

# 메타 인공 물질을 이용한 새로운 Split-Ring 공진기 및 대역통과 필터

## New Split Ring Resonator and Band-pass Filter Using Meta-Material

윤 기 철\*  
(Ki-Cheol Yoon)

이 종 철\*\*  
(Jong-Chul Lee)

### 요 약

본 논문에서는 메타 인공 물질을 이용한 스플릿 링 공진기를 새롭게 제안하여 2단 필터를 설계 하였다. 제안된 필터는 새로운 공진기의 크기를 자유롭게 조절할 수가 있고, 탭-선로의 위치를 이용하여 대역폭을 쉽게 조절할 수가 있다. 제안된 공진기 및 필터는 군사용 위성통신 대역인 I-밴드의 10 GHz 중심 주파수에서, 공진기의  $Q_e$ 값은 184이며, 필터의 대역폭은 10 %이고, 삽입손실 및 반사손실은 각각 1.43 dB 와 16.8 dB의 값을 얻었다.

### Abstract

In this paper, a new split ring resonator using left-handed meta-material adapted in a bandpass filter with 2-stages is suggested. In this proposed bandpass filter, the size of the novel resonator can be easily controlled. Also, the bandwidth can be adjusted with the position of the tapped-line. The proposed resonator and filter has the center frequency of 10 GHz for I-band in military-satellite communication system with the  $Q_e$  value of 184. The experimental results of the filter show that the insertion and return losses are 1.43 dB and 16.8 dB with bandwidth of 10 %, respectively.

**Key words:** Bandpass filter; tapped-line, MT-SRR, left handed meta-material, high quality factor

## I. 서 론

위성통신 시스템 및 통신망 사용량이 급증하면서 위성통신 대역(Band)망은 여러 망으로 분류되는 추세이다. 그 중에서 군사용 위성통신 대역은 대표적으로 J(10~20GHz)와 I(8~10 GHz) 대역 [1]으로 구분되는데 이 모든 대역은 레이더와 위성 항법 장치, 항공 및 미사일 유도, 각종 무기 통제를 위한 송수신기의 목적으로 사용되고 있다 [2]. 이러한 대역망은 주

로 미국, 일본, 프랑스, 네덜란드, 대한민국 등과 같은 몇 나라의 공군 및 해군과 같은 정규군들이 사용하고 있고, 이와 같은 군사용 위성통신 (I-밴드) 망에 사용되고 있는 통신 시스템의 내부에는 신호 처리를 하기 위한 많은 부품들이 내장되어 있다. 그 중에서 원하는 신호는 통과시켜 주고 불요파(spurious)는 억압시켜주는 대역통과 필터 및 공진기는 시스템에서 중요한 핵심 역할을 하고 있다. 필터의 경우는 몇 개의 공진기들로 연결되어 있어서 필터를 구성하는 공

\* 주저자 : 광운대학교 전자공학과 박사학위 과정  
\*\* 공저자 및 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 교수  
† 논문접수일 : 2010년 3월 22일  
† 논문심사일 : 2010년 5월 26일(1차), 2010년 8월 5일(2차)  
† 게재확정일 : 2010년 8월 10일

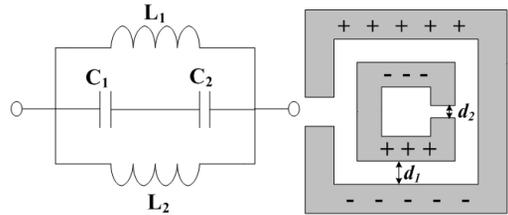
진기들은 초 광대역(UWB)이 아닌 이상, 주파수 선택도(Qe: External Quality Factor)가 우수해야 한다. 저주파에서 사용되는 필터 및 공진기의 경우는 집중정수 소자(lumped element)를 사용하겠지만 초고주파 공학에서 다루는 공진기는 주로 분포 정수 소자(distributed element)를 사용하여 헤어핀(hair-pin)과 같은 평면(planar) 구조를 갖는 공진기를 많이 사용하게 되는데, 이는 유전체 혹은 도파관으로 구성된 공진기들 보다는 비교적 Qe값이 낮은 편이다 [2]. 그러나 시스템에 집적화하기 위해서는 평면 구조로 구성된 공진기를 사용해야 하는 것이 해결 수단이다. 그러므로 평면 구조로 구성된 공진기는 주파수 선택 품질을 좌우하는 Qe값을 높이기 위해 많은 연구들이 시도되고 있다 [3, 4].

참고문헌 [3, 4]의 경우는 헤어핀 구조보다 Qe값이 높지만 단점으로는 공진기의 크기가 주파수에 결정되어 있어 크기 조절이 제한받고 있다.

이와 같은 점을 해결하기 위해서는 평면 구조로 구성 되면서 부품의 크기를 주파수에 상관없이 자유롭게 조절 할 수가 있고, Qe값을 높일 수도 있으며, 시스템에 적용이 가능한 메타인공 물질(Metamaterial)을 소개 하고 있다 [5].

메타 인공물질은 자연계인 전자기학에 존재하지 않는 전자기적 특성을 갖도록 만든 인공 물질로서 전자기학에서 해결치 못하는 것을 인공적으로 해결 할 수 있도록 연구하는 학문이다.

