

유체를 이용하여 위상응답을 제어하기 위해 잉크젯 프린팅으로 구현한 미세유체채널 복합 좌·우향 전송선로

Fluidically-Controlled Phase Tunable Line Using Inkjet-Printed Microfluidic Composite Right/Left Handed Transmission Line

최 성 진 · 임 성 준

Sungjin Choi · Sungjoon Lim

요 약

본 논문은 미세유체채널에 채워진 유체를 이용하여 위상응답을 제어하는, 잉크젯 프린터로 인쇄된 미세유체채널 복합 좌·우향 전송선로(CRLH TL: Composite Right/Left Handed Transmission Line)를 제안한다. 제안된 CRLH TL은 종이 위에는 나노입자 잉크를 이용하여 인쇄되었으며, Poly Methyl Methacrylate(PMMA)에 레이저 식각을 이용하여 제작된 미세유체채널은 잉크젯 프린터로 인쇄된 접착물질인 SU-8을 이용하여 CRLH TL 위에 부착되었다. 제안된 CRLH TL은 미세유체채널에 채워진 유체에 따라서 위상응답을 변화시킬 수 있으며, 미세유체채널에 각기 다른 유체가 흐를 때, 900 MHz에서 -10 dB 이하의 반사계수를 유지한 상태로 위상 지연, 0° 위상, 위상 앞섬 특성을 모두 나타낼 수 있음을 확인하였다. 제안된 CRLH TL의 성능은 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 통하여 성공적으로 증명되었다.

Abstract

In this paper, a novel fluid controlled phase tunable line using inkjet printed microfluidic composite right/left-handed(CRLH) transmission line(TL) is proposed. A CRLH-TL prototype has been inkjet-printed on a paper substrate using silver nano particle ink. In addition, a laser-etched microfluidic channel in poly methyl methacrylate(PMMA) has been integrated with the CRLH TL using inkjet-printed SU-8 as a bonding material. The proposed TL provides excellent phase-tuning capability that is dependent on the different fluidic materials used. As the fluid is changed, the proposed TL can have negative-phase, zero-phase, and positive-phase characteristics at 900 MHz and reflection coefficient is maintained to below -10 dB. The performance of the proposed TL is successfully validated using simulation and measurement results.

Key words: Composite Right/Left Handed Transmission Line(CRLH TL), Inkjet Printed Electronics, Microfluidics, Metamaterial, Phase Shifter

I. 서 론

위상 천이기(phase shifter)는 원하는 주파수 대역에서

입력단과 출력단 사이의 투과 계수(transmission coefficient)의 위상응답(phase response)을 변화시켜 주는 장치로써, 위상 배열 안테나(Phased Array Antenna: PAA) 및

「이 논문은 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 September 29, 2014 ; Revised November 11, 2014 ; Accepted December 12, 2014. (ID No. 20140929-08S)

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

아날로그 빔(beam) 형성 시스템의 기본 구성 요소로 사용되고 있다. 위상 천이기는 위상 배열 안테나와 아날로그 빔 형성 시스템에서, 배열을 구성하는 단일 요소들 사이에 위상차를 제공하여 배열로부터 방사되는 빔의 방향을 조절할 수 있도록 한다. 일반적으로 이러한 위상 천이기는 PIN 다이오드, 버랙터(varactor) 다이오드, FET(Field Effect Transistor), MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 스위치 등의 튜닝 소자들을 이용하여 구현할 수 있다^[1].

복합 좌·우향 전송선로(Composite Right/Left Handed Transmission Line, CRLH TL)는 특별한 위상 응답 특성을 갖는다. 우향 전송 선로(Right Handed Transmission Line, RH TL)은 항상 음의 위상 응답(위상 지연) 특성을 갖고, 좌향 전송 선로(Left Handed Transmission Line, LH TL)은 항상 양의 위상 응답(위상 앞섬) 특성을 갖지만, CRLH TL은 특정 주파수 대역에서 RH TL과 LH TL의 균형(balance)에 따라서 음의 위상, 0도 위상, 양의 위상을 모두 가질 수 있다^[2]. 이러한 CRLH TL의 위상 응답 특성을 이용하면 크기가 작고, 광대역에서 선형적인 위상 응답 특성을 갖는 위상 천이기가 구현될 수 있으며^[3], CRLH TL을 기반으로 강유전체 varactor, MEMS 스위치 등의 튜닝 소자를 이용하여 위상응답을 가변할 수 있는 위상 천이기에 대한 연구가 다양하게 진행되어 왔다^{[4],[5]}.

