode.

Key words: Dipole Antenna, Loop Antenna, Origami Paper Antenna, Eutectic Gallium-Indium(EGaln), Liquid Metal

I. 서 론

최근 적응형 무선 통신 시스템을 위한 패턴 가변형 안테나의 수요가 급속하게 증가하고 있다. 안테나의 Null 위치에서 신호가 수신될 경우, 신호의 수신율이 매우 낮

기 때문에 서비스의 품질은 매우 떨어진다^[1]. 이 문제점은 패턴 가변형 안테나 또는 다양한 패턴을 갖는 안테나에 의해 해결될 수 있다^{[2],[3]}. 안테나의 방사 패턴은 배열된 안테나의 방사 특성 크기와 위상을 조절하는 방법으로 변환될 수 있다. 하지만 배열된 안테나는 부피가 매우

「본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2015-H8501-15-1007).」
중앙대학교 전자공학과(School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University)

· Manuscript received October 2, 2015 ; Revised December 3, 2015 ; Accepted December 7, 2015. (ID No. 20151002-21S)

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

크기 때문에, 이를 대체하기 위해 많은 패턴 가변형 안테나가 제안되어 왔다. 대부분의 패턴 가변형 안테나는 핀 다이오드(pin diodes)나 벡터 다이오드(varactor diodes) 혹은 Microelectro Mechanical System(MEMS) 스위치와 같은 전기적인 가변 소자에 의해 구현되어졌다^{[4]~[7]}.

최근에는 종이접기 방식의 패턴 가변형 안테나가 많이 연구되어졌다^{[8]~[10]}. 종이접기 안테나는 접는 방식에 따라 다양한 구조와 모양을 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이런 장점을 기반으로 종이접기 구조는 그 성능을 개선하기 위해 다양하고 창의적인 구조로 만들어지는데 중요한 역할을 하고 있다. 예를 들면, 마이크로 스트립 패치 안테나와 모노폴 안테나를 종이접기 방식에 따라 변환되는 연구가 진행되었다^[8]. 그리고 주파수를 가변할 수 있는 종이접기 방식의 Quadrifilar Helix Antenna(QHA)가 제안되었다^[9]. 최근에는 종이접기식의 나선형 가변안테나도 제안되었다^[10].

본 논문에서는 종이 위에 잉크젯 프린팅된 패턴 가변형 종이접기 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 다이폴 상태와 루프 상태로 동작하도록 설계되었으며, 다이폴 안테나와 루프 안테나는 가장 간단하게 구현할 수 있는 안테나로써 많은 연구가 이루어져 왔다^[11]. 본 논문에서 제안된 안테나는 종이 평평한 상태에서는 다이폴 상태로 동작하지만 종이를 정사각형 모양으로 접었을 경우에는 루프 상태로 동작하게 된다. 다이폴과 루프 상태가 서로 변환되기 때문에, 제안된 안테나의 방사패턴 또한, 각각의 상태에 맞춰서 변환된다. 제안된 안테나의 제작 방법은 일반적인 기판의 식각을 통한 패턴 제작이 아닌 일반 프린터를 사용하여 전도성 잉크를 종이 기판 위에 인쇄하는 방식으로 제작된다. 화학적인 제작 방법과 비교해 봤을 때, 잉크젯 프린팅 방식은 화학적 부산물이 발생되지 않는다는 장점이 있다. 또한, 공정 과정이 간단하고 빠르며, 많은 비용이 들지 않는다.

종이를 접었을 때 종이 필름의 코팅부분과 그 위에 인쇄된 전도성 잉크의 깨짐 현상이 발생하는데, 이러한 문제점을 액체 금속중 하나인 Eutectic Gallium-Indium(EGa-In)을 사용하여 해결하였다. 제안된 안테나의 성능은 반사계수와 방사패턴의 측정을 통해서 확인되었다.

