

# 결합 접지면 구조의 사각 분리형 링 공진기의 등가 653회로 모델링 해석

문승민\* · 김기래\*\* · 윤중환\*\* · 최영규\*\*

Equivalent Circuit Modeling Analysis of Square Split Ring Resonator with Defected Ground Structure

Seung-Min Mun\* · Gir-Re Kim\*\* · Joong-Han Yoon\*\* · Young-Kyo Choi\*\*

## 요 약

본 논문에서는 MMIC( Monolithic Microwave Integrated Circuit) 설계에 적용 가능한 결합 접지면 구조의 사각 분리형 링 공진기를 제안한다. 본 논문에서는 공진기의 등가회로 파라미터를 공진기의 측정된 특성 값으로부터 수식적으로 계산하는 방법을 나타내었다. 본 논문에서 제안하는 방법을 검증하기 위해 공진주파수가 2.95 GHz인 결합 접지면 구조의 사각 분리형 링 공진기를 제작하여 특성을 측정하고 그것을 본 논문의 방법대로 등가 파라미터를 계산하였다. 이 결과를 시뮬레이션한 결과와 비교하여 일치함을 보였다.

## ABSTRACT

In this paper, the Square Split Ring Resonator( SRR) of Defected Ground Structure( DGS), applicable to MMIC( Monolithic Microwave Integrated Circuit) design, is proposed. The mathematical method to solve the equivalent parameter of the resonator from the measured results of resonator is introduced in this paper. To verify the method, SRR-DGS resonator with 2.95 GHz center frequency is fabricated, for measuring characteristics and calculating the equivalent parameter. The result from this process is compared with the data of the ADS simulation, and as a result both were identical.

## 키워드

SRR-DGS Resonator, Oscillator, Microstrip Resonator, MMIC  
SRR-DGS 공진기, 발진기, 마이크로스트립 공진기, MMIC

## 1. 서 론

DGS는 접지면의 일정 부분이 식각된 구조인데, 여기서 전류 흐름이 방해를 받음으로써 등가적인 인덕턴스와 커패시턴스가 변하게 되어 전송선로의 특성이 변해진다. 전송속도가 느려지는 저속파 효과와 대역저지 특성을 나타낸다. Pendry[1]는 공진주파수 근처에

서 음의 투자율을 나타내는 SRR 배열구조를 발표하였다. SRR는 좌향 메타물질의 특성을 갖는 효과적인 매체로써 최근 수 년 동안 많은 관심을 이끌었다. 다양한 종류의 SRR 공진기들은 소형의 협대역 대역 통과 여파기와 듀플렉서의 설계에 적용되어져 왔다. 이것으로부터 음의 유전율을 갖는 매체는 공진 물질로 동작할 수 있음을 보여준다. 사각 형태의 SRR들은

\* 신라대학교 전자공학과(tmdalsz@naver.com)

\*\* 교신저자(corresponding author) : 신라대학교 전자공학과 교수(grkim, jhyoon, ykchoi@silla.ac.kr)

접수일자 : 2015. 05. 07

심사(수정)일자 : 2015. 06. 13

게재확정일자 : 2015. 06. 23

음의 메타물질의 개념을 기반으로 효과적인 저지대역 구조들을 만들기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조와 자계적으로 결합될 수 있다[2-3]. 본 논문에서는 MMIC에 부적합한 유전체 공진기의 단점과 낮은 Q값으로 인해 발진기의 위상잡음이 떨어지는 평면형 마이크로스트립 공진기의 단점을 보완할 수 있는 SRR-DGS 공진기에 대해 특성을 분석하였다. 공진기의 특성 결과를 바탕으로 등가회로를 추출하는 방법을 제시하고 이 결과를 발진기의 설계에 이용하고자한다.

