

SRR-DGS 공진기를 이용한 저역통과 필터 설계

김종화*, 김기래**, 김성훈***

Low Pass Filter Design using the SRR-DGS Resonator

Jong-Hwa Kim*, Gi-Rae Kim**, Sung-Hoon Kim***

요약 본 논문에서는 SRR-DGS 공진기를 제안하고 그것의 등가회로를 해석하여 저역통과 필터 설계에 적용하였다. 기존의 덤벨형 DGS 구조로 된 것과 비교하였을 때 제안된 구조는 차단주파수 근처에서 스킵트 특성과 저주파 대역의 평탄도 특성이 우수하였다. 기본적인 SRR-DGS 셀에서 등가회로의 병렬 커패시턴스를 증가하기 위해 전송선로에 개방 스틱스를 추가함으로써 대역의 고주파 억압 특성을 개선하였다. 이와 같은 등가회로의 해석적인 방법으로 개선된 SRR-DGS 셀의 특성이 연구되어 차단 특성이 우수하고 고주파 억압 특성이 35dB 이상인 저역통과 필터의 설계에 적용되었다. 그리고 공진기의 측면 길이와 링 간격 등과 같은 물리적 크기와 전송특성과의 관계를 해석하여 나타내었다. 개방 스틱스의 면적을 증가하면 차단 주파수 이상의 대역에서 억압 특성이 개선되었다. SRR-DGS에 대해 유도해낸 등가 파라미터와 회로의 정확성을 검증하기 위해 SRR-DGS 셀을 이용한 저역통과 필터를 설계하고 제작하였다.

Abstract In this paper, the split-ring DGS resonator is proposed and its equivalent circuit are analyzed to design the low pass filter. Compared with the conventional dumbbell DGS cell, this structure has a flat fluctuation in low frequency range and a sharp slop at edge frequency. The out-band suppression of the SRR-DGS cell can be improved by placing the open stubs on the conductor line which operates as parallel capacitances. Making use of equivalent circuit analytical method, the characteristics of the improved SRR DGS cell are investigated and applied to design compact low pass filter, which has a low in-band loss, sharp slop and high suppression of more than 35dB within a wide out-band frequency range. The dependence of the transmission characteristic on the dimension of a split ring, such as side-length and split-gap, is analyzed in detail. In addition, an improved SRR DGS cell model with open stubs loaded on the conductor line is then presented to improve the out-band suppression. By using the equivalent-circuit analytical method, an S-band microstrip low-pass filter with perfect low-pass characteristic and high out-band suppression is designed and fabricated.

Key Words : Split-Ring DGS, SRR-DGS Resonator, Oscillator, Microstrip Resonator, Phase Noise

1. 서론

1999년에 PBG 구조에 대한 개념에서 시작된 결함 접지면 구조 (DGS)가 처음으로 제안되었고, 그것의 응용은 저역통과 필터와 평면구조 회로 설계 등에 적용되었다[1-3]. DGS에서 전류

흐름이 방해받음으로써 증가적인 인덕턴스와 커패시턴스가 변하게 되어 전송선로의 특성이 변하게 되며, 전송속도가 느려지는 저속과 효과와 대역저지 특성을 나타낸다. 분리형 링 공진기 (SRR)는 좌향 메타물질(LHM) 구현과 평면 회로의 설계에 많이 적용되어졌다. Pendry[4]는 공

This paper is being conducted with the support of regional innovation creative manpower business in Korea Research Foundation and the Department of Education 2014 study (2014H1C1A1066859)

* Corresponding Author : Dept. of Electronics Engineering, Silla University, Busan, Korea (electronlab@silla.ac.kr)

