

원격 화학 센서로 활용 가능한 플렉서블 미세유체 메타물질 흡수체

Flexible Microfluidic Metamaterial Absorber for Remote Chemical Sensor Application

김형기 · 임성준

Hyung Ki Kim · Sungjoon Lim

요약

본 논문에서는 원격 화학 센서로 활용 가능한 플렉서블 미세유체 메타물질 흡수체를 제안한다. 제안된 흡수체는 잉크젯 프린팅 기법으로 증위 기관 위에 인쇄한 분할고리공진기(SRCR: Split Ring Cross Resonator)와 Polydimethylsiloxane (PDMS) 기관에 레이저 식각된 미세유체 채널로 구성되어 있어 매우 유연한 특징을 보인다. 본 연구에서 제안한 메타물질 흡수체는 미세유체 채널에 주입된 화학물질에 따른 실효 유전율의 변화를 공진주파수의 이동으로 감지할 수 있다. 제안된 흡수체는 시뮬레이션과 측정을 통하여 성능을 검증하였다. 측정 결과, 공기의 경우에는 10.49 GHz에서 흡수가 되었고, 에탄올과 탈이온수의 경우에는 각각 10.04 GHz와 8.9 GHz에서 흡수체로 동작함을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, a novel flexible microfluidic metamaterial absorber is proposed for remote chemical sensor applications. The proposed metamaterial absorber consists of a periodic of split-ring-cross resonators(SRCRs) and a microfluidic channel. The SRCR patterns are inkjet-printed using silver nanoparticle inks on paper. The microfluidic channels are laser-etched on polydimethylsiloxane(PDMS) material. The proposed absorber can detect change of the effective permittivity at different liquids. Therefore, the absorber can be used for a remote chemical sensor by detecting change of the resonant frequencies. The performance of the proposed absorber is demonstrated with full-wave simulation and measurement results. The experimental results shows that the resonant frequency is 10.49 GHz at the empty channel. When ethanol and DI-water are injected into the channel, the resonant frequencies are 10.04 GHz and 8.9 GHz, respectively.

Key words: Metamaterial Absorber, Frequency-Tunable Absorber, Microfluidics, Chemical Sensor, Split Ring Cross Resonator(SRCR)

I. 서론

현대 산업 및 연구에서 사용되는 다양한 화학물질은 물질안전보건자료(MSDS: Material Safety Data Sheet)와 화학물질 분류, 표지에 관한 세계조화시스템(GHS: Globa-

lly Harmonized System of classification and labelling of chemicals)에 의하여 관리되고 있다. 하지만 이러한 관리 속에서도 복잡한 실험 과정에 의하여 미확인 화학물질이 간혹 발생하게 된다. 화학물질 중에는 인체에 해를 끼치는 물질들이 다수 존재한다. 메탄올을 섭취할 경우에는

「이 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A2A1A11050010).」

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

· Manuscript received October 2, 2015 ; Revised January 7, 2016 ; Accepted January 8, 2016. (ID No. 20151002-11S)

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

중추신경계에 영향을 초래하여 실명이나 사망에 이르는 큰 피해를 입게 된다^[1]. 따라서 다양한 환경에서 사용되는 화학물질의 검출 및 정량화 과정은 필수적이다.

한편, 유전율과 투자율을 인위적으로 조절할 수 있는 메타물질의 성질을 이용하여 메타물질 흡수체를 구현할 수 있다. 특히 분할고리 공진기(SRR: Split Ring Resonator)와 같은 전자기적 공진기를 사용하여 특정 공진 주파수에서 메타물질의 임피던스와 공기의 임피던스를 정합시킴으로써 반사파를 최소화할 수 있다^[2]. 메타물질의 공진 주파수는 공진기의 capacitive 성분과 inductive 성분에 매우 민감하게 반응한다. 이러한 특징을 센서에 응용할 수 있다면 메타물질 흡수체를 이용하여 높은 민감도를 가진 센서로 활용이 가능하다. 기존에 전도성 고무 기판에 공진기를 배치하여 기계적으로 당겨짐을 측정하거나, 실리콘 기판 위에 SRR 패턴을 증착하여 압력을 측정하는 연구가 발표된 사례가 있다^{[3],[4]}.

