

수직 분할 링 공진기의 소형화 방안 연구

이상민*, 윤원상**

A Size Reduction Method of Vertical Split Ring Resonator

Sang-Min Lee*, Won-Sang Yoon**

본 연구는 2018년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2018-0340).

요 약

본 논문에서는 수직 분할 링 공진기(VSRR, Vertical Split Ring Resonator)의 소형화 방안을 제시하였다. VSRR은 유전체 기판의 상하면에 놓인 마이크로스트립 라인을 이용한 링형 공진기로서, 일반적인 평면형 링 공진기에 비해 공진 회로의 전기적 크기를 줄일 수 있다. VSRR의 공진 주파수는 상면과 하면에 일렬로 놓인 마이크로스트립 라인 간에 발생하는 커패시턴스와 인덕턴스에 의해 결정되며, 본 논문에서는 하면의 마이크로스트립 라인의 형태를 변경시켜 커패시턴스를 증가시킴으로써 공진주파수를 낮출 수 있는 방안을 제시하였다. 이를 적용하여 일반적인 형태의 VSRR과 소형화된 VSRR를 설계하고, 그 결과를 비교하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 적용한 결과 동일한 길이를 가질 때, VSRR의 동작주파수가 2.445GHz에서 1.165GHz로 줄어들었으며, 동일한 공진주파수를 갖도록 할 경우 길이가 55.1% 단축되었다.

Abstract

In this paper, a size reduction method of a vertical split ring resonator (VSRR) is presented. VSRR is a type of ring resonator, consists of the microstrip lines arranged on the upper surface and the lower surface of the dielectric substrate, and can reduce the electrical size of the resonant circuit as compared to a conventional planar ring resonator. The resonant frequency of VSRR is determined by the capacitance and inductance generated between the microstrip lines arranged in the upper and lower surfaces and we proposed a method to increase the capacitance and reduce the resonance frequency by changing the shape of the bottom microstrip line in this paper. By applying proposed method, the conventional VSRR and size-reduced VSRR were designed and the experimental results were compared. When having the same length with the conventional VSRR, the operating frequency of proposed VSRR is reduced from 2.4 GHz to 1.165 GHz, and the length is reduced 55.1% compared to conventional VSRR when having the same resonant frequency.

Keywords

vertical split ring resonator, resonator, ring resonator, miniaturized resonator, filter, metamaterial

* 호서대학교 전자공학과 학사과정
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6587-5292>
** 호서대학교 전자디스플레이공학부(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1125-384X>

· Received: Aug. 31, 2020, Revised: Sep. 21, 2020, Accepted: Sep. 24, 2020
· Corresponding Author: Won-Sang Yoon
Division of Electronics and Display Engineering, Hoseo University
20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do, Korea,
Tel.: +82-41-540-5661, Email: wsoon@hoseo.edu

1. 서 론

무선 통신 시스템은 다른 지역에 위치한 사용자 간의 음성, 송수신으로부터 진화하여 데이터의 송수신, 사람과 사물간 연결, 사물과 사물간의 유기적인 연결이 이루어지는 방향으로 발전하고 있으며, 사물 지능통신과 센서 네트워크가 융합된 형태로 발전해 나가고 있다. 특히, 5G 통신에 있어 가장 중요한 핵심요소는 수많은 디바이스들이 네트워크로 연결되는 IoT(Internet of Things) 혹은 IoE(Internet of Everything) 서비스가 될 것이다. 이러한 IoT/IoE에 있어 필수적인 근거리 무선 접속 기술로서, IEEE 802.11 계열의 WLAN과 더불어, IEEE 802.15 계열의 Bluetooth TM, ZigBee, UWB 기술에 이르기까지 광범위하게 발전해오고 있으며, 근거리에서의 주파수 인지 기술인 IEEE 802.16의 Cognitive Radio 기술 및 IEEE 802.22의 Wireless BAN(Body Area Network)에 이르기까지 초근거리 접속 기술이 차세대 RFID/USN 네트워크를 위한 기술로 진화하고 있다.

