

## 미앤더 마이크로스트립 전송선을 이용한 고감쇄 LPF 설계 및 제작

서수덕<sup>1</sup>, 조학래<sup>1</sup>, 양두영<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>(주)이너트론, <sup>2</sup>제주대학교 통신공학과

### Design and Fabrication of Deep Attenuation LPF using Meander Microstrip Transmission Line

Soo-Duk Seo<sup>1</sup>, Hak-Rae Cho<sup>1</sup> and Doo-Yeong Yang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Innertron Inc., <sup>2</sup>Dept. of Telecommunication Eng., Jeju National University

**요 약** 본 논문에서는 변형된 DCRLH 구조의 전송선로를 이용하여 저지대역에서 나타나는 고조파 공진 특성을 제거하고, 큰 감쇄 특성을 갖는 마이크로스트립 지역통과 필터를 설계하고 제작하였다. 지역통과 필터는 통과대역 신호를 잘 전달하고 저지대역 감쇄특성을 키우기 위한 병렬 개방스티브 선로와 고조파 통과특성을 제거하기 위한 직렬 단락스티브 선로를 복합적으로 사용하여 구성하였다. 이렇게 구성함으로써 저지대역에서 나타나는 불필요한 고조파 신호를 억제시킬 수 있었고, 필터의 대역통과 성능을 개선할 수 있었다. 제작된 지역통과필터는 1.5 GHz 이내의 통과대역에서 삽입손실 1.26 dB, 정재파비 1.65, 그리고 1.84 GHz에서 2.18 GHz의 저지대역에서 100 dB 감쇄, 20 와트 전력테스트에서 양호 평가를 얻어 모든 면에서 스펙에서 정한 규정 값 이상의 우수한 성능을 가질 수 있었다.

**Abstract** In this paper, microstrip low pass filter using transmission line with the modified DCRLH structure is designed and fabricated to be removed a spurious resonant mode, and a deep attenuation in stop band. The low pass filter is composed of shunt open-stub to get a deep attenuation and series short-stub to eliminate the spurious harmonics in stop band. In this way, the spurious harmonics occurring on the higher order frequency are suppressed and the filter performance is improved. Insertion loss and VSWR of the fabricated microstrip low pass filter in the passband from DC to 1.5 GHz is 1.26 dB and 1.65, and attenuation on the stopband from 1.84 GHz to 2.18 GHz is less than -100 dB. And also this filter has a good performance for 20 watt power test.

**Key Words** : Deep attenuation, Modified DCRLH, Shunt open-stub, Series short-stub, Spurious harmonics

### 1. 서론

필터는 회로망 합성의 한 분야로서 광범위한 주파수 대역에서 필요한 신호성분만을 통과시키고, 그 이외의 주파수 대역은 저지 또는 감쇄시키거나 방해가 되는 신호를 제거하는 특성을 갖는다. 필터의 설계법은 크게 영상 파라미터법과 동작파라미터법으로 나누어진다[1]. 영상 파라미터법은 영상임피던스가 동일한 기본회로를 중속 접속하여 소정의 특성을 얻는 설계 방법으로 비교적 용이하게 기본회로의 특성을 얻을 수 있지만, 실제로 원하는

성능을 얻기 위해서는 시행오차 과정을 통하여 반복 계산함으로써 컴퓨터 계산 시간이 많이 소요되고 복잡하기 때문에 주로 사용하지 않는다. 반면에 동작파라미터법은 원하는 필터의 설계 특성을 부여하고, 이에 근사한 함수를 구하여 회로를 직접 합성하는 방법이므로 이론적으로 명확하고, 사용 부품 수도 최적화할 수 있는 우수한 방법이다. 이 방법은 회로소자의 산출에 따른 이론과 근사함수의 종류에 따라 다양한 설계법이 제시되었으며, 도표화된 원형 (prototype) 필터의 소자 값을 이용하면 쉽게 설계가 가능하도록 되어 있다[1,2]. 일반적으로 이상적인 필터

본 논문은 ATC 2013 연구과제로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Doo-Yeong Yang(Jeju Nat'l Univ.)