미세유체 공학은 마이크로 리터 단위의 매우 적은 양의 유체를 사용하여 분석하는 방법으로 기존의 검출 방식에 비해 소형화 시킬 수 있는 장점이 있다. 마이크로 펌프를 사용한 실리콘 기반의 인산염 측정 미세유체 시스템, 전기삼투 유동을 기반으로 화학 반응을 모니터링할 수 있는 미세유체 시스템이 발표되어 화학물질 분석에 미세유체 시스템을 이용할 수 있는 가능성을 열어주었다^{[5],[6]}. 이를 기반으로 생물학적 정량이나 혈액 분석, 생산 품질 관리 등 다양한 분야에서 응용되고 있다^{[7]~[11]}. 최근에는 유체 가변형 Radio Frequency(RF) 시스템과 유체 검출 RF 시스템 분야로 확장되어 연구되고 있고, 유체를 유전체로 사용한 연구 결과가 발표되었다^{[12]~[14]}.

본 논문에서는 메타물질 흡수체에 미세유체 채널을 구현함으로써 원격으로 화학물질을 검출할 수 있는 무선 화학센서를 제안한다. 제안된 메타물질 흡수체는 미세유체 채널에 주입된 화학물질에 따른 공진주파수의 이동을 측정하여 농도를 검출한다. 메타물질 흡수체는 은나노입자가 포함된 전도성 잉크를 종이 기판 위에 잉크젯 프린팅으로 인쇄하여 구현하였다. 따라서 기존의 Printed Circuit Board(PCB) 기반 흡수체에 비하여 매우 유연하고, 부산물이 발생하지 않아 환경 친화적인 장점을 가지고 있다. 한편, 미세유체 채널은 Polydimethylsiloxane(PDMS) 기

판 위에 레이저 식각으로 제작하여 화학 폐기물을 발생시키지 않을 뿐만 아니라, 유연성도 확보할 수 있다. 이렇게 제안된 메타물질 흡수체의 성능과 에탄올 센서로써 활용가능성은 모의 실험과 측정 결과를 통해 입증하였다.

II. 흡수체 설계

메타물질은 유효 매질 근사 기법(effective medium approximation)을 통하여 복소수로 구성된 유전율과 투자율을 가진다는 것을 알 수 있다^[15]. 전자기파가 메타물질에 수직으로 입사할 경우, 메타물질의 고유 임피던스($\tilde{Z}(\omega)$)는 식 (1)과 같이 유전율(ϵ)과 투자율(μ)에 의하여 결정되게 된다.

$$\tilde{Z}(\omega) = \sqrt{\tilde{\mu}(\omega)/\tilde{\epsilon}(\omega)} \tag{1}$$

상대 유전율(ϵ_r)과 상대 투자율(μ_r)을 동일한 값으로 만들어 주면, 메타물질의 고유 임피던스는 공기의 임피던스와 정합을 이루어 반사성분을 제거할 수 있다. 또한, 메타물질의 굴절률(n)은 허수 부분이 크기 때문에, 입사된 전자기파의 에너지를 소모시키게 된다. 따라서 메타물질 흡수체는 공기와의 임피던스 정합으로 반사파를 최소화하고 큰 손실을 이용하여 투과파를 최소화함으로써 얇은

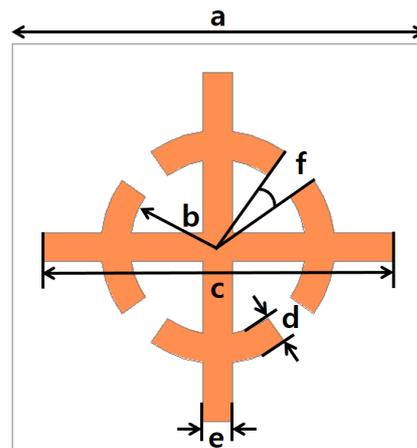


그림 1. 미세유체 채널을 제외한 제안된 메타물질 흡수체의 구조

Fig. 1. Layout of the proposed metamaterial absorber without microfluidic channel($a=7$ mm, $b=1.5$ mm, $c=6$ mm, $d=0.5$ mm, $e=0.5$ mm, and $f=20^\circ$).

두께에서도 높은 흡수율을 얻을 수 있다.