그러나 이러한 기술들을 구현한 솔루션들은 저전력, 데이터 효율, 스펙트럼 효율, 저가격 등의 모든 요구사항을 만족하지는 못하는 상황이다. 따라서 최근의 무선 통신 시스템의 연구개발 동향은 시스템 단위의 전송 효율을 높여 주파수 사용 극대화 및 동시 사용자 수의 최대화를 이루기 위한 방향과 더불어, 개별 시스템 및 회로 소자의 소형/경량/저전력화를 이루기 위한 방향으로 진행되고 있다[1]-[3].

한편, 메타 물질(Metamaterial)은 초고주파 대역에서 인위적으로 형성된 음의 유전율과 투자율을 동시에 갖는 물질로서, “left-handed material”로 알려져 있다. 이는 물체가 갖는 기본 물질 특성을 사용하지 않고, 반복적인 패턴의 배열 등을 이용하여 물질에서 구성되는 커패시턴스, 인덕턴스를 변화시켜 음의 유전율과 투자율이 생성되는 새로운 물리적 특성을 이용하게 된다. 이러한 메타물질은 CRLH(Composite Right/Left Handed) 전송선 이론을 통해 등가회로 모델이 정립되었으며, 특정 주파수에서 위상속도가 영(0)이 되는, 소위 영차 모드 공진(Zeroth-order resonance), 혹은 무한 파장 공진 현상을 가지고 있다. 즉, 영이 아닌 주파수에서 영의 전파상수를 가

지게 되고, 무한 파장의 전기적 길이 성분으로 공진을 발생한다[4]. 이러한 영차 모드 공진은 주파수에 무관한 특성으로 인하여 안테나, 필터 등의 다양한 고주파 무선 부품의 소형화에 적용 가능하다. 이중 분리형 링 공진기(SRR, Split Ring Resonator)는 평면적인 구성이 가능하여 구현이 용이하여 필터나 발진기 등 여러 가지 무선 통신용 회로에 많이 사용되고 있다[5]-[7].

하지만, 평면에 구현되기 때문에 차지하는 면적이 적지 않으므로 소형화에 있어 제약이 발생한다. 이러한 단점을 해소하기 위하여 수직 분할 링 공진기(VSRR, Vertical Split Ring Resonator)이 제안된 바 있다[8][9]. VSRR은 유전체 기판의 상하면에 놓인 마이크로스트립 라인을 이용한 링형 공진기로서, 상면과 하면에 일렬로 놓인 마이크로스트립 라인간에 발생하는 커패시턴스와 인덕턴스에 의해 공진이 발생하게 되며, 일반적인 분리형 링 공진기에 비해 차지하는 면적이 감소하는 장점을 갖는다.

본 논문에서는 수직 분할 링 공진기가 갖는 소형화의 장점을 더 강화시키는 방법으로서 기판 하면의 마이크로스트립 라인의 구조를 변경하여 커패시턴스를 증가시키는 방법을 제시하고, 이를 일반적인 형태의 수직 분할 링 공진기 설계와 비교하였다.

본 논문 2장에서는 일반적인 VSRR의 구조와 동작 특성을 소개하였으며, VSRR 구조의 변경을 통한 소형화 방안을 3장에 기술하였다. 4장에서는 일반적인 구조를 갖는 VSRR과 제안된 VSRR의 설계 결과를 제시하고, 그 특성을 비교하였으며, 5장에 결론을 제시하였다.

II. 수직 분할 링 공진기

그림 1과 같이 수직 분할 링 공진기는 일반적으로 유전체 기판의 상부와 하부에 나란히 위치하고 길이 L_1 을 갖는 마이크로스트립 라인과 이를 연결하는 via hole로 구성된다. 상부에 놓인 마이크로스트립 라인과 하부에 놓인 마이크로스트립 라인은 via hole을 통하여 전기적으로 연결되며, 하단부의 라인은 갭(g)에 의해 분리되어 있는 형태로 구성되어, 수직 구조의 헤어핀 공진기 형태로 동작하게 된다.

