

## 의복용 메타물질 흡수체

# Metamaterial Based Absorber for Wearable Applications

이 동 주 · 임 성 준

Dongju Lee · Sungjoon Lim

### 요 약

본 논문에서는 스크린 인쇄 방식으로 제작된 의복용 메타물질 흡수체를 제안한다. 제안된 흡수체의 단위구조의 도체 패턴 모양은 의류 브랜드인 샤넬 로고를 차용하였으며, FEM 방식의 시뮬레이션 툴을 사용하여 성능을 검증하였다. 또한, 성능을 검증하기 위해 일반적인 직물 원단 위에 전도성 잉크를 스크린 프린팅 방식으로 인쇄하여 시제품을 제작한 뒤, 벡터 회로망 분석기와 두 개의 도파관을 이용하여 반사계수를 측정하였다. 그 결과, 제안된 흡수체는 10.8 GHz에서 약 93 %에 가까운 흡수율을 갖는 것을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we propose a textile metamaterial absorber that using screen printing technology. A unit cell of the proposed absorber is motivated from the commercial Chanel logo for wearable applications. The complex impedance of the designed unit cell is analyzed by full-wave simulation. To verify its performance, the proposed metamaterial absorber is fabricated where the silver conductive ink is screen printed on an ordinary textile. From experimental results, the absorptivity of the proposed absorber is around 93 % at 10.8 GHz under normal incidence.

Key words: Metamaterial Absorber, Screen Printing Technology, Wearable Electronics

## I. 서 론

메타물질을 이용한 전자파 흡수체는 2008년 Landy에 의해 처음으로 도입된 이후 지속적으로 연구되고 있다<sup>[1]</sup>. 메타물질 흡수체는 무한히 주기적인 단위구조로 구현되기 때문에 필요한 공간에 적용시키기 쉽다. 게다가 기존의 페라이트와 같은 전자파 흡수체와는 달리, 부피가 작으며 얇은 두께임에도 불구하고 100 %에 가까운 흡수율을 가질 수 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 장점을 바탕으로 메타물질 흡수체는 다양한 응용 분야에 적용되고 있으며, 특히 곡면

형 구조에 적용시키기 위해 PDMS(polydimethylsiloxane)<sup>[3]</sup>, 필름<sup>[4]</sup>, 폴리이미드(polyimide)<sup>[5]</sup>와 같은 유연성을 가지는 기판을 활용한 유연한 흡수체가 활발히 연구되고 있다.

한편, 웨어러블 디바이스에 적용시키기 위해 직물에 전도성 물질을 사용하여 전자 기기를 구현하는 연구가 이루어지고 있다. 예를 들면 웨어러블 전자소자의 에너지 밀도를 증가시키기 위한 yarn 슈퍼커패시터가 제안되었으며<sup>[6]</sup>, 인간의 생체 신호를 실시간으로 감시할 수 있는 센서가 제안되었다<sup>[7]</sup>. 이러한 웨어러블 디바이스는 일반 직물 원단에 전도성 도체 폴리머 섬유를 구현하거나<sup>[8]</sup>,

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

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

· Manuscript received October 10, 2016 ; Revised November 18, 2016 ; Accepted December 12, 2016. (ID No. 20161010-09S)

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

전도성 물질을 스크린 프린팅 방법을 사용하여 인쇄함으로써 만들어진다<sup>[9]</sup>. 특히 웨어러블 디바이스는 특성상 인체에 매우 밀접해 있기 때문에 전자 기기 주변의 필드 분포가 인체에 의해 영향을 받을 수 있으므로 전자파 적합성(EMC : Electromagnetic Compatibility)과 전자파의 인체 흡수율(SAR : Specific Absorption Rate)과 같은 항목들이 고려되어야 한다. SAR의 경우에는 SAR 모델링 기법을 통하거나, 시제품을 몸에 부착하여 측정함으로써 웨어러블 디바이스가 인체로부터 어떤 영향을 받는지 확인할 수 있다<sup>[10],[11]</sup>.