제안된 흡수체의 단위 구조는 그림 1에서 확인할 수 있다. 간단하고 대칭적인 구조인 분할고리 십자공진기(SRCR: Split Ring Cross Resonator)를 사용하여 미세유체 채널을 형성하기에 용이할 뿐만 아니라, 편파에도 둔감한 특성을 가질 수 있도록 설계하였다. SRCR의 공진은 십자 구조의 인덕턴스, 링 구조 간극의 커패시턴스, 이웃한 공진기 사이의 커패시턴스 성분에 의하여 발생한다. 이때, SRCR의 capacitive 성분은 식 (2)에 의하여 결정된다^[16].

$$C \cong \frac{\epsilon_{eff} 10^{-3}}{18\pi} \frac{K(k)}{K'(k)} l \quad (2)$$

식 (2)의 ϵ_{eff} 는 실효 유전율, $K(k)/K'(k)$ 는 타원 적분의 근사 비율, l 은 간극 면의 길이를 나타낸다. 식 (2)에 의하여 SRCR의 공진주파수는 공진기의 구조뿐만 아니라, 실효 유전율에 의하여 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서 공진기의 구조나 실효 유전율을 조절할 수 있다면, 공진주파수의 변화를 감지하는 센서로 활용 가능하다. 공진기의 구조는 제작 이후 변경하기 어렵기 때문에, 미세유체 채널을 도입하여 주입되는 유체에 따라 실효 유전율을 변경하는 방법을 사용하였다.

효과적인 구조의 미세유체 채널을 설계하고, 단위 구조 상의 위치를 결정하기 위해서 모의실험을 통해 전계 분포를 확인하였다. 그림 2(a)는 수평 방향, 그림 2(b)는 대각선 방향의 편파에 대한 모의실험 결과를 나타내고 있다. 입사파의 전계는 이웃한 SRCR 사이의 capacitive 간극에서 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 해당 위치에 미세유체 채널을 형성할 때 실효 유전율을 가장 민감하게 변화시킬 수 있기 때문에 미세유체 채널은 이웃한 공진기 사이를 지나갈 수 있도록 설계해야 한다.

채널에 유체를 균일하게 주입하기 위해서는 일정한 압력을 필요로 한다. 이때 필요한 압력의 크기는 Young-Laplace 공식에 의하여 채널의 단면적에 반비례하는 것을 알 수 있다^[14]. 따라서 채널의 폭을 넓게 설계하면, 채널 내부에 유체를 균일하게 주입하기 어렵게 된다. 그림 3에서 설계한 미세유체 채널을 확인할 수 있다. 채널은 유체의 균일한 주입과 배출이 용이하도록 관 형태로 설계하였다. 이웃한 공진기 사이에 위치한 채널은 실효 유전율

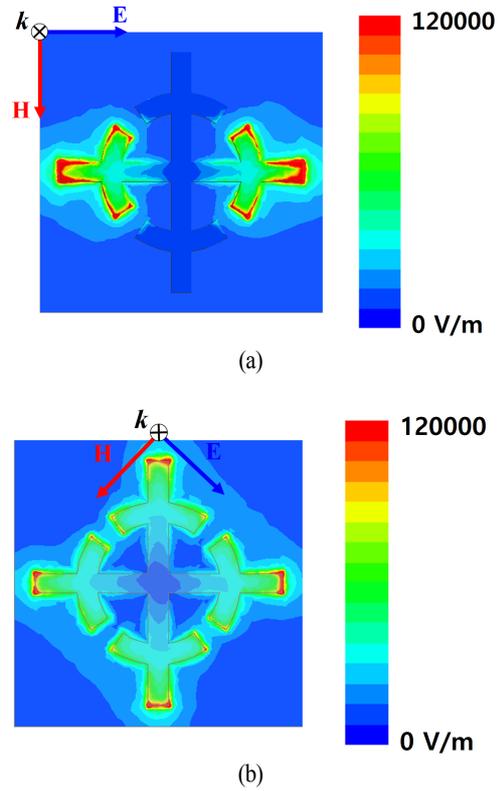


그림 2. 미세유체 채널을 제외한 (a) 수평 방향, (b) 대각선 편파 전계 분포 시뮬레이션 결과.

Fig. 2. Magnitude of electric field distribution for (a) horizontal and (b) diagonal polarized incident wave of the proposed metamaterial absorber without microfluidic channel.

의 변화량을 증가시키기 위하여 채널 폭을 넓게 하였다. 그리고 채널의 연결 부위는 SRCR과 이격시킴으로써 영향을 최소화하였다.