Tel: +82-64-754-3636 email: yeongyd@jejunu.ac.kr

Received October 17, 2013 Revised December 9, 2013

Accepted March 6, 2014

는 통과대역 내에서는 모든 주파수의 신호가 손실 없이 통과되고, 저지대역에서는 신호가 무한정 감쇄 된다. 그러나 실제 물리계에서는 이상적인 필터 구현이 불가능하므로 필터 함수 근사법을 이용하게 된다.

최근에 기존의 기술을 극복하고 소형화와 복합기능을 동시에 이룰 수 있는 메타물질 (MTM: metamaterial)에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이에 따른 상용화 기술들이 개발되고 있다. 메타물질은 인공적인 방법으로 회로 또는 소자에 가해지는 전자기 특성을 변경시킬 수 있도록 만들어진 복합구조체로서 유전율과 투자율이 동시에 음의 값을 갖는다[3]. 따라서 다양한 메타물질 구조를 사용하면 이전에는 불가능했던 신호의 진폭, 위상, 주파수를 제어할 수 있게 된다. 고주파 신호를 전송하는 이상적인 무손실 전송선로는 등가적으로 직렬인덕턴스와 병렬 캐패시턴스의 구조를 지니므로 기본적으로 저역통과 전달특성을 갖게 되고, 전송선로 매질의 유전율과 투자율, 전송신호의 위상속도와 군속도 모두 양의 값인 RH (Right Handed) 선로 형태를 갖는다. 그러나 전송선로 매질의 구성을 상대적으로 바꾸어 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스의 등가회로를 갖게 하면 고역통과 전달특성을 지니게 되고, 유전율과 투자율이 모두 음의 값을 갖는 NRI (Negative Refractive Index) 전송매질이 형성된다 [4,5]. NRI 매질안에서 전송신호는 RH 전송선로와 달리 전송방향과 위상 흐름이 역방향으로 형성되기 때문에 회로의 소형화, 위상제어, 다중대역에서의 동위상 확보가 가능하여 통신부품을 설계하는데 있어서 매우 다양한 응용성을 지닌다. 인위적으로 구성한 LH 전송선로는 낮은 주파수대에서는 LH 성질을 주로 갖지만 높은 주파수에서는 RH 성질이 우세하게 되어 군속도를 제한하게 되므로 사실상 LH와 RH 전송선로가 혼재된 CRLH (Composite Right and Left Handed) 전송선로이다[6-10]. 그러나 CRLH 전송선로 구조와는 반대로 쌍대적으로 메타매질 구조를 구성하면 낮은 주파수에서는 RH 성질이 우세하고 높은 주파수에서는 LH 성질을 갖는 DCRLH (Dual CRLH) 구조가 된다[11].

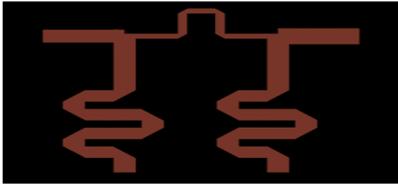
일반적으로 분포회로 특성을 갖는 전송선로를 이용하여 필터를 구현하면, 고조파 (Harmonics) 주파수 대역에서 주기적으로 반복되어 나타나는 불필요한 공진모드 때문에 광대역 저지 특성을 갖는 고성능 저역통과 필터를 구현하기 어렵다. 이러한 현상을 개선하기 위하여 많은 연구들에서 기본 원형 필터의 구조를 다양한 형태로 변형하여 광대역 저지 특성과 큰 감쇄 특성을 얻는 방법들을 다루었다[12,13].