본 논문에서는 웨어러블 응용을 위해 직물에 스크린 프린팅 방식을 이용하여 구현한 메타물질 흡수체를 제안한다. 단위구조의 도체 패턴 모양은 샤넬 로고를 차용하여 사용하였으며, FEM(Finite Element Method) 방식의 시뮬레이션 툴을 사용하여 설계되었다. 성능을 측정하기 위해 전도성 잉크를 스크린 프린팅 방식으로 일반 직물 원단에 인쇄하여 시제품을 제작하였다. 스크린 프린팅 방식은 간단하고 경제적이며, 빠르게 공정이 가능하며, 특히 다른 인쇄 기술들과는 다르게 대량생산이 가능하다는 장점이 있다. 시제품을 제작 후 성능 측적을 위해 벡터 회로망 분석기와 두 개의 도파관을 이용하여 반사계수를 측정하였으며, 제안된 흡수체는 10.8 GHz에서 약 93%에 가까운 흡수율을 갖는다. 본 논문을 통해 일반 직물에도 메타물질을 이용한 전자파 흡수체의 구현이 가능하다는 사실을 입증하였고, 이는 레이더를 피 탐지하기 위한 전투 조끼와 같은 군사적 용도로 충분히 사용될 수 있다는 가능성을 제시한다.

## II. 흡수체 설계

제안된 흡수체는 일반 직물 원단 위에 전도성 잉크를 스크린 인쇄 방식으로 인쇄하여 흡수체를 구현하였으며, 흡수체의 단위 구조는 그림 1과 같다. 단위구조의 윗면은 샤넬 로고 모양의 도체 패턴으로 이루어져 있으며, 입사되는 전자기파의 투과를 방지하기 위해 아랫면은 전면 구리 테이프로 덮여 있다. 샤넬 로고는 반지름  $r$ 을 갖는 두 개의 원으로 이루어졌으며, 두 원의 중심( $c, c'$ ) 사이의 거리는  $d$ 로 표현되었다. 설계된 흡수체는 전도성 잉크의

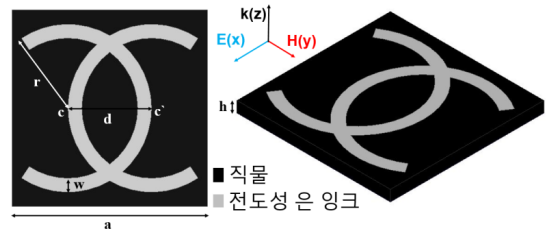


그림 1. 제안된 흡수체의 단위구조;  $a=0.7, d=1.5, r=2, w=0.5, h=1.2$  [단위: mm].

Fig. 1. Layout of proposed absorber;  $a=0.7, d=1.5, r=2, w=0.5, h=1.2$  [unit: mm].

도체 패턴으로 인한 인덕턴스와 인접한 단위 구조 사이의 공간에서 발생하는 커패시턴스에 의해 LC 공진을 발생시키며 이는 전기적 공진을 발생시킨다. 또한, 흡수체의 윗면과 아랫면의 도체 성분으로 인해 역방향 전류가 흐르게 되며 이로 인해 자기적 공진이 발생한다.

그림 2는 제안된 흡수체에서 사용된 설계 변수 값의 변

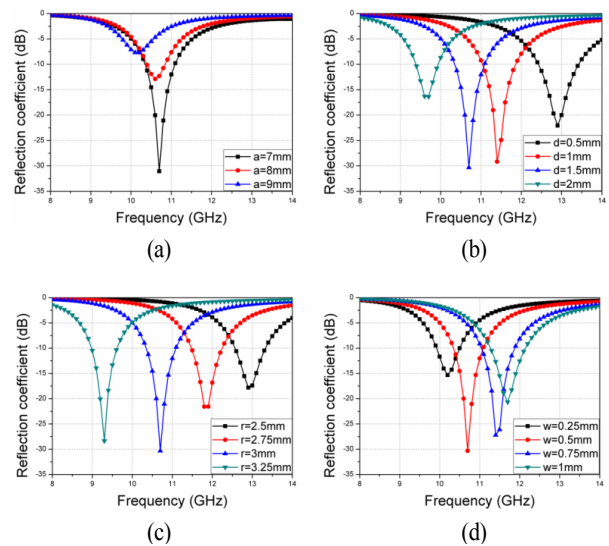


그림 2. 설계 변수의 변화에 따른 반사계수의 변화. (a)  $a$ 가 7~9 mm로 변할 때, (b)  $d$ 가 0.5~2 mm로 변할 때, (c)  $r$ 이 2~3.25 mm로 변할 때, (d)  $w$ 가 0.25~1 mm로 변할 때.