최근 RF 소자와 미세유체의 상호작용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 잉크젯 프린트된 RF 소자와 결합된 미세유체채널 시스템에 관한 연구가 다양하게 진행되어 왔다^{[6]-[8]}. 잉크젯 프린팅 기술은 전도성 잉크를 이용하여 전자 소자를 기판 위에 직접 인쇄하는 기술로써, 제작 시간과 비용이 크게 절감되며, 화학적 식각 제작과정과는 달리 부산물이 없기 때문에 매우 친환경적이다. 잉크젯 프린팅 기술을 이용하면 SU-8과 같은 접착 물질도 손쉽게 인쇄될 수 있기 때문에, 미세유체채널 시스템이 매우 쉽게 결합될 수 있다. 미세유체채널 시스템을 이용하면, 미세유체채널에 채워진 유체의 전기적 특성에 따라서 전자 소자의 성능을 가변할 수 있으며, DC bias가 필요한 기존의 튜닝 소자들을 이용하는 것에 비하여 많은 장점을 갖고 있다. 미세유체채널 시스템은 DC bias를 이용하지 않기 때문에 튜닝시 DC 전력 소모가 없고, 복잡한 bias 네트워크를 설계할 필요도 없다. 또한, 튜닝 소

자와는 달리 기생성분이 존재하지 않고, 고전력 환경에서도 이용할 수 있는 장점이 있다.

잉크젯 프린팅 기술과 미세유체채널 시스템을 결합하여 구현된 RF 소자는 전기적 용도로 사용하는 것 이외에도 화학물질과 생체물질을 감지하는 센서로도 응용될 수 있다^{[9],[10]}. 참고문헌 [9]와 [10]에서는, 미세유체채널 시스템을 Interdigitated electrode 위에 집적하여 화학물질과 생체물질을 구분하거나, 그것들의 변이를 감지할 수 있는 Capacitive sensor를 제안하였다. 참고문헌 [9]과 [10]에서 제안된 Capacitive sensor는 미세유체채널에 주입된 물질에 따라서 출력전압의 파형이 변화하는 원리를 이용하여, 다양한 물질들을 구분하는 방법을 제안하였다. 참고문헌 [9]와 [10]에서 제안된 Capacitive sensors는 크기가 작고, 적은 양의 샘플을 이용하여도 물질을 감지할 수 있는 장점이 있으나 DC bias가 필요한 소자들을 사용함에 따라서, 복잡한 DC bias network 설계가 필요하고, DC 전력을 소모해야 한다는 단점이 존재한다.

본 논문은 유체를 이용하여 위상 응답을 제어하는 잉크젯 프린트된 미세유체채널 CRLH TL 설계와 제작에 관하여 논하고자 한다. 제안된 CRLH TL은 나노 입자 잉크를 이용하여 종이 위에 잉크젯 프린터로 인쇄되었으며, PMMA(Poly Methyl Methacrylate)에 레이저 식각된 미세유체채널은 접착물질인 SU-8을 이용하여 결합되었다. 제안된 CRLH TL은 미세유체채널에 채워진 유체가 변할 때, 900 MHz에서 10 dB 이상의 반사 손실을 유지한 상태에서 위상 앞섬, 0° 위상, 위상 지연 특성을 모두 나타낼 수 있다. 제안된 CRLH TL은 미세유체채널에 주입된 유체를 이용하여 위상응답을 제어하는 위상 천이기로 사용될 수 있음과 동시에, 위상 변화를 통하여 미지의 유체를 감별할 수 있는 센서에도 응용될 수 있다. 제안된 CRLH TL의 성능은 시뮬레이션과 측정 결과를 통하여 증명되었다.

II. 미세유체채널 CRLH TL 설계

그림 1은 제안된 CRLH TL의 구조와 그 등가회로를 나타낸다. CRLH TL을 구성하는 요소인 50 Ω RH TL 부분은 CPW(Coplanar Waveguide)를 이용하여 설계하였고, LH TL 부분의 직렬 커패시턴스(C_L)는 Interdigital 커패시터, 병렬 인덕턴스는(L_L) 단락된 Stub을 이용하여 설계하였다.

