

단락 개방간극 링 구조와 인터디지틀 선로의 결합형 소형 초광대역 여파기 설계

Design of the Miniaturized Ultra-WideBand(UWB) Filter of the Shorted Open Gap Ring Structure combined with the interdigital Line

오 승 훈* · 김 군 태* · 강 성 인* · 이 정 혁* · 한 준 희* · 김 형 석†
(Seunghun Oh · Koon-Tae Kim · Seong-In Kang · Jeong-Hyeok Lee ·
Jun-Hee Han · Hyeong-Seok Kim)

Abstract - This paper presents the filter of a resonator comprising a shorted open gap ring(SOGR) and interdigital lines. The proposed filter has the ultra wideband characteristic operating from 3 GHz to 10.5 GHz. In order to achieve the remarkable improvement in the size-reduction of the overall filter structure, only one cell of the SOGR with the inter-digital lines is adopted. It is shown that this filter has the size of 18mm×15mm using a metamaterial, the fractional bandwidth over 100%, the insertion loss much less than 1dB, an acceptable return loss performance in the results.

Key Words : CRLH-TL(Composite Right and Left Handed-Transmission Line), Meta-material, UWB(Ultra WideBand) Filter, SOGR(Shorted Open Gap Ring) Structure, Interdigital line

1. 서 론

2002년 미합중국 FCC에서 통신용 주파수로 3.1~10.6 GHz 초광대역(Ultra Wideband, UWB)이 일반에게 허가됨에 따라 UWB 통신용 초고주파 소자들에 대한 연구들이 진행되어져 왔다. 또한 UWB용 통신에 연관된 연구 활동 중의 하나인 초광대역 통과 여파기에 대한 개발 기술도 국내 및 국외에서 지속적으로 발표되고 있다[1]-[3].

기존 UWB 여파기의 연구는 주로 다중 모드(multi mode) 공진기를 마이크로스트립(microstrip)에 적용하여 UWB 여파기를 구현하는 고전적인 전자기 공진 방법을 사용하였다[1]-[2]. 기존 연구된 다중모드 공진기는 광대역 특성을 얻기 위해 저역통과 여파기와 고역통과 여파기의 혼합형 구조를 사용하였다. 혼합형 구조는 일정한 전기적 공진 길이가 요구되기 때문에 전체적인 여파기의 길이가 증가하게 된다.

UWB 여파기의 다른 방법으로 병렬의 링(Ring) 공진기와 낮은 특성 임피던스를 갖는 관내파장 길이의 0.25배 길이의 개방형 마이크로스트립 선로를 결합한 구조를 갖는 UWB 여파기를 제시하였다[3]. 이것은 병렬 스테브를 10 이하의 매우 낮은 임피던스로 설계하기 때문에 마이크로 스트립 선로 폭이 커지게 되된다. 이를 개선하기 위해 50의 임피던스를 갖는 병렬 스테브 끝에 가변 콘텐서를 연결하였다. 하지만

가변콘텐서로 인해 여파기 제작이 어려워진다.

위의 여파기는 UWB 여파기로써 동작할 수는 있으나, 여파기 전체를 초소형으로 만드는 데는 적합하지 않을 수 있다. 이를 개선하기 위해 전기적 공진 길이에 따른 여파기의 크기를 소형화하기 위한 연구의 필요성이 대두된다.

기존 여파기의 크기에 대한 문제점 등을 해결하기 위해, 본 논문에서는 전기적 공진 방법과는 다른 좌우수 결합형 전송 선로(Composite Right and Left Handed-Transmission Line, CRLH-TL)의 이론을 적용하여 소형의 초광대역 여파기와 공진기를 설계하는 방법을 제안한다. 이때, 여파기의 소형화를 위하여 많은 수의 CRLH-TL 단위 구조를 이용하는 방식과는 다르게 1단의 CRLH-TL을 사용한 공진기를 설계한다[4]-[7].

하지만 기존 π -형 CRLH-TL 구조는 인터디지틀 단자와 폐쇄형 스테브의 단순 결합형으로 파장방향의 직교축 길이가 길어지는 단점이 있다[5]-[8]. 이러한 현상을 막기 위해 단락 개방간극 링(Shorted Open Gap Ring, SOGR)구조와 인터디지틀 선로와의 커플링 결합을 통한 1단 π -형 CRLH-TL 공진기 구조를 적용한 UWB 여파기를 제안한다.