Received August 1, 2015

Revised August 5, 2015

Accepted August 10, 2015

진주파수 근처에서 음의 투자율을 나타내는 SRR 배열 구조를 발표하였고, Gay-Balmaz[5]는 실험 및 수치적인 방법으로 하나의 SRR과 결합된 SRR에 대해 전자기적 공진 주파수를 연구하였다. Markos[6]는 주기적인 SRR 배열에 대해 링의 크기, 내부 직경, 링의 간격 그리고 기판의 전기적 유전율 등과 같은 구조적인 조건과 공진 주파수의 관계를 연구하였다. Bonache[7]는 마이크로 스트립 구조의 소형화된 대역통과 필터를 설계하기 위하여 상보형 SRR을 개발하고 그것의 응용에 대해 발표하였다. 본 논문에서는 SRR-DGS 셀을 제안하고 그것의 응용에 대해 나타내었다. 제안하는 SRR-DGS는 기존의 DGS 구조와 비교했을 때 평탄한 저역통과 특성과 날카로운 대역 차단 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 SRR-DGS 셀의 구조적 크기와 전송 특성과의 관계를 자세하게 나타내고, 저지대역의 억압 특성을 개선하기 위하여 SRR-DGS 셀에 개방 스테르브를 추가한 개선된 구조를 제안하였다. 등가회로적인 설계방법으로 주기적인 SRR-DGS 셀을 이용한 소형화된 S-대역 마이크로스트립 저역통과 필터를 설계하고 구현하였다.

2. SRR-DGS 공진기 등가회로

그림 1은 제안된 SRR-DGS 구조를 나타내었다. 기판 위에 마이크로스트립 선로가 있으며 기판 밑 부분에 SRR DGS 패턴이 식각 되어 있는 구조이다.

그림 1의 포트에서 L 만큼 떨어진 점은 마이크로스트립 선로가 개방되는 곳이어서 전류가 0이 되고 결과적으로 개방 상태가 된다. 이것을 등가회로로 나타낸다면 그림 2와 같이 된다. 이때 공진주파수는 변화가 없게 되며, 공진시 나타나는 저항 R의 경우 결합도에 대한 함수가 될 것이다.

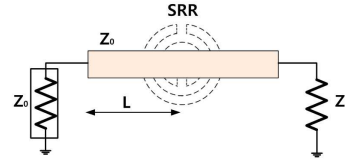


그림 1. 제안된 SRR-DGS 구조
Fig. 1. Structure of SRR-DGS type Resonator

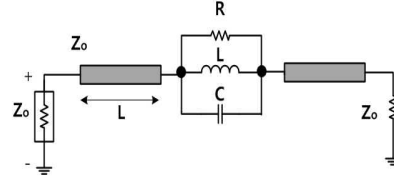


그림 2. 링형 DGS 공진기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent Circuit of Ring type DGS

그림 2의 회로에서 병렬공진회로의 임피던스를 Z_p 라고 하면, 이때 포트 1에서 들여다본 반사계수는 식(1)과 같고, 병렬공진회로의 임피던스 Z_p 는 식(2)와 같이 되며, 그 점에서의 반사계수는 식(3)과 같다.

$$S_{11} = \frac{Z_p}{Z_p + 2Z_0} e^{-2\beta} \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} \approx \frac{R}{1 + 2jQ_u \frac{\Delta\omega}{\omega_0}} \quad (2)$$

$$S_{11} = \frac{\frac{\beta}{1 + \beta}}{1 + 2jQ_L \frac{\Delta\omega}{\omega_0}} e^{-2\beta} \quad (3)$$

$$Q_u = \omega_0 CR \quad (4)$$

여기서, 상수 β 와 Q_L 은 다음과 같다.

$$\beta = \frac{R}{2Z_0} \quad (5)$$

$$Q_L = \frac{Q_u}{1 + \beta} \quad (6)$$

식(3)에서 $|S_{11}|$ 에 대한 주파수 응답 특성을 그림으로 나타내면 그림 3과 같이 나타낼 수 있

다. 반사계수 $|S_{11}|$ 의 주파수 응답을 측정할 경우 최댓값을 주는 주파수가 바로 공진주파수 f_0 가 되고, 이때의 값은 $\beta / (1 + \beta)$ 되므로, 측정된 최댓값으로부터 β 값을 알 수 있게 된다. 또한 -3dB 대역폭 BW를 그림 3과 같이 측정할 경우 Q_L 을 결정할 수 있게 된다. 식(6)에 따라 무부하 Q인 Q_u 를 결정할 수 있게 되고, 이에 따라 식(4)를 이용하면 C 를 결정하게 되고, 또한 공진주파수로부터 식(4)를 이용하면 L 을 결정할 수 있어 등가회로 파라미터 값 들을 모두 구할 수 있게 된다.