그림 4에서 제안된 흡수체의 최종 단위 구조를 나타내고 있다. 총 3개의 층으로, 상단에는 미세유체 채널, 중단에는 SRCR 구조, 하단에는 금속 박막으로 덮인 층이 위치하고 있다. 상단과 하단은 PDMS로 이루어져 있고, 중단은 종이로 구성되어 있다. 종이 1장으로는 두께가 얇아 충분한 흡수율을 얻을 수 없기 때문에 하단의 PDMS가 추가되었다. 또한, 제안된 흡수체의 바닥면은 금속으로 덮여 있어, 투과성분이 발생하지 않는다.

그림 5에서는 제안된 흡수체의 임피던스 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있다. 공기의 임피던스를 기준으로 정

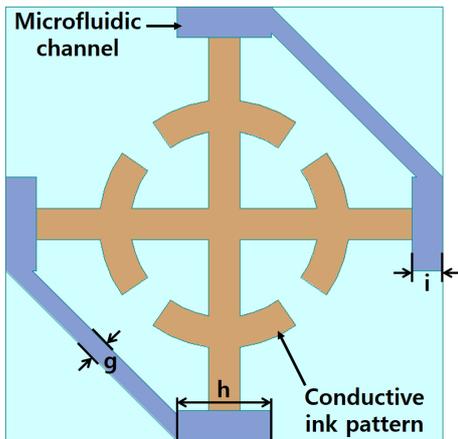


그림 3. 미세유체 채널을 포함한 제안된 메타물질 흡수체의 구조

Fig. 3. Layout of the proposed metamaterial absorber with microfluidic channel($g=0.3$ mm, $h=1.5$ mm, $i=0.5$ mm).

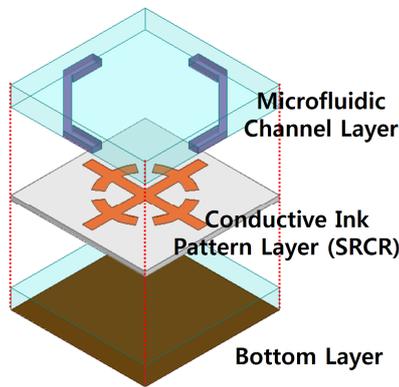


그림 4. 제안된 흡수체의 3차원 조감도

Fig. 4. Three-dimensional view of the final design($j=153$ mm, $k=133$ mm).

규화 하였고, 채널이 비어 있을 경우와 탈이온수(DI water: Deionized water), 에탄올을 주입하였을 때의 결과를 각각 나타내었다. 그림 5(a)에서 채널이 비어 있을 경우, 10.49 GHz에서 허수 부분이 0, 실수 부분이 1을 보이고 있다. 따라서 공진주파수에서 공기와의 임피던스 정합을 이루었고, 반사파를 최소화 하게 된다. 그림 5(b)는 에탄올이 주입되었을 경우이고, 10.04 GHz에서 공진하며, 공기와의 임피던스 정합을 이루었다. 그림 5(c)는 탈이온수가 주입된 결과로 8.9 GHz에서 공진하며, 임피던스 정합을 이룬