2. 본 론

2.1 CRLH-TL 회로 및 공진기 설계

메타 재질은 일반 전자기 이론에서 언급된 현상과는 다른 특이한 현상을 보인다. 메타 재질은 음의 투자율과 유전율을 가지는 인위적인 구조 또는 매질이다. 특정 주파수의 전자기파가 메타 재질내에서 진행할 때, 음의 위상상수와 위상속도를 가진다. 이러한 현상으로 메타 재질내의 파는 기존의 양의 투자율과 양의 유전율을 가지는 일반 매질과 다르

† Corresponding Author : School of Electrical and Electronics Eng., Chung-Ang University, Korea
E-mail : kimcaf2@cau.ac.kr

* School of Electrical and Electronics Eng., Chung-Ang University, Korea

Received : October 22, 2013; Accepted : November 12, 2013

개 파의 진행이 이루어 진다.

메타 재질내에서 파의 진행이 기존 매질과 달라지는 현상은 Veselago에 의해 처음 발견되었다[4]. 이러한 매질을 전송선로 관점에서 현재는 좌수 전송 선로(Left-Handedness Transmission Line, LH-TL)라 명명되었다. 또한, 기존의 양의 투자율과 양의 유전율을 가지는 매질은 우수 전송 선로(Right-Handedness Transmission Line, RH-TL)가 되었다. RH-TL과 LH-TL을 결합하면, 통과 대역이 기존의 RH-TL만의 구조와는 다르게 광대역의 특성을 가지게 된다.

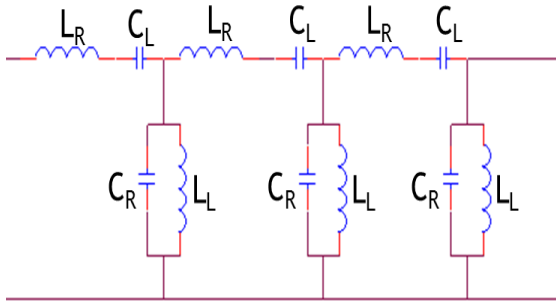


그림 1 CRLH-TL의 주기적인 회로 모델
Fig. 1 Periodic circuit model of CRLH-TL

그림 1은 주기적인 CRLH-TL의 회로 배치 구성도이다. 각각의 단은 두 쌍의 인덕터와 커패시터로 구성된다. 이때 병렬 커패시턴스와 직렬 인덕턴스(C_R , L_R)는 RH-TL을 구성하고, 직렬 커패시턴스와 병렬 인덕턴스(C_L , L_L)는 LH-TL을 구성한다.

여기서 RH-TL을 구성하는 공진소자와 LH-TL을 구성하는 공진소자 사이에 주파수 대소관계에 따라 개방형 혹은 폐쇄형 소자로 간략화 할 수 있다. 즉, 회로의 하한 저주파에서는 CRLH-TL이 LH-TL로 동작되며, 반대로 상한 고주파에서는 RH-TL로 동작하게 된다.

따라서 하한과 상한 주파수에 따라 CRLH-TL이 RH-TL 혹은 LH-TL으로 동작하도록 소자값의 대소 구분을 정확히 해주어야 한다[4].

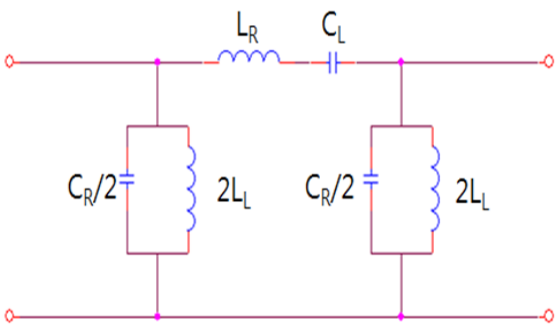


그림 2 CRLH-TL의 단일 π-형 회로 모델
Fig. 2 Unit π-type circuit model of CRLH-TL

소형 여파기의 제작을 위해 그림 2와 같이 주기적인 회로 모델에서 π-형 CRLH-TL 단일 회로를 추출 할 수 있다. T-형회로는 다단의 직렬구조 설계로 인해 길이가 길어지는

단점이 있다. 따라서, 단일구조로도 회로의 특성이 T-형보다 안정된 π-형 회로를 이용하여 CRLH-TL을 설계한다[4]. CRLH π-형 회로설계 변수식은 식 (1)과 같다.