Fig. 2. Reflection coefficient variation when the design parameters of unit cell are changed. (a) When  $a$  varies from 7 to 9 mm, (b) When  $d$  varies from 0.5 to 2 mm, (c) when  $r$  varies from 2 to 3.25 mm, and (d) when  $w$  varies from 0.25 to 1 mm.

화에 따라 반사계수의 변화를 FEM 시뮬레이션을 통해 나타낸 그림이다. 그림 2(a)는 제안된 흡수체의 크기인  $a$ 가 7~9 mm로 바뀔 때의 반사계수 변화를 나타낸다. 동작 주파수는 크게 변화하지 않지만,  $a$ 의 값이 증가함에 따라 반사계수 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는  $a$ 값이 커짐에 따라 인접한 단위구조 사이의 커플링이 감소하기 때문이다. 그림 2(b)는 샤넬 로고를 이루는 두 원의 반지름 사이의 거리  $d$ 의 변화에 따른 반사계수의 변화를 나타낸 그림이다.  $d$ 가 0.5~2 mm로 변함에 따라 반사계수가 줄어듦을 확인할 수 있다. 다음으로 그림 2(c)는 두 원의 반지름인  $r$ 이 2.5~3.25 mm로 변할 때의 반사계수 변화를 나타낸다.  $r$ 이 증가함에 따라 동작주파수가 감소됨을 확인할 수 있다. 마지막으로 그림 2(d)는 인쇄된 도체 부분의 폭  $w$ 의 변화에 따른 반사계수를 나타내며,  $w$ 가 0.25~1 mm로 증가함에 따라 동작주파수 또한 증가함을 확인할 수 있다. 그 결과, 제안된 흡수체는 각각  $a=7$  mm,  $d=1.5$  mm,  $r=3$  mm,  $w=0.5$  mm, 기판의 높이  $h=1.2$  mm의 변수 값으로 설계되었다.

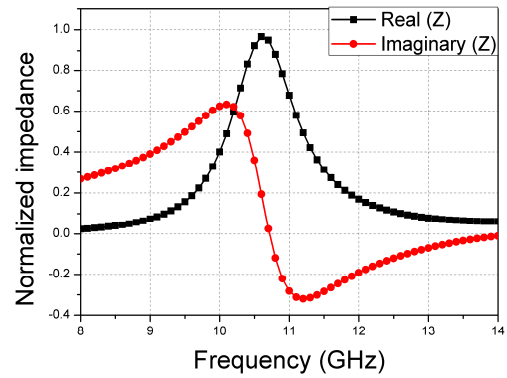
전자기파가 흡수체로 입사될 때 발생하는 반사신호와 투과신호를 최소화함으로써 흡수체의 흡수율을 최대화시킬 수 있다. 그 중에서 투과계수는 기판의 손실과 도체의 손실을 통해 열로써 변환시킴으로써 최소화시킬 수 있다. 반면, 반사계수는 흡수체와 공기 사이의 임피던스 정합을 통해 최소화시킬 수 있다. 흡수체의 고유 임피던스  $Z(\omega)$ 는 유효 유전율( $\epsilon_r$ )과 투자율( $\mu_r$ )의 값에 따라 변화하며 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r(\omega)}{\epsilon_0 \epsilon_r(\omega)}}, \quad (1)$$

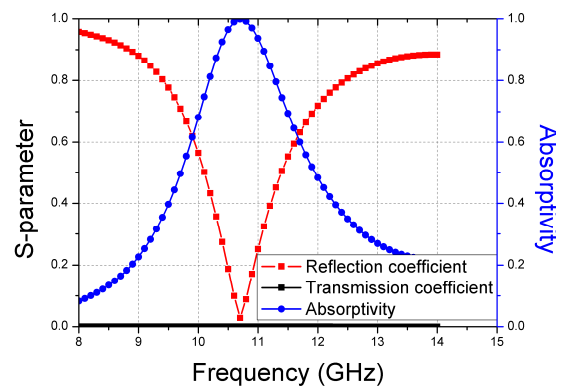
$\epsilon_0$ 와  $\mu_0$ 는 각각 공기 중의 유전율과 투자율을 나타낸다. 또한 식 (2)를 통해서 공기와 흡수체 사이의 임피던스 정합은 흡수체의 유효 유전율과 투자율을 조절함에 따라 맞출 수 있음을 알 수 있다.