본 논문에서는 변형된 DCRLH 구조의 전송선로를 이용하여 저지대역에서 나타나는 고조파 성분들을 제거할

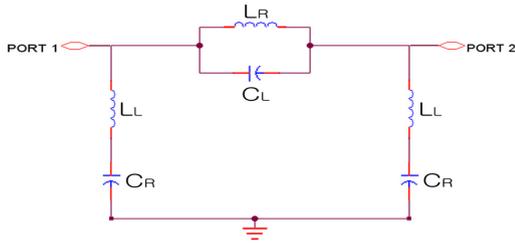
수 있는 마이크로스트립 저역통과 필터를 설계한다. 저역통과 필터는 통과대역 신호를 잘 전달하고 저지대역 감쇄특성을 키우기 위한 병렬개방 스텐브 (Shunt open-stub) 선로와 고조파 통과특성을 제거하기 위한 직렬 단락스텐브 (Series short-stub) 선로를 복합적으로 사용하여 구성한다. 이렇게 구성하면 마이크로스트립 전송선로를 이용하여 저역통과필터를 구성할 때 저지대역에서 반복적으로 나타나는 불필요한 고조파 통과특성을 억제할 수 있고, 필터의 제반 성능을 개선할 수 있다.

## 2. 마이크로스트립 전송선을 이용한 LPF 단위셀 설계

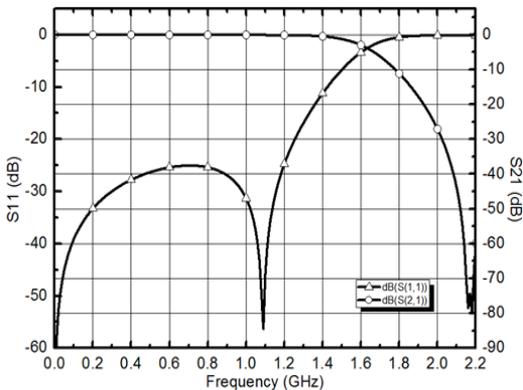
Fig. 1은 마이크로스트립 선로를 이용하여 변형된 DCRLH 구조의 단위셀을 구성한 그림이다. 이 회로 특성은 Fig. 2와 같이 병렬 연결된 직렬공진회로( $L_L, C_R$ )와 직렬 연결된 병렬공진회로 ( $L_R, C_L$ )가 결합된 DCRLH 메타물질 전송선로 구조를 갖는다. Fig. 1에서 입출력단 사이에 직렬로 연결된 단락스텐브의 간격을 넓히면 회로성분 중에  $C_L$ 보다  $L_R$  성분이 주도적인 값을 갖게 되어 저지대역의 감쇄 특성이 커지고 저지대역이 넓어져 불필요한 고조파 성분을 억제시킬 수 있다. 그리고 각 포트와 병렬 연결된 병렬 개방스텐브는 차단주파수 내에서 사분파장 길이의 미앤더 구조로 만들면  $L_L$ 과  $C_R$  공진회로 성분을 동시에 얻을 수 있고, 저지대역 내의 리플 특성을 일정 수준 이하로 억제시킬 수 있다. 이러한 현상은 전송선로의 분포정수에 따른 고조파 공진 특성을 억제시키고, 마이크로스트립 선로의 기생효과와 커플링효과 때문에 달라지는 필터회로 소자의 값을 유지하는데 도움을 준다. 특히 기생효과와 커플링효과는 병렬 캐패시턴스 ( $C_R$ )에 커다란 영향을 미친다. 그러므로 이러한 현상을 극복하고 필터회로를 소형화하기 위해서는 병렬 캐패시턴스 값을 형성하는 병렬 개방스텐브를 넓은 면의 전송선 대신에 Fig. 1처럼 병렬로 폭이 좁은 전송선을 사용하여 미앤더 형태의 병렬연결 직렬공진회로 성분인 인덕터와 캐패시터 성분을 만들어 대치하면 고감쇄 저역통과필터 회로를 설계할 수 있다. 이런 방법을 이용하여 다단으로 회로를 구성하면 반사손실은 저역통과대역 내에서 -20 dB, 저지대역은 설계하고자하는 스펙규정인 1.84 GHz ~2.18 GHz 주파수대역에서 -100 dB 이하인 고감쇄 특성을 만족시킬 수 있다.