$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L C_L}}, f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} \tag{1}$$

$$f_{series} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_L}}, f_{shunt} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L C_R}}$$

$$f_{series} = f_{shunt} = f_0, f_0 = \sqrt{f_L f_R}$$

이러한 1단의 π형 CRLH-TL을 UWB 공진기에 적용한다. 우선 LH-TL의 하한주파수와 RH-TL의 상한주파수를 UWB인 3~10.5GHz대역에 맞춘다. 그리고 CRLH-TL의 균형조건을 맞추기 위해 상/하한 주파수에 따른 설계변수를 결정한다. UWB 공진기는 CRLH-TL의 균형 조건에 의한 광대역 매칭을 위해, 중심주파수 f_0 , 직렬 공진 주파수 f_{series} , 병렬 공진 주파수 f_{shunt} 는 같게 하여 식 (1)에 맞게 L_R , C_R , L_L , C_L 를 구하면 된다.

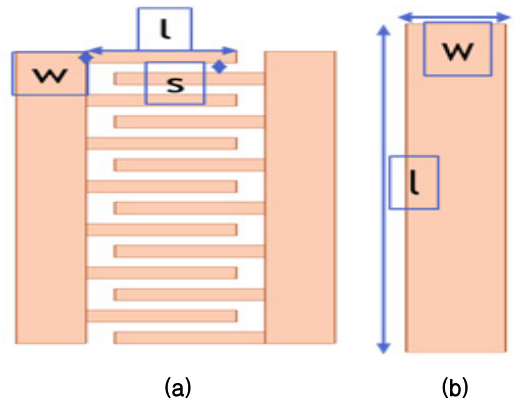


그림 3 CRLH-TL 설계용 구조 (a) 인터디지털 선로 (b) 단락 스텐브
Fig. 3 Components to design the CRLH-TL (a) Inter-digital line (b) Short Stub

그림 3은 CRLH-TL 공진기 설계를 위한 소자들이다. 공진기를 그림 2의 회로에 맞게 설계하기 위해, 회로의 소자값 L_R , C_L 은 인터디지털 선로를 사용하여 얻을 수가 있다. 이는 인터디지털 선로의 자계결합과 전계결합 두 가지를 한번에 취하는 방법을 선택한다. 또한 병렬 커패시턴스와 병렬 인덕턴스 값은 접지 스텐브를 사용하여 동시에 추출한다. 이때 접지스텐브와 인터디지털 선로는 상호 커플링을 통하여 결합하게 된다.

이때, 결합한 전체구조의 길이를 CRLH-TL 조건(전체구조 $\ll \lambda/4$)에 맞춰야 한다. 이러한 조건하에 메타재질구조의 파장방향의 길이는 4~5mm가 되어야 한다.

먼저, 하한 주파수 f_L 에 따른 L_L , C_L 를 얻어야 한다. 소자값 C_L 은 인터디지털 라인의 커패시턴스이다. CRLH-TL의 조건에 맞추어 보았을 때 C_L 을 얻을 수 있는 인터디지털 단의 길이는 0~2mm의 길이의 제한이 있다. 인터디지털 라인의 핑거개수는 핑거사이의 간격까지 고려하여 12~14개를 선

정하였다. 이때 인터디지틀 결합 선로의 캐패시턴스 공식에 의거하여 초기 C_L 값을 조정 할 수 있다. 또한, L_L 값은 주어진 C_L 값과 하한주파수 f_L 을 기준으로 하여 접지 스텐브의 길이와 폭을 조정하여 하한주파수에 맞는 L_L 을 얻어 낸다.

그리고, 상한 주파수 f_R 에 따른 L_R, C_R 를 얻어야 한다. C_R 은 인터디지틀의 결합단 및 스텐브 선로의 평판과 접지면의 커패시턴스 값을 말한다. 또한, L_R 은 인터디지틀 선로의 핑거개수에 따른 개방형 스텐브의 인덕턴스값이라 할 수 있다. 각각의 L_R, C_R, L_L, C_L 값을 구하는 식은 식(2)~(4)와 같다.

