DBpia

논문 17-42-04-02 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '17-04 Vol.42 No.04
https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.4.716

은 나노 분말과 카본 잉크를 이용한 완전 인쇄형 NFC 태그 설계

이 상 화•, 박 현 호*, 최 은 주*, 윤 선 홍*, 홍 익 표°

Design of a Full-Printed NFC Tag Using Silver Nano-Paste and Carbon Ink

Sang-hwa Lee•, Hyun-ho Park*, Eun-ju Choi*, Sun-hong Yoon*, Ic-pyo Hong°

요 약

본 논문에서는 은 나노 분말과 카본 잉크를 이용하여 13.56 MHz에서 동작하는 완전 인쇄형 NFC 태그를 설계 및 제작하였다. 제안된 NFC 태그는 50 pF의 내부 커패시턴스를 갖는 NFC 태그 IC에 적용하기 위해서, 2.74 μH의 인덕턴스를 갖는 원형 코일을 PI 필름 위에 설계하였으며, 전통적인 회로 제작 방식인 PCB 제조 공정에 비해 대면적 및 대량 생산, 저비용, 친환경공정 등의 장점을 가진 인쇄 전자 기술인 스크린 프린팅 기법을 이용하여 제작하였다. 제안된 구조는 단일 층으로 구현된 원형 코일, 코일 외곽과 중심부 사이에 칩 실장을 위한 점퍼 패턴, 그리고 코일과 점퍼 패턴과의 절연을 위한 절연 패턴으로 구성되어 있으며, 은 나노 분말과 카본 잉크를 이용하여 전도성 패턴과 절연 패턴을 중첩 인쇄하여 구현하였다. 본 논문에서 제안된 NFC 태그의 성능 검증을 위해 인쇄 선폭, 두께, 선저항, 밀착력 그리고 환경 신뢰성 평가 등을 수행하였으며, 완전 인쇄형 제작 방식 기반 NFC 태그의 적합성을 확인하였다.

Key Words : Full-printed NFC tag, Screen printing, Silver nano-paste

ABSTRACT

In this paper, a fully printed NFC tag operating at 13.56 MHz was designed and fabricated using silver nano-paste and carbon ink. The proposed NFC tag has a printed coil with an inductance of 2.74 μH on a PI film for application to an NFC tag IC with an internal capacitance of 50 pF. Screen printing technology used in this paper has advantages such as large area printing for mass production, low cost and eco-friendly process compared to conventional PCB manufacturing process. The proposed structure consists of a circular coil implemented as a single layer using silver nano-paste and carbon ink, a jumper pattern for chip mounting between the outer edge and the center of the coil, and an insulation pattern between the coil and the jumper pattern. In order to verify the performance of the proposed NFC tag, we performed the measurements of the printing line width, thickness, line resistance, adhesion and environmental reliability, and confirmed the suitability of the NFC tag based on the full-printed manufacturing method.

※ 본 연구는 2016년도 미래창조과학부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원(2016K000298)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2015R1A2A2A01003380)으로 수행되었습니다.

• First Author : Kongju National University Department of Information and Communication Engineering, lt4881ye@kongju.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Kongju National University Department of Information and Communication Engineering, iphong@kongju.ac.kr, 정회원

* IT Application Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Korea

논문번호 : KICS2017-01-004, Received January 7, 2017; Revised March 21, 2017; Accepted March 24, 2017

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

스마트 폰, 태블릿 PC 등의 소형화된 휴대 단말기기를 기반으로 사용자들의 편리한 생활환경 제공을 위한 다양한 생활 편의 서비스가 개발되고 있다. 특히, 사물인터넷(IoT, Internet of Things)이 가시화됨에 따라, 단순한 정보를 제공하는 물류 및 재고 관리 시스템 등 M2M(Machine to Machine) 영역에서 활용되고 있는 무선 식별 기술(RFID, Radio-Frequency Identification)로부터 확장되어, 양방향 통신이 가능하고, 높은 보안성 그리고 낮은 시스템 요구 비용 등의 특징을 갖는 비접촉식 근거리 무선통신 기술인 NFC(Near Field Communication) 기술이 사물인터넷 환경에서 기지국의 부하 문제 해결을 위한 트래픽 오프로딩(Offloading) 기술 중 저전력 무선 센서로서 중요성이 재조명되고 있다[1,2].