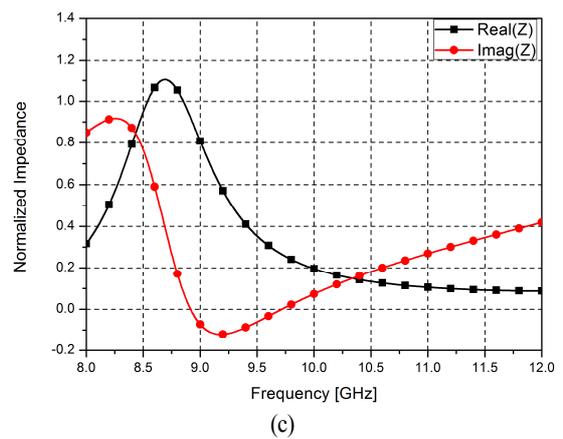
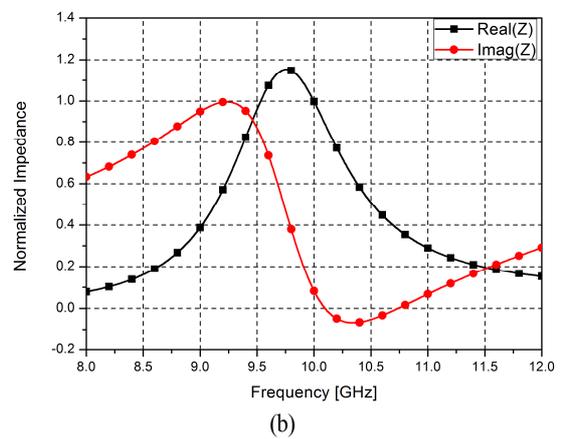
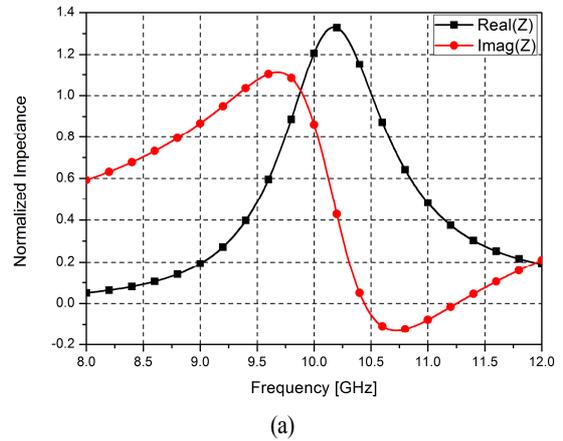
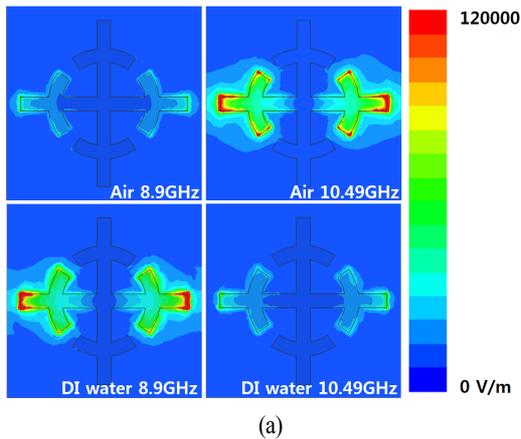
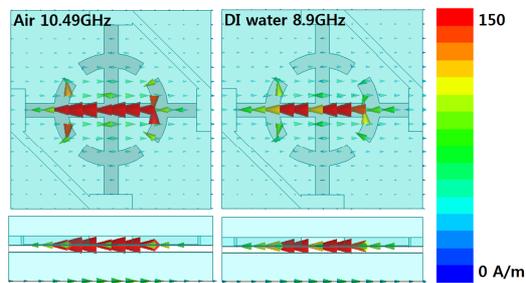


그림 5. (a) 채널이 비어 있을 경우, (b) 에탄올이 주입되었을 경우, (c) 탈이온수가 주입되었을 경우의 임피던스 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Simulated normalized impedance for (a) empty state, (b) filling with ethanol, and (c) filling with DI water.



(a)



(b)

그림 6. 제안된 흡수체의 (a) 전계 분포, (b) 표면 전류 분포 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulated (a) electric field distribution and (b) vector current distribution.

것을 확인할 수 있다.

그림 6에서는 미세유체 채널이 비어 있을 경우와 탈이온수가 주입되었을 경우의 전계 분포와 표면 전류 분포 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 채널이 비어 있을 경우에는 10.49 GHz, 탈이온수가 주입되었을 경우에는 8.9 GHz에서 이웃한 SRCR 사이에 강한 전계가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 6(b)에서는 채널의 상태에 따라 서로 다른 주파수에서 단위 구조 상단과 하단에 역평행 전류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 시뮬레이션 결과를 통해 채널의 상태에 따른 전자기적 공진의 발생을 확인할 수 있다.

III. 결 과

그림 7에서 제작된 흡수체를 나타내고 있다. 흡수체의

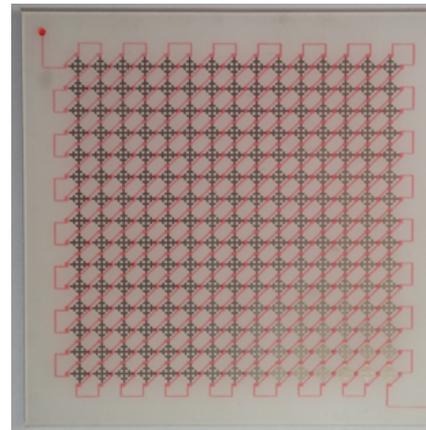


그림 7. 제안된 흡수체의 시제품
Fig. 7. Fabricated prototype sample.