여기서 식(2)는 인터디지틀 라인의 커패시턴스, 식(3)은 인터디지틀 라인 및 스텐브의 인덕턴스, 식(4)는 소자들의 구조에 따른 병렬 커패시턴스 식이다. 식(2)의 변수인 W 는 인터디지틀 핑거의 폭, S 는 핑거사이의 간격이며 식(3)의 변수 W 는 스텐브의 폭이다[9].

$$C(pF) = \frac{\epsilon_{rc} 10^{-3}}{18\pi} \frac{K(k)}{K} (n-1) \quad (2)$$

$$k = \tan^2\left(\frac{a\pi}{4b}\right), a = \frac{W}{2}, b = \frac{W+S}{2}$$

$$L(nH) = 2 \times 10^{-4} \left[\ln\left(\frac{l}{W+t}\right) + 1.193 + 0.224 \frac{W+t}{l} \right] \times K_g \quad (3)$$

$$K_g = 0.57 - 0.145 \ln\left(\frac{W}{h}\right)$$

$$C(pF) = 1.11 \times 10^{-3} (\sqrt{\epsilon_{rc}} / Z_0 - 0.034 W/h) l \quad (4)$$

표 1 CRLH-TL의 회로 소자 값

Table 1 Component value of the circuit of CRLH-TL

C_L (pF)	L_L (nH)	C_R (pF)	L_R (nH)
0.34	2.36	0.05	7.56

2.2 CRLH-TL 이론이 적용된 초소형 공진기 설계

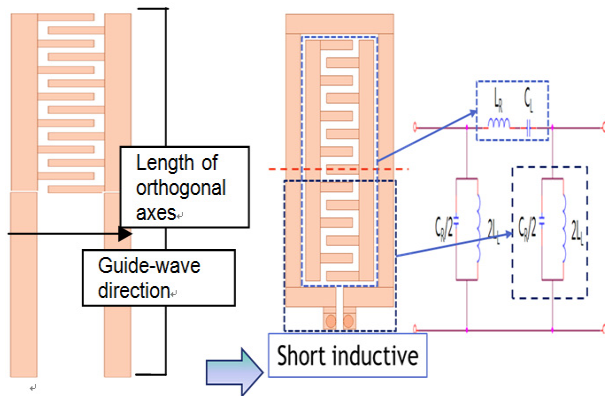


그림 4 기존 CRLH-TL 공진구조와 제안된 단락 개방간극 링 구조와 인터디지틀 선로의 커플링결합 CRLH-TL 공진구조

Fig. 4 Existing resonator applied the CRLH-TL and proposed structure

그림 4는 2.1의 설계 이론에 따라 설계된 두 개의 공진기를 보여주고 있다. 접지 스텐브와 인터디지틀 라인의 단순 결합으로 이뤄진 기존의 CRLH-TL공진기와 새로운 단락 개방간극 링 구조와 인터디지틀 라인과의 결합을 통하여 얻

어진 공진구조를 보여주고 있다. 서론에서 언급되었던 CRLH-TL의 횡축 방향 길이가 길어지는 단점[5]을 개선하기 위하여 단락 개방간극 링 구조와 인터디지틀 선로와의 강한 결합을 통하여 구조를 개선 할 수 있다.

단락 개방간극 링 구조의 아랫단 부분은 단락 스텐브 역할과 동시에 간극으로 인한 커플링 역할을 같이 수행하게 된다. 또한, 단락 개방간극 링 구조의 윗단은 급전부 및 스텐브 사이의 직접적인 전류경로를 형성한다. 이는 인터디지틀 라인과 단락 개방간극 링 구조와의 전체적인 커플링을 유도한다. 또한 여파기 전체에 다중 공진을 유도 한다. 즉, 단락 개방간극 링의 윗단의 다단 임피던스 변화 공진 설계로 추가적인 공진을 유도할 수 있는 집적 구조라는 장점이 있다. 따라서 추가적인 임피던스 매칭 라인을 및 커플링을 통하여 CRLH-TL의 반사손실 및 여파기의 반사손실 및 통과특성을 개선할 수 있다. 그림 5는 설계된 CRLH-TL공진기의 전류 흐름을 보여준다.