II. 안테나 설계

그림 1은 제안된 안테나의 설계도를 나타낸다. 종이가 접히지 않은 상태에서는 그림 1(a)의 청색 박스에서 표시된 부분이 다이폴 안테나로 동작한다. 청색 박스 이외의 다른 부분은 다이폴 상태에서는 아무 동작도 하지 않는다. 하지만 그림 1(b)와 같이 종이 정사각형 모양으로 접히게 되면 인쇄된 부분이 모두 연결되면서 루프 안테나로 동작하게 된다. 제안된 안테나는 다이폴 상태와 루프 상태 모두 1.85 GHz에서 동작하도록 설계되었다. 다이폴 상태의 경우에는 가장 많이 쓰이는 반 파장($\lambda/2$) 다이폴 안테나로 동작하도록 설계되었으며, 이에 따라 안테나의 총 길이와 폭이 각각 69 mm, 1.5 mm로 설계되었다. 마찬가지로 루프 상태의 경우에는 한 파장(1λ) 루프 안테나로 동작하도록 설계되었다.

제안된 안테나를 그림 1(b)와 같이 접었을 때 적색 부분과 청색 부분으로 표시된 부분이 서로 연결되어 루프 상태로 동작하게 된다. 그림 1(b)의 적색 박스로 표시된 부분은 루프 안테나의 동작 주파수를 결정하는데 중요한 요인이다. 적색 부분을 통해 다이폴 상태와 루프 상태의 주파수를 동일하게 맞출 수 있다. 예를 들어 그림 2(a)~(c)는 적색으로 표시된 부분의 길이가 각각 1 mm, 16 mm, 27 mm일 때의 서로 다른 세 유형의 루프 상태를 나타낸다. 그리고 그림 2(d)는 서로 다른 세 유형의 루프 상태의

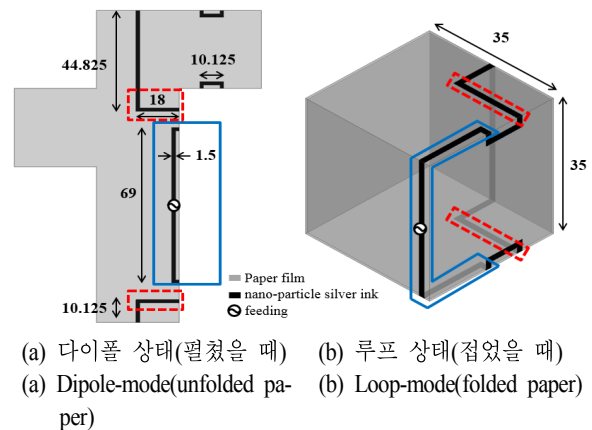


그림 1. 제안된 안테나의 설계도(단위: mm)

Fig. 1. Layout of proposed origami antenna design(unit: mm).

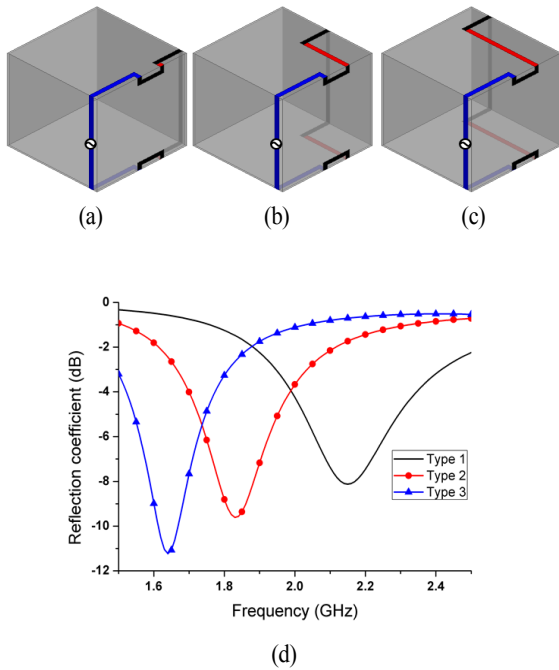


그림 2. (a) 루프 상태 유형 1(적색 선:1 mm). (b) 루프 상태 유형 2(16 mm). (c) 루프 상태 유형 3(27 mm). (d) 각각의 유형에 따른 반사계수
 Fig. 2. (a) Loop-mode type #1. (b) Loop-mode type #2. (c) Loop-mode type #3. (d) S-parameter of loop-mode design type #1, #2 and #3.