[Fig. 1] Lay-out pattern of DCRLH microstrip unit-cell



[Fig. 2] Equivalent circuit of the microstrip unit-cell



[Fig. 3] Simulation results of microstrip unit-cell

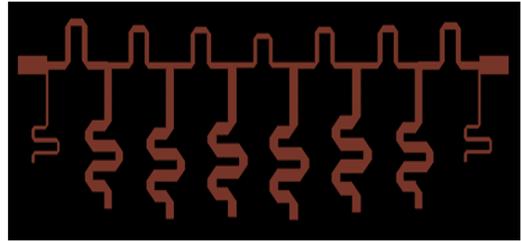
Fig. 1에 나타난 마이크로스트립 단위셀의 시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 같이 나타난다. 그림을 보면 통과대역은 1.5 GHz 범위에서 형성되며, 통과대역내의 전달특성인  $S_{21}$ [dB]의 리플은 0.56 dB, 반사손실  $S_{11}$ [dB]은 -25 dB 이하, 그리고 1.84 GHz~2.18 GHz 저지대역에서  $S_{21}$ [dB]의 스킨트 특성은 최대 -75 dB 정도로 나타나며, 다단으로 종속 연결하면 스킨트 특성이 좋아지므로 설계 규정에 맞출 수 있다.

### 3. 마이크로스트립 전송선을 이용한 LPF 필터 설계

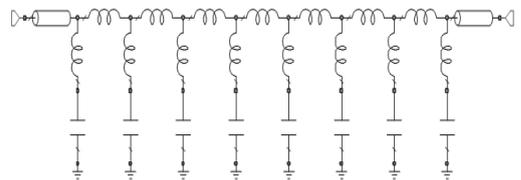
Fig. 4와 Fig. 5는 마이크로스트립 단위셀을 8단으로 종속 연결하여 구성한 마이크로스트립 저역통과필터이

다. 우선 통과대역 리플이 0.1 dB인 7단으로 구성된 체비셰프 15차 원형필터[1,2]의 기본 소자 값 ( $C_R, L_R$ )으로부터 기본 필터회로를 구성하고, 각 단의  $C_R$ 을 형성하는 병렬 개방스터브를 미앤더형으로 구부러서  $L_L$  성분이 함께 분포하도록 만들면 차단주파수 대역 내의 신호는 잘 통과시키고, 저지대역의 스킨트 특성은 커진다. 또한 각 단의  $L_R$ 을 형성하는 직렬 단락스터브는  $C_L$  성분이 나타나지 않도록 간격을 조정하면 저지대역이 넓어져 고주파 특성이 억제된다.

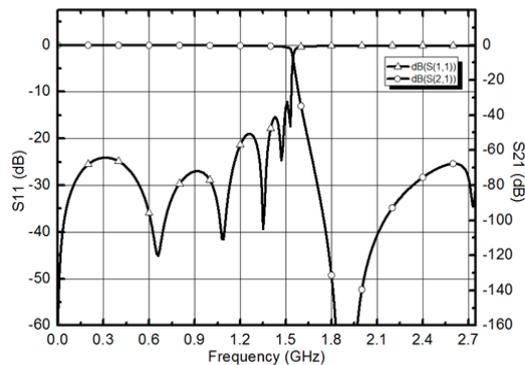
Fig. 6은 마이크로스트립 저역통과필터의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 차단주파수 1.5 GHz 이내의 주파수 대역에서 통과대역을 형성하고 있으며, 통과대역내의 리플은 0.5 dB, 반사손실  $S_{11}$ [dB]은 -15 dB, 그리고 1.84 GHz와 2.18 GHz의 차단대역에서  $S_{21}$ [dB]의 스킨트 특성은 각각 -102 dB 이하로 매우 양호한 특성을 갖는다.