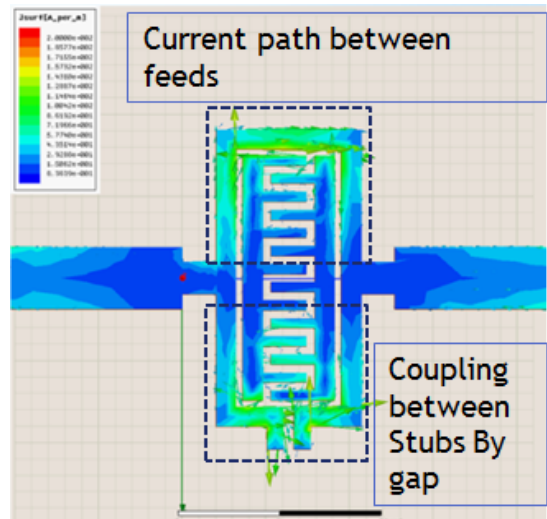


그림 5 설계된 CRLH-TL 공진기의 전류 흐름도

Fig. 5 Current flow of the designed CRLH-TL resonator

설계된 공진기의 크기는 4.35mm x 9.05mm로 매우 작으며, '관내과장/10.3'의 크기로 축소 할 수 있었다. 또한, 기존 CRLH-TL에 비해 과장방향 직교축의 길이가 1.44배 감소 되었다.

2.3 CRLH-TL 공진기 기반의 UWB 여파기 설계

앞서 설계한 CRLH-TL 공진기를 여파기에 적용하기 위하여 공진기 양 옆단에 급전부를 연결하여 UWB 여파기를 설계한다.

먼저, 공진기에 연결되는 급전부와 단락 개방간극 링 윗단의 결합은 앞선 2.2에서 보였듯이 추가적인 공진을 유도할 수 있는 일종의 다단 임피던스 라인으로 생각할 수 있다 [10]. 그림 6, 7에서 보듯 급전부와 단락 개방간극 링의 윗단이 결합된 다단임피던스 구조는 7.5GHz에서 낮은 반사손실 특성을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

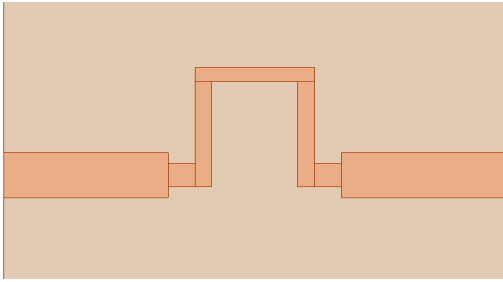


그림 6 단락 개방간극 링의 윗단과 급전부가 연결된 다단 임피던스 구조

Fig. 6 Stepped impedance line connected to the top of the SOGR

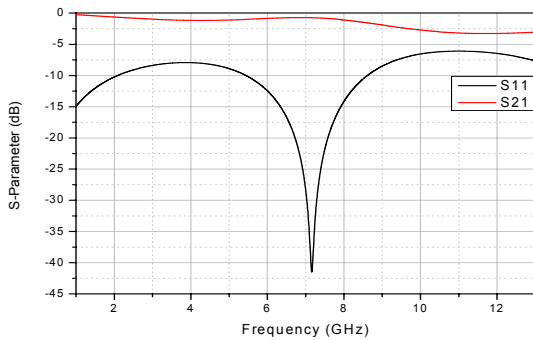


그림 7 단락 개방간극 링의 윗단과 피드단이 연결된 다단 임피던스 구조의 S-파라미터

Fig. 7 S-parameters of the stepped impedance line connected to the top of the SOGR

위에서 다단임피던스 구조를 앞서 제안된 CRLH-TL공진기와 결합하여 UWB에서 동작하는 여파기를 설계하였다. 이는 CRLH-TL과 다단임피던스의 병렬 결합 구조인데, 공진기 구조가 UWB대역의 중심주파수의 파장길이보다 매우 작은 길이이기 때문에 병렬결합이 효과적으로 적용이 되었다. 설계 및 제작된 여파기와 삽입/반사손실 특성도는 그림 8, 9, 10에 기술하였다.