상단과 하단은 상대 유전율 4.44, 유전 손실 0.075의 PD-MS를 사용하였고, 각 두께는 1 mm이다. 중단에는 상대 유전율 2.35, 유전 손실 0.11의 종이를 사용하였고, 두께는 0.22 mm이다. 자유공간 측정을 위해서 15×15개의 단위 구조를 인쇄하여 제작하였다.

상단의 미세유체 채널은 PDMS 표면에 레이저 식각기를 이용하여 제작하였고, 채널의 깊이는 0.3 mm이다. 중단의 SRCR 패턴은 Dimatix DMP2800 잉크젯 프린터를 사용하여 인쇄하였고, Dimatix 10 pL 카트리지를(DMC-11-610)로 3회 인쇄하였다. 은나노입자를 포함한 전도성 잉크는 Advanced Nano Products 사의 DGP 40LT-15C를 사용하였다. 인쇄 과정이 완료된 후, 높은 전기 전도도를 얻기 위하여 180℃ 오븐에서 5분간 열 소결과정을 거쳤다. 이때 전도성 잉크의 전기 전도도는 9×10^6 에서 1.1×10^7 S/m가 된다^[17]. 이 값은 은의 전기 전도도(6.3×10^7 S/m)의 14.3%에서 17.5%에 해당하고, 철의 전기 전도도(1.0×10^7 S/m)와 비슷한 수치이다. 제작된 흡수체 하단에는 구리 박막을 입혀 투과성분을 방지하였다. 각 층은 표면을 플라즈마 처리한 후에 누수를 방지하기 위하여 Polyethylene Terephthalate(PET) 재질의 라미네이팅 필름을 사용하여 부착하였다.

제안된 흡수체의 성능을 자유공간에서 측정하기 위하여 그림 8과 같은 측정 환경을 구축하였다. 두 개의 혼 안테나와 Anritsu MS2038C 벡터 회로망 분석기를 측정에

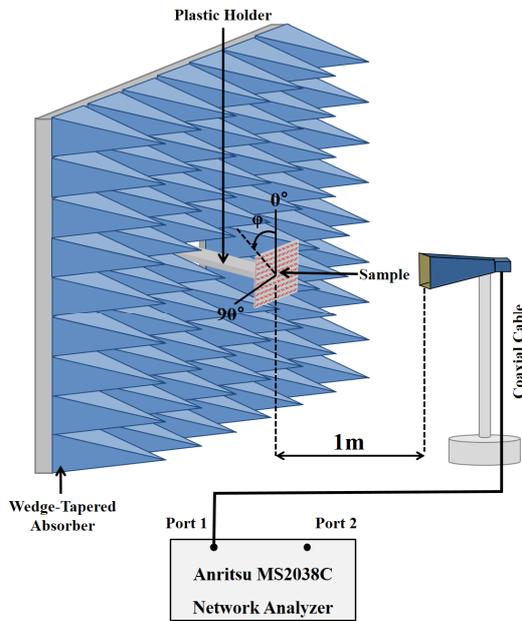


그림 8. 자유공간 상에서 흡수율 측정 환경
Fig. 8. Free space test environment to measure absorptivity.

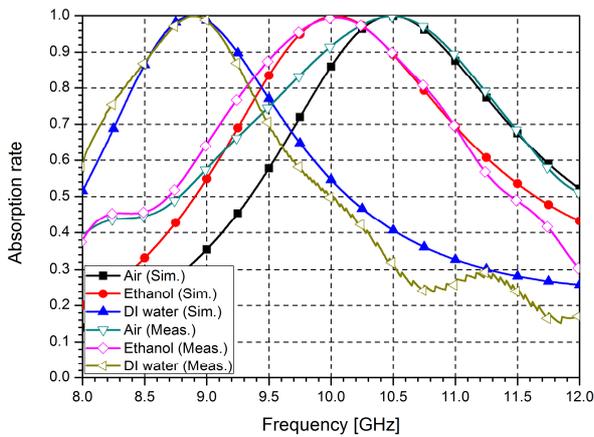


그림 9. 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 9. Simulated and measured absorption rates of the proposed absorber.