## II. SRR-DGS 공진기 등가회로

SRR-DGS 구조는 평면형 전송선로의 접지면에 식각된 한 개 또는 몇 개의 결함을 갖는 구조이다[4-5]. SRR-DGS는 전송 선로의 유효 인덕턴스를 증가시켜 같은 폭의 마이크로스트립 전송선로보다 큰 임피던스를 갖는 특성을 발생하여 큰 특성 임피던스가 필요한 전송선로 구현의 경우 동일한 특성 임피던스를 갖는 기존의 전송선로와 비교하여 더 넓은 선폭을 제공함으로써 수동 부품의 동작 전력 특성을 개선시키는 효과를 기대할 수 있다[6]. 특히 일반적인 SRR-DGS는 구조적으로 칩 저항, 인덕터, 커패시터, 그리고 트랜지스터와 같은 외부 집중소자와의 결합이 용이한 구조적 특징을 갖는다. 그림 1은 제안된 SRR-DGS 구조를 나타내었다. 기판위에 마이크로스트립 선로가 있으며 기판 밑 부분에 SRR-DGS 패턴이 식각 되어 있는 구조이다.

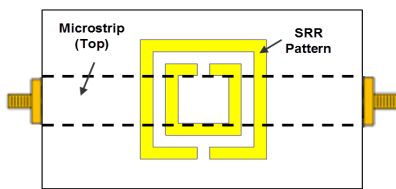


그림 1. 제안된 SRR-DGS 구조  
Fig. 1 Structure of SRR type resonator

그림 2는 DGS 공진기의 일반적인 전송 특성을 나타내며 SRR의 크기에 반비례하여 공진 주파수가 결정 된다. SRR-DGS공진기를 중심주파수 2.95 GHz에

서 공진하도록 설계하였고 설계된 DGS 공진기의 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타내었다. 설계된 구조는 유전율 2.2 유전체 두께 1.6mm, 금속 두께 0.018mm인 기판을 기준으로 HFSS를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 1의 제안된 SRR-DGS 공진기의 전송특성을 해석하기 위해서 그림 3과 같이 입력포트로부터 SRR-DGS의 중심점까지의 거리를  $L$  이라고 하고, 전송선로의 특성 임피던스는  $Z_0$  이다.

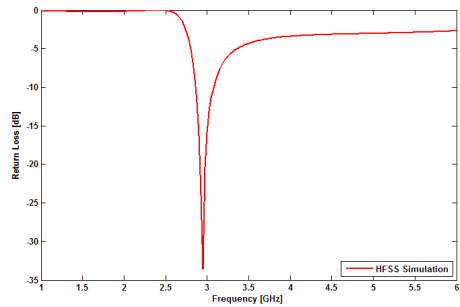


그림 2. DGS 공진기의 시뮬레이션 결과  
Fig. 2 Simulation result of DGS resonator

그림 3에 나타난 특성에서 알 수 있듯이 포트에서  $L$  만큼 떨어진 점은 마이크로스트립 선로가 개방되는 곳이어서 전류가 0이 되고 결과적으로 개방 상태가 된다. 이것을 등가회로로 나타낸다면 그림 4와 같이 된다.  $RLC$  병렬 공진기 특성을 나타내는 병렬공진 등가회로이다.

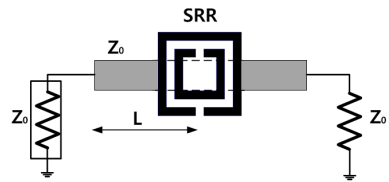


그림 3. SRR-DGS 공진기 회로  
Fig. 3 Circuit of ring type resonator

그림 3의 선로에서 들여다 본 임피던스를 고려하여 등가회로를 나타내면 그림 4와 같이 된다. 이때 공진 주파수는 변화가 없으나 공진주파수에서 삽입손실의 피크 값이 다르게 되는데 이것은 결합도로서 저항  $R$ 의 함수가 될 것이다.