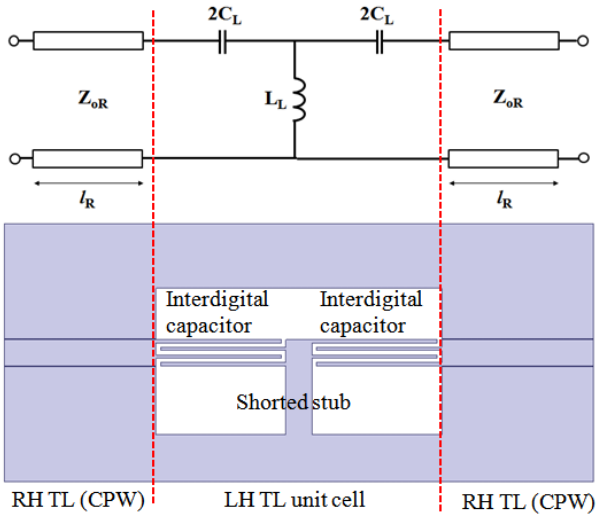


그림 1. 제안된 CRLH TL과 등가회로
Fig. 1. Proposed CRLH TL and its equivalent circuit model.

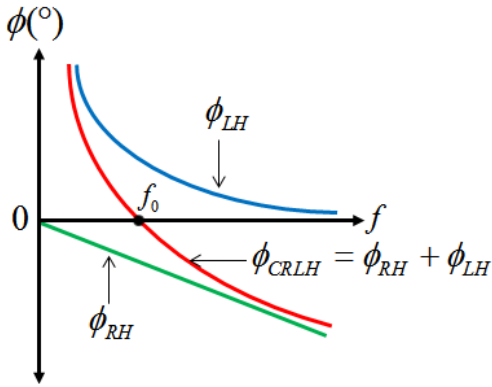


그림 2. RH TL, LH TL, CRLH TL의 위상응답
Fig. 2. Phase response of RH TL, LH TL, and CRLH TL.

그림 2는 일반적인 RH TL, LH TL의 위상응답과 Balanced CRLH TL의 위상응답($\phi_{S_{21}}$)을 나타낸다. RH TL의 위상응답(ϕ_{RH}), LH TL의 위상응답(ϕ_{LH}), Balanced CRLH TL의 위상응답(ϕ_{CRLH})은 다음과 같이 주어진다^[2].

$$\phi_{RH}(f) = -\beta l_{RH} = -\sqrt{\epsilon_e} k_0 l_{RH} \quad (1)$$

$$\phi_{LH}(f) \approx \frac{1}{2\pi f \sqrt{L_L C_L}} \quad (2)$$

$$\phi_{CRLH}(f) = \phi_{RH}(f) + \phi_{LH}(f) \quad (3)$$

식 (1)의 l_{RH} 는 RH TL의 길이, k_0 는 진공에서의 wave number, ϵ_e 는 유효 유전율을 의미한다.

일반적인 RH TL은 항상 음의 위상응답을 가지며 선형적인 특성을 나타내는 반면, LH TL은 항상 양의 위상응답을 가지며 비선형적인 특성을 나타낸다.

그림 1과 같이 RH TL과 LH TL이 Cascade된 CRLH TL은 RH TL과 LH TL이 균형을 이루는 주파수 f_0 에서 0° 의 위상을 가지며, f_0 보다 낮은 주파수에서는 양의 위상, f_0 보다 높은 주파수에서는 음의 위상을 갖는다.

CRLH TL의 위상 응답을 변화시킬 수 있는 요소는 여러 가지가 있지만, 본 논문에서는 LH TL의 Interdigital 커패시터를 이용하였다. Interdigital capacitor의 커패시턴스가 변하게 되면, 식 (2)와 식 (3)에 의하여 CRLH TL의 위상응답도 변화하게 된다. 일반적으로 커패시턴스 값은 커패시터를 구성하는 도체 사이에 존재하는 유전체의 유전율에 비례한다.

본 논문에서는 Interdigital 커패시터의 핑거(finger) 사이의 적절한 위치에 미세유체채널을 위치시킨 후, 채널에 각기 다른 유체가 흐를 때, 그 유체의 유전율에 따라 Interdigital 커패시터의 커패시턴스 값을 변화시키는 원리를 이용하였다.