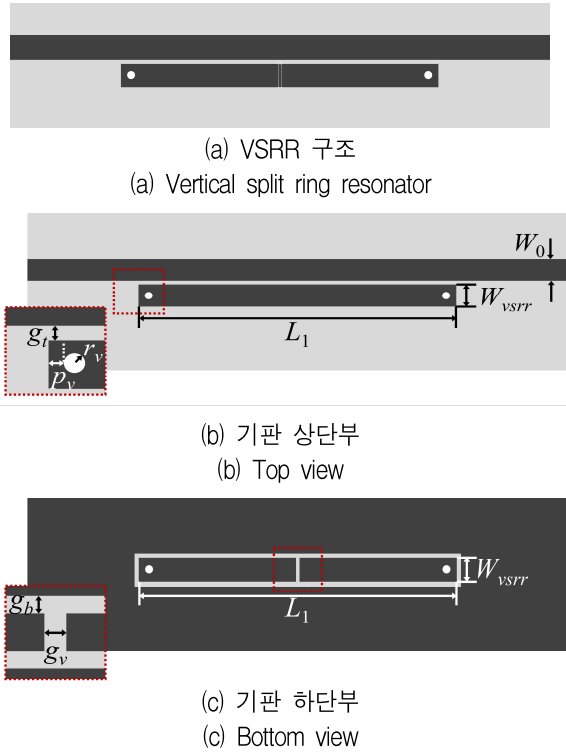


그림 1. 수직 분할 링 공진기(VSRR)
Fig. 1. Vertical split ring resonator

이러한 VSRR의 마이크로스트립 전송선 등가 모델은 그림 2(a)에 나타난 것과 같다. 마이크로스트립 전송선로가 공진기가 위치한 구간을 통과하는 위치에 대한 인덕턴스와 커패시턴스는 L_o 와 C_o 이며, C_g 는 VSRR 하단부에 위치한 공진기 선로간 겹에 의해 발생하는 커패시턴스, C_a 는 VSRR 하단부의 공진기 선로와 접지면 사이의 커패시턴스, L_r 와 L_o 는 VSRR 상단부와 하단부 선로의 인덕턴스, L_v 는 VSRR 상단부와 하단부의 선로를 연결하는 via hole에 의해 발생하는 인덕턴스이다. 그림 2(b)는 이를 간략화하여 나타낸 등가회로이며, 인덕턴스 L_r 과 커패시턴스 C_r 은 식 (1), (2)에 의해 구할 수 있고, 공진주파수 ω_r 은 식 (3)과 같이 L_r 와 C_r 에 의하여 결정된다[8][10][11].

$$L_r = L_t + (2 \cdot L_v) + L_b \quad (1)$$

$$C_r = C_g + C_a/2 \quad (2)$$

$$\omega_r = 1/\sqrt{L_r C_r} \quad (3)$$

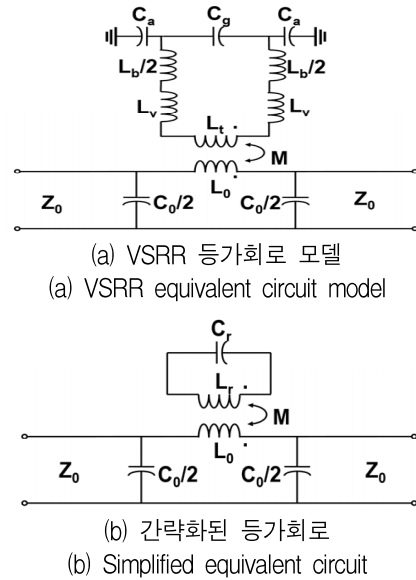


그림 2. VSRR에 의해 로드된 전송선의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the transmission line loaded by VSRR

2.4GHz 대역에서 동작하는 VSRR을 설계하여 각 파라미터값과 시뮬레이션한 결과를 표 1과 그림 3에 나타내었다.