메타인공물질을 RF공학 분야에서는 흔히 왼손물질(LHM: Left-Handed Material)이라 일컫기도 한다. 메타 인공 물질의 역사를 살펴보면 1968년에 Veselogo가 투자율과 유전율이 음의 정수를 갖고 전자기적으로 동작이 가능하도록 인공적으로 물질을 구현할 수 있는 방법을 제시하면서 이를 메타인공물질 혹은 왼손물질이라 명칭을 정하면서 최초로 연구를 시도하였다 [6]. 이러한 메타 인공물질 혹은 왼손물질의 효과를 얻기 위해서는 음의 정수를 갖는 유전율과 투자율의 특성을 지닌 물질을 인공적으로 구현한 후 이 물질을 삽입을 하게 된다. 메타 인공 물질을 이용하게 되면 공진기 등을 설계 할 수가 있게 되는데, 이 공진기의 경우는 공진 주파수 범위 내



<그림 1> 일반적인 사각 형태의 SRR의 등가회로 및 구조

<Fig. 1> Equivalent circuit and general square structure of a SRR

에서 투자율이 음의 정수(음의 투자율)를 갖도록 동작하게 된다. 이렇게 동작되는 공진기는 Qe값이 우수하다는 장점을 갖는다. 대표적으로는 원형 혹은 사각 개방 루프를 이용한 나선형 공진기(SR:Spiral Resonator)와 SRR (Split Ring Resonator)의 형태를 지닌 공진기가 제시되었는데 [7], 1999년 영국의 Pendry 교수가 SRR이 음의 투자율 값을 가질 수 있음을 최초로 증명한 후, SRR에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다 [8-12].

SRR의 동작 여부는, <그림 1>과 같이 두 사각 개방 루프에서 외부의 시변자계(time varying magnetic field)가 가해지면, 두 사각 개방 루프(loop)에 전류가 유기 되는데, 유기된 전류는 두 사각 개방 루프에 의해 인덕턴스(Inductance)가 발생하게 되고, 루프 사이에는 유기된 전류에 의하여 전압 분포가 <그림 1>과 같이 되며, 안쪽과 바깥쪽의 사각 개방 루프 사이에는 캐패시턴스(Capacitance)  $d_1$  이 발생하게 된다. 또한 루프의 끝단에 위치한 개방 루프 부분에는 캐패시턴스  $d_2$  가 발생되므로 총 캐패시턴스는 루프 사이의 캐패시턴스  $d_1$  과 끝단의 개방구조에 대한 캐패시턴스  $d_2$  의 합으로 등가회로와 같이 직렬로 연결되어 있다고 가정 할 수 가 있다. SRR의 등가회로는 LC공진 회로와 같으므로 공진 주파수는 식 (1)과 같게 된다 [13].

$$w_o = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1}$$

여기서 C는 루프 사이의 단위 길이 당 캐패시턴스  $d_1$  이고, L은 SRR의 두 사각 개방 루프에서 발생

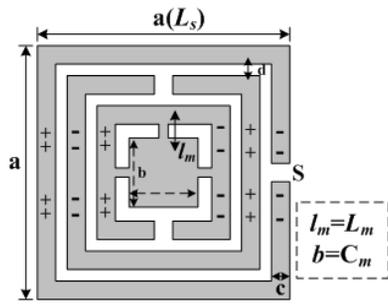
하는 총 인덕턴스이다. 또한, 메타 인공물질에서 물질의 투자율을 조절하기 위해서는 루프 모양의 물질을 삽입하게 되어 어느 특정 주파수 근처에서 공진하게 된다. 메타 인공물질을 갖는 SRR은 기본적으로 대역통과 필터와 듀플렉서(Duplexer)의 설계 및 응용이 가능하다 [14]. 장점으로는 경제적이면서 공진 및 필터 특성이 우수하고 제작이 용이하며 낮은 방사 손실과 주파수 선택도가 높다 [5]. 이와 같은 장점들을 활용하게 된다면 무선통신 시스템에 적용 시 매우 우수한 특성을 갖게 된다 [15, 16].

본 논문에서는 위에서 언급한 메타 인공물질을 갖는 SRR을 이용하여 기존의 SRR보다  $Qe$ 값이 더 높은 새로운 SRR을 제안한다. 새롭게 제안한 SRR의 특징은 공진 주파수가 고정된 상태에서 크기를 조절할 수 있고  $Qe$ 값이 높으며, 경제적이고 제작이 용이하면서 동시에 2단 필터로도 응용이 가능하도록 설계를 하였다. 제안된 SRR은 3단의 다중(Multiple)구조를 갖는 MT-SRR (Multiple Tri section-SRR)로서, 다중 구조로 인한 높은 커플링으로 높은  $Qe$ 값 특성을 얻게 된다. 또한 구조적인 특성 때문에 중심 주파수를 기준으로 하여 공진기의 크기를 임의적으로 조절할 수 있다는 장점을 갖게 된다. 제안된 공진기 및 필터는 해군 및 공군에서 사용되는 군사용 위성통신망의 I-밴드 대역으로 메타 인공 물질의 새로운 등가 MT-SRR을 이용한 2단 대역통과 필터로써 통신망에 응용이 가능하도록 구현을 하였으며, 필터로 응용하기 위해 공진기의 연결 부분에 어드미턴스 인버터(J-Inverter)를 적용하였고, 입출력 부분에 탭-선로(tapped-line)를 적용하여 탭-선로의 위치를 변화시킬 때 마다 필터의 대역폭을 조정할 수 있도록 유도하였다.

