

에탄올의 농도를 검출하기 위한 미세유체 메타물질 흡수체

Ethanol Concentration Sensor Using Microfluidic Metamaterial Absorber

김형기·유민영·임성준

Hyung Ki Kim · Minyeong Yoo · Sungjoon Lim

요약

본 논문에서는 메타물질 흡수체를 사용한 새로운 에탄올 농도 검출 센서를 제안한다. 메타물질 흡수체는 분할고리십자공진기(SRCR: Split Ring Cross Resonator) 구조와 미세유체 채널로 구성되어 있다. SRCR 구조는 capacitive 간극 부근의 실효 유전율에 민감하게 반응하는 LC 공진을 발생시킨다. 미세유체 채널은 마이크로 리터 단위의 극미량 액체를 사용하여 유전체 기판의 실효 유전율을 변화시킬 수 있다. 본 연구에서 제안한 미세유체 메타물질 흡수체는 미세유체 채널에 주입된 에탄올의 농도에 따른 전기적 특성을 감지하여 그 농도를 검출할 수 있다. 제안된 흡수체는 도파관 측정법을 사용하여 측정하였고, 미세유체 채널에 각기 다른 농도의 에탄올이 흐를 때 공진 주파수가 이동하는 것을 확인하였다. 또한, 시뮬레이션과 측정 결과 사이에 높은 일치율을 보인다.

Abstract

In this paper, we proposed a novel ethanol concentration sensor using microfluidic metamaterial absorber. The metamaterial absorber comprises a split-ring-cross resonator(SRCR) and a microfluidic channel. The SRCR can generate LC resonance that is very sensitive to changes in the effective dielectric constant around the capacitive gap. In addition, microfluidic channels can change the effective dielectric constant of the dielectric substrate by using an infinitesimal quantity of a liquid on the order of microliters. The proposed absorber can detect the electrical properties of different concentration of ethanol. The performance of the proposed absorber is demonstrated using the absorption measurements of a fabricated prototype sample with waveguides. In addition, the simulated results and measurement results show good agreement.

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

I. 서론

최근 다양한 산업이 발전함에 따라 다양한 액체 화학 물질이 사용되고 있다. 이러한 액체 화학물질은 화학물질 분류, 표지에 관한 세계조화시스템(GHS: Globally Harmonized System of classification and labelling of chemicals)과 물질안전보건자료(MSDS: Material Safety Data Sheets)에

의해서 분류된다. 이러한 분류에도 불구하고, 다양한 실험들에 의해 미확인 화학물질이 발생하게 된다. 화학물질 중에는 인체에 해를 끼치는 물질이 존재하기 때문에, 이러한 물질을 검출하고 정량화하는 과정이 필수적이다^[1].

미세유체 공학은 미소량의 액체 화학물질을 분석하기 위한 방법으로 제안되었고, 혈액 분석, 생물학적 정량 및 생산품질 관리 등 다양한 분야에서 사용되고 있다^{[2]-[6]}.

「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 March 16, 2015 ; Revised April 21, 2015 ; Accepted May 12, 2015. (ID No. 20150316-021)

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

기존의 생물학적 정량 기법이나 수질 측정 방법은 배관이나 밸브를 채우기 위해서 많은 양의 액체를 필요로 한다^{[7][8]}. 하지만 대부분의 액체는 분석이나 측정 용도로 사용되지 않고 버려지게 된다. 이렇게 낭비되는 액체 화학물질을 개선하기 위하여, 미세유체 시스템이 제안되었다. 유체 조절부, 마이크로미터 크기의 채널 그리고 측정부분이 단일 칩에 집적되어, 이를 사용하면 마이크로 리터 단위의 매우 적은 양으로도 유체 해석을 실행할 수 있다^[6]. 최근에는 미세유체 공학이 유체-가변형 RF(Radio Frequency) 시스템과 유체 검출 마이크로파 시스템 분야까지 확장되어 연구하고 있다. 미세유체 채널이 적용된 RF 시스템에서는 전송선로, 공진기 또는 안테나의 유전체로 다양한 액체 화학물질을 사용하여 가변형 구조를 제안하였다^{[9]-[11]}.