표 1. VSRR의 설계파라미터
Table 1. Design parameters of the VSRR

Parameters	Values (mm)
W_o	1.15
W_{vsrr}	1.15
L_1	25.4
g_t	0.2
p_v	0.2
r_v	0.25
g_v	0.2

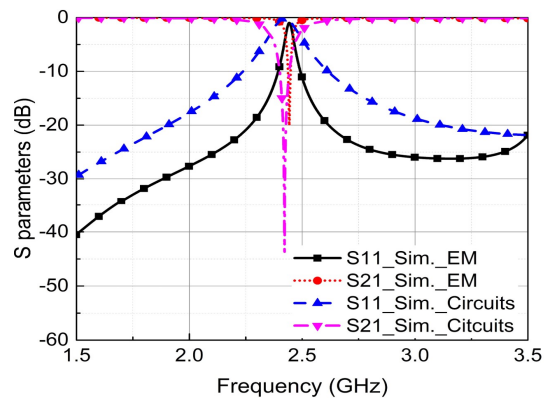


그림 3. VSRR 동작특성 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation results for VSRR

III. 수직 분할 링 공진기 소형화 설계

VSRR을 소형화하기 위해서는 식 (3)을 통해 알 수 있듯이 공진기의 커패시턴스 C_r 과 L_r 을 증가시켜야 한다. 공진기 회로에서 인덕턴스는 공진기 라인의 선폭과 via hole의 반지름에 의해 결정되나, 선폭의 변화에 의해 나타나는 인덕턴스의 변화에 의해 갭 커패시턴스도 함께 영향을 받아 주파수 변화가 거의 나타나지 않는다. 따라서 본 논문에서는 커패시턴스를 증가시켜 공진기를 소형화하는 방법을 그림 4와 같이 제안하였다. 하부면 선로 간에 발생하는 갭 커패시턴스는 선로 간 이격 거리 및 마주보는 면적에 의해 결정되므로, 하부면의 구조를 변경하여 선로끼리 마주보는 면적을 넓혀 갭 커패시턴스를 증가시킬 수 있다.

본 연구에서는 그림 4(b)에 나타난 것과 같이 하부면의 구조를 hair comb 형태로 구성하여 두 선로 사이가 마주보는 면적을 증가시켜 갭 커패시턴스를 증가시켰다. 이로 인하여 L_2 를 25.4mm로 동일하게 일반적인 VSRR 구조와 제안된 구조의 동작 특성을 시뮬레이션을 통하여 비교하였을 때, 그림 5(a)에 나타난 것과 같이 공진주파수가 2.445GHz에서 1.165GHz로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