NFC 기술은 코일 형태의 태그(Tag) 안테나와 내부 커패시턴스를 갖는 IC 칩의 병렬 구성을 통해 13.56 MHz 주파수 대역을 이용하여 10 cm이내의 거리에서 낮은 전력으로 인접한 단말기와 직접 통신하는 기술로, 태그 안테나의 성능이 인식 거리 및 안정성 등 전체 시스템 성능에 영향을 미친다. 기존 일반적인 태그 안테나는 고정밀의 전도성 패턴 성형이 가능하고, 높은 설계 자유도와 회로의 신뢰성 확보가 용이하다는 장점을 갖는 FPCB(Flexible Printed Circuits Board) 제조 공정을 통해 제작되고 있다. 이와 같은 전통적인 회로 제조 방식은 복잡한 제작 공정으로 생산 효율이 낮고, 높은 비용이 요구되며, 제작 과정의 도금, 식각에서 발생하는 유해물질에 대한 환경 처리 비용 상승 등의 한계를 가지고 있으며, 응용분야 확대를 저해하는 요인으로 작용하고 있다[3,4].

최근 이러한 한계를 개선하기 위해 전도성 잉크 또는 분말을 이용, 회로를 인쇄하여 재료의 소모량이 적고, 친환경적이며 연속 공정으로 낮은 생산비용, 대면적 및 대량생산이 가능한 인쇄전자(Printed electronics) 기술 기반의 전자 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[5,8-10]. 인쇄전자 기술은 기능성(도체, 반도체, 절연체) 전자 잉크를 잉크젯(Ink jet), 스크린 프린팅(Screen Printing), 그라비아(Gravure), 플렉소(Flexo), 오프셋(Off-set Lithography) 등의 인쇄 기법을 통해 전자 소자를 제작하는 기술로, 단단한 플라스틱, 유리뿐만 아니라, 유연한 종이, 필름, 섬유에 이르기까지 다양한 재료 위에 인쇄할 수 있어, 재료에 크게 구애받지 않고 회로를 구현할 수 있다는 강점으로 디스플레이, RF 전자 소자 등 다양한 분야에서 연구되고 있으나[4,6,7], 선행 연구 대부분 전자 소자를 구성하는 일부 영역에 대하여 제한적으로 적용하여 추가적인 인쇄, 조립 공정이 요구되거나, 전도성 향상을 위해 부분적인 도금 공정이 추가 되는 등 생산성 향상에 한계가 있다[8-10].

본 논문에서는 전도성 패턴 구현이 쉽고, 낮은 제작 비용으로 대량 생산이 용이한 스크린 프린팅 기법을 이용하여 NFC 태그를 설계하였으며, 생산성을 고려하여 단면 구조의 완전 인쇄(Full-printed) 방식으로 제작하였다. 제안된 구조는 은 나노 분말을 이용하여 단일 층으로 구현된 원형 코일과 칩 실장을 위한 점퍼 패턴 그리고 코일과 점퍼 패턴 간 절연을 위한 카본 절연 패턴으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 설계한 NFC 태그의 성능 검증을 위해, 인쇄 선폭과 두께, 인쇄 패턴의 밀착력, 환경 신뢰성 등 인쇄 품질 검증을 수행하였으며, NFC 표준 규격 검사를 통해 적합성을 확인하였다.