메타물질 흡수체는 주기적인 구조를 가지는 분할고리 공진기(SRR: Split Ring Resonator)와 같은 전기적 LC (ELC) 공진기를 사용하여 구현한다^[12]. 메타물질 공진기 구조의 공진 주파수는 capacitive 및 inductive 성분에 매우 민감하게 반응하는데, 이러한 특성은 메타물질 흡수체를 메타물질 센서로 사용 가능하도록 한다^[13]. 예를 들어 SRR 패턴을 실리콘 기판 위에 증착시켜 압력을 측정하는 센서가 발표되었다. 이는 메타물질의 특성을 활용하여 표면의 기계적 변형을 공진 주파수의 이동으로 감지하여 측정하게 된다^[14].

본 논문에서는 메타물질 흡수체를 사용한 에탄올 농도 검출 센서를 제안한다. 제안된 흡수체는 공진 주파수의 변화를 통해서 에탄올의 농도를 검출하게 된다. 메타물질 흡수체는 분할고리십자공진기(SRCR: Split Ring Cross Resonator) 구조와 FR4 기판을 깎아 만든 미세유체 채널로 구성되어 있다. 흡수 주파수는 채널에 주입되는 에탄올의 농도에 따라 이동하게 된다. 제안된 흡수체의 성능은 시뮬레이션과 도파관 측정 결과를 통하여 증명되었다.

II. 흡수체 설계

에탄올 농도 검출을 위한 메타물질 흡수체를 설계하기 위하여 그림 1과 같은 대칭적이고 간단한 구조의 SRCR을 사용하였다. SRCR의 LC 공진은 십자 구조의 인덕턴

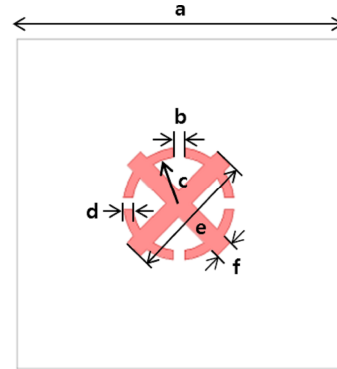


그림 1. 미세유체 채널을 제외한 제안된 메타물질 흡수체의 구조

Fig. 1. Layout of the proposed metamaterial absorber without microfluidics($a=14$, $b=0.5$, $c=2$, $d=0.4$, $e=5.5$, and $f=0.8$) [units: mm].

스와 원형 링 구조 간극의 커패시턴스에 의하여 발생된다.

SRCR의 capacitive 성분은 다음 식 (1)과 같이 간극 부근의 실효 유전율에 의하여 결정된다^[15].

$$C \cong \frac{\epsilon_{eff} 10^{-3}}{18\pi} \frac{K(k)}{K'(k)} d \quad (1)$$

식 (1)의 d 는 원형 링의 폭, $K(k)/K'(k)$ 는 타원 적분의 근사 비율을 나타낸다^[16].

식 (1)에 의하여 메타물질 공진기의 공진 주파수는 SRCR의 기하학적 크기뿐만 아니라, 실효 유전율에 의해 정해진다는 것을 알 수 있다. SRCR의 크기는 제작 이후에 변경이 불가능하기 때문에, 미세유체 채널을 사용하여 실효 유전율을 변경하는 방법이 적용되었다. 실효 유전율은 미세유체 채널에 액체가 주입되면 매우 크게 변하게 된다. 따라서 제안된 흡수체는 공진 주파수의 이동을 분석하여 채널에 주입된 에탄올의 농도를 검출할 수 있는 특성을 가진다.