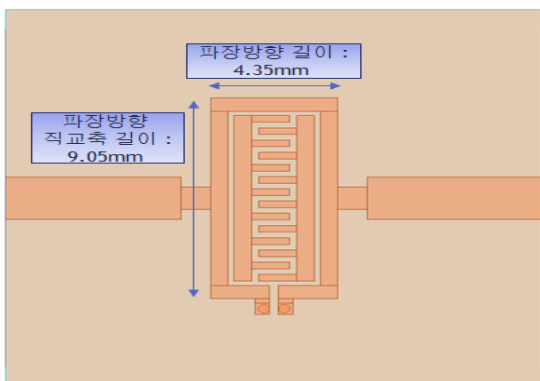


그림 8 다단 임피던스 구조와 제안된 CRLH-TL공진기가 결합된 UWB 여파기의 설계 단면부

Fig. 8 UWB Filter comprising the stepped impedance line combined with the proposed CRLH-TL resonator

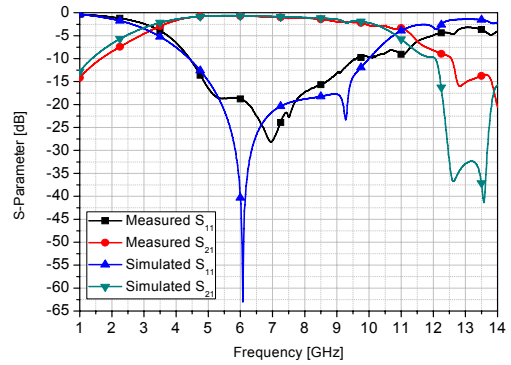


그림 9 구현된 UWB여파기의 S-파라미터 그래프

Fig. 9 S-parameters of the realized UWB Filter

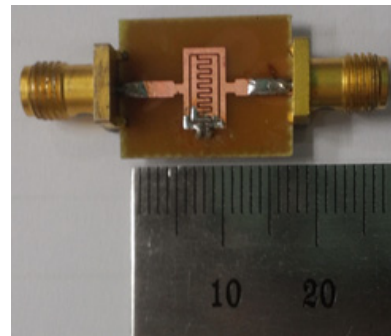


그림 10 제작된 UWB 여파기

Fig. 10 Manufactured UWB Filter

설계된 여파기는 UWB 100%이상의 통과 대역폭과 UWB인 3~10.5GHz에서 1dB이하의 삽입손실을 가지며, 전체적인 크기는 18mmx15mm의 매우 작은 크기를 가진다.

2.4 CRLH-TL 공진기 적용 UWB 여파기의 메타물질 특성 관찰

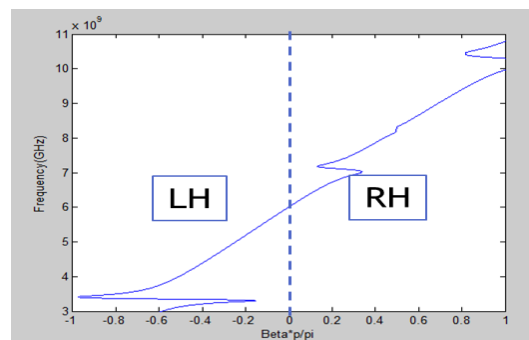


그림 11 제안된 UWB 여파기의 분산특성도

Fig. 11 Dispersion diagram of proposed UWB filter

그림 11은 설계된 공진기구조에서 얻어진 분산특성도이다. 분산특성도는 전자기 시뮬레이션으로 측정된 데이터를 근간으로 ABCD 네트워크 파라미터를 추출하여 얻어내었다.

분산특성도를 보면 설계된 여파기는 중심 주파수 5.9GHz

를 기준으로 중심주파수보다 낮은 주파수 영역에서 위상상수가 음의 값을 가지는 왼손 진행 법칙의 선로(LH-TL)의 특성을 보인다. 그리고 높은 주파수 영역에서는 위상상수가 양의 값을 가지는 오른손 진행 법칙의 선로(RH-TL)의 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 왼손 진행 법칙의 선로(LH-TL)와 오른손 진행 법칙의 선로(RH-TL)의 정합과정에서 생겨난 중간 경계 지점에서 위상상수가 0이 된다.

그림 12-14의 전자기 시뮬레이션 결과를 기술하였다. 그림 12를 살펴 보면 LH영역의 주파수에서는 음의 위상상수로 파의 움직임이 진행과 반대방향으로 움직이는 것을 살펴 볼 수 있다.