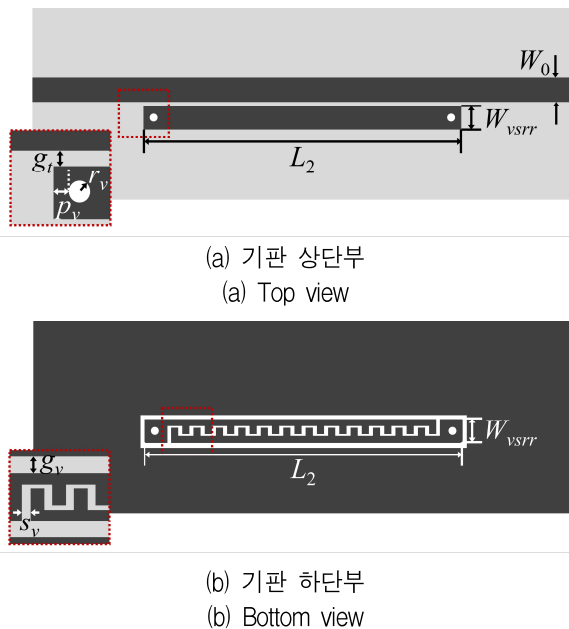
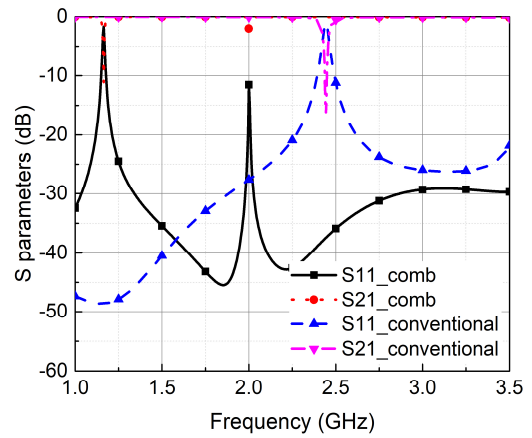
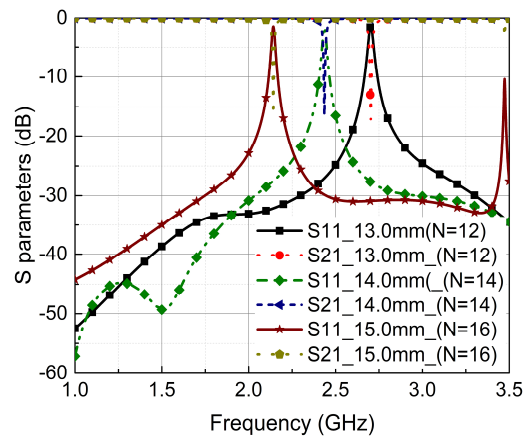


그림 4. 소형화된 수직 분할 링 공진기(VSRR)
Fig 4. Configuration of the size reduced VSRR

이를 바탕으로 소형화된 VSRR 구조의 L_2 값을 13~15mm로 변화시켰을 때, 공진 주파수 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 5(b)에 나타내었다. 이때, VSRR이 갖는 갭 커패시턴스를 늘리기 위해 L_2 변경에 따라 comb의 개수(N)를 조정하였다. 제안된 구조를 갖는 VSRR의 L_2 길이를 13, 14, 15mm로 설계하였을 때, 공진주파수는 각각 2.705GHz, 2.435GHz, 2.140GHz로 나타났으며, 이를 통해 일반적인 구조의 VSRR과 동일한 공진주파수를 갖기 위해서는 L_2 가 14mm가 되어야 하는 것을 알 수 있다. 이 때 VSRR 뒷면에 형성된 comb은 14개로 설정되었다.



(a) VSRR 구조에 따른 공진주파수 비교($L_2 = 25.4\text{mm}$)
(a) Resonant frequency comparison with respect to VSRR configuration($L_2 = 25.4\text{mm}$)



(b) L_2 값에 따른 공진주파수 변화
(b) Resonant frequency comparison with respect to L_2 variation