동작 주파수를 나타내며, 각각 2.13 GHz, 1.85 GHz, 1.62 GHz에서 동작한다. 따라서 제안된 안테나는 적색으로 표시된 부분의 길이가 16 mm로 설계되었다. EM 시뮬레이션은 Finite-Element Method(FEM) 방식의 ANSYS High-Frequency Structure Simulator(HFSS)를 사용하였다.

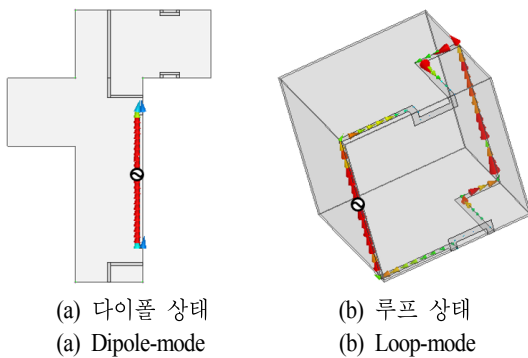


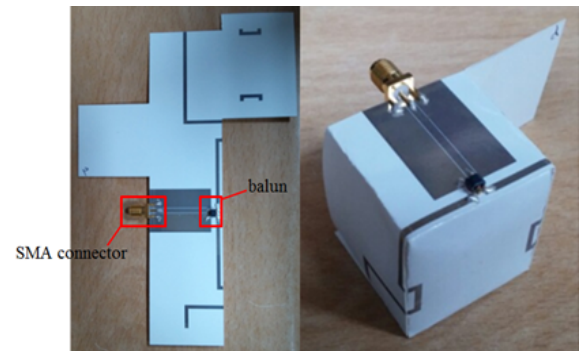
그림 3. 벡터 전류 분포도
 Fig. 3. Simulated vector current distributions.

그림 3(a)는 다이폴 상태, 그림 3(b)는 루프 상태일 때의 전류 분포도이다. 이를 통해 제안된 안테나가 각각 반파장($\lambda/2$) 다이폴, 한 파장(1λ) 루프 안테나로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

III. 제작 및 측정결과

제안된 종이접기 방식의 안테나는 그림 4에서 보이는 것과 같이 0.254 mm의 두께를 갖는 Kodak사의 종이 필름 위에 전도성 잉크를 인쇄하는 방식을 통해 제작된다. 전도성 잉크는 Novacentrix사의 JS-B25P 은나노입자잉크 모델^[12]을 사용하였으며, Epson사의 WF-7011 홈 프린터로 인쇄되었다. JS-B25P 은나노입자 잉크는 25 Ag wt %를 함유하고 있으며, 점성은 5cP이다. 또한, 전도성 잉크의 표면 저항은 60 m Ω /square이다. 기판이 되는 종이 필름의 전기적 특성은 원형 공진기(ring resonator)를 통하여 추출되었다. 종이 필름의 유전율(ϵ_r)과 유전손실($\tan \delta$)은 각각 2.85, 0.05이다. 종이 필름위에 전도성 패턴을 인쇄한 후에는 JEIO tech사의 ON-22GW 오븐을 통해 180 $^{\circ}$ C의 온도에서 10분간의 소결(sintering) 과정을 진행하였다^[13].

다이폴 안테나와 CPW(Coplanar Waveguide)의 양쪽으로 균형잡힌 신호(balanced signal)를 전달하기 위해 발룬(balun)을 사용하였다. 제안된 안테나에서 사용된 발룬은 MACOM사의 MABA-009822-715254이며, 4.5 MHz~3 GHz 까지 RF 1:1 전송선로 변환기로 사용된다. 50 Ω CPW의



(a) 다이폴 상태(펼쳤을 때) (b) 루프 상태(접었을 때)
 (a) Dipole-mode(unfolded paper) (b) Loop-mode(folded paper)
 그림 4. 제작된 종이접기 안테나의 모습
 Fig. 4. Pictures of inkjet-printed origami antenna.