$$\Gamma(\omega) = \sqrt{\frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0}}, \quad (2)$$

$Z(\omega)$ 와  $Z_0$ 는 각각 제안된 흡수체와 공기의 고유 임피던스를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 3. (a) 제안된 흡수체의 복소수 형태의 정규화된 고유 임피던스, (b) 시뮬레이션된 반사계수, 투과계수, 흡수율

Fig. 3. (a) Normalized complex impedance of the proposed absorber. (b) Simulated reflection coefficient, transmission coefficient, and absorptivity.

그림 3(a)는 제안된 흡수체에 전자기파가 수직으로 입사될 때의 정규화된 고유 임피던스( $Z$ )를 복소수 형태로 표현한 그림이다. 복소수 형태의 고유 임피던스( $Z$ )는 다음 식에 의해 S-parameter( $S$ )로부터 계산할 수 있다.

$$Z = (U + S)(U - S)^{-1}, \quad (3)$$

$U$ 는 단위행렬을 나타낸다.

복소수 형태의 정규화된 고유 임피던스의 값 중 허수 부분은 제안된 흡수체의 동작 주파수를 나타낸다. 반면, 실수 부분의 값이 1에 가까울수록 공기와 흡수체 사이의 임피던스 정합이 잘 되었다는 것을 나타낸다. 그림 3(b)는

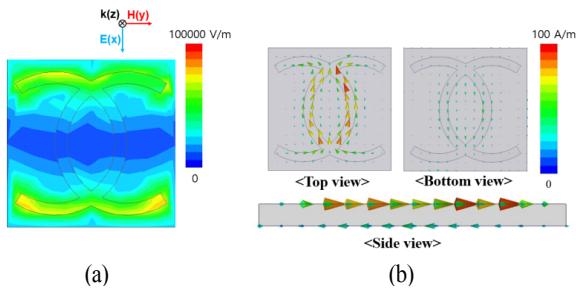


그림 4. (a) 윗면에서의 전기장 분포, (b) 윗면과 아랫면에서의 전류 분포

Fig. 4. (a) Electric field distribution at the top layer, and (b) surface current density at top and bottom layers.

제안된 흡수체의 시뮬레이션 된 반사계수, 투과계수, 흡수율의 값을 나타낸 그림이다. 그림 3으로부터 제안된 흡수체가 10.8 GHz에서 동작하며, 100 %에 가까운 흡수율을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 메타물질 기반의 전자파 흡수체에서 동시에 발생하는 전기적 공진과 자기적 공진을 나타낸 그림이다. 흡수체의 윗면에 구현된 도체 패턴에서의 인덕턴스와 인접한 단위구조 사이의 커패시턴스에 의해 LC 공진이 발생되며, 이에 따라 전기적 공진이 발생하게 된다. 그림 4(a)는 전기장 분포를 나타낸 그림이며, 인접한 두 단위구조 사이에 강력한 전기장이 형성된다. 또한, 흡수체의 윗면과 아랫면의 두 전도성 층으로 인해 서로 방향이 다른 역방향 전류가 형성되며, 이로 인해 자기적 공진이 발생된다. 그림 4(b)에서 두 전도성 층에서 반대방향으로 흐르는 전류를 볼 수 있다.

### III. 제작 및 측정결과

제안된 흡수체의 성능을 검증하기 위해 스크린 인쇄 방식으로 전도성 잉크를 일반 직물 원단에 인쇄함으로써 시제품을 제작하였다. T-공진기 방법을 사용하여 흡수체의 기관으로 사용되는 원단의 전기적 특성을 알아내었으며, 유전율과 유전손실값은 각각 1.8과 0.12이다<sup>[12]</sup>. 다음으로 직물원단 위에 Ahtech LTS사의 LOCTITE EDAD 479SS E&C 전도성 잉크(silver conductive ink)를 스크린 인쇄하였다. 사용된 전도성 잉크의 시트 저항은 0.02 Ω



그림 5. 스크린 인쇄방식으로 구현된 시제품

Fig. 5. Prototype of the proposed absorber using screen printing technology.