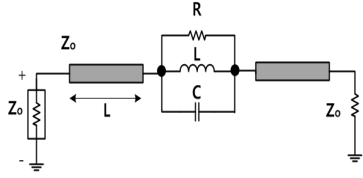
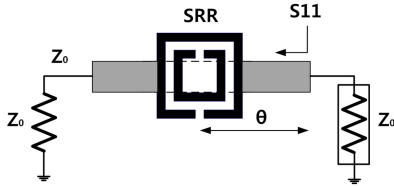


그림 4. SRR-DGS 공진기의 등가회로  
Fig. 4 Equivalent circuit of DGS resonator

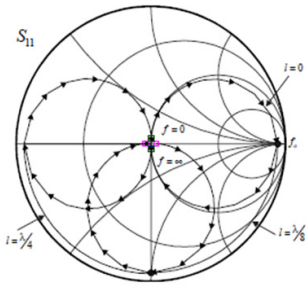
공진기의 공진주파수에서의 반사계수는  $\Gamma(w_0)$  이고, 공진주파수에서 선로의 길이가 전기각을  $\theta$ 라고 하면 이때의 반사계수  $\Gamma_{in}$ 는 식(1)과 같이 된다.

$$\Gamma_{in} = \Gamma(w_0) e^{-2j\theta} \quad (1)$$

입력 반사계수는 전송선 길이에 따라 시계방향으로  $2\theta$ 만큼 회전하게 될 것이다. 이때 근사적으로 강하게 결합된 것을 개방으로 보면 여기서는  $\Gamma(w_0) = 1$  이 되고, 이때 들여다 본 반사 계수는 길이  $\theta(L)$ 에서 개방된 것처럼 보이는 것으로 해석할 수 있다.



(a) 회로도 (Circuit)



(b) 입력 반사계수 (Input Reflection Coefficient)

그림 5. 선로길이에 따른 입력반사계수  
(a) 회로도 (b) 입력 반사계수

Fig. 5 Input reflection coefficient for line length  
(a) Circuit (b) Input reflection coefficient

### III. 공진기의 등가 파라미터 추출

그림 3의 회로에서 병렬공진회로의 임피던스를  $Z_p$ 라고 하면, 이때 포트 1에서 들여다본 반사계수는 식(2)와 같다.

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

병렬공진회로의 임피던스  $Z_p$ 는 식(3)과 같고, 공진주파수와 무부하 Q 값은 각각 식(4), (5)와 같다.

$$Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} \approx \frac{R}{1 + 2jQ_u \frac{\Delta\omega}{\omega_0}} \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (4)$$

$$Q_u = \omega_0 CR \quad (5)$$

여기서  $Q_u$ 는 유전체공진기 자체의 Q가 되며 이것을 유전체공진기의 무부하 Q라고 부른다.  $Z_p$ 를 식(2)에 대입하고 정리하면 반사 계수는 식(6)과 같다.

$$S_{11} = \frac{\beta}{1 + \beta + 2jQ_u(\Delta\omega/\omega_0)} e^{-2j\theta} \quad (6)$$

여기서,  $\beta = R/(2Z_0)$  이고  $Q_L = Q_u/(1 + \beta)$  이다.

식(6)에서  $|S_{11}|$ 에 대한 주파수 응답 특성을 그림으로 나타내면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