그림 5. EPSON WF-7011 프린터를 이용한 제안된 안테나의 인쇄모습

Fig. 5. Printing the proposed antenna on photo paper using EPSON WF-7011.

폭과 갭은 각각 2 mm, 0.25 mm로 제작되었다. 또한, CPW의 반대쪽에는 Sub-Miniature version A(SMA) 커넥터를 연결하였다. 발룬과 SMA 커넥터를 연결하는데 있어 납땜을 하면 종이 필름과 전도성 잉크에 심각한 손상이 가해지기 때문에 silver epoxy를 이용하여 발룬과 SMA 커넥터를 종이 위에 제작하였다.

본 논문에서 사용된 종이 필름은 표면이 코팅처리되어 있기 때문에 추가적인 코팅 처리 없이 잉크젯 프린팅 할 수 있고, 인쇄 품질도 우수하다. 하지만 종이 필름의 코팅 부분은 소결 과정을 거치게 되면 딱딱하게 되어 종이 필름을 접었을 때 접힌 부분에 깨짐 현상이 발생하게 된다. 그림 6(a)~(c)는 각각 접지 않았을 때, 접었을 때, 접었다 폈을 때의 종이 필름의 표면을 현미경을 통해 관찰한 사진이며, 종이 필름과 잉크가 갈라지는 현상을 관찰할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 액체금속 중 하나인 EGaln을 사용하였다^[14]. 그림 6(d)처럼 갈라지는 부분에 EGaln으로 처리해 주었다. 따라서 종이를 접었을 때에도 도체 신호가 연결됨으로써 종이 필름과 잉크의 갈라지는 문제를 해결할 수 있음을 그림 6(e)와 (f)를 통해 확인할 수 있다. 한편, 구리 테이프를 연결 부위에 접착함으로써 잉크의 균열 문제를 해결할 수도 있다.

그림 7(a)는 제안한 종이접기 안테나의 반사계수를 시뮬레이션과 측정결과를 통해 비교한 그림이다. 다이폴 모드인 종이를 접지 않았을 때 측정되었으며, 루프 상태는 정사각형 모양으로 종이를 접었을 때 측정되었다. 측정결

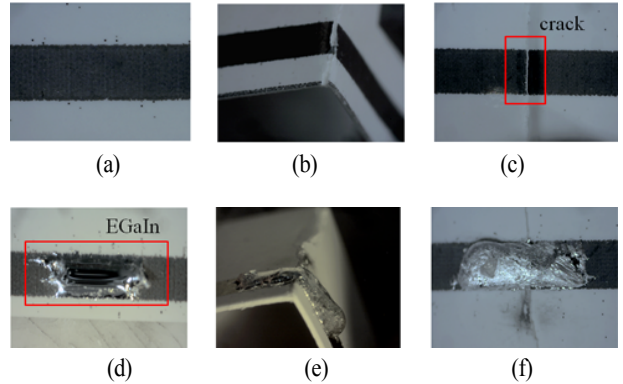
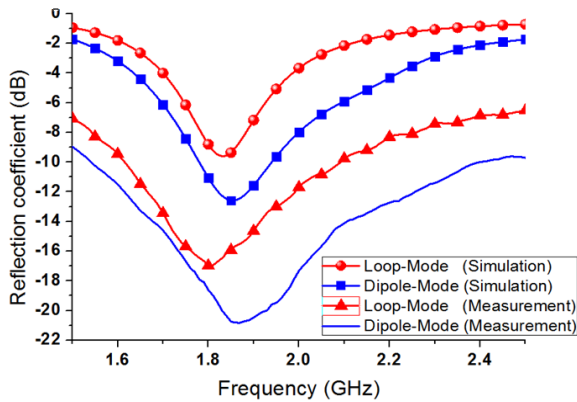