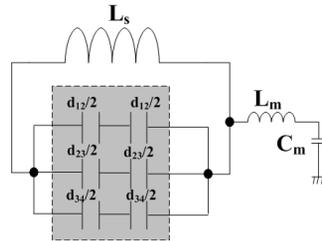
## II. 높은 $Qe$ 값을 갖는 새로운 스플릿 링 공진기

### 1. 새로운 스플릿 링 공진기의 이론 및 실험결과

제안된 MT-SRR은 일반적인 SRR보다 공진 특성이 더 우수하다. MT-SRR의 우수한 공진 특성을 구



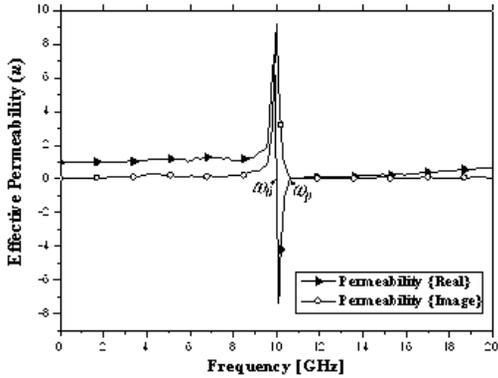
(a) MT-SRR의 구조  
(a) Structure of an MT-SRR



(b) MT-SRR의 등가회로  
(b) Equivalent circuit of the MT-SRR

<그림 2> 제안된 MT-SRR  
<Fig. 2> The proposed MT-SRR

현하기 위하여 <그림 2> (a)와 같이 다중 형태로 구성 하였다. 뿐만 아니라 공진기 전체 크기의 변화에도 공진 주파수는 변하지 않고 정 위치에서 고정 가능하도록 중앙에 인덕턴스  $L_m$ 이 발생하는 작은 길이  $l_m$  과 중앙의 패드와 접지면 사이에서 상호 커패시턴스  $C_m$ 이 발생하는 작은 면적  $b$ 를 추가하였다. <그림 2> (b)는 MT-SRR에 대한 등가회로로써, 루프의 전체 길이에 대한 높은 임피던스(impedance)를 갖는 총 인덕턴스  $L_s$ 와 낮은 임피던스를 갖는 루프 사이의 커플링  $d$ , 루프 끝단에 개방된 커플링  $s$ 들의 커패시턴스 합  $do$ 로, 이는  $L$ 과  $C$  ( $do$ )가 서로 평행하게 구성되어 공진하고 있다는 점을 알 수 있다. 여기서  $do$ 는  $do, n+1/2$ 의 합을 의미한다. MT-SRR의 물리적인 구성은 다음과 같다.  $N$ 개를 갖는 루프에서 개방된 구조의 끝 부분  $s$ 가 서로 반대의 면을 연속적으로 번갈아 갖는 형태로 구성됨으로써, 인접한 사각 형태의 루프 사이  $d$ 에서 발생하는  $N-1$ 개의 분산 캐

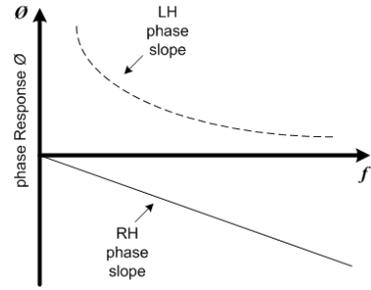


<그림 3> MT-SRR의 음의 투자율  
<Fig. 3> The negative permeability of the MT-SRR

패시턴스가 고려된다. 최외각과 최내각 사이의 선로들에 대한 분산 캐패시턴스를 각각  $d_1, d_2, d_3, d_4$  등 각각 기호로 부여 하였다. MT-SRR의 물리적인 동작은 다음과 같다. 최초, MT-SRR에 시변자계가 인가되면 사각형태의 루프 선로에 전류가 흐르면서 발생하는 인덕턴스와 선로 사이에서 발생하는 전압 분포의 커패시턴스가 균형을 이루기 때문에  $\omega_0 < \omega < \omega_{mp}$ 에서  $\mu_{eff}$ (유효투자율)은 공진하는 형태가 되고 자계의 에너지는 루프의 인덕턴스에 저장되면서 식 (2)와 같이 음의 투자율  $\mu_{eff}$ 로 조건을 만족하게 되어 왼손물질로 동작하게 된다 [13].

$$\mu_{eff(\omega)} = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2} \quad (2)$$

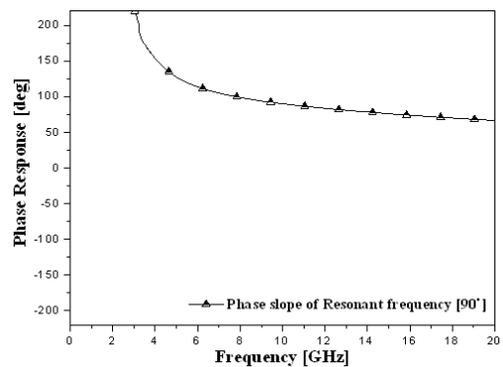
여기서,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ 가 된다. 또한  $\omega_0$  는 공진 주파수를 의미하고  $\omega_{mp}$  는 자기 플라즈마 주파수를 의미하며, 여기서 자기 플라즈마 주파수의 의미는 <그림 3>과 보는 바와 같이  $\omega_0$ 에서  $\omega_{mp}$  사이의 주파수 영역을 뜻 하며, 이는 주파수 영역에 해당되는 투자율이 zero가 되어 음의 굴절 현상을 갖는다는 뜻을 의미 한다. 또한  $\omega_0$ 와  $\omega_{mp}$ 사이를 결정하는 것은 루프 내부의 크기이므로 SRR의 크기로도 유효 투자율이 음수가 되도록 구현을 할 수가 있다 [17]. 그러므로 음의 투자율은 진행파의 방향을 반대로도 조정이 가능하다. 그렇기 때문에 MT-SRR은 공진 주파수에서 위상응답 특성이 이론 과 마찬가지로