Ⅱ. NFC 태그의 설계 및 제작

2.1 NFC 태그의 설계

리더로부터 전원을 공급받는 수동형 NFC 태그는 리더와 태그 사이의 유도 결합(Inductive coupling)을 통해 태그와 연결된 IC 칩으로부터 데이터를 전송하며, 이때 NFC 태그는 IC 칩의 내부 커패시턴스 성분과 태그 코일의 인덕턴스 성분으로 구성된 병렬 회로로부터 특정 주파수에서 자기 공진 주파수(SRF, Self Resonant Frequency)를 갖도록 설계한다[10]. 본 연구에서 제안된 NFC 태그는 50 pF의 내부 커패시턴스를 갖는 NXP사의 NTAG213 IC 칩 모델 적용을 목표로, 공진 주파수와 커패시턴스, 인덕턴스의 관계식인 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 로부터 13.56 MHz에서 동작하도록 2.7 μH의 인덕턴스를 갖는 원형 코일을 설계하였다. NFC 태그의 기판으로 크기 30×30 mm, 유전율 ε_r=3.5, 손실 탄젠트 tanδ=0.008, 두께 0.2 mm인 PI(Polyimide) 필름을 가정하였으며, 원형 코일을 구성하는 전도성 잉크는 0.02Ω/sq의 표면저항을 갖는 은 나노 분말을 가정하였다. 원형 코일의 인덕턴스를 결정하는 주요 설계 변수로 루프의 회전(turn)수와 선폭과 선 간격을 가정하고, 전자기장 해석 S/W인 ANSYS HFSS를 이용하여 주요 설계 변수의 변화에 따른 주파수 특성 분석을 통해 최적화를 진행하였다. 해석 시간 및 결과에 대한 신뢰도를 고려하여, 그림 1(a)와 같이 원형 코일을 십이각 루프 형태로 모델링

www.dbpia.co.kr

하고 시뮬레이션을 진행하였다.

해석 결과로부터 코일의 크기, 회전수, 코일 내부 공백의 크기 등과 같은 변수에 따른 코일 면적의 증가는 이득 향상과 인덕턴스 성분을 증가시키고, 코일의 선 간격을 고정된 변수로 할 때 선 폭 증가는 커패시턴스 성분을 증가시켜 공진 주파수를 낮은 주파수 대역으로 이동시킨다[11,12]. 이러한 경향성에 따라 선폭이 0.3 mm, 선 간격이 0.2 mm이며, 11번의 회전수를 갖는 지름 23 mm의 원형 코일을 설계하였으며, 그 외형을 그림 1에 나타내었다.

그림 1(a)에 최적화된 원형 코일의 설계 변수를 나타내었으며, 그림 1(b)에 제안된 NFC 태그 안테나의 구조를, 그림 1(c)에는 코일 중앙에 NFC IC 칩을 실장하기 위한 전도성 점퍼 선과, 원형 코일과 점퍼 선 사이의 절연을 위한 카본 절연 패턴을 그림 1(d)에 나타내었다.

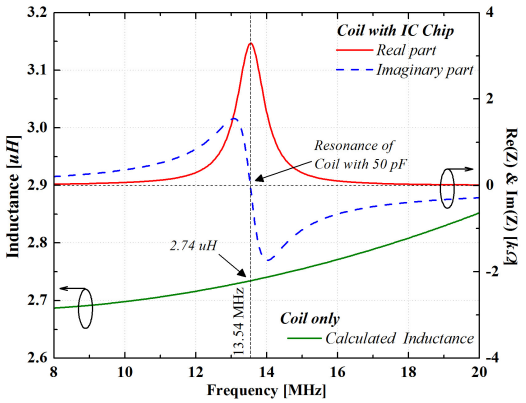
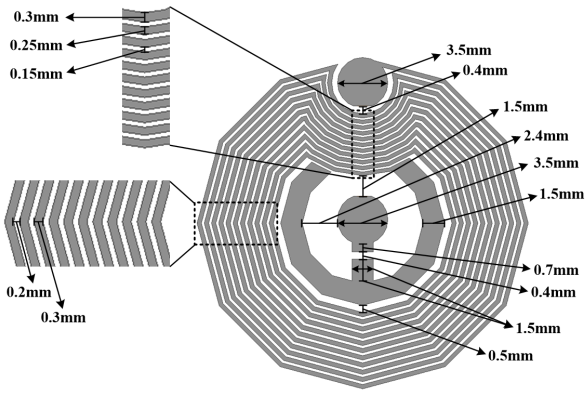
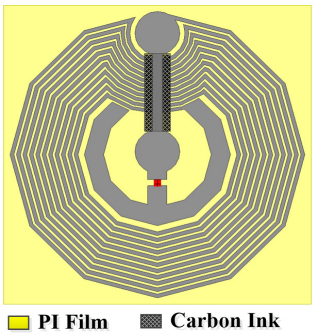