미세유체 채널을 디자인하기 위해서, Finite Element Method(FEM) 기반의 ANSYS High Frequency Structure Simulator(HFSS)를 사용하여 그림 2와 같이 SRCR의 전계분포를 나타내었다. 입사파의 전계는 SRCR 주위에서 커플링이 일어나게 되는데, 특히 좌, 우측의 capacitive 간극에서 강하게 발생함을 볼 수 있다. 따라서 미세유체 채널은 모

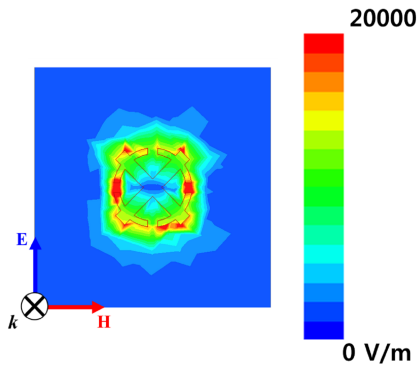


그림 2. 미세유체 채널을 제외한 전계 분포 시뮬레이션 결과
 Fig. 2. Magnitude of electric field distribution of proposed metamaterial absorber without microfluidics.

든 capacitive 간극에 위치하여야 한다.
 그림 3(a)는 처음 설계한 미세유체 채널 메타물질 흡수체를 나타내고 있다. SRCR의 모든 capacitive 간극을 미세유체 채널에 포함하기 위해서 넓은 직육면체 모양의 채

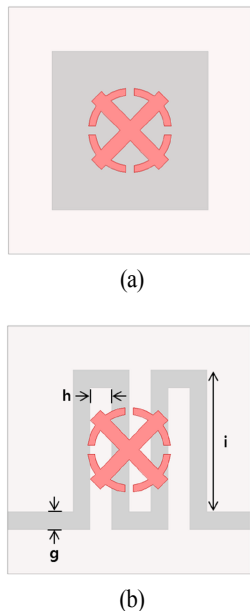


그림 3. (a) 넓은 직육면체 모양의 미세유체 채널, (b) meandering 미세유체 채널
 Fig. 3. (a) First design with a large square microfluidic space, (b) second design with a meandering microfluidic channel($g=1$, $h=1.25$, $i=8$) [units: mm].

널을 설계하였다. 하지만 채널 내부에 에탄올이 균일하게 채워지지 않는 문제점이 발생하는데, 이는 Young-Laplace equation에 의하여 미세유체 채널의 단면적에 반비례하는 최소한의 압력이 유체의 흐름을 위해 필요하기 때문이다 [11]. 따라서 그림 3(b)와 같이 단방향의 meandering 미세유체 채널로 재설계하였다.

그림 4(a)는 최종 설계된 흡수체의 3차원 조감도를 나타내고 있다. 제안된 흡수체는 3개의 층으로 나뉘어 있고, 각 층은 전도성 SRCR 패턴 층, 미세유체 채널 층, 그리고 금속 박막으로 덮인 층으로 구성되어 있다. 미세유체 채널은 기관으로 사용한 유전물질을 깎아서 제작하였기 때문에, 채널을 위한 추가적인 장치가 필요 없는 장점이 있다. 또한, 바닥면이 금속 박막으로 덮여 있기 때문에, 투과파가 발생하지 않게 된다. 실제 도파관 측정 환경을 고려하여 채널의 주입구와 배출구를 포함한 최종 흡수체의 설계는 그림 4(b)에 도시하였다.

제안된 흡수체의 전기적 및 자기적 응답은 전계 및 자기 분포를 통해서 이해할 수 있다. 그림 5는 제안된 흡수체의 미세유체 채널에 서로 다른 물질을 주입하였을 때

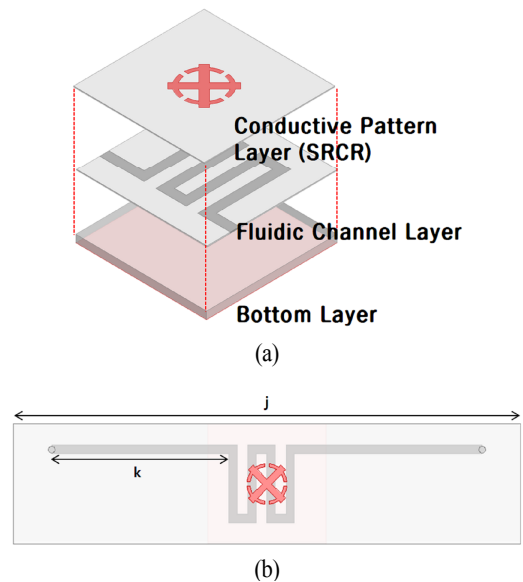


그림 4. (a) 3차원 조감도 및 (b) 최종 설계
 FIG. 4. (a) Three-dimensional and (b) top views of the final design.