본 논문에서 제안된 CRLH TL은 3.1의 유전상수 값과 0.06의 손실 탄젠트 값을 갖는 0.254 mm 두께의 사진 인쇄용지 위에 설계되었다. 또한, 1.5 mm의 두께, 3.5의 유전상수, 0.04의 손실 탄젠트 값을 갖는 PMMA를 이용하여 미세유체채널을 설계하였으며, 15 μm 의 두께, 3의 유전상수, 0.04의 손실 탄젠트 값을 갖는 SU-8이 접착물질로 사용되었다. 시뮬레이션은 미세유체채널 시스템을 만들 때 사용되는 물질인 PMMA와 SU-8이 CRLH TL의 설계에 미치는 영향까지 고려하여 수행되었다.

그림 3은 제안된 CRLH TL의 평면도와 조감도를 나타낸다. Interdigital 커패시터의 핑거 사이에 위치한 미세유체채널의 길이(그림 3(b)의 j)가 길어질수록, 채널에 흐르는 유체에 따라서 커패시턴스 값의 변화폭이 커지게 되고, 위상변화 역시 커지게 된다. 또한, 채널의 폭이나 높이 등을 크게 만들어 주입된 유체의 양을 증가시키는 경우에도 위상을 크게 변화시킬 수 있다. 하지만 그에 따라 RH TL과 LH TL의 임피던스 정합이 깨지기 때문에 삽입

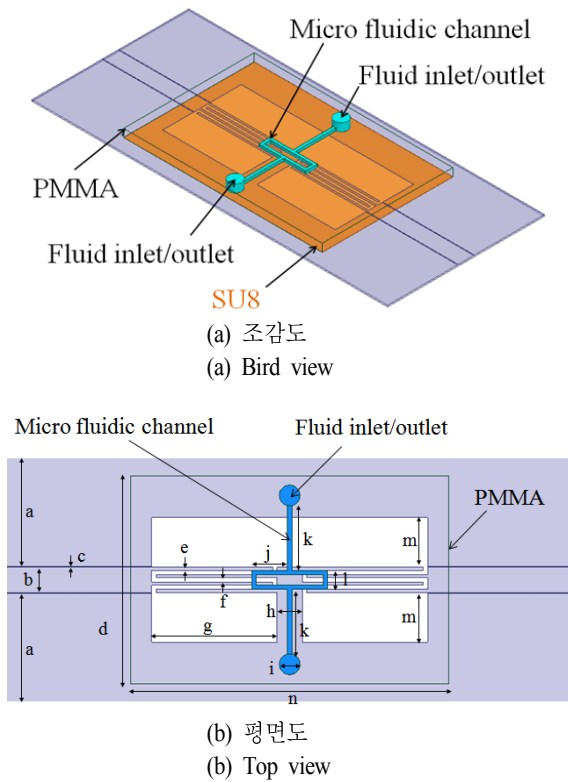


그림 3. 미세유체채널과 결합된 CRLH TL
 Fig. 3. Layout of the proposed CRLH TL integrated with the microfluidic channel($a=13.4$, $b=3$, $c=0.1$, $d=25$, $e=0.375$, $f=0.5$, $g=15$, $h=3$, $i=2.5$, $j=4.25$, $k=7.75$, $l=2.25$, $m=6$, $n=38$) [units: mm].

손실(insertion loss)이 증가하게 된다. 그러므로 위상변화와 삽입손실을 동시에 고려하여 적절한 채널의 길이를 설정하였다.

III. 미세유체채널 CRLH TL 제작과정

그림 4는 설계된 CRLH TL의 제작과정을 나타낸다. 먼저 설계된 CRLH TL 패턴은 0.254 mm 두께의 Kodak photo paper(Office Depot, Atlanta, GA, USA) 위에, ANP Silver Jet 55 LT-25C는 나노 입자 잉크(Advanced Nano Products, Sejong, Korea)와 Dimatix DMP-2831 프린터(Fujifilm Dimatix, Santa Clara, CA, USA)를 이용하여 인쇄되었다. 그 뒤에 120°C에서 60분, 180°C에서 5분 동안의 Sintering 과정을 거쳤다. 미세유체채널을 인쇄된 CRLH TL에 부착