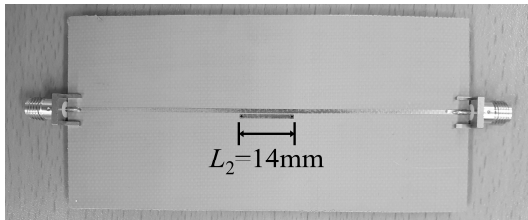
그림 5. 제안된 수직 분할 링 공진기(VSRR)의 시뮬레이션 결과

Fig 5. Simulation results for the proposed VSRR

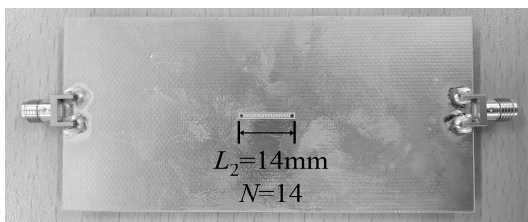
IV. 소형화 설계를 적용한 VSRR의 구현 결과

제안된 VSRR은 비유전율 3.5, 두께 0.508mm를 갖는 taconic사의 RF-35를 사용하여 100×50mm²의 크기로 제작되었으며, 그림 6에 제작된 VSRR의 사진을 나타내었다. 3장의 설계 결과를 반영하여 공진기 길이(L_2)는 14mm로 설계하였으며, 이 때 VSRR 뒷면에 형성된 comb은 14개로 설정되었으며, comb 간격(s_v)은 0.2mm로 설계하였다. 제안된 구조의 VSRR의 설계 파라미터를 표 2에 나타내었다.

제작된 VSRR의 공진 특성을 확인하기 위하여 Agilent사의 네트워크 분석기 E5071C를 사용하여 S-파라미터를 측정하였으며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다.



(a) 상부면
(a) Top view



(b) 하부면
(b) Bottom view

그림 6. 제작된 수직 분할 링 공진기 사진
Fig. 6. Photo of the implemented VSRR

표 2. 제안된 구조의 VSRR의 설계 파라미터
Table 2. Design parameters of the proposed VSRR

Parameters	Values (mm)
W_o	1.15
W_{vsrr}	1.15
L_2	14
g_t	0.2
p_v	0.2
r_v	0.25
g_v	0.2
s_v	0.2

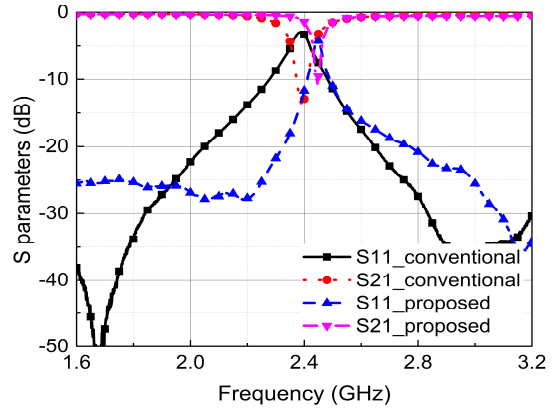


그림 7. 제작된 수직 분할 링 공진기 S-파라미터 측정결과

Fig. 7. Measured S parameter of the proposed VSRR

일반적인 형태의 VSRR은 공진기 길이(L_1)가 25.4mm이며, 공진주파수는 2.395GHz로 나타났으며, 공진기 후면부에 comb을 적용하여 소형화된 VSRR의 경우 2.445GHz에서 공진하여 대역 저지특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 때 S_{11} -3.4dB, S_{21} -11.2dB이며, 3dB 대역폭은 180MHz로 측정되었으며, 선택도는 136으로 나타났다. 시뮬레이션 결과에 비해 공진주파수가 소폭 감소한 것으로 나타나는 것은 이는 회로 제작에서 발생하는 공차와 기판의 유전율 등이 일정하지 않아 발생하는 것으로 판단된다. 이를 통해 comb 구조를 적용하여 갭 커패시턴스를 증가시킴으로써 VSRR을 소형화시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문을 통해 수직 분할 링 공진기의 크기를 소형화하는 방법을 제시하였다. 수직 분할 링 공진기의 하단부의 형태를 변경시켜 갭 커패시턴스를 증가시켰으며, 이로 인해 공진주파수를 낮추는 효과를 얻을 수 있었으며, 기존 VSRR과 동일한 주파수에서 공진을 얻기 위해서 필요한 VSRR의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방법을 적용한 결과 동일한 길이를 가질 때, VSRR의 동작주파수가 2.4GHz에서 1.165GHz로 감소하였으며, 동일한 공진주파수를 갖도록 설계할 경우 기존의 VSRR에 비해서 길이가 55.1% 감소하는 것을 확인하였다. VSRR의 커패시턴스 증가를 통해

공진기를 소형화한 것과 같이 VSRR 라인의 인덕턴스를 변경시키는 방법으로도 추가적인 소형화가 가능할 것이며, 이를 조합하여 공진기의 대역폭 조절도 가능할 것으로 판단된다.