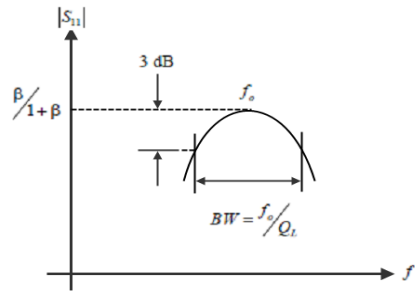


그림 6. 공진기 회로의 주파수 특성  
Fig. 6 Frequency response of resonator

반사계수  $|S_{11}|$  의 주파수 응답을 측정할 경우 최대 값을 주는 주파수가 바로 공진주파수  $f_0$ 가 되고, 이때의 값은  $\beta / (1 + \beta)$  되므로, 측정된 최대값으로부터  $\beta$  값을 알 수 있게 된다. 식(7)을 이용하여 R을 결정할 수 있게 된다. 3 dB 대역폭  $BW$ 를 그림 6과 같이 측정할 경우  $Q_L = f_0 / BW$  이므로  $Q_L$ 을 구할 수 있게 된다. 따라서  $Q_L = Q_u / (1 + \beta)$  이므로  $Q_u$ 를 결정할 수 있게 된다. 식(5)에 의해  $C$ 를 결정하게 되고, 식(4)에서  $L$ 을 결정할 수 있다.

IV. 실험 및 결과

앞 장에서 공진기의 특성을 측정하여 등가회로의 R, L, C 파라미터를 구하는 식을 유도하였다. 본 장에서는 앞에서 유도한 결과 식을 검증하기 위해 공진주파수 2.95 GHz의 공진기를 설계하여 특성을 측정하고 그 결과를 유도된 식에 적용하여 등가회로의 파라미터를 구하는 과정을 보이고자한다. 설계의 예로서 공진주파수가 2.95 GHz인 SRR-DGS 공진기를 설계하였다. 기판은 Teflon으로서 비유전율이 2.2, 유전체 두께가 1.5mm이며, 구조적 치수는 A=10mm, B=1mm, C=1mm, G=1mm, W=4mm, L=20mm 이다. 그림 7의 공진기 구조에 대해 전자파 구조해석 도구인 HFSS를 이용하여 산란계수 파라미터를 시뮬레이션 하여 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

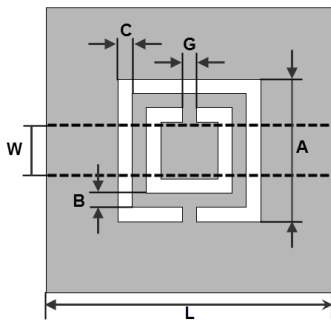


그림 7. 설계된 DGS 공진기  
Fig. 7 Designed ring type resonator

그림 8의 측정된 결과로부터 등가회로 파라미터를 구해보면 다음과 같다. 그림 8에서  $|S_{11}|$  의 최대값을

구하면 -0.036 dB 이다. 그림 5에서  $|S_{11}|$  의 최대값과  $\beta$ 와의 관계식은 식(7)과 같으므로  $\beta$  를 구하면 249 이다. 구한  $\beta=249$ 를 식(7)에 대입하면 등가회로의 R 파라미터를 구할 수 있다. 계산하면  $R = 24.9 \text{ k}\Omega$  이다.

$$\frac{\beta}{1 + \beta} = |S_{11}|_{\max} \tag{7}$$

$$\frac{\beta}{1 + \beta} = |S_{11}|_{\max} = 10^{-0.036/20} = 0.996 \tag{8}$$

그리고 대역폭(BW)이 250 MHz 이고, 공진주파수  $f_0 = 2.9 \text{ GHz}$ 이므로 식(6)을 이용하여  $Q_L = 11.6$  이 되고,  $Q_u = 2900$  이다. 식(5)를 이용하면 등가회로의  $C = 6.392 \text{ pF}$ 이고, 인덕턴스 L은  $471.2 \text{ pH}$  가 된다.

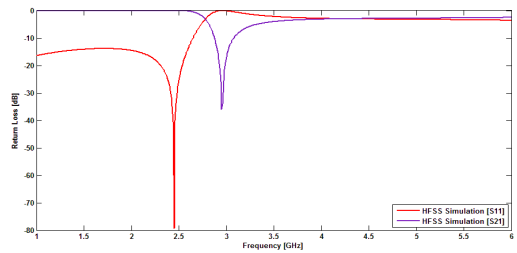


그림 8. 공진기의 시뮬레이션 결과  
Fig. 8 Simulation result of resonator

위에서 구한 등가회로의 파라미터를 고주파 회로 시뮬레이션 도구인 ADS를 이용하여 특성을 검증하였다. 그림 9는 구해진 등가회로 나타내며 이 회로를 ADS 시뮬레이션한 결과를 그림 10에 나타내었다.