/sq/mil이다. 제안된 흡수체의 성능 측정을 위해 도파관 모드 측정법을 사용하였으며, 이에 따라 8.2~12.4 GHz에서 동작하는 도파관 WR-90의 개구면 크기에 맞춰 시제품을 제작하였다. 그림 5는 스크린 인쇄 방식으로 제작된 시제품의 모습이다. 흡수체의 윗면은 전도성 잉크를 인쇄함으로써 샤넬 모양의 도체 패턴을 구현하였고, 아랫면은 전면 구리 테이프를 붙여 투과성분을 방지하였다.

직물 위에 전도성 잉크를 인쇄한 뒤 열에 의한 소결과정을 약 150°C에서 10여 분의 시간동안 진행하였다<sup>[13]</sup>. 소결과정은 전도성 잉크의 포함되어 있는 불순물들을 없애주는 과정으로 소결 과정을 통해 전도성 잉크의 전도도를 향상시킬 수 있다. 뿐만 아니라 소결과정을 통해 흡수체와 전도성 잉크 사이의 결합을 강화시킬 수 있다.

시제품을 제작한 뒤 흡수체의 흡수율 측정을 위해 반사계수를 측정하였다. 흡수체의 흡수율(A)은 다음 식과 같이 반사계수( $\Gamma$ )와 투과계수(T)를 통해 계산된다.

$$A(\omega) = 1 - \Gamma(\omega) - T(\omega) = 1 - \Gamma(\omega) \quad (4)$$

$A(\omega)$ 는 제안된 흡수체의 흡수율을 나타내며  $\Gamma(\omega)$ 와  $T(\omega)$ 는 각각 반사계수와 투과계수를 나타낸다.

제안된 흡수체는 직물의 뒷면이 전면 구리 테이프로 덮여 있기 때문에 투과계수를 0으로 가정하고, 오로지 반사계수로부터 흡수율 값을 계산하였다. 그림 6은 흡수체의 성능을 측정하기 위한 측정 환경을 나타낸다. S-parameter를 측정하기 위해 Anritsu사의 MS2038C 벡터 회로망 분석기와 두 개의 8.2~12.4 GHz에서 동작하는 WR-90 도파관을 사용하였다. 이때 도파관의 측정 모드는 기본 모드인 TE10 모드가 사용되었다. 그림과 같이 두 도파관 사이에 시제품을 위치시킨 뒤 시제품의 S-parameter를 측

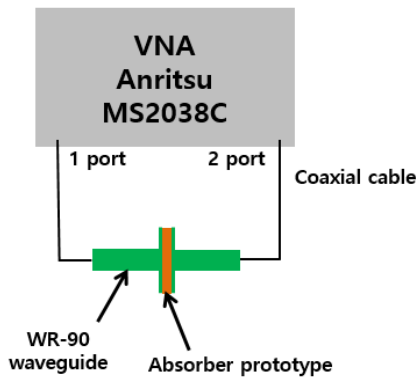


그림 6. 도파관을 이용한 측정환경  
Fig. 6. Waveguide measurement setup.

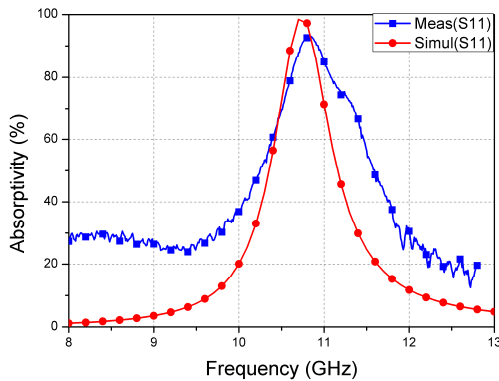


그림 7. 제안된 흡수체의 시뮬레이션 및 측정결과  
Fig. 7. Simulated and measured absorptivity of proposed absorber.

정하였다.