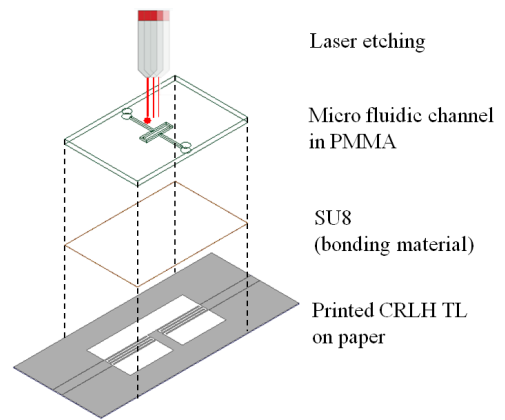


그림 4. 미세유체채널 CRLH TL 제작 과정
 Fig. 4. Fabrication process of the proposed microfluidic CRLH TL.

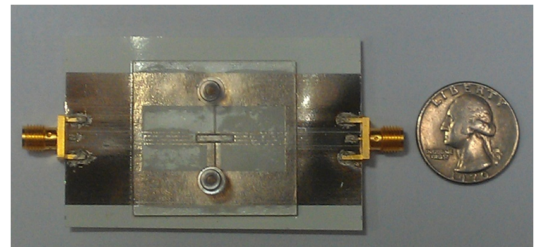


그림 5. 미세유체채널 CRLH TL의 시제품
 Fig. 5. Picture of the fabricated microfluidic CRLH TL prototype.

시키기 위해, SU-8 polymer ink(Microchem, Newton, MA, USA)를 사용하여 15 μm 접착층을 CRLH TL 위에 인쇄하였다. 또한, Epilog Mini 45 W infrared laser (Epilog Laser, Golden, CO, USA)를 이용하여, Micron size의 미세유체채널과 유체 주입구를 1.5 mm 두께의 PMMA에 식각하였다. SU-8 접착층 위에 식각된 미세유체채널을 올려놓은 후, 전체적인 구조를 80°C로 가열하면서 압력을 가하여 미세유체채널과 CRLH TL을 결합하였다. 그림 5는 제작된 미세유체채널 CRLH TL의 시제품을 나타낸다. 측정을 위해 연결된 SMA 커넥터는 Silver epoxy를 이용하여 부착하였다.

IV. 시뮬레이션 결과와 측정 결과

본 논문에서는 미세유체채널에 공기($\epsilon_r=1$), 핵산올(ϵ_r

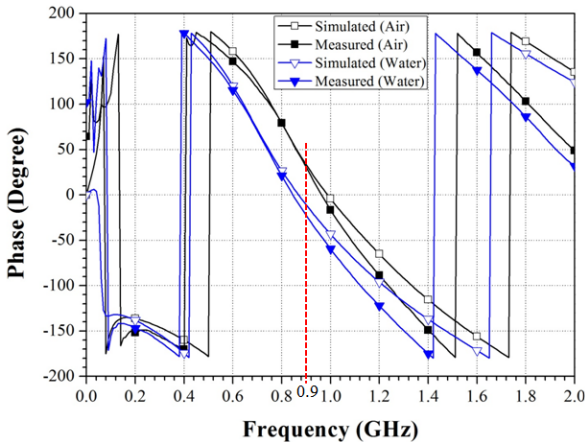


그림 6. 미세유체채널이 공기 또는 증류수로 채워져 있을 때의 S_{21} 의 위상응답 시뮬레이션 결과와 측정 결과

Fig. 6. Simulated and measured phase response of S_{21} when the microfluidic channel is filled with air or distilled water.

=3), 에탄올($\epsilon_r=15$), 증류수($\epsilon_r=73$)가 채워져 있을 때의, 900 MHz에서의 위상응답을 확인하였다.