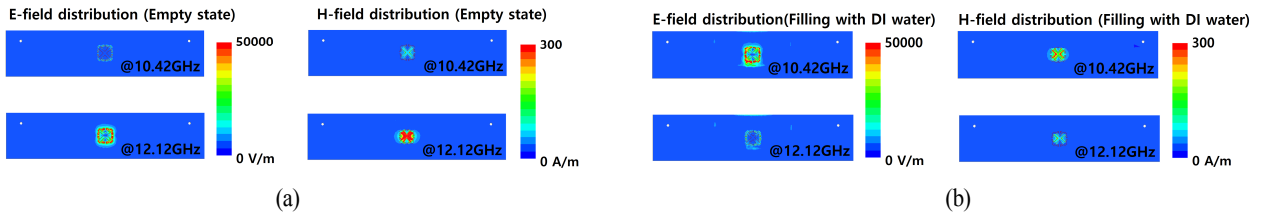


그림 5. (a) 채널이 비어있을 경우와 (b) 탈이온수로 채워진 경우의 전계 및 자계 시뮬레이션 결과
 Fig. 5. Electric and magnetic field distribution for (a) empty state and (b) filling with DI water.

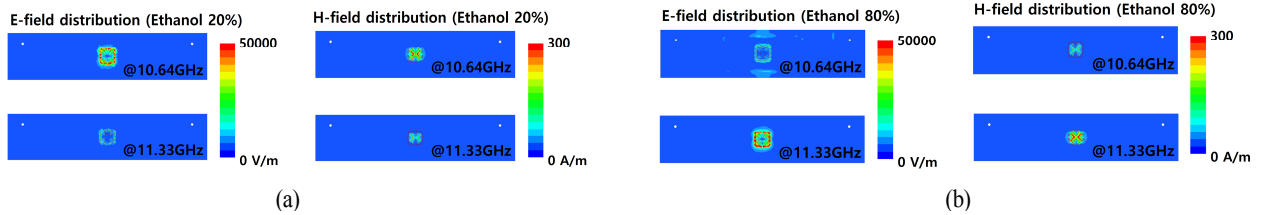


그림 6. (a) 20 %와 (b) 80 % 농도의 에탄올로 채워진 경우의 전계 및 자계 시뮬레이션 결과
 Fig. 6. Electric and magnetic field distribution for (a) 20 % and (b) 80 % concentrations of ethanol.

의 전자계 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 미세유체 채널이 비어 있는 경우, 전자계는 12.12 GHz에서 SRCR 주위에서 강하게 분포되어 있지만, 10.42 GHz에서는 약하게 분포되어 있는 것을 그림 5(a)에서 확인할 수 있다. 반면에, 탈이온수(DI water: Deionized water)를 미세유체 채널에 주입하였을 경우에는 10.42 GHz에서 SRCR 주위에 강하게 전자계가 분포하지만, 12.12 GHz에서는 약하게 분포한 것을 그림 5(b)에서 확인할 수 있다. 그림 6에서 미세유체 채널에 서로 다른 농도의 에탄올을 주입하였을 때의 전계 및 자계 시뮬레이션 결과를 볼 수 있다. 20 % 농도의 에탄올이 주입되었을 경우, 10.64 GHz에서 강한 전자계 분포를 보인다. 80 % 농도의 에탄올이 주입되었을 경우, 11.33 GHz에서 강한 전자계 분포가 나타난다. 결과적으로 제안된 흡수체는 미세유체 채널에 주입되는 에탄올의 농도에 따라서 서로 다른 주파수에서 전자기 공진이 일어나게 됨을 알 수 있다. 이러한 원리를 통하여 제안된 흡수체는 미세유체 채널에 주입된 에탄올의 농도를 검출하게 된다.