그림 7은 제안된 흡수체의 시뮬레이션과 측정결과 값을 비교한 그림이다. 제안된 흡수체는 10.8 GHz에서 동작하며, 약 93%의 흡수율을 갖는다. 시뮬레이션과 측정결과를 비교해 보면 동작 주파수는 10.8 GHz로 동일하지만, 흡수율에서 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 도파관의 개구면 크기에 맞추기 위해 단 세 개의 단위구조를 구현하였지만, 실제 메타물질을 이용한 전자파 흡수체는 무한 주기구조로 설계하였기 때문에 두 결과의 차이가 나타났다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 웨어러블 디바이스를 위해 일반 원단에

구현한 의복용 메타물질 흡수체를 구현하였다. 제안된 흡수체는 전도성 잉크를 스크린 인쇄를 통해 구현하였으며, 단위구조 모양은 의류 브랜드인 샤넬 로고를 차용하였다. 스크린 인쇄 방식은 다른 인쇄방식과는 다르게 공정이 쉽고, 대량생산이 가능하다는 장점이 있다. 제안된 흡수체의 성능을 검증하기 위해 시제품을 제작한 뒤, 벡터 회로망 분석기와 WR-90 도파관을 이용해 흡수체의 반사계수를 측정하였고, 이를 바탕으로 흡수율을 계산하였다. 그 결과, 제안된 흡수체는 10.8 GHz에서 동작하며, 약 93%의 흡수율을 갖는다.

#### References

- [1] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 20, pp. 1-4, 2008.
- [2] B. Kim, B. Lee, "Design of metamaterial-inspired wide-band absorber at X-band adopting trumpet structures", *J. Electromagnetic Eng. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 314-316, 2014.
- [3] K. Ling, K. Kim, and S. Lim, "Flexible liquid metal-filled metamaterial absorber on polydimethylsiloxane (PDMS)", *Opt. Express*, vol. 23, no. 16, pp. 21375-21383, 2015.
- [4] K. Iwaszczuk, A. C. Strikwerda, K. Fan, X. Zhang, R. D. Averitt, and P. U. Jepsen, "Flexible metamaterial absorbers for stealth applications at terahertz frequencies", *Opt. Express*, vol. 20, no. 1, pp. 635-643, 2012.
- [5] P. K. Singh, K. A. Korolev, M. N. Afsar, and S. Sonkusale, "Single and dual band 77/95/110 GHz metamaterial absorbers on flexible polyimide substrate", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 26, pp. 1-5, 2011.
- [6] L. Kou, T. Huang, B. Zheng, Y. Han, X. Zhao, K. Gopalsamy, H. Sun, and C. Gao, "Coaxial wet-spun yarn supercapacitors for high-energy density and safe wearable electronics", *Nat. Commun.*, vol. 5, no. May, p. 3754, 2014.
- [7] L. Yan, J. Yoo, B. Kim, and H. J. Yoo, "A 0.5- $\mu$ W rms 12- $\mu$ W wirelessly powered patch-type healthcare sensor

- for wearable body sensor network", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 11, pp. 2356-2365, 2010.
- [8] Z. Wang, L. Zhang, Y. Bayram, and J. L. Volakis, "Embroidered conductive fibers on polymer composite for conformal antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 9, pp. 4141-4147, 2012.
- [9] K. Jost, D. Stenger, C. R. Perez, J. K. McDonough, K. Lian, Y. Gogotsi, and G. Dion, "Knitted and screen printed carbon-fiber supercapacitors for applications in wearable electronics", *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, Aug. pp. 2698, 2013.
- [10] N. H. M. Rais, P. J. Soh, F. Malek, S. Ahmad, N. B. M. Hashim, and P. S. Hall, "A review of wearable antenna", *Loughbrgh. Antennas Propag. Conf. LAPC 2009*, Dece. pp. 225-228, 2009.
- [11] S. Zhu, R. Langley, "Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 4, pp. 926-935, 2009.
- [12] K. P. Lätti, M. Kettunen, J. P. Strom, and P. Silven-toinen, "A review of microstrip T-resonator method in determining the dielectric properties of printed circuit board materials", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 5, pp. 1845-1850, 2007.
- [13] B. S. Cook, A. Shamim, "Inkjet printing of novel wideband and high gain antennas on low-cost paper substrate", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 9, pp. 4148-4156, 2012.

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 정교수  
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 안테나