그림 2. 제안된 NFC 태그의 계산된 임피던스 특성
Fig. 2. Simulated impedance of proposed NFC tag

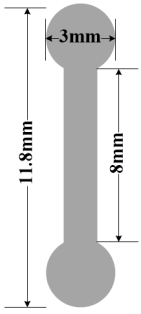
최적화된 NFC 태그 안테나의 주파수 특성을 확인하기 위해, 원형 코일의 인덕턴스, IC 칩이 실장 된 태



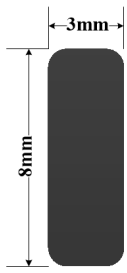
(a) 원형 코일의 설계 (1st layer)
(a) Design of circular coil (1st layer)



(b) 제안된 NFC 태그 안테나
(b) The proposed NFC tag antenna



(c) 점퍼 선
(3rd layer)
(c) Jumper line
(3rd layer)



(d) 절연층
(2nd layer)
(d) Dielectric layer
(2nd layer)

그림 1. NFC 태그의 구성
Fig. 1. Component of NFC tags

www.dbpia.co.kr

그 안테나의 임피던스와 위상 등을 도출하기 위한 EM 해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 해석 결과로부터 코일의 인덕턴스는 2.74 μH, 13.54 MHz의 공진 주파수를 갖는 등 목표하는 태그 안테나의 주파수 특성(L=2.7 μH, *SRF*=13.56 MHz)을 확인하였으며, 안테나의 주파수 선택 특성인 Q factor의 Q값과 유도 리액턴스, 저항의 관계식인 $Q= 2\pi fL/R$ 로부터 코일의 선저항 4.1 Ω, 56.85의 Q값을 확인하였다.

2.2 NFC 태그의 제작

설계한 NFC 태그 안테나의 성능 검증을 위해 스크린 프린팅 기법을 이용하여 완전 인쇄 방식으로 제작을 진행하였다. 제안한 NFC 태그는 370×470 mm의 PI 필름 위에 스크린 프린터(SERIA, SFA-GL 7346IP)를 이용하여 80개의 태그 안테나를 인쇄하였다. 인쇄 방법으로 코일에 해당하는 부분을 은 나노 분말(ANP, ANP-SP-150429-1)로 인쇄한 후, 절연 패턴에 해당하는 부분을 카본 잉크(Solarnux, NEX-470-C)로 인쇄하였으며, 점퍼 선에 해당하는 부분을 다시 은 나노 분말을 사용하여 중첩 인쇄하였다. 원형 코일의 낮은 직렬 저항 특성을 구현하기 위해, 고점도 은 나노 분말을 사용하여 코일 패턴의 두께를 두껍게 인쇄하였으며, 인쇄 압력(Down force, kg·f/cm^2), 속도(Velocity, mm/s), 간격(Clearance, mm), 경화 온도(Curing temperature, °C/min) 등 최적화된 인쇄 조건을 도출하고[13], 이를 바탕으로 제작하였다.

낮은 저항 특성을 가지며 단일 층으로 구성된 완전 인쇄형 NFC 태그의 제작을 위해, 전도성 패턴과 절연 패턴 형성에 사용되는 은 나노 분말과 카본 잉크의 특성이 고려된 최적화된 인쇄 조건으로 제작하였으며, 각각의 인쇄 조건을 표 1에 나타내었다. 이후, 인쇄된 회로의 잉크 번짐 현상을 최소화하고, 전도성 향상을 위한 건조 과정을 진행하였으며, 컨벡션 오븐(Convection oven)을 사용하여 250 °C에서 수행하였다.

표 1. 최적화된 인쇄 조건
Table 1. Optimized printing conditions

Ink / Printing Conditions	Silver nano-paste	Carbon Ink
Printing Down force	50 kg·f/cm^2	200 kg·f/cm^2
Printing Velocity	30 mm/s	100 mm/s
Clearance	6 mm	1 mm
Curing Temperature	150°C/30min	150°C/30min

그림 3. 제작한 NFC 태그
Fig. 3. The fabricated NFC tags

제작한 완전 인쇄형 NFC 태그의 중앙에 IC 칩을 실장하기 위해, 저비용으로 높은 신뢰성 확보가 가능한 플립 칩 본딩 방식으로 에폭시 접착제를 이용하여 접합하였으며[14], 반자동 플립 칩 본더(FINETECH, Fineplacer) 장비를 사용하여 제작하였다. 제작된 NFC 태그의 외형을 그림 3에 나타내었다.