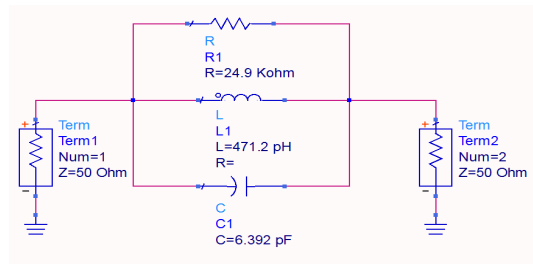


그림 9. 공진기의 등가회로  
Fig. 9 ADS circuit of resonator

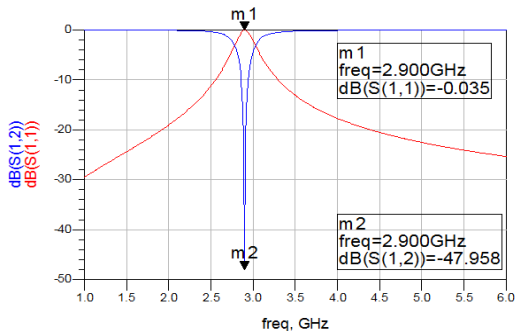


그림 10. ADS 시뮬레이션 결과  
Fig. 10 Simulation result of ADS

그림 10에 나타낸 바와 같이 ADS에 의한 검증 결과가 공진 주파수가 2.9GHz 이고 S21의 삽입손실이 -47.958dB 로서 그림 8의 HFSS 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다. 그림 7과 같은 DGS 공진기의 구조에 대해 HFSS에 의한 구조 시뮬레이션 결과와 구해진 등가회로에 대해 ADS를 이용하여 회로 시뮬레이션한 결과를 그림 11에 비교하여 나타내었다. 그림 12는 제작한 DGS 공진기의 사진이며 그림 13에는 네트워크 분석기를 이용하여 측정한 결과와 HFSS를 이용한 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타내었다.

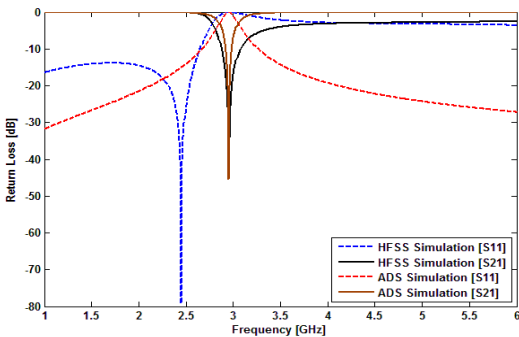
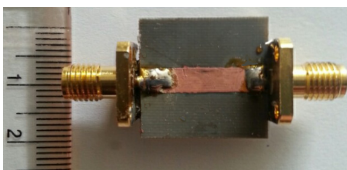
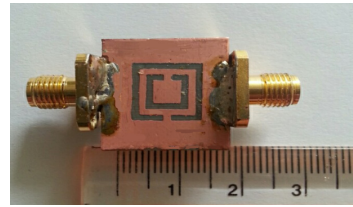


그림 11. 구조적 해석과 회로적 해석 결과의 비교  
Fig. 11 Comparison of simulation results



(a) 윗면(Top)



(b) 밑면(Bottom)

그림 12. DGS 공진기 사진 (a) 윗면 (b) 밑면  
Fig. 12 Photo of DGS resonator (a) Top (b) Bottom