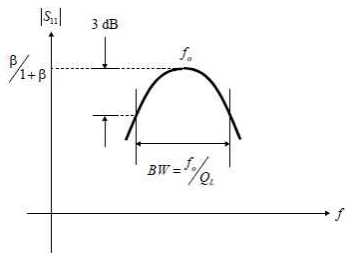


그림 3. 공진기 회로의 주파수 특성
Fig. 3. Frequency Response of Resonator

설계의 예로서 공진주파수가 3 GHz인 SRR-DGS 공진기를 설계하였다. 기판은 Teflon 으로서 비유전율이 2.2이고 유전체 두께는 0.7874 mm이며, 구조적 치수는 A=10 mm, B=1 mm, C= 1 mm, G= 1 mm, W= 4 mm, L= 30 mm 이다. 그림 4의 공진기 구조에 대해 전자파 구조해석 도구인 HFSS를 이용하여 산란계수 파라미터를 시뮬레이션하여 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

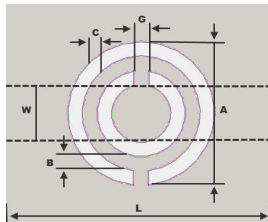


그림 4. 설계된 DGS 공진기
Fig. 4. Designed Ring type Resonator

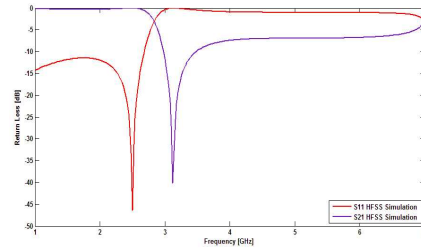


그림 5. 공진기의 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation Result of Resonator

그림 5의 측정된 결과로부터 등가회로 파라미터를 구해보면 다음과 같다. 그림 5에서 $|S_{11}|$ 의 최댓값을 구하면 -0.034 dB 이다. $|S_{11}|$ 의 최댓값과 β 와의 관계식은 식(7)과 같으므로 β 를 구하면 249 이다. 구한 $\beta=249$ 를 식(7)에 대입하면 등가회로의 R 파라미터를 구할 수 있다. 계산하면 $R = 24.9 k\Omega$ 이다.

$$\frac{\beta}{1 + \beta} = |S_{11}|_{\max} = 10^{-0.034/20} = 0.996 \quad (7)$$

대역폭(BW)이 300 MHz 이고, 공진주파수 $f_0 = 3.0$ GHz이므로 $Q_L = 9.67$ 이 되고, $Q_u = 2417.5$ 이다. 등가회로의 $C = 5.15$ pF이고, 인덕턴스 $L = 546.5$ pH 가 된다.

3. 개선된 SRR-DGS 구조와 등가회로

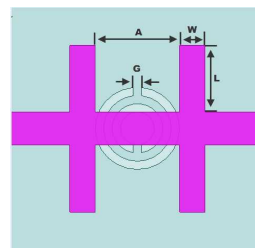


그림 6. 개선된 SRR-DGS 구조
Fig. 6. Structure of the improved SRR DGS

그림 1의 기본적인 SRR-DGS 구조에서 전송 선로의 상하측에 개방 스텐브를 추가하여 병렬

커패시턴스를 증가시킨 구조로서 개선된 SRR-DGS 구조를 그림 6에 나타내었다. 그것의 등가회로는 그림 7(a)와 가티 모델링 될 것이다. 그림 7(a)에서와 나타낸 바와 같이 등가회로의 양측에 두 개의 커패시터를 대칭적으로 추가하고 그것을 적절한 범위 내에서 커패시턴스를 증가할 때 전송 특성을 시뮬레이션 하여 결과를 그림 7(b)에 나타내었다. 그림 7(b)에서 나타낸 바와 같이 커패시턴스를 증가하게 되면 대역 외 저지특성이 좋아짐을 알 수 있다.