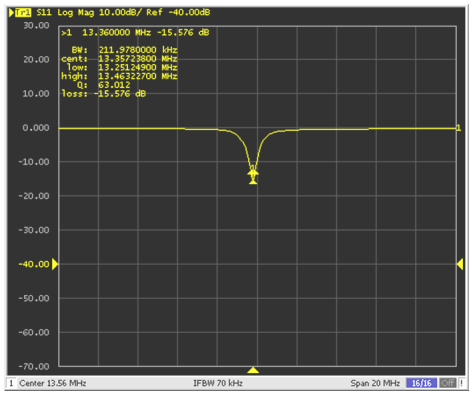
Ⅲ. NFC 태그의 측정 및 분석

제작한 완전 인쇄형 NFC 태그의 인쇄 품질을 검증하기 위해, 인쇄 선폭과 두께, 인쇄 패턴의 밀착력, 환경 신뢰성 등을 평가하였으며, NFC 표준 규격의 적합성 확인을 위해 시험 항목으로 선 저항과 Q 값, 공진 주파수 측정 시험을 진행하였다. 제작한 완전 인쇄형 NFC 태그의 인쇄 선폭과 두께, 잉크의 번짐이나 전이 불량을 확인하기 위해 SEM(HITACHI, S-4700)을 사용하여 불균일도를 측정하였으며[15], 인쇄된 패턴의 밀착력은 ASTM D3359 시험방법을 통해 평가하였다. 제작된 태그의 온·습도와 저온 시험 등의 환경 신뢰성 검증을 위해 항온 항습기(ESPEC, SH-641)를 사용하였으며, 코일의 선 저항, 태그 안테나의 Q 값, 공진 주파수 측정을 통해 NFC 표준 규격의 적합성을 검증하였다.

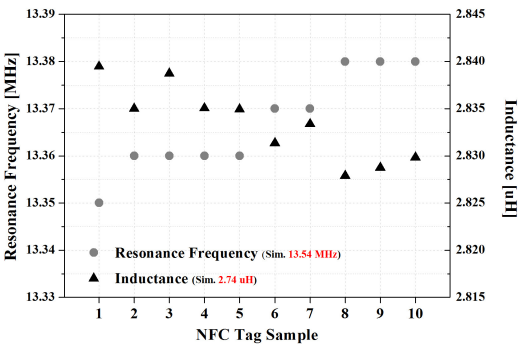
NFC 태그의 인쇄 품질 검증과 NFC 표준 규격 검증 과정은 10 개의 시료를 대상으로 평균값을 통해 적합성을 확인하였다. 2차원 단차 측정기(2D surface profiler)와 전자현미경을 통해 인쇄 선폭을 측정하였으며, 태그의 인쇄 선폭과 두께의 불균일도는 10 % 이하를 기준으로 코일의 선폭 295.4 μm, 불균일도 6.3 %, 코일의 두께는 20.2 μm, 불균일도 8.2 %로 인쇄