<그림 4> 주파수에 따른 위상 변화  
<Fig. 4> Phase deviation of frequency

실질적으로 만족해야 하는데 <그림 4>와 같이 일반적인 오른손 물질(RH:Right Handed)을 갖는 구조물은  $-90^\circ$ 의 위상 응답을 갖고 위상변화가 선형적으로 동작하는 데에 반해, 왼손물질로 동작하는 구조물은 비선형적인 기울기의 위상응답을 갖고 동작하게 되므로 이와 같은 왼손 물질의 특성을 갖고 동작하는 구조물의 동작 여부에 대해 증명하기 위하여 <그림 3>과 <그림 5>와 같은 실험 결과를 제시 하였다. <그림 3>과 <그림 5>는 <그림 2>에서 제안한 MT-SRR의 설계에 필요한 전체의 주파수 영역에서 음의 투자율의 실수(Real)와 허수(Imaginary) 및 왼손물질의 위상 응답 특성에 관한 실험결과를 증명하기 위해 제시를 하였다.

<그림 3>은 공진기에서 외부 자기장의 주파수가

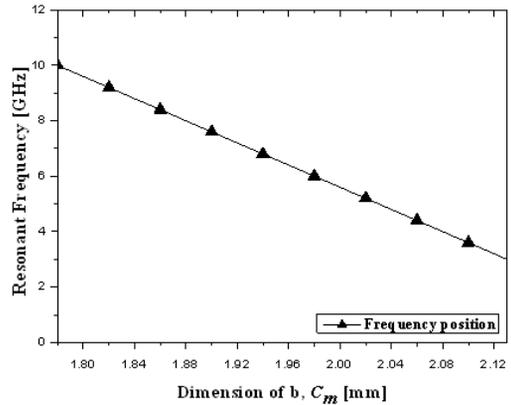


<그림 5> MT-SRR을 위한 주파수에 따른 위상 기울기 응답에 관한 실험결과  
<Fig. 5> Experimental results for the MT-SRR of phase response as a function of frequency

발생하게 되고, 주파수가 증가하게 되면 공진 주파수 범위에 도달하게 되어 투자율은 양의 값으로 발산하게 된다. 주파수는 그 후로 지속적인 증가로 인하여 공진 주파수는 어느 순간에 해당 범위를 초과하게 되고, 순간적으로 부호가 음의 값으로 바뀌어 발산하게 된다. 그 이후 투자율의 절대 값은 줄어들다가 zero가 된 다음, 양의 값으로 발산하게 되어 음의 투자율로 동작하게 된다 [18]. 즉, 투자율의 절대 값인 양의 정수 와 음의 정수 사이의 중간 부분인 zero지점 부터 주파수가 상승하면서 다음의 zero지점까지의 범위가 바로 왼손물질로 동작함을 실험 과정을 통해 알 수가 있다. <그림 5>는 왼손물질의 위상 특성을 나타내도록 설계를 했는데, 공진 주파수에서 비선형 기울기의 위상 응답을 갖는 실험 결과를 보여주고 있다. 이는 왼손물질로 동작하는 것을 확인할 수가 있다.

MT-SRR의 특수한 기능은 공진기의 크기가 주파수의 파장에 맞게 결정되는 것이 아니라 크기를 임의로 정밀하게 조정할 수 있다는 점이다.

<그림 2> (a)와 같이 공진기의 크기  $a$ 와 공진기의 내부 중앙의 패드 면적  $b$ 를 동시에 줄이면, 공진기 내부의 길이  $lm$ 은 증가하면서 중심 주파수  $f_0$ 가 고정된다. 즉, 공진기의 크기  $a$ 를 줄이게 되면 공진 주파수  $f_0$ 는 상승하게 된다. 이때, 공진 주파수  $f_0$ 는 원래의 위치에서 벗어나므로 면적  $b$ 를 줄일 필요가 있고  $b$ 를 줄임으로써 길이  $lm$ 은 증가하게 되어 길이로 인하여 공진 주파수  $f_0$ 는 낮아지면서 원래의 위치로 되돌아오게 된다. 즉, 공진기의 크기  $a$  및 내부의 면적  $b$ 는 주파수와 반비례하고 내부의 길이  $lm$ 은 비례 한다. 이러한 실험과정을 <그림 6>과 같이 제시를 하였다.