[Fig. 4] Physical structure of microstrip low pass filter



[Fig. 5] Equivalent circuit of microstrip low pass filter with 7-stages



[Fig. 6] Simulation results of microstrip low pass filter

### 4. 저역통과필터(LPF)의 시뮬레이션 및 측정결과

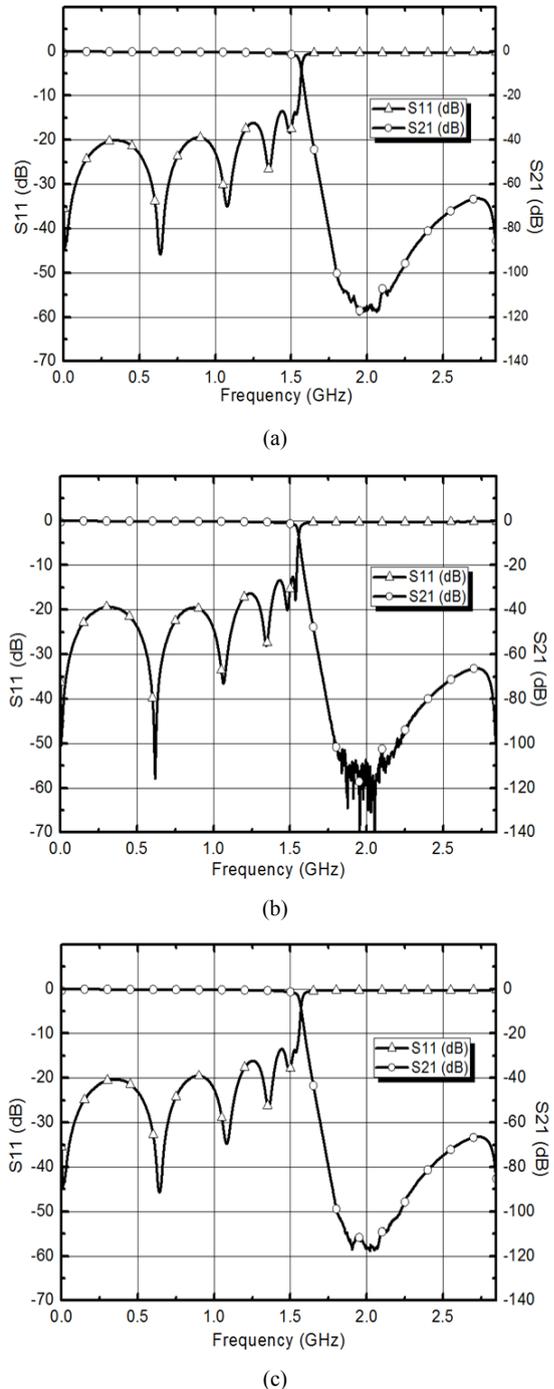
Fig. 7(a)는 제작한 시제품을 가지고, +25°C에서 측정한 저역통과필터의 전달특성인  $S_{21}$ [dB]과 반사특성인 정재파비(VSWR,  $S_{11}$ )의 특성 그래프이다. 측정한 필터의 삽입손실 특성인  $S_{21}$ [dB]은 DC ~ 1.5 GHz의 통과대역인 1.0 GHz, 1.496 GHz 주파수에서 -0.023 dB, -0.95 dB, 저지대역인 1.84 GHz ~ 2.18 GHz에서 -100.88 dB로 측정되어, -0.95 dB 이하인 양호한 삽입손실과 -100 dB 이하의 우수한 스킨트 특성을 보였다. 그리고 입력정재파비와 출력정재파비 특성( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ )은 통과대역 1.0 GHz, 1.453 GHz 에서 1.013, 1.643로 측정되어, 1.7 : 1 이하로서 2.0 : 1 스펙규정을 만족하였다.

Fig. 7(b)는 -30°C에서 측정한 저역통과필터의 전달특성인  $S_{21}$ [dB]과 반사특성인 정재파비(VSWR,  $S_{11}$ ) 특성 그래프이다. 측정한 필터의 삽입손실 특성인  $S_{21}$ [dB]은 DC ~ 1.5 GHz의 통과대역 1.5 GHz, 1.496 GHz 주파수에서 -1.19 dB, -1.143 dB, 저지대역인 1.84 GHz ~ 2.18 GHz에서 -101.2 dB로 측정되어, -1.19 dB 이하인 양호한 삽입손실과 -101 dB 이하의 우수한 스킨트 특성을 보였다. 그리고 입력정재파비와 출력정재파비 특성( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ )은 통과대역 1.5 GHz, 1.433 GHz 에서 1.269, 1.608로 측정되어, 1.7 : 1 이하로서 2.0 : 1 스펙규정을 만족하였다. 온도가 +25°C에서 -30°C로 내려감에 따라 통과대역내의 삽입손실은 0.24 dB 정도 커지고 저지대역내의 스킨트 특성은 1 dB 정도 증가한다.