그림 13에서는 흡사 진행과가 정재파처럼 움직이는 것과 같은 현상을 지켜 볼 수 있는데, 이는 왼손 진행 법칙의 선로(LH-TL)와 오른손 진행 법칙의 선로(RH-TL)의 정합과정에서 생겨난 0차 공진 지점에서 나타나는 파의 움직임이다. 그림 14에서는 일반적인 전자기파의 움직임을 볼 수 있다. 나는 것이라 할 수 있다.

이러한 파의 움직임의 관찰을 통하여 실제 CRLH-TL이 제대로 동작하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 실제로 여파

기에 적용된 공진기가 단순한 다중 모드 공진이 아닌 CRLH-TL로써 동작하게 됨을 확인할 수 있다.

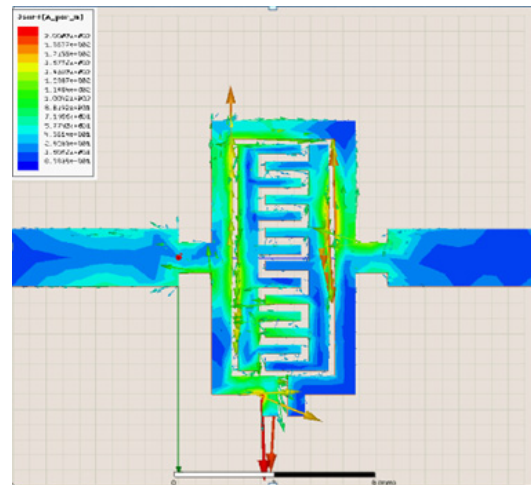


그림 14 RH-영역에서의 파의 움직임
Fig. 14 Motion of the traveling wave in the RH-region

3. 결 론

본 논문에서는 제시된 단락 개방간극 링(SOGR) 구조와 인터디지털 선로가 결합된 CRLH-TL 공진 특성을 사용하여 UWB에서 적용가능한 소형 여파기를 제안하였다.

설계된 CRLH-TL공진기의 크기는 4.35mm x 9.05mm로 매우 작으며, '관내파장/10.3'의 크기로 축소 할 수 있었다. 또한, 기존 CRLH-TL에 비해 파장방향 직교축의 길이가 1.44배 감소 되었다.

설계된 UWB여파기는 100%이상의 통과 대역폭을 가지며, 1dB이하의 삽입손실과 우수한 반사손실 특성을 가진다. 또한, 설계된 여파기의 전체적인 크기는 18mmx15mm로 매우 작은 크기를 가진다.

이는 UWB 시스템에서 높은 통신 품질을 보장할 것으로 기대되며, 여파기 뿐만 아니라 집적 회로 혹은 다양한 RF 소자의 소형화에 기여를 할 것으로 전망된다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구임(2012R1A1A2007758)

References

[1] H. Wang, L. Zhu and W. Menzel, "Ultra-Wideband Bandpass Filter with Hybrid Microstrip/CPW Structure," IEEE Microwave And Wireless Component Letters, vol. 15, no. 12, pp. 844-846, December 2005.
[2] C.-L. Hsu, F.-C. Hsu, and J.-T. Kuo, "Microstrip