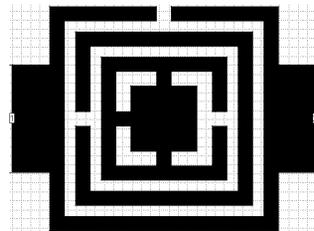


<그림 6> 넓이  $C_m$ 에 따른 주파수의 변화  
 <Fig. 6> Variation of frequency as a function of dimension,  $C_m$

2. 제안된 MT-SRR 설계 및 공진 실험결과

새롭게 제안한 MT-SRR을 설계하기 위하여 수치 해석 및 실험의 필요성을 위해 IE3D tools을 이용하였고 <그림 7>과 같이 도면을 제시한다. 설계된 MT-SRR은 유전율 2.54, 기판 높이 0.54 mm, 도체의 두께 0.18 mm의 값을 갖는 테프론(Teflon) 기판을 사용하였다. 또한 음화필름을 적용하는 wet-etching의 방식을 채택하여 제작을 한 후, 측정 결과를 얻어내었다. <그림 8>은 설계 및 제작된 새로운 MT-

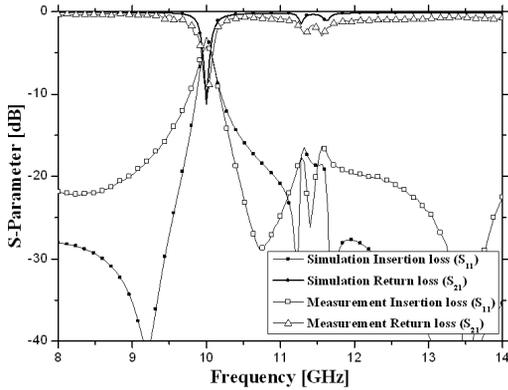
SRR의 시뮬레이션 및 측정 결과 이다. 실험결과로부터 공진 주파수는 10 GHz이고,  $Q_e$ 값은 시뮬레이션 결과에서 216, 그리고 측정결과에서는 184와 같



<그림 7> 메타 인공 물질인 왼손 물질을 갖는 제안된 MT-SRR의 구조  
 <Fig. 7> Structure of the proposed MT-SRR with left-handed meta-material

<표 1> MT-SRR과 SIR 및 SRR의  $Q_e$  값  
 <Table 1> Unloaded Quality factor of the MT-SRR and SIR with SRR

ref [#]	$f_0$ [GHz]	$Q_u$
This paper	10	184
[21]	10.8	128
[22]	10.66	165
	10.7	170
	10.82	180



<그림 8> 제안된 MT-SRR의 시뮬레이션 및 측정 결과  
<Fig. 8> Simulation and measurement results of the proposed MT-SRR

은 비교적 높은 값을 얻게 되었다. 측정을 위하여 Agilent사의 8510 C 벡터 회로망 분석기(Vector Network Analyzer)를 사용하였고,  $Q_e$ (Unloaded Quality Factor)값을 계산하기 위해 식 (3)을 사용하여 중심 주파수로부터 3 dB 떨어진 위치의 주파수 ( $\Delta\omega$ )들을 각각 선택하여 계산을 하였다.

$$Q_u = \frac{\omega_o}{\Delta\omega} \quad (3)$$

여기서 참고적으로 고려해야 할 내용은 MT-SRR 은 루프들이 다중형으로 구성되어 있어서  $Q_e$  값은 높겠지만, 만일 루프의 수  $N$ 이 어느 필요 이상으로 증가하게 된다면 내부 루프와 관련되는 분산 캐패시턴스의 영향은 점진적으로 작아지므로, 루프의 수를 계속 늘린다 하더라도  $Q_e$ 값은 증가되지 않고 오히려 공진기 크기만 증가되므로 공진기의 크기 등을 함께 고려하여 루프의 수  $N$ 을 어느 정도 절충하여 적절하게 선택한 후 구성하는 것이 바람직하다 [19]. 만일  $N$ 값을 적절히 구성하게 된다면 캐패시턴스의 증가로 인하여 일반적인 SRR보다 더 높은 결합계수를 갖게 되어, 개방 갭  $s$ 를 갖는 부분에서는 최대의 전계 강도를 갖기 때문에 또한 각각의 개방 루프 구조들이 기존의 원형 형태를 갖는 SRR [20]과는 달리, 사각 형태의 다중 SRR의 형태로 설계된다면, 루프의 길이가 원형의 루프보다 더욱 길어지므로  $L$ 과  $C$  값

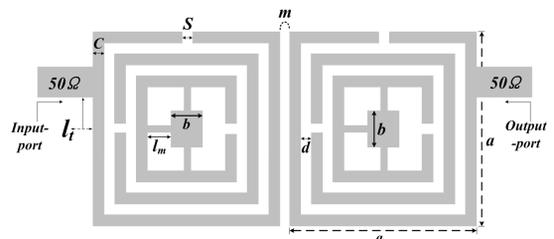
의 증가로 인해 전자계의 특성이 더욱 강하게 증가되어 결국 공진특성에서  $Q_u$ 값이 높게 된다 [20]. 그러므로 <표 1>에서는 MT-SRR과 기존의 논문에서 발표되었던 SIR (Stepped Impedance Resonator)과 SRR을 함께 비교한  $Q_u$ 값에 대해 제시를 한다.