References

[1] J. Lim, W. S. Yoon, H. Choi, S.-M. Han, and D. Ahn, "Design of a Branch Line Coupler Using Stripline and Common Defected Ground Structure", *Journal of KIIT*, Vol. 16, No. 4, pp. 87-93, Apr. 2018.

[2] S. Kim and K. Kwon, "A Low-Power RF-to-BB-Current-Reuse Receiver Employing Simultaneous Noise and Input Matching and $1/f$ Noise Reduction for IoT Applications", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 29, No. 9, pp. 614-616, Sep. 2019.

[3] W. S. Yoon, S. J. Lee, and S. M. Han, "Channel Cognitive Wireless Sensor System Based on Spectrum Sensing Technology", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 62, No. 3, pp. 1157-1164, Mar. 2014.

[4] A. Lai, T. Itoh, and C. Caloz, "Composite Right/Left-handed Transmission Line metamaterials", *IEEE microwave magazine*, Vol. 5, No. 3, pp. 34-50, Sep. 2004.

[5] C. Hwang, J. Lee, J. Kim, N. Myung, and J. Song, "Simple K-band MMIC VCO utilizing a miniaturized hairpin resonator and a three terminal p-HEMT varactor with low phase noise and high output power properties", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 13, No. 6, pp. 229-231, Jun. 2003.

[6] J. H. Lee, M. C. Hong, J. T. Oh, and W. S. Yoon, "Design of a S-band Oscillator Using Vertical Split Ring Resonator", *Journal of KIIT*, Vol. 17, No. 3, pp. 43-50, Mar. 2019.

[7] A. K. Horestani, C. Fumeaux, S. F. Al-Sarawi, and D. Abbott, "Split ring resonators with tapered strip width for wider bandwidth and enhanced resonance", *IEEE Microwave and Wireless*

Components Letters, Vol. 22, No. 9, pp. 450-452, Sep. 2012.

[8] J. Choi, S. Oh, S. Jo, W. S. Yoon, and J. Lee, "Vertical Split Ring Resonator Using Vias With Wide Bandwidth and Small Electrical Size", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 27, No. 1, pp. 16-18, Jan. 2017.

[9] J. Lim, S. Lee, S. Oh, W. S. Yoon, Y. Kim, D. Oh, and J. Lee, "Design of Miniaturized Vertical Split-Ring Resonator Based on Coupled Coplanar Waveguide", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 28, No. 9, pp. 753-755, Sep. 2018.

[10] R. Grag, I. Bahl, and M. Bozzi, "Microstrip Lines and Slotlined", Norwood, MA, USA: Artech House, 2013.

[11] I. Bahl and P. Bhartia, "Microwave Solid State Circuit Design", New York, NY, USA: Wiley, 1988.

저자소개

이 상 민 (Sang-Min Lee)



2015년 3월 ~ 현재 : 호서대학교
전자공학과 학사과정
관심분야 : 초고주파 능동/수동
회로, 재구성 회로

윤 원 상 (Won-Sang Yoon)



1997년 2월 : 고려대 전파공학과 (공학사)
1999년 2월 : 고려대 대학원
통신시스템공학과(공학석사)
2010년 8월 : 고려대 대학원
컴퓨터·전파통신공학과(공학박사)
1999년 3월 ~ 2015년 8월 :
한화탈레스(現 한화시스템) 통신연구소 수석연구원
2015년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 전자디스플레이공학부
부교수
관심분야 : RF transceivers, Reconfigurable antenna
systems, RF sensor systems 등