사용하였다. 시제품에서 반사된 신호만을 측정하기 위하여 시제품 주변에 Wedge-tapered 흡수체를 배치하였고, 벡터 회로망 분석기의 time gating method를 사용하였다. 또한, far-field 조건을 만족하기 위하여 시제품과 안테나의 거리는 1 m로 하였다. 샘플과 동일한 크기의 금속판의 반사계수를 측정하여 이를 전반사 기준으로 하였다.

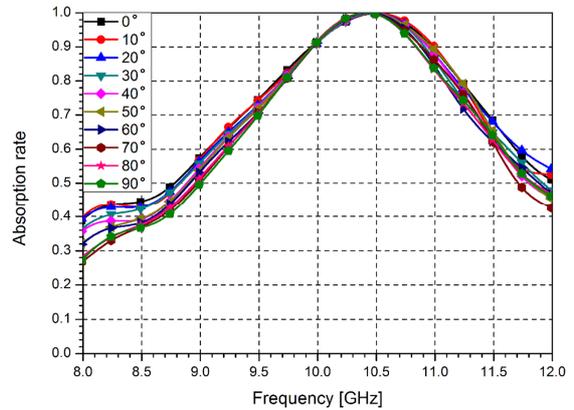


그림 10. 편파 측정 결과
Fig. 10. Measured absorption rates for different polarization angles (ϕ).

흡수율은 다음 식 (3)에 의하여 계산되어진다. 제안된 흡수체는 바닥면이 구리로 덮여 있기 때문에 투과성분은 고려하지 않아도 된다.

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - |S_{11}|^2 \quad (3)$$

그림 9에서 제안된 흡수체의 시뮬레이션 및 측정 결과를 확인할 수 있다. 제안된 흡수체는 채널이 비어 있는 경우, 10.49 GHz에서 99.8 %의 흡수율이 측정되었다. 그리고 채널에 에탄올이 주입된 경우에는 10.04 GHz에서 99.4 %, 채널에 탈이온수가 주입된 경우에는 8.9 GHz에서 99.8 %의 흡수율이 측정되었다. 그림 10에서 채널이 비어 있을 때, 편파에 대한 측정 결과를 나타내었다. 대칭적 구조를 사용하여 ϕ 방향으로 $0^\circ \sim 90^\circ$ 의 모든 편파에 대해 일정한 성능이 유지됨을 확인할 수 있다.

따라서 제안된 흡수체는 흡수되는 공진 주파수의 변화를 통해 원격으로 물질의 정보를 감지할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 에탄올과 같은 화학물질의 정보를 원격으로 센싱할 수 있는 플렉서블 미세유체 메타물질 흡수체를 제안하였다. 제안된 흡수체는 잉크젯 프린팅 기법으로 종위 기판 위에 인쇄한 SRCR 구조와 PDMS 기판에 레이저 식각된 미세유체 채널로 구성되어 있어 매우 유

연한 특징을 보인다. 제안된 흡수체는 미세유체 채널에 주입된 화학물질에 따른 실효 유전율의 변화를 공진주파수의 이동으로 감지하여 농도를 검출하게 된다. 제안된 흡수체는 시뮬레이션과 측정을 통하여 성능을 검증하였다. 제안된 흡수체의 측정 결과, 공기일 경우에는 10.49 GHz, 탈이온수의 경우 8.9 GHz, 에탄올일 경우에는 10.04 GHz에서 90 %이상의 높은 흡수율을 얻을 수 있었다. 본 논문의 결과를 통해 제안된 흡수체가 원격 화학 센서로 활용될 수 있는 가능성을 확인하였으며, 원격 화학 센서로 응용되기 위해서는 Calibration 및 신뢰성 확보에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한, 주기적인 구조를 확장함으로써 효과적인 대면적 무선 화학 센서로도 응용 가능할 것이다.