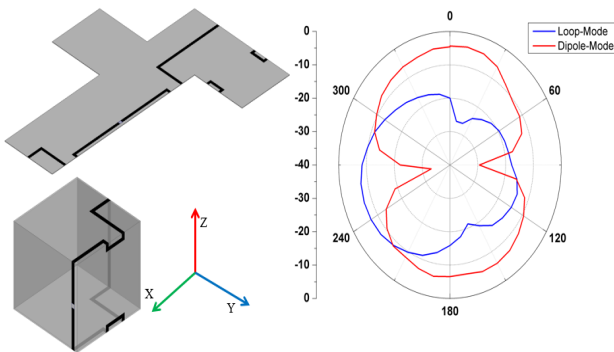
그림 6. 제안된 종이접기 안테나의 접히는 부분을 현미경으로 관찰한 모습, (a) 종이를 접기 전 모습, (b) 종이를 접었을 때 모습, (c) 종이를 접었다 폈 후에 갈라지는 현상이 발생한 모습, (d) 갈라지는 부분에 EGaln 처리한 모습, (e) EGaln 처리 후 종이를 접었을 때 모습, (f) EGaln 처리 후 종이를 접었다 폈 후의 모습

Fig. 6. Magnified pictures of folded parts of proposed origami antenna. (a) conductive line without EGaln before folding paper, (b) conductive line without EGaln when paper is folded, (c) conductive line without EGaln after unfolding folded paper, (d) conductive line with EGaln before folding paper, (e) conductive line with EGaln when paper is folded, (f) conductive line with EGaln after unfolding folded paper.

과는 Anritsu의 MS2038C 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer)를 통해 측정되었다. 다이폴 상태와 루프 상태일 때의 동작 주파수는 각각 1.81 GHz, 1.85 GHz인 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션과 실제 측정 사이의 오차는 balun의 기생저항 성분에서 발생된 것으로 예상된다. 그림 7(b)는 제안된 안테나의 다이폴 상태와 루프 상태일 때 각각의 XZ 평면상의 방사패턴을 나타낸다. 다이폴 상태의 Null 방향은 90°와 270°이지만, 이 각도에서 루프 상태일 때는 최대 방사를 하며, 이때 루프상태의 안테나 이득은 -5 dBi이다. 반면, 루프 상태일 때의 Null 방향은 10°, 170°이지만, 마찬가지로 이 각도에서 다이폴 상태일 때 최대 방사를 이루며, 다이폴 상태의 안테나 이득은 -4 dBi이다. 측정 결과를 통해 각각의 상태일 때 방사패턴이 상호 보완됨을 확인할 수 있다.



(a) 시뮬레이션과 측정된 반사계수
(a) Simulated and measured reflection coefficient



(b) XZ 평면상의 측정된 방사패턴
(b) Measured radiation patterns on XZ plane

그림 7. 반사계수와 방사패턴
Fig. 7. Reflection coefficient and radiation patterns.

IV. 결 론

본 논문에서는 다이폴 상태와 루프 상태로 변환 가능한 종이접기식의 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 일반 흡프린터를 사용해 종이 필름 위에 은 나노 입자 잉크를 인쇄하는 잉크젯 프린팅 방식으로 제작된다. 종이 필름이 접히지 않았을 때는 다이폴 모드로 동작하며, 종이 필름이 접혔을 때는 루프 모드로 동작한다. 종이접기식의 안테나에서는 접는 부분에서 발생하는 잉크의 균열 문제가 발생하게 된다. 본 논문에서도 종이 필름이 접혔을 때 깨짐 현상이 발생하였지만, 액체 금속층 하나인 EGaIn을 사용하여 깨짐 현상을 해결하였다. 제안된 안테나는 종이를 접고 펼치는 종이접기 방식의 안테나로 다

이폴 상태와 루프 상태로 변환할 수 있으며, 동일 주파수에서 다이폴과 루프 모드를 얻기 위하여 추가적인 안테나 도선을 배열하였다. 따라서 제안된 안테나는 1.8 GHz 대역에서 다이폴 상태와 루프 상태의 쌍대성으로 인하여 각각의 방사패턴의 Null 부분을 상호 보완할 수 있다.