www.dbpia.co.kr

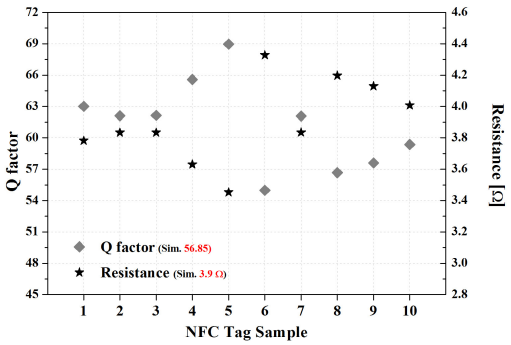
품질이 양호함을 확인하였다. 인쇄된 패턴의 밀착력은 표면의 크로스 컷(Cross-cut)으로 제거된 영역이 5 % 미만이면 4B, 0 %이면 5B로 분류하는 ASTM D3359 기준으로 시험하였으며, 10 개의 시료 중 2 개는 4B, 8 개는 5B로 전체적인 인쇄 패턴의 밀착력이 우수함을 확인하였다. NFC 태그의 환경 신뢰성 평가를 위해 온·습도 시험을 수행하였으며, 곰팡이, 부식 등 발생이 유리한 환경인 온도 40±2 °C, 상대습도 93±3 %에서 시험을 진행하였다. 저온 시험은 -10±2 °C의 환경에서 96 시간 동안 수행하였으며, 온·습도 및 저온 환경에서 정상 동작을 확인함으로써 NFC 태그의 신뢰성을 확보하였다. 전자부품연구원의 자체 NFC 표준 규격을 바탕으로 선 저항은 멀티미터를 이용하여, Q 값과 공진주파수는 그림 4(a)와 같이 반사 손실 특성을 측정하여 NFC 태그의 적합성을 평가하였다. 그림 4(b),(c)를 통해 알 수 있듯이 10개의 시료에 대한 선 저항은 평균 3.9 Ω(자체 기준 : 선 저항≤30 Ω), Q값과 공진주파수는 평균 61.25, 13. 36 MHz(자체 기준: 13.56 MHz±0.3 MHz)이며, 공진 주파수와 커패시턴스, 인덕턴스의 관계식인 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 을 통해 얻은 코일의 인덕턴스는 평균 2.83 uH으로 NFC 태그로서 적합한 것을 확인하였다.



(a) 반사 손실 특성
(a) Measured reflection loss characteristics



(b) 10개 시료에 관한 공진주파수와 인덕턴스
(b) Measured resonance frequency and inductance for 10 samples



(c) 10개 시료에 관한 Q 값과 선저항
(c) Measured Q factor and resistance for 10 samples

그림 4. 제작한 NFC 태그의 적합성 평가
Fig. 4. The suitability evaluation of fabricated NFC tags

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 친환경적이며 저비용, 대면적 및 대량 생산이 가능한 인쇄 전자 기술인 스크린 프린팅 기법을 이용하여 13.56 MHz에서 동작하는 NFC 태그를 설계 및 제작하였다. 칩 본딩을 제외한 모든 회로 제조 공정을 인쇄 방식으로 일원화된 완전 인쇄형 제작 방식을 통해 생산성을 극대화 하였으며, 이를 위해 최적의 인쇄 조건 및 경화 조건을 도출하였다. 제안된 NFC 태그의 인쇄 선폭과 두께의 불균일도, 인쇄 패턴의 밀착력 등 인쇄 품질 검증과 환경 신뢰성 평가 및 표준 규격 시험을 통해 NFC 태그로서 적합성을 확인하였다. 제안된 NFC 태그는 스마트폰 어플리케이션과 연동하여 물류 정보 조회, 광고용 포스터, 스마트 치료용 교구와 같은 다양한 무선 통신 제품 등에 응용이 기대된다.

References

[1] M. S. Lee, G. C. Shin, and S. C. Bang, "Trends of near field communication and high speed NFC technology," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 30, no. 12, pp. 51-56, Nov. 2013.

[2] J. Y. Kim and D. H. Won, "Security analysis and improvements of authentication protocol

www.dbpia.co.kr

for privacy protection in RFID systems," *J. KICS*, vol 41, no. 5, pp. 581-591, May 2016.

[3] S. M. Hwang and K. H. Lee, "Failure mechanisms analysis of printed electronics type FPCB used in NFC antenna," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2015*, pp. 1198-1199, Jeju Island, Korea, Jun. 2015.

[4] J. Y. Park and J. S. Park, "The present status and future aspects of the market for printed electronics," *J. KIICE*, vol. 17, no. 2, pp. 263-272, Feb. 2013.

[5] Y. S. Yang, I. K. You, H. K. Yun, S. H. Hong, J. H. Park, M. K. Jang, and J. H. Lee, "Technology trend of printed electronics," *ETRI J. Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 28, no. 5, pp. 1-11, Oct. 2013.

[6] S. S. Cho and I. P. Hong, "Design of paper-based reconfigurable frequency selective surface for spectrum control of indoor environments," *J. KICS*, vol. 41, no. 7, pp. 775-782, Jul. 2016.