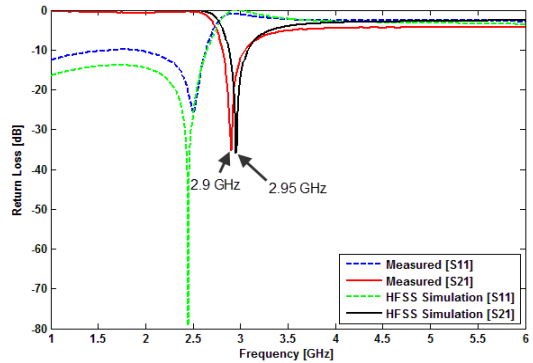


그림 13. 측정결과와 시뮬레이션 결과의 비교  
Fig. 13 Comparison of simulation and measured results

제작된 SRR-DGS는 회로망 분석기(Network Analyzer, Anritsu MS4623B)를 이용하여 반사손실을 측정하였다. 그림 13은 제안된 필터에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 제작 후 측정된 결과를 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 약간의 오차가 있으나 두 값이 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 이러한 오차는 제작상의 오류라기보다는 기판의 유전율 오차와 시뮬레이션 상에 존재하지 않는 입력포트에 의한 영향 때문인 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 초고주파용 평면형 공진기로서 SRR-DGS 공진기를 제안하고 이것의 특성을 측정하여 공진기의 등가회로를 구하는 식을 나타내었다. 결과를 검증하기 위해 공진주파수가 2.95 GHz인

SRR-DGS 공진기를 제작하여 측정된 결과를 바탕으로 등가회로의 파라미터를 구하였다. 구한 등가파라미터 결과를 검증하기 위해 ADS와 HFSS 도구를 이용하여 시뮬레이션하여 제작된 결과와 비교하여 일치함을 보였다. 본 논문에서 나타낸 등가회로 파라미터를 구하는 방법은 여러 종류의 공진기를 이용한 발전기 설계에 적용할 수 있을 것이다.

### References

- [1] I. Gil, J. Bonache, J. G. Garcia, and F. Martin, "Tunable Metamaterial Transmission Lines Based on Varactor-Loaded Split-Ring Resonators," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 6, June. 2006. pp.225-228
- [2] F. Falcone, T. Lopetegui, J. D. Baena, R. Margues, F. Martin, and M. Sorolla, "Effective Negative- Stopband Microstrip Lines Based on Complementary Split Ring Resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 6, June 2004. pp.280-282
- [3] T. Xie, G. Kim, and Y. Choi, "A Study on the Novel Rectangular Split Ring Notch Resonators," *Int. J. of Information and Communication Engineering*, vol. 8, no. 4, 2010, pp. 365-369.
- [4] G. Kim, "Design of Coupled Resonators Bandpass Filter With Defected Ground Structure," *Int. J. of Information and Communication Engineering*, vol. 9, no. 2, 2011, pp. 150-154.
- [5] Y. Yoon, *RF active circuit design theory and practical*. Seoul: Hongriling publishing company, 2005, pp. 74-95.
- [6] Y. Han, "Interference Cancellation System in Repeater using Adaptive algorithm with step size," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 5, 2014, pp. 549-554

### 저자 소개



#### 문승민(Seung-Min Mun)

2014년 신라대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
2014년 신라대학교 대학원 전자공학과 재학(공학석사)

※ 관심분야 : RF Circuit, Antenna, filter RF System



#### 김기래(Girae Kim)

신라대학교 전자공학과 교수  
논문 제9권 11호 참조

※ 관심분야 : 초고주파 회로 설계, MMIC, 전파 해석 및 모델링



#### 윤중환(Joong-Han Yoon)

신라대학교 전자공학과 교수  
논문 제 7권 3호 참조

※ 관심분야 : RF & Antenna, RFID, Radar



#### 최영규(Young-kyu Choi)

신라대학교 전자공학과 교수  
논문 제 10권 4호 참조

※ 관심분야 : 초고주파, MMIC, 광통신, 광센서