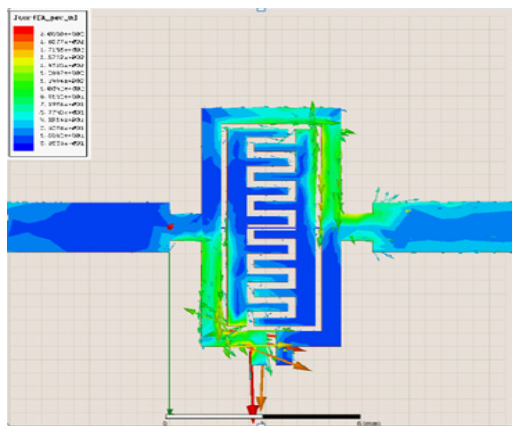


그림 12 LH-영역에서의 진행파의 움직임
Fig. 12 Motion of the traveling wave in the LH-Region

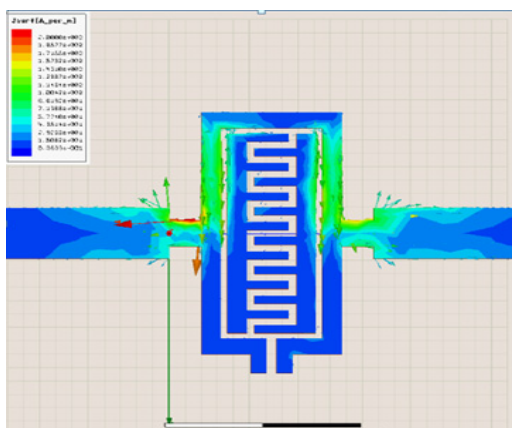


그림 13 LH-영역과 RH-영역이 합쳐지는 지점에서 파의 움직임
Fig. 13 Motion of the wave at the point where the LH-region added to the RH-region

Bandpass Filters for Ultra-Wideband(UWB) Wireless Communications,” IEEE MTT-S Intl. Dig., pp. 675-678, June 2005.

- [3] H. Ishida, and K. Araki, “Design and Analysis of UWB Bandpass Filter with Ring Filter,” IEEE MTT-S Intl. Dig., vol. 3, pp. 1307-1310, June 2004.
- [4] Christophe Caloz, Tatsuo Itoh, Electromagnetic Metamaterials : Transmission Line Theory and Microwave Applications, WILEY-INTERSCIENCE, John-Wiley & Sons Inc., Hobokin, NJ 2006.
- [5] Sungtek Kahng, and Jeongho Ju, “Design of the UWB BandPass Filter based on the 1 Cell of Microstrip CRLH-TL,” International Conference Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008, vol. 1, pp. 67-72, April 2008.
- [6] J. Ju, S. Kahng, “A compact UWB bandpass filter using a center-tapped composite right/left-handed transmission-line zeroth-order resonator” Microwave and Optical Technology Letters, Volume 53, Issue 9, pages 1974-1976, September 2011
- [7] S. Kahng and Dongjin Lim, “A Center-Tapped CRLH ZOR UWB Bandpass Filter with Improved Stopband”, Microwave Journal, vol. 55, no. 6, pp. 86-92, June 2012
- [8] Boram Lee, Sungtek Kahng “Compact UWB Bandpass Filter as Cascaded Center-Tapped CRLH Transmission-Line ZORs for Improved Stopband” Journal of Electrical Engineering & Technology, vol.8, no.2, pp. 371-375, August 2013
- [9] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, Microstrip Lines and Slotlines, Artech House, Inc., Norwood, MA 1996.
- [10] David M. Pozar, Microwave Engineering Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Wiley publishing company 2005.

저 자 소 개



오 승 훈 (吳承勳)

2013년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업,
2013년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 부품 설계, 안테나 설계



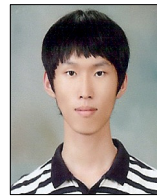
김 군 태 (金君泰)

2008년 서경대학교 정보통신공학과 졸업,
2010년 중앙대학교 전자전기공학부 공학석사
2012년 중앙대학교 전자전기공학부 박사수료
[주 관심분야] 초고주파 부품 설계, 안테나 설계, 등가회로 모델링, 최적화 설계



강 성 인 (姜星仁)

2003년 창원대학교 전기공학과 졸업,
2010년 중앙대학교 미디어통신 공학석사
2012년 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
[주 관심분야] RF, 무선통신, Radar, 무선충전



이 정 혁 (李 灯 赫)

2010년 동양미래대학교 정보전자과 졸업,
2013년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업,
2013년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
[주 관심분야] 최적화 설계, FEM, MFC



한 준 희 (韓俊熙)

2013년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업,
2013년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 부품 설계, 안테나 설계



김 형 석 (金炯碩)

1985년 서울대학교 전기공학 공학사,
1987년 서울대학교 전기공학 공학석사,
1990년 서울대학교 전기공학 공학박사,
1990~2002년 순천향대학교 정보기술공학부 교수, 1997~1998년 R.P.I ECSE, USA 방문교수, 2002년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수
[주 관심분야] 전자파수치해석, 무선통신 부품 해석 및 설계, 최적설계 기법 연구, 전력설비 모니터링 시스템, SoC 응용회로, EMI/EMC, RFID 응용 기술