메타물질 흡수체는 공기와의 임피던스 정합을 통해 반사파를 최소화 시켜 구현한다. 물질의 고유 임피던스 식 (2)에서 구할 수 있다.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (2)$$

공기의 상대 유전율과 투자율은 1로, 공기의 고유 임피던스는 약 377 Ω이 된다. 메타물질 흡수체는 유전율과 투자율을 조절할 수 있는 메타물질의 특징을 사용하여, 상대 유전율과 투자율을 같은 값으로 만들어 공기와의 임피던스 정합을 이루어 메타물질 흡수체의 반사파를 최소화 할 수 있게 된다. 그림 7(a)는 제안된 흡수체 채널에 주입된 물질에 따른 상대 유전율과 투자율을 retrieval method를 사용하여 구한 결과를 나타내고 있다^[17]. 채널이 비어있을 경우, 상대 유전율과 투자율 값은 12.12 GHz에서 비슷한 수치를 보인다. 그림 7(b)에서 채널에 탈이온수가 주입되었을 경우에는 10.42 GHz에서 상대 유전율과 투자율이 같은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 그림 7(c)와 (d)는 서로 다른 농도의 에탄올이 채널에 주입되었을 때의 상대 유전율과 투자율을 나타낸다.

III. 결 과

그림 8은 제작된 흡수체의 시제품을 나타낸다. 시제품 흡수체는 3층으로 구성되어 있고, 상대 유전율 3.7, 유전

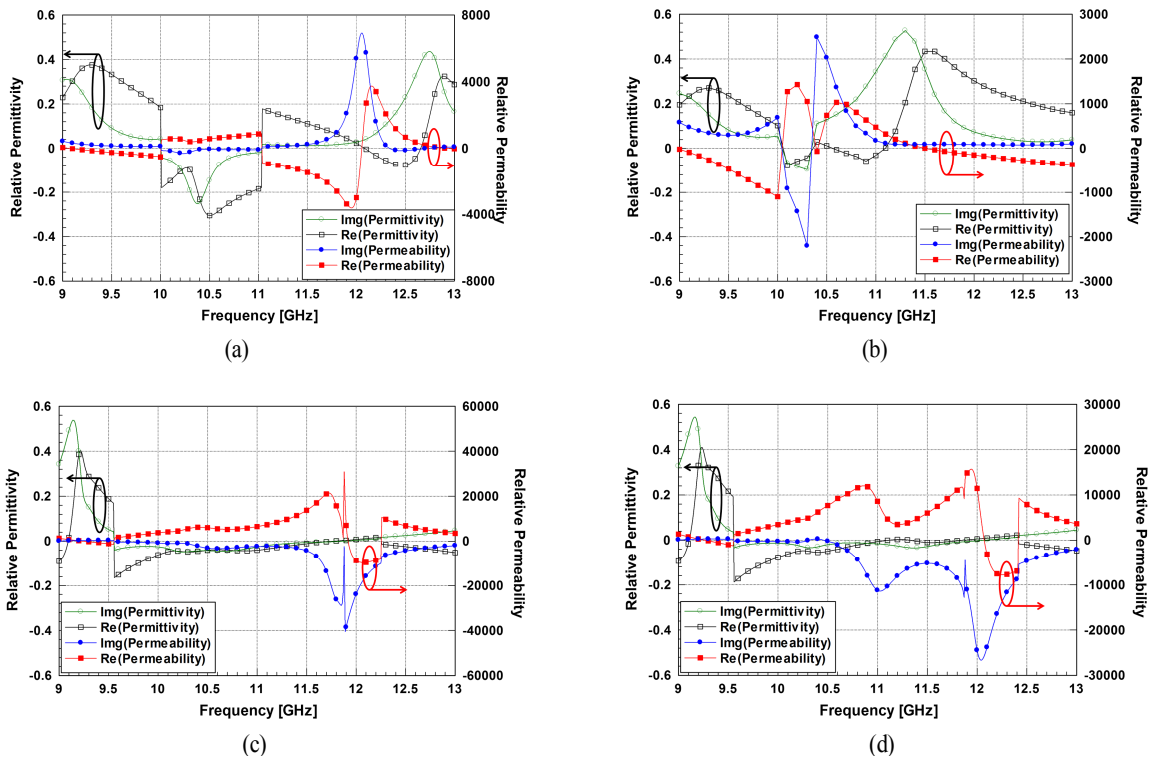


그림 7. 미세유체 채널의 상태에 따른 상대 유전율과 투자율의 시뮬레이션 결과. (a) 빈 채널, (b) 탈이온수, (c) 20 % 에탄올, (d) 80 % 에탄올

Fig. 7. Real and imaginary values of simulated relative permittivity and permeability for (a) Empty state, (b) Filling with DI water, and for (c) 20 % and (d) 80 % concentrations of the ethanol.