Fig. 7(c)는 +65°C에서 측정한 저역통과필터의 전달특성인  $S_{21}$ [dB]과 반사특성인 정재파비(VSWR,  $S_{11}$ ) 특성 그래프이다. 측정한 필터의 삽입손실 특성인  $S_{21}$ [dB]은 DC ~ 1.5 GHz의 통과대역인 1.5 GHz, 1.496 GHz 주파수에서 -1.149 dB, -1.121 dB, 저지대역인 2.18 GHz에서 -103.9 dB로 측정되어, -1.13 dB 이하인 양호한 삽입손실과 -103.93 dB 이하의 우수한 스킨트 특성을 갖는다. 그리고 입력정재파비와 출력정재파비 특성( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ )은 DC ~ 1.5 GHz의 통과대역인 1.5 GHz, 1.448 GHz 주파수에서 1.142, 1.604로 측정되어, 1.65 : 1 이하로서 2.0 : 1 스펙규정을 만족하였다. 특히, 온도가 -30°C에서 +65°C로 올라감에 따라 통과대역내의 삽입손실은 0.04 dB 정도 커지고 저지대역내의 스킨트 특성은 2.9 dB 정도 증가한다.

결과적으로 Fig. 7의 저역통과필터의 신호전달과 반사손실에 대한 제반특성은 DC ~ 1.5 GHz의 통과대역에서 삽입손실과 정재파비는 최대 1.5 dB, 2.0 : 1 이하의 설계 스펙 규정을 만족하며, 1.84 GHz ~ 2.18 GHz의 저지대역

에서 최소 -100 dB 이하의 매우 우수한 대역제거 성능을 갖는다.

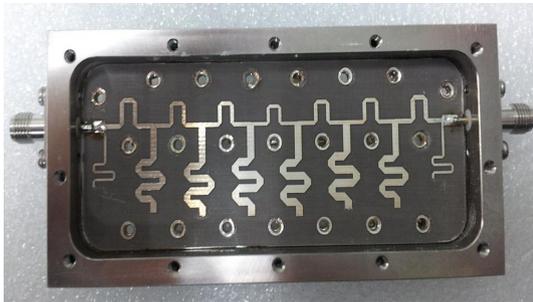


[Fig. 7] Measurement results of microstrip low pass filter (a) Measurement result at +25°C (b) Measurement result at -30°C (c) Measurement result at +65°C

[Table 1] Specification of microstrip LPF

Parameter	Spec.	LPF			Judg
		+25	-30	+65	Pass /Fail
Passband		DC - 1.5 GHz			
Insertion Loss	Max. 1.5dB	1.02	0.95	1.14	Pass
VSWR	2:1	1.64:1	1.61:1	1.60:1	Pass
Rejection Band		1.84 GHz - 2.18 GHz			
Rejection	Min. 100dB	100.9	101.2	103.9	Pass

Fig. 8은 설계된 회로에 따라 레이아웃패턴을 만들고 부품들을 조립한 후, 지그에 고정시켜 저역통과필터를 완성한 시제품 사진이고, Table 1은 측정된 결과를 도표로 나타낸 명세서이다. 따라서 이 필터의 성능은 통과대역 DC ~ 1.5 GHz, 저지대역 1.84 GHz ~ 2.18 GHz, 최대 삽입손실 1.14 dB, VSWR 1.64, 저지대역 감쇄 100.9 dB로써 -30°C ~ +65°C의 온도의 변화에도 스펙에서 정한 모든 규격을 매우 잘 충족시킨다.