References

- [1] G. Wen, X. Wen, S. Shung, and M. Choi, "Whole-cell biosensor for determination of methanol", *Sensors Actuators B: Chem.*, vol. 201, no. 1, pp. 586-591, Oct. 2014.
- [2] N. Landy, S. Sajuyigbe, J. Mock, D. Smith, and W. Padilla, "Perfect metamaterial absorber", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 20, p. 207402, May 2008.
- [3] F. Zhang, S. Feng, K. Qiu, Z. Liu, Y. Fan, W. Zhang, Q. Zhao, and J. Zhou, "Mechanically stretchable and tunable metamaterial absorber", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 9, p. 091907, Mar. 2015.
- [4] R. Melik, E. Unal, N. Perkgoz, C. Puttlitz, and H. Demir, "Metamaterial-based wireless strain sensors", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no. 1, p. 011106, Jul. 2009.
- [5] E. Verpoorte, B. Schoot, S. Jeanneret, A. Manz, H. Widmer, and N. Rooij, "Three-dimensional micro flow manifolds for miniaturized chemical analysis systems", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 4, no. 4, p. 246, Oct. 1994.
- [6] G. Doku, S. Haswell, "Further studies into the development of a micro-fia system based on electroosmotic flow for the determination of phosphate as orthophosphate", *Anal. Chim. Acta*, vol. 382, no. 1, p. 1, Feb. 1999.
- [7] I. Dimov, L. Basabe-Desmonts, J. Garcia-Cordero, B. Ross, A. Ricco, and L. Lee, "Stand-alone self-powered integrated microfluidic blood analysis system(SIMBAS)", *Lab on a Chip*, vol. 11, no. 5, pp. 845-850, Mar. 2011.
- [8] E. Delamarque, A. Bernard, H. Schmid, A. Bietsch, B. Michel, and H. Biebuyck, "Microfluidic networks for chemical patterning of substrates: Design and application to bioassays", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 120, no. 3, pp. 500-508, Jan. 1998.
- [9] A. Martinez, S. Phillips, G. Whitesides, and E. Carrilho, "Diagnostics for the developing world: Microfluidic paper-based analytical devices", *Anal. Chem.*, vol. 82, no. 1, pp. 3-10, Jan. 2010.
- [10] K. Abe, K. Suzuki, and D. Citterio, "Inkjet-printed microfluidic multianalyte chemical sensing paper", *Anal. Chem.*, vol. 80, no. 18, pp. 6928-6934, Sep. 2008.
- [11] B. Cook, J. Cooper, and M. Tentzeris, "An inkjet-printed microfluidic RFID-enabled platform for wireless lab-on-chip applications", *IEEE Trans. on Microw. Theo. and Tech.*, vol. 61, pp. 4714-4723, Nov. 2013.
- [12] J. Mateu, N. Orloff, M. Rinehart, and J. Booth, "Broadband permittivity of liquids extracted from transmission line measurements of microfluidic channels", *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 523-526, Jun. 2007.
- [13] T. Chretiennot, D. Dubuc, and K. Grenier, "A microwave and microfluidic planar resonator for efficient and accurate complex permittivity characterization of aqueous solutions", *IEEE Trans. on Microw. Theo. and Tech.*, vol. 61, no. 2, pp. 972-978, Dec. 2012.
- [14] G. Hayes, J. So, A. Qusba, M. Dickey, and G. Lazzi, "Flexible liquid metal alloy(EGaIn) microstrip patch antenna", *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, vol. 60, no. 5, pp. 2151-2156, Apr. 2012.
- [15] N. Landy, C. Bingham, T. Tyler, N. Jokerst, D. Smith, and W. Padilla, "Design, theory, and measurement of a polarization-insentive absorber for terahertz imaging", *Phys. Rev. B*, vol. 79, no. 12, p. 125104, Mar. 2009.
- [16] W. Withayachumnankul, C. Fumeaux, and D. Abbott, "Compact electric-LC resonators for metamaterials",

Optics Express, vol. 18, no. 25, pp. 25912-25921, Dec. 2010.

[17] S. Kim, C. Moriotti, F. Alimenti, P. Mezzanotte, A. Georgiadis, A. Collado, L. Roselli, and M. Tentzeris, "No

battery required: perpetual RFID-enabled wireless sensors for cognitive intelligence applications", *IEEE Microw. Mag.*, vol. 14, no. 5, p. 66, Jul. 2013.

김 형 기



2014년 2월: 중앙대학교 전기전자공학부 (공학사)

2014년 2월 ~ 현재: 중앙대학교 전기전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 메타물질 및 전자파 흡수 기술

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