### III. MT-SRR을 이용한 대역통과 필터

#### 1. T-SRR의 결합과정 및 필터의 설계

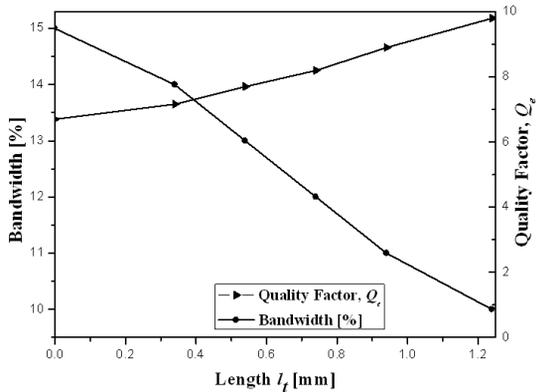
본 논문은 <그림 9>와 같이 왼손 물질의 메타 인공물질을 이용한 새로운 형태의 MT-SRR을 이용하여 2단의 대역통과 필터를 설계하였다. 제안된 대역통과 필터의 구조는 두개의 MT-SRR과 공진기 사이의 연결을 위한 J-인버터로 해석되는 갭(gap) 커플링으로 구성되어 있다 [23].

MT-SRR을 이용한 대역통과 필터는 커플링 구조에서 대역폭을 조절할 수 있겠지만 만일 대역폭을 약간 좁은 대역으로 구현하게 된다면 커플링 값이 상당히 커져서 갭의 거리  $m$ 이 좁아지게 되어 필터의 구현이 어려워지게 된다는 단점이 생긴다. 그러므로 본 대역통과 필터는 탭-선로  $l$ 의 위치를 조절하여  $Q_e$ 값의 변화에 따른 대역폭을 임의로 조절할 수 있도록 구현을 하였다. 이러한 방법은 높은 커플링 효과를 얻기 위해 사용하는 탭-선로의 설계 방법과 유사한데, 일반적으로 interdigital, combline, hairpin등의 구조를 사용한 대역통과 필터는 탭-선로를 이용하여 첫 번째 인버터의 높은 커플링 값을 구현하게 된다 [24]. 이러한 탭-선로는 탭-선로의 위치에 따른  $Q_e$ 값



<그림 9> 새로운 형태의 MT-SRR을 이용한 대역통과 필터의 구조

<Fig. 9> Structure of a bandpass filter using a new MT-SRR



<그림 10>  $l_t$ 의 변화에 따른  $Q_e$ 값과 대역폭의 변화  
 <Fig. 10> Variation of  $Q_e$  and bandwidth as a function of length,  $l_t$

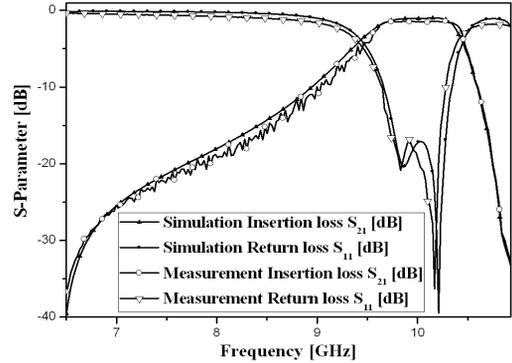
을 수치(EM) 해석을 통해 얻음으로써 설계하게 되는데, 이와 유사하게 공진기에서는  $Q_e$ 값을 결정하여 필요에 따라 협대역의 대역통과 필터를 설계할 수가 있다. 이론적으로  $Q_e$ 값은 대역폭에 대한 함수로써 다음 식 (4)와 같이 주어진다 [24].

$$Q_e = \frac{g_o g_1}{\Delta} = \frac{g_n g_{n+1}}{\Delta} \quad (4)$$

여기서,  $Q_e$ 값은 대역폭  $\Delta$ 와 반비례하므로,  $Q_e$ 값이 높아지면 대역폭  $\Delta$ 는 좁아진다. <그림 10>은  $Q_e$ 를 실험한 설계 결과이다. MT-SRR의 첫째 단과 마지막 단의 위치에서 탭-선로의  $l_t$ 가 변화할 때 마다  $Q_e$ 값도 변하게 되고 변화하는  $Q_e$ 값에 따라 대역폭도 함께 변화하게 되는 특성을 실험결과로 보여주고 있다. <그림 10>으로부터 대역폭은 최소 10 %부터 최대 15 %까지의 변화 범위를 갖게 된다.

<표 2> 제안된 대역통과 필터의 실험 결과  
 <Table 2> Experimental results of the proposed band-pass filter

중심 주파수[GHz]	10	
대역폭 [%]	10	
손실 [dB]	시뮬레이션	측정결과
삽입손실 $S_{21}$	1.05	1.43
반사손실 $S_{11}$	17.1	16.8



<그림 11> 제안된 대역통과 필터의 시뮬레이션 및 측정결과 (대역폭 :10%)  
 <Fig. 11> Simulation and measurement results of the proposed bandpass filter (bandwidth: 10%)

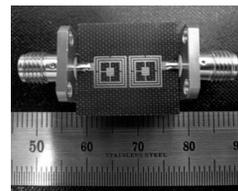
## 2. 대역통과 필터의 제작 및 실험 결과

<그림 11> 은 본 논문에서 제안한 메타인공물질을 적용한 MT-SRR의 2단 대역통과 필터에 대한 시뮬레이션 및 측정결과를 보여주고 있다. 또한 <그림 12>은 제작된 필터의 사진을 보여주고 있다. 필터의 실험결과 값은 <표 2>에 요약을 하였다.

## IV. 비교 및 고찰

제안한 대역통과 필터는 원순물질인 메타 인공 물질을 사용하여 공진기의 크기를 임의로 조절 할 수가 있고,  $Q$ 값도 증가시킬 수가 있다.