그림 6은 미세유체채널이 공기 또는 증류수로 채워져 있을 때의 S_{21} 의 위상응답 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 나타내준다. 증류수가 채워져 있을 때, S_{21} 의 위상은 900 MHz에서 -22° (위상앞섬)이며, 대조군인 공기가 채워져 있을 때는 30° (위상지연)의 값을 갖는다. 이를 통하여 채널에 채워진 물질에 따라서 위상지연과 위상응답 특성을 가변할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 미세유체채널이 공기 또는 증류수로 채워져 있을 때의 S -parameter 크기의 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 나타낸다. 900 MHz에서 측정된 반사 손실(return loss)은 공기의 경우 13.38 dB, 증류수의 경우 30.4 dB이고, 삽입손실(insertion loss)은 공기의 경우 5.6 dB, 증류수의 경우 4 dB의 값을 가진다. 두 경우 모두 10 dB 이상의 반사 손실 값을 갖는 것을 통하여, 공기의 경우에 비해 가장 큰 위상변화를 일으킨 증류수의 경우에서도 RH TL과 LH TL의 임피던스 정합이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 삽입손실은 사진 인쇄용지, PMMA, SU-8, 미세유체채널에 주입된 액체의 손실 탄젠트로 인하여 발생한다.

그림 8은 미세유체채널에 공기, 에탄올, 헥산올, 증류

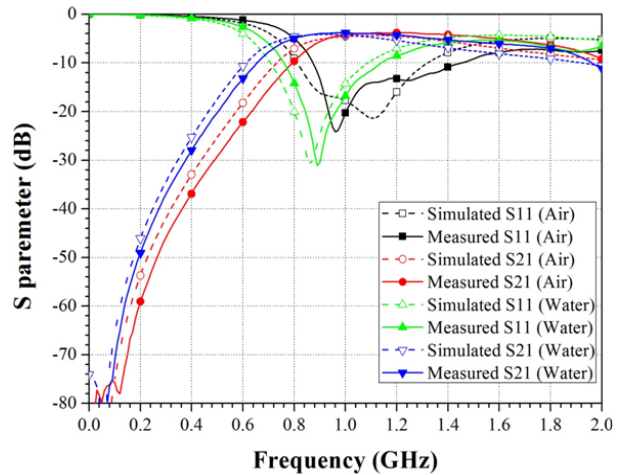


그림 7. 미세유체채널이 공기 또는 증류수로 채워져 있을 때의 S -parameter 크기의 시뮬레이션 결과와 측정 결과

Fig. 7. Simulated and measured magnitude of S -parameter when the microfluidic channel is filled with air or distilled water.

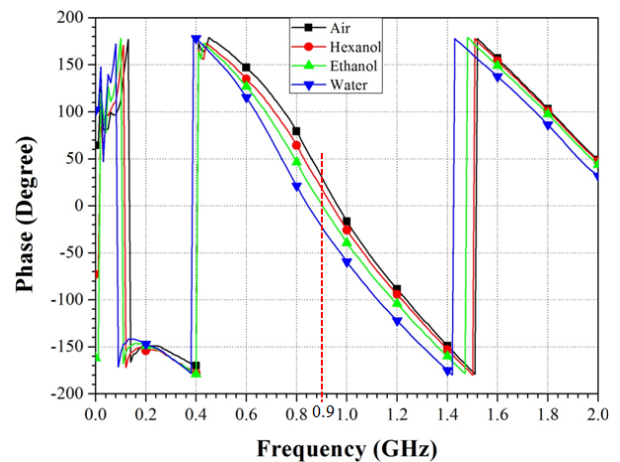


그림 8. 미세유체채널에 채워진 다양한 물질에 따른 S_{21} 의 위상응답 측정 결과

Fig. 8. Measured phase response of S_{21} for different filled fluidic materials.

수가 채워져 있는 각 경우에 대한 S_{21} 의 위상응답 측정값을 나타낸다. 에탄올의 경우 0° , 헥산올의 경우 18° 의 위상을 나타내며, 이를 통하여 위상앞섬, 위상지연 이외에도 0° 의 위상을 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 식 (2)와 (3)에서 보여지듯이, 유전상수가 높은 물질을 사

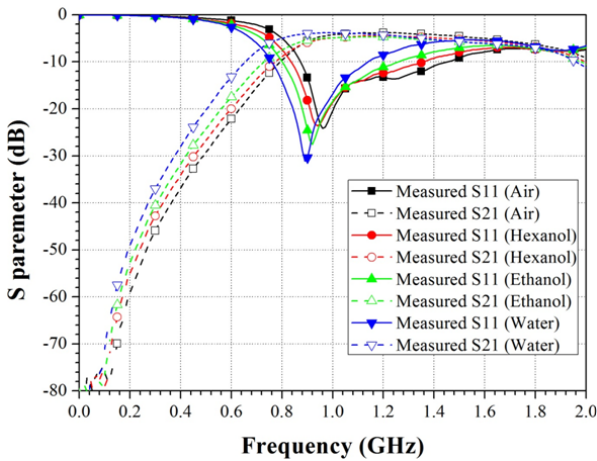


그림 9. 미세유체채널에 채워진 다양한 물질에 따른 S-parameter 크기 측정 결과

Fig. 9. Measured magnitude of S-parameter for different filling fluidic materials.