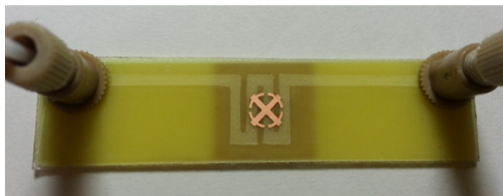


그림 8. 제작된 흡수체의 시제품
Fig. 8. Fabricated prototype sample.

손실 0.02의 FR4 기판을 사용하여 제작하였다. 첫 번째 층의 SRCR 패턴은 0.1 mm 두께의 FR4 기판을 사용하여 포토리소그래피 공정을 사용하여 제작하였다. 두 번째 층의 미세유체 채널은 0.1 mm 두께의 FR4 기판을 깎아서 제작하였다. 세 번째 층은 0.8 mm 두께의 FR4 기판을 사용하였고, 바닥면은 구리 박막으로 덮었다. 각 층은 라미네이팅 필름을 사용하여 접착하였고, 플라스틱 재질의 액

체 주입구와 배출구를 제작하여 채널에 쉽게 액체를 주입하거나 배출시킬 수 있도록 하였다.

제안된 흡수체의 흡수율을 측정하기 위하여 도파관 측정 환경을 그림 9와 같이 구축하였다^[18]. 두 개의 WR-90 도파관과 Anritsu MS2038C 벡터 회로망 분석기를 측정에 사용하였다. 도파관 사이에 시제품 흡수체를 위치시켜 반사 계수를 측정하였다. 제안된 흡수체의 바닥면은 구리 박막으로 덮여 있어 투과파가 발생하지 않게 된다. 따라서 식 (3)을 이용하여 흡수율을 계산할 때, 투과 성분은 고려하지 않아도 된다.

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

그림 10(a)에서 다양한 액체에 대한 흡수율 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교하였다. 제안된 흡수체는 채널이 비어 있을 경우, 12.12 GHz에서 92.9 %의 흡수율을 보였

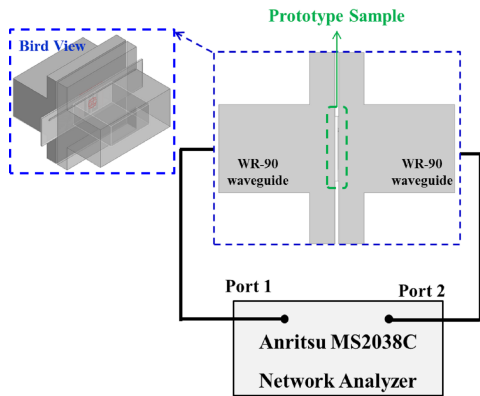


그림 9. 도파관 측정 환경
Fig. 9. Measurement environments using the rectangular waveguides.