본 논문에서 제안한 공진기와 필터는 연구실 제작 할 수 있는 환경 범위 내에서 적절한 크기를 갖도록 설계를 하였고, 일반적으로 공진주파수에 따라 결정



<그림 12> 제안된 대역통과 필터 사진  
 <Fig. 12> Photograph of the proposed bandpass filter

되는 공진기의 크기와는 달리, 공진 주파수와 관계 없이 공진기의 크기에 대한 미세 조정과 탭-선로의 위치를 이용하여 대역폭을 쉽게 조절할 수가 있다. 장점으로서는 다른 필터와 비교했을 때, 비아(Via)를 사용할 필요가 없는 관계로 설계 및 제작 시 번거로움을 해결할 수 있다. 또한 비아와 집중정수 소자를 사용하지 않았기 때문에 부품에 대한 단가를 효율적으로 줄일 수가 있었다.

<표 1>에서 MT-SRR은 [21, 22] 보다 성능(Q)이 더 우수하다. 참고문헌 [21, 22]의 경우는 메타 인공물질과는 밀접한 관계로 보기 어려우므로 공진기의 성능 개선을 위한 방법은 여러 기술이 있겠지만 그 중에서 대표적으로 SIR을 이용하는 방법이 있고 SRR로 구성을 하여 향상 시키는 방법도 있다.

그렇지만 [22]은 단지 SRR의 형태일 뿐, 메타 인공 물질의 특성을 증명할 만한 분산도와 음의 공진 특성은 보이지 않고 있다. 그러나 [21, 22]을 비교한 이유는 일반적인 메타 인공물질을 이용한 공진기와 발전기, 필터 등은 주로 고주파(VHF) 혹은 극 초고주파(UHF) 및 L/C 밴드 대역에서 많은 결과들이 제시되어 왔다.

제안한 MT-SRR의 경우는 X-밴드(I-밴드) 대역에서의 결과이므로 유사 주파수 대역에서의 비교 논문들은 부족한 실정이다. 그러므로 본 공진기의 성능 비교를 하기 위해서 SRR과 밀접한 관계를 갖는 공진기와 일반적인 공진기를 함께 제시한 것이다. 뿐만 아니라 필터의 경우는 크기를 줄이는데 있어 고 유전율을 갖는 기판을 사용하여 단가 면에서 단점이 있으며, 반사손실도 우수하지 않다.

만일 고 유전율을 사용하게 된다면 크기는 줄일 수 있겠지만 단가 면에서는 비경제적일 수 있다 [25]. X-밴드 영역에서 메타 물질의 기술을 접목 시킨 도파관(Meta-waveguide) 구조의 필터 [26]도 논문으로 제시된 사례가 있는데, 이 필터의 경우는 무게와 크기, 회로들과 집적화 하는데 어려움이 따를 것으로 판단된다. 그러나 본 논문에서 제안한 필터는 낮은 유전율을 갖는 일반 기판을 사용하여 메타 인공물질을 적용하였고, 평면 구조로 구성을 하여 대역통과 필터를 구현하였다는 것이 뚜렷한 장점이다.

뿐만 아니라 시스템과의 집적화가 가능하고, 무게와 크기, 단가 면에서 우수함을 갖고 있다는 것이 특징이다.

## V. 결 론

본 논문은 메타 인공 물질인 왼손물질의 방식을 이용하여 SRR 공진기를 새롭게 제안하였고, 그 공진기를 이용하여 2단 필터를 설계하였다.

본 필터의 뚜렷한 장점은 메타 인공 물질을 사용하여 공진기의 크기를 임의적으로 조절 할 수가 있고, Qe값을 증가 시킬 수 있으며, 탭-선로의 위치를 변화시켜서 대역폭을 조절 할 수가 있다.

본 논문에서 제안하는 필터는 군사용 목적으로 사용이 가능하고 위성통신망(I-밴드) 및 그 시스템의 주파수에 응용이 가능 하도록 중심 주파수를 10 GHz로 결정하였고, 공진기의 측정결과에서 Qe값은 184이며, 필터는 10 % 대역폭을 갖도록 설계하였다. 또한 설계한 필터의 삽입손실 및 반사손실은 각각 1.43 dB, 16.8 dB의 값을 얻었다. 본 필터는 현재 HMIC (Hybrid Microwave Integrated Circuit)를 통하여 제작을 하였으나, 향후 본 필터의 구조를 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 혹은 MEMS의 환경에 맞도록 재설계를 하게 된다면, 시스템의 집적화 시, 소형 경량화 및 낮은 단가의 대량생산 면에서 우수 할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이병남, 이광일, “항공용 전자정보 탐지기술개발 동향,” *국전자파학회지*, 제19권, 제4호, pp. 43-51, 2008. 7.
- [2] K. C. Yoon, H. W. Lee, J. G. Park, K. B. Kim, and J. C. Lee, “Design of an I-band low phase noise oscillator using a new hair-pin resonator,” *Microwave and Optical Technology Lett.*, vol. 51, no. 5, pp. 1172-1174, May 2009.
- [3] B. Dong, Q. Feng, and S. Yang, “Research and design of X-band SIR microstrip filters,” *Proc. Int.*