용함에 따라서 C_L 값이 커지고 그에 따라 900 MHz에서 위상이 감소함을 확인할 수 있다.

그림 9는 미세유체채널에 공기, 에탄올, 헥산올, 증류수가 채워져 있는 각 경우에 대한 S-parameter의 크기의 측정값을 나타낸다. 900 MHz에서의 반사 손실은 에탄올의 경우 24.6 dB, 헥산올의 경우 18.2 dB의 값을 갖는 것을 통하여, 두 경우에서도 RH TL과 LH TL의 임피던스 정합이 유지되는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 유체를 이용하여 위상응답을 제어하는 잉크젯 프린터로 인쇄된 미세유체채널 CRLH TL을 제안하였다. 제안된 CRLH TL은 채널에 채워진 물질에 따라 900 MHz에서 위상 앞섬, 0° 위상, 위상 지연 특성을 모두 나타낼 수 있음을 확인하였다. 공기의 경우 30°, 헥산올의 경우 18°, 에탄올의 경우 0°, 증류수의 경우 -22°의 위상을 가지며, 채널에 채워진 물질의 유전상수가 커질수록 위상은 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 본 논문에서 실험한 모든 물질에 대하여 위상의 변화에도 불구하고, RH TL과 LH TL의 임피던스 정합은 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 제안된 CRLH TL은 유체를 이용하여 위상응답을 제어하는 위상천이기와, 유체에 따른 위상변화로부

터 미세유체채널에 주입된 유체를 감별할 수 있는 low-cost flexible fluid sensor에 응용될 수 있다.

References

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., John Wiley & Sons, 2012.
- [2] I. Lin, M. DeVincentis, C. Caloz, and T. Itoh, "Arbitrary dual-band components using composite right/left-handed transmission lines", *IEEE Trans. Microwave Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1142-1149, Apr. 2004.
- [3] M. A. Antoniades, G. V. Eleftheriades, "Compact linear lead/lag metamaterial phase shifters for broadband applications", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 103-106, Feb. 2005.
- [4] T. Jang, S. Hwang, Y. Bang, J. Kim, Y. Kim, C. Baek, and S. Lim, "Switchable composite right/left-handed (S-CRLH) transmission line using MEMS switches", *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 14, no. 12, pp. 804-806, Dec. 2009.
- [5] D. Kuylenstierna, A. Vorobiev, P. Linner and S. Gevorgian, "Composite right/left-handed transmission line phase shifter using ferroelectric varactors", *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 16, no. 4, pp. 167-169, Apr. 2006.
- [6] B. Cook, J. Cooper, and M. Tentzeris, "An inkjet-printed microfluidic RFID-enabled platform for wireless lab-on-chip applications", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 61, no. 12, pp. 4714-4723, Dec. 2013.
- [7] W. Su, B. Cook, C. Mariotti, L. Roselli, and M. Tentzeris, "A novel inkjet-printed microfluidic tunable coplanar patch antenna", in *2014 IEEE International Symp. on Antennas and Propagation*, Memphis, USA, Jul. 2014.
- [8] J. A. Gordon, C. L. Holloway, J. Booth, S. Kim, Y. Wang, J. Baker-Jarvis, and D. R. Novonthy, "Fluid interactions with metafilms / metasurfaces for tuning, sensing, and microwave-assisted chemical processes", *Physical Review*

B, vol. 83, no. 20, pp. 205130, May 2011.

- [9] E. G. Zadeh, M. Sawan, "A hybrid microfluidic/CMOS capacitive sensor dedicated to lab-on-chip applications", *IEEE Trans. Biomedical Circuits and Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 270-277, Dec. 2007.

- [10] E. G. Zadeh, M. Sawan, "Charge-based capacitive sensor array for CMOS-based laboratory-on-chip applications", *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 325-332, Apr. 2008.

최 성 진



2013년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
2013년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
[주 관심분야] Microfluidics, Inkjet Printed Electronics

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