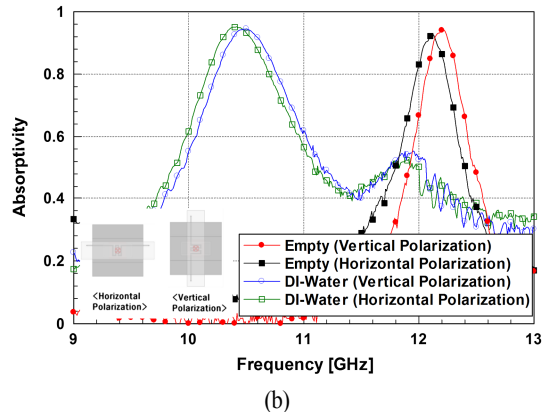
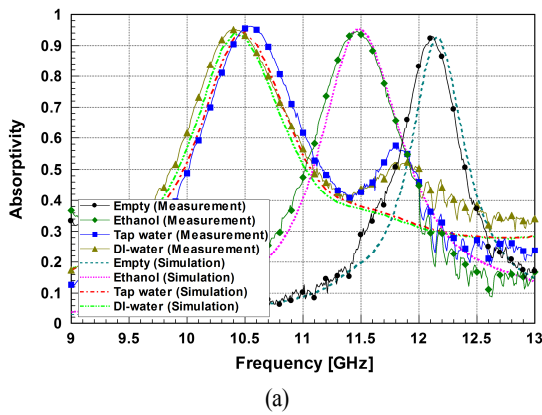


그림 10. (a) 다양한 액체에 대한 흡수율 시뮬레이션 및 측정 결과, (b) 편파 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 10. (a) Simulated and measured absorptivity of proposed absorber, and (b) measured absorptivity for different polarizations.

고, 채널에 에탄올, 수돗물 그리고 탈이온수가 주입되었을 경우에는 주파수가 각각 11.46 GHz, 10.54 GHz, 10.42 GHz로 이동함을 확인하였다. 또한, 흡수율과 반치폭(FWHM: Full Width at Half Maximum)이 주입된 액체의 유전 손실의 차이에 의해 변화됨을 확인할 수 있다.

제한된 흡수체의 편파에 대한 특성을 분석하기 위하여 시제품 흡수체를 수평편파와 수직편파에서 측정하여 그림 10(b)에서 비교하였다. 편파에 큰 영향 없이 성능이 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 또한, 다양한 농도의 에탄올을 채널에 주입하여 측정된 결과를 그림 11(a)에 도시하였다. 에탄올의 농도가 20 %에서 80 %로 바뀔에

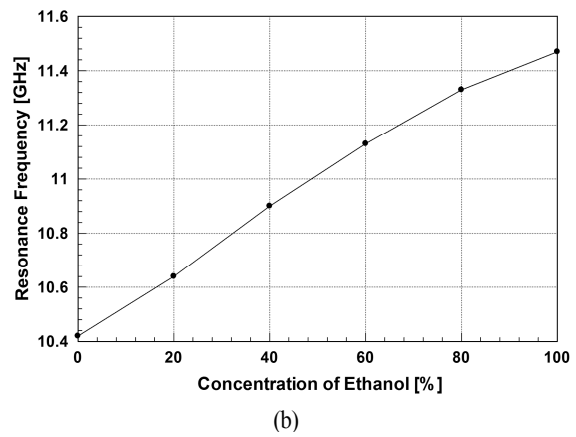
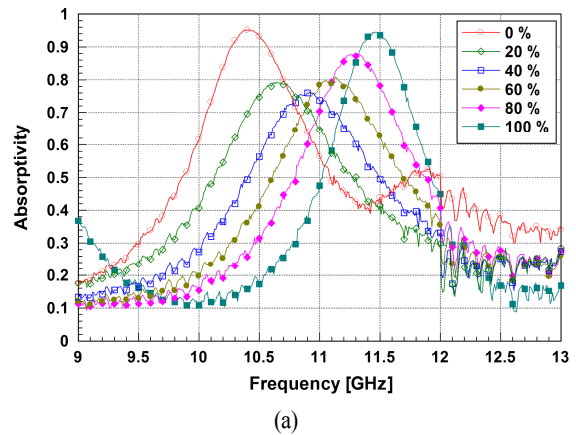


그림 11. (a) 다양한 농도의 에탄올에 대한 흡수율 측정 결과, (b) 에탄올 농도에 따른 공진주파수
Fig. 11. (a) Measured absorptivity and (b) resonant frequency for ethanol with different concentrations, from 0 %(DI water 100 %) to 100 %.