- Conf. E-Business and Inform. System Security*, pp. 1-4, June 2009.
- [4] H. K. Pang, K. M. Ho, K. W. Tam, and R. P. Martin, "A compact microstrip  $\lambda/4$ -SIR interdigital bandpass filter with extended stopband," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1621-1624, June 2004.
- [5] 김양현, 서철현, 하성재, 이복형, "Metamaterial 공진기를 이용한 레이더 송수신기용 X-대역 고출력 저 위상 잡음 Push-Push 발진기," *대한 전자공학회 논문지*, 제46권, 제12호, pp. 1105-1109, 2009. 12.
- [6] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials Transmission Line Theory and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, 2006.
- [7] J. Choi and C. Seo, "Microstrip square open-loop multiple split-ring resonator for low phase noise VCO," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 56, no. 12, pp. 3245-3252, Dec. 2008.
- [8] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [9] S. Maslovski, P. Ikonen, I. Kolmakov, and S. Tretyakov, "Artificial magnetic materials based on the new magnetic particle: Matasolenoid," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 54, pp. 61-81, 2005.
- [10] M. Kafesaki, T. Koschny, R. S. Penciu, T. F. Jundogdu, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, "Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties," *J. Optics A: and Applied Optics*, pp. 12-22, June 2005.
- [11] R. Marques, F. Medina, and R. Ruffi-El-Edrissi, "Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials," *Physical Review*, vol. 65, pp. 1440(1)-(6), 2002.
- [12] I. Bulu, H. Caglayan, and E. Ozbay, "Experimental demonstration of labyrinth-based left-handed metamaterials," *Optics Express*, vol. 13, no. 25, pp. 10238-10247, Dec. 2005.
- [13] R. Marqués, F. Martín, and M. Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters Theory, Design and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, 2007.
- [14] M. Gil, J. Bonache, J. G. Garcia, and F. Martin, "New left-handed microstrip lines with complementary split rings resonators CSRRs) etched in the signal strip," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1419-1422, June 2007.
- [15] A. Hajimiri and T. H. Lee, "A general theory of phase noise in electrical oscillators," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 2, pp. 179-194, Feb. 1998.
- [16] S. Im, C. Seo, J. Kim, Y. Kim, and N. Kim, "Improvement of microstrip open loop resonator filter using aperture," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1801-1804, June 2002.
- [17] R. B. Greegor, C. G. Parazzoli, A. M. Vetter, D. R. Smith, D. C. Vier, and S. Schultz, "Ab initio numerical simulation of left-handed metamaterials: Comparison of calculations and experiments," *J. Applied Physics*, vol. 90, no. 10, pp. 5419-5425, Nov. 2001.
- [18] G. Lubkowski, R. Schuhmann, and T. Weiland, "Extraction of effective metamaterial parameters by parameter fitting of dispersive models," *Microwave and Optical Technol. Lett.*, vol. 49, no. 2, pp. 285-288, Feb. 2007.
- [19] F. Bilotti, A. Toscano, L. Vegni, K. Aydin, K. B. Alici, and E. Ozbay, "Equivalent-circuit models for the design of metamaterials based on artificial magnetic inclusions," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, no. 12, pp. 2865-2872, Dec. 2007.
- [20] F. Falcone, T. Lopetegui, J. D. Baena, R. Marques, F. Martin, and M. Sorolla, "Effective negative- $\epsilon$

- stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators,” *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 280-282, June 2004.
- [21] Y. Qian, K. Yanagi, and E. Yamashita, “Characterization of a folded stepped impedance resonator for miniature microstrip bandpass filter applications,” *Proc. European Microwave Conf.*, vol. 2, pp. 1209-1211, Sept. 1995.
- [22] H. J. Lee, H. S. Lee, K. H. Yoo, and J. G. Yook, “On the possibility of biosensors based on split ring resonators,” *Proc. European Microwave Conf.*, pp. 1222-1225, Oct. 2008.
- [23] J. S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, 2001.
- [24] 윤기철, 이종철, “고조파가 억제된 5.8 GHz 협대역 대역통과 필터,” *한국통신학회 논문지*, 제33권, 제2호, pp. 167-173, 2008. 2.
- [25] 윤기철, 오승연, 오경민, 이현욱, 홍태의, 이종철, “전송선로의 임피던스 부정합을 이용한 협대역 개방형 소형 스테르브 대역통과 필터,” *한국ITS학회 논문지*, 제7권, 제6호, pp. 38-47, 2008. 12.
- [26] D. Budimir and F. Kamal, “Novel meta-waveguide bandpass filters,” *Proc. European Antenna Propagation Conf.*, pp. 1-3, Nov. 2007.

저자소개



윤 기 철 (Yoon, Ki-Cheol)

2007년 3월 ~ 2008년 8월 : 광운대학교 전자정보공과대학 전파공학과 박사과정 수료  
 2007년 2월 : 광운대학교 전자정보공과대학 전파공학과 (공학석사)  
 2005년 2월 : 우송대학교 컴퓨터전자정보공학부 (공학사)



이 종 철 (Lee, Jong-Chul)

1996년 3월 ~ 현재 광운대학교 전자융합공학과 전임강사/조교수/부교수/교수  
 1994년 4월 ~ 1996년 2월 : 현대전자 광소자 개발실 선임연구원  
 1994년 5월 : Texas A&M Univ, EE Dept (공학박사)  
 1989년 12월 : Arizona State Univ, EE Dept (공학석사)  
 1985년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)