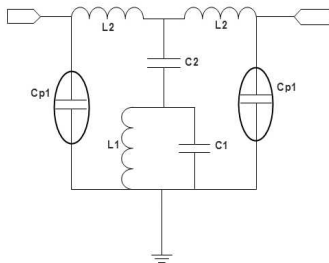


그림 7. (a) 병렬 커패시터를 갖는 등가회로
Fig 7. (a) Equivalent circuit with parallel capacitors

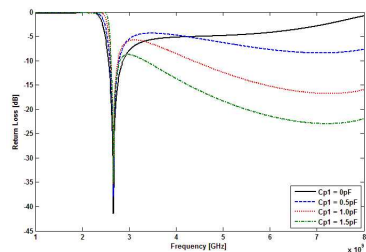


그림 7. (b). 병렬 커패시터를 갖는 등가회로의 전송 특성
Fig 7. (b) Variation of the transmission curve with parallel capacitance.

등가회로의 결과를 검증하기 위하여 그림 6의 구조에서 특성 결과에 맞도록 설계하고 그것의 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교하여 나타내었다. 유전체 두께 $H=0.7874$ mm, 비유전율 $\epsilon_r=2.2$ 인 테프론 기판을 사용하였고, 마이크로 스트립 선로의 폭 $w_o=4.0$ mm 이고, 사각 SRR DGS 셀은 측면 길이 $A=10$ mm, 분리 갭 $G=1$

mm이고, 도체 선로에 놓인 모든 개방 스테르브는 폭 $W=3$ mm, 길이 $L=8$ mm이다.

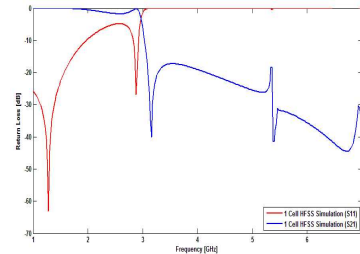
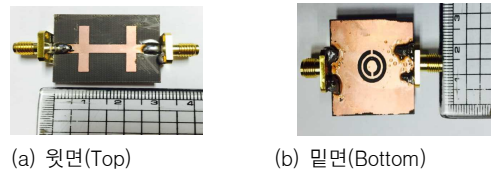


그림 8. 개선 된 SRR DGS 셀의 시뮬레이션결과
Fig 8. Simulation results of the improved SRR DGS cell.



(a) 윗면(Top) (b) 밑면(Bottom)

그림 9. 제작한 DGS 저역통과필터
Fig 9. Photo of Fabricated DGS Low Pass Filter

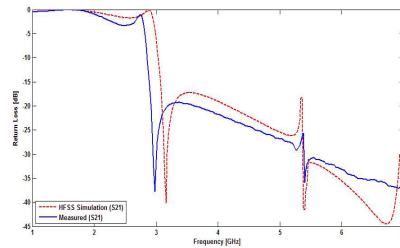


그림 10. 측정결과와 시뮬레이션 결과의 비교
Fig 10. Comparison of Simulation and Measured Results

그림 11은 두 개의 셀 구조 SRR-DGS에 대한 구조이고 그림 12는 세 개의 셀 구조 SRR-DGS에 대한 구조이다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 셀의 개수를 한 개부터 세 개 까지 세 종류의 SRR-DGS를 설계하고 시뮬레이션 하였다. 그림 13은 그것의 전송 특성을 비교하여 나타내었다. 셀의 수가 증가할수록 차단주파수 이상의 대역에서 역압 특성이 개선되며 세 개의 셀로 구성된 것이 저역 통과 필터로서 우수한

특성을 나타내었다.

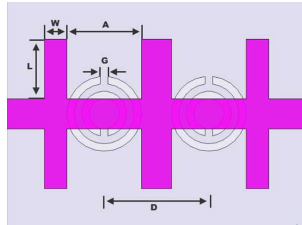


그림 11. 두 개의 셀 SRR-DGS의 레이아웃
Fig. 11. Layout of two-cell SRR-DGS

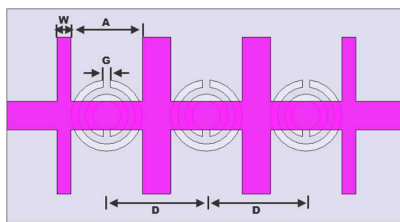


그림 12. 세 개의 셀 SRR-DGS의 레이아웃
Fig. 12. Layout of three-cell SRR-DGS

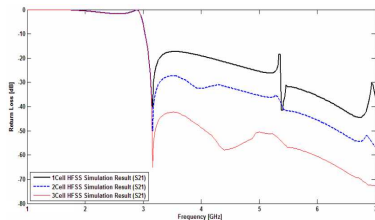


그림 13. 셀의 수의 변화에 따른 SRR-DGS의 시뮬레이션 결과.
Fig 13. Simulation of SRR DGS with different cell number.