따라, 흡수체의 공진 주파수가 10.64 GHz에서 11.33 GHz로 선형적으로 이동하는 것을 그림 11(b)에서 확인할 수 있다. 따라서 제안된 흡수체는 에탄올의 농도를 공진 주파수의 이동으로 검출 가능하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 에탄올의 농도를 검출하기 위한 미세유체 메타물질 흡수체를 제안하였다. 제안된 흡수체는 3개의 층으로 구성되어 있고, 미세유체 채널을 기관을 깎아 제작하였기 때문에 추가적인 구조가 필요 없는 장점이 있다. 제안된 흡수체는 공진 주파수의 이동을 감지하여 채널에 주입된 에탄올의 농도를 검출할 수 있다. 제안된 흡수체의 채널에 20 %에서 80 % 농도의 에탄올을 주입할 경우, 공진주파수는 10.64 GHz에서 11.33 GHz로 이동하는 것을 확인하였다. 또한, 측정을 통해서 편파에 둔감한 특성을 보임을 확인하였다. 제안된 흡수체를 넓은 면적에 주기적으로 배열하게 되면 효율적인 무선 에탄올 농도 검출 센서로 사용이 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] 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
- [3] E. Delamarche, 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] W. Mullett, K. Levsen, D. Lubda, and J. Pawliszyn, "Bio-compatible in-tube solid-phase microextraction capillary for the direct extraction and high-performance liquid chromatographic determination of drugs in human serum", *Journal of Chromatography A*, vol. 963, no. 1, pp. 325-334, Jul. 2002.
- [8] R. Dahlgren, E. Nieuwenhuys, and G. Litton, "Transparency tube provides reliable water-quality measurements", *Calif. Agric.*, vol. 58, no. 3, pp. 149-153, Sep. 2004.
- [9] J. Mateu, N. Orloff, M. Rinehart, and J. Booth, "Broad-band permittivity of liquids extracted from transmission line measurements of microfluidic channels", *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 523-526, Jun. 2007.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] N. Landy, S. Sajuyigbe, J. Mock, D. Smith and W. Padilla, "Perfect metamaterial absorber", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 20, pp. 207402, May 2008.
- [13] E. Ekmekci, G. Turhan-Sayan, "Metamaterial sensor applications based on broadside-coupled SRR and V-shaped resonator structures", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation(APSURSI)*, pp. 1170-1172,

Jul. 2011.

[14] R. Melik, E. Unal, N. Perkgoz, C. Puttlitz, and H. Demir, "Metamaterial-based wireless strain sensors", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no. 1, pp. 011106, Jul. 2009.

[15] W. Withayachumnankul, C. Fumeaux, and D. Abbott, "Compact electric-LC resonators for metamaterials", *Optics Express*, vol. 18, no. 25, pp. 25912-25921, Dec. 2010.

[16] K. Gupta, R. Garg, and I. Bahl, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House, 1979.

[17] D. Smith, D. Vier, T. Koschny, and C. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials", *Physical Review E*, vol. 71, no. 3, pp. 036617, Mar. 2005.

[18] H. Chen, J. Zhang, Y. Bai, Y. Luo, L. Ran, Q. Jiang, and J. Kong, "Experimental retrieval of the effective parameters of metamaterials based on a waveguide method", *Optics Express*, vol. 14, no. 26, pp. 12944-12949, Dec. 2006.

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

유 민 영



2013년 2월: 중앙대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2015년 2월: 중앙대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2015년 2월~현재: LG 이노텍
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 전자파 흡수 기술