[7] T. H. Yun, S. Lee, and S. J. Lim, "Inkjet-printed capacitive touch paper," *J. KICS*, vol. 40, no. 5, pp. 799-805, May 2015.

[8] S. H. Eom and S. J. Lim, "Paper-based pattern switchable antenna using inkjet-printing technology," *J. KIEES*, vol. 26, no. 7, pp. 613-619, Jul. 2015.

[9] S. H. Nam and Y. C. Chung, "UHF & HF RFID credit card size tag antenna designs using silver-ink and jumper structure," *J. KIEES*, vol. 27, no. 11, pp. 972-977, Nov. 2016.

[10] B. Shao, Q. Chen, R. Liu, and L. R. Zheng, "Design of fully printable and configurable chipless RFID tag on flexible substrate," *Microwave and Optical Technol. Lett.*, vol. 54, no. 1, pp. 226-230, Jan. 2012.

[11] S. J. Lee, S. B. Park, T. H. Jung, D. G. Lim, J. H. Park, Y. H. Kim, and N. S. Mun, "Electrical properties of RFID tag antenna fabricated by Si CMOS process," *J. Microelectronics & Packaging Soc.*, vol. 16, no. 1, pp. 21-25, Mar. 2009.

[12] S. S. Mohan, M. M. Hershenson, S. P. Boyd, and T. H. Lee, "Simple accurate expressions for planar spiral inductances," *J. Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 10, pp. 1419-1424, Oct. 1999.

[13] S. A. Choi, J. T. Youn, J. S. Mok, and C. W. Koo, "Computer simulation of ink transfer in the different printing speed and ink viscosity in the screen printing," *J. Korean Graphic Arts Commun. Soc.*, vol. 29, no. 1, pp. 75-88, Apr. 2011.

[14] K. S. Choi, H. Lee, H. C. Bae, and Y. S. Oem, "Recent trends of flip chip bonding technology," *ETRI J. Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 28, no. 5, pp. 100-110, Oct. 2013.

[15] C. H. Kim, Y. S. Lee, Y. K. Kim, D. S. Kim, and B. O. Choi, "Characteristics of resonant frequency of printed RFID tag antenna," in *Proc. KSME Int. Conf. Commun. 2007*, pp. 228-230, Pyeongchang, Korea, Oct. 2007.

이 상 화 (Sang-hwa Lee)

2014년 3월~현재 : 공주대학교 정보통신공학부 학사과정

<관심분야> NFC, 주파수 선택 구조

박 현 호 (Hyun-ho Park)

2012년 2월 : 전북대학교 반도체과학기술학과 졸업

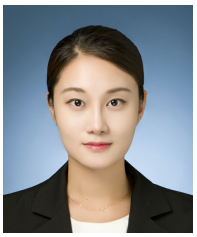
2014년 8월 : 전북대학교 반도체공학과 석사

2014년 10월~현재 : 전자부품연구원 연구원

<관심분야> 반도체공학, 전자공학, 광통신공학

www.dbpia.co.kr

최 은 주 (Eun-ju Choi)



2013년 2월 : 전북대학교 물리학과 졸업
2015년 8월 : 전북대학교 물리학과 석사
2016년 7월~현재 : 전자부품연구원 연구원
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신공학

윤 선 홍 (Sun-hong Yoon)

2002년 8월 : 아주대학교 응용화학과 졸업
2005년 2월 : 포항공과대학교 화학과 석사
2012년 1월~현재 : 전자부품연구원 책임연구원
<관심분야> 인쇄전자, 3D프린팅, 에너지저장/변환

홍 익 표 (Ic-pyo Hong)

2000년 2월 : 연세대학교 전기컴퓨터공학과 대학원 공학박사
2000년 3월~2003년 2월 : 삼성전자 무선사업부 책임연구원
2006년 2월~2007년 2월 : Texas A&M 대학교 방문연구원
2012년 2월~2013년 2월 : Syracuse 대학교 방문연구원
2003년 3월~현재 : 국립 공주대학교 정보통신공학부 교수
<관심분야> 전자기 수치해석, 주파수 선택구조, 스펙트럼 공학

www.dbpia.co.kr