References

- [1] H. Kang, S. Lim, "Electric and magnetic loop mode pattern switchable antenna", in *Antennas and Propagation (ISAP), 2012 International Symposium*, Nagoya, pp. 1337-1340, Sep. 2012.
- [2] V. Nguyen, M. Jeong, M. Dao, and S. Park, "Four-port beam reconfigurable antenna array for pattern diversity system", *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 6, pp. 1179-1186, 2012.
- [3] S. Yong, J. T. Bernhard, "A pattern reconfigurable null scanning antenna", *Antennas and Propagation IEEE Transactions on*, 60, pp. 4538-4544, 2012.
- [4] S. Nikolaou, R. Bairavasubramanian, C. Lugo Jr, I. Carrasquillo, D. C. Thompson, G. E. Ponchak, J. Papapolymerou, and M. M. Tentzeris, "Pattern and frequency reconfigurable annular slot antenna using PIN diodes", *Antennas and Propagation IEEE Transactions on*, 54, pp. 439-448, 2006.
- [5] S. Shynu, G. Augustin, C. K. Aanandan, P. Mohanan, and K. Vasudevan, "Design of compact reconfigurable dual frequency microstrip antennas using varactor diodes", *Progress in Electromagnetics Research*, 60, pp. 197-205, 2006.
- [6] G. H. Huff, J. T. Bernhard, "Integration of packaged RF MEMS switches with radiation pattern reconfigurable square spiral microstrip antennas", *Antennas and Propagation IEEE Transactions on*, 54, pp. 464-469, 2006.
- [7] C. W. Jung, M. Lee, G. Li, and F. De Flaviis, "Reconfigurable scan-beam single-arm spiral antenna integrated with RF-MEMS switches", *Antennas and Propagation IEEE Transactions on*, 54, pp. 455-463, 2006.

- [8] G. J. Hayes, Y. Liu, J. Genzer, G. Lazzi, and M. D. Dickey, "Self-folding origami microstrip antennas", *Antennas and Propagation IEEE Transactions on*, 62, pp. 5416-5419, 2014.
- [9] X. Liu, S. Yao, S. V. Georgakopoulos, and M. Tentzeris, "Origami quadrifilar helix antenna in UHF band", *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, Memphis, pp. 372-373, 2014.
- [10] S. Yao, X. Liu, S. V. Georgakopoulos, and M. M. Tentzeris, "A novel reconfigurable origami spring antenna", *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, Memphis, pp. 374-375, 2014.
- [11] 이영중, 이진성, 정병운, 박면주, 이병제, "다중 대역 이동 통신 단말기용 내장형 루프 안테나 설계", *한국 전자과학기술논문지*, 16(9), pp. 917-925, 2005년 9월.
- [12] Novacentrix Corp. Metalon, conductive inks for printed electronics-metalon js-b25p. [www.novacentrix.com]. 2011.
- [13] T. W. Yun, S. Lee, and S. J. Lim, "The capacitive touch paper using inkjet printing technology", *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 40, pp. 799-805, 2015.
- [14] M. D. Dickey, R. C. Chiechi, R. J. Larsen, E. A. Weiss, D. A. Weitz, and G. M. Whitesides, "Eutectic Gallium Indium(EGaIn): A liquid metal alloy for the formation of stable structures in microchannels at room temperature", *Advanced Functional Materials*, 18, pp. 1097-1104, 2008.

이 동 주



2015년 2월: 중앙대학교 전자공학부 (공학사)
 2015년 3월~현재: 중앙대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 메타물질

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

서 윤 식



2013년 2월: 중앙대학교 전자공학부 (공학사)
 2014년 3월~현재: 중앙대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 설계