4. 결론

본 논문에서는 SRR-DGS 구조와 그것의 등가회로를 해석하여 나타내었다. SRR-DGS 구조는 공진 주파수 이하의 대역에서 평탄한 특성을 갖고 공진 주파수 이상의 대역에서는 날카로운 억압 특성을 가진다. 이 공진기의 특성은 저역통과 필터와 유사한 특성을 나타낸다. 그러나 이것이 저역통과 필터로서 사용되기 위해서는 차단 주파수 이상의 대역에서 억압 특성을 개선하여

야 하므로, SRR-DGS의 등가회로에서 병렬 커패시턴스를 추가하고 그 값을 증가함에 따라 억압 특성이 개선되었다. 병렬 커패시턴스는 SRR-DGS 셀에서 윗면 전송선로에 개방 스텔브를 추가하여 개선된 SRR-DGS 셀을 통하여 구현할 수 있었다. 개선된 SRR-DGS 셀에서 저역통과 필터의 특성을 보완하기 위해 주기적으로 셀을 배열하여 우수한 특성을 갖는 저역통과 필터를 설계하였다.

REFERENCES

- [1] Yablonovitch, E., T. J. Gmitter, and K.M.Leung, "Photonic band structure: The face centered cubic case employing nonspherical atoms," *Physical Review Letters*, Vol.67, No. 17,2295-2298,1991.
- [2.] Park, J. I., C. S. Kim, J. Kim, et al., "Modeling of a photonic bandgap and its application for the low-pass filter design." Singapore: Asia Pacific Microwave Conference, 1999.
- [3] KIm, C. S., J.I.Park,A.Dal,et al., "A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, Vol. 10,No. 4, 131-133, 2000.
- [4] Pendry, J. B., A. J. Holden, D. J. Robbins, et al., "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans.Microwave Theory Tech.*, Vol. 47, No. 11,2075-2084,1999.
- [5] Gay-Balmax,P.and O.J.F.Martin, "Electromagnetic resonances in individual and coupled split-ring resonators," *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 5, 2929-2936, 2002.
- [6] Markos,P.and C.M.Soukoulis, "Numerical studies of left-handed materials and arrays of split ring resonators," *Physical Review*

E., Vol. 65, 036622-1~036622-8, 2002.

[7] Bonache, J., F. Marin, F. Falcone, et al., "Application of complementary split-ring resonators to the design of compact narrow band-pass structures in microstrip technology," Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 46, No. 5, 508-512, 2005.

저자약력

김 종 화 (Jong-Hwa Kim) [학생회원]



- 2015년 2월 : 신라대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 2015년 3월 : 신라대학교 대학원 전자공학과 입학 (공학석사)

<관심분야>

RF Circuit, Antenna, filter RF System

김 성 훈 (Sung-Hoon Kim) [정회원]



- 1979 ~ 1986 : 부산대학교 화학과 이학사
- 1986 ~ 1988 : 서울대학교 화학과 이학석사 물리화학전공
- 1989 ~ 1993 : 서울대학교 화학과 이학박사 고체물리화학 전공
- 2001 ~ 2005 : 오사카대학교 기초공학부 공학박사 전자재료 전공
- 현재 : 신라대학교 에너지 응용화학과 교수

<관심분야>

나노전자 소재 및 조사 (Nano electronic materials and devices)

김 기 래 (Gi-Rae Kim) [종신회원]



- 1986년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 - 1988년 2월 : 서강대학교대학원 전자공학과 (공학석사)
 - 1987년 12월 ~ 1993년 3월 : 삼성전자종합연구소 선임연구원
 - 1993년 3월~1998년 2월: 마산대학교 정보통신공학과 교수
 - 1998년 2월 : 경남대학교대학원 전자공학과 (공학박사)
 - 1998년 3월~ 현재 : 신라대학교 전자공학과 교수
- 마이크로파 회로설계, 전자파 해석, 안테나, MMIC

<관심분야>