[Fig. 8] Fabricated microstrip low pass filter

## 5. 결론

본 논문에서는 변형된 DCRLH 구조의 전송선로를 이용하여 저지대역에서 나타나는 고조파 성분들을 제거할 수 있는 마이크로스트립 저역통과 필터를 설계하였다. 또한 통과대역 신호를 잘 전달하고 저지대역 감쇄특성을 키우기 위한 병렬 개방스타브 선로와 고조파 통과특성을 제거하기 위한 직렬 단락스타브 선로를 복합적으로 사용하여 저역통과필터의 시제품을 제작하고 측정하였다. 그리고 기 측정된 결과를 토대로 미비한 점들을 다시 보완하는 작업을 반복 실시하였으며, 이렇게 얻어진 설계제원을 바탕으로 상용화가 가능한 최종 5개의 완제품 시료를

완성하였다. 측정 결과, LPF 필터 각각에 따른 5개의 시료들은 삽입손실, 정재파비, 저지대역 감쇄, 고전력 테스트에서 모두 우수한 성능으로 통과되었다. 저역통과필터는 삽입손실 1.26 dB, 정재파비 1.65, 저지대역 감쇄 101.4 dB, 20 W 전력테스트에서 양호한 평가를 얻어 모든 면에서 스펙에서 정한 규정 값 이상의 우수한 성능을 가질 수 있었다.

## References

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Third Edition, pp. 160-162, pp. 419-496, 2006.
- [2] G. L. Matthaei, L. Yeong, E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House Books, pp. 83-162, 1980.
- [3] V. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Feb. 1968. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>
- [4] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," *Physics Review Letter*, vol. 84, no. 18, pp. 4184-4187, May 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>
- [5] C. Caloz, T. Itoh, "Novel Microwave Devices and Structures Based on the Transmission Line Approach of Meta-materials," *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, vol. 1, pp. 195-198, June 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWSYM.2003.1210914>
- [6] A. Lai, T. Itoh, C. Caloz, "Composite Right/Left-handed Transmission Line Metamaterials," *IEEE Microwave Magazine*, pp. 34-50, Sept. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MMW.2004.1337766>
- [7] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, p. 15, 2006.
- [8] Q. Zhu, S. J. Xu, "Composite Right/Left Handed Transmission Line Metamaterials and Applications," *Meta. 2008 International Workshop*, pp. 72-75, Nov. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/META.2008.4723536>
- [9] L. Yang, S. D. Seo, H. R. Cho, D. Y. Yang, "Analysis of Unit Cells for Filter Design using CRLH Transmission Line," *ICCE2012 Proceeding*, pp. 397-401, Aug. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CCE.2012.6315937>

[10] L. Yang, D. Y. Yang, "Analysis and Design of Low Pass Filter using Unit Cell Based on CRLH Transmission Line," *International Journal of Contents*, vol. 8, no. 3, pp. 100-104, Sep. 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5392/IJoC.2012.8.3.100>

[11] C. Caloz, "Dual Composite Right/Left Handed (D-CRLH) Transmission Line Metamaterial," *IEEE Microwave Wireless Component Letter*, vol. 16, no. 11, pp.585-587, Nov. 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LMWC.2006.884773>

[12] J. X. Chen, Q. Xue, "Compact Microstrip Low-pass Filter using Spiral Resonant Structure," *IEE Proc., Microwave, Antennas Propagation*, vol. 153, no. 5, Oct. 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ip-map:20050001>

[13] M. J. Song, J. S. Li, "A Compact Microstrip Lowpass Filter with Suppression of Spurious Response," *IEEE 4th International Symposium, Microwave, Antenna, Propagation and EMC Tech.*, pp. 244-245, Oct. 2011.

**양 두 영(Doo-Yeong Yang)**

[정회원]



- 1984년 2월 : 제주대학교 통신학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신학과 (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2002년 6월 : 유 타주립대학교 연구교수
- 1992년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 통신공학과 교수

<관심분야>

RF회로 및 무선통신시스템 설계

**서 수 덕(Soo-Duk Seo)**

[정회원]



- 1996년 2월 : 제주대학교 통신공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 제주대학교 통신공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 7월 : 에이스테크놀로지 선임연구원
- 2007년 1월 ~ 현재 : (주)이너트론 연구소 소장

<관심분야>

무선통신시스템, 마이크로파회로 설계

**조 학 래(Hak-Rae Cho)**

[정회원]



- 1999년 2월 : 경남국대학교 재료공학과 (공학사)
- 2000년 3월 ~ 200년 12월 : 에이스테크놀로지 대리
- 2001년 1월 ~ 2002년 2월 : 이노웨이브 이사
- 2002년 2월 ~ 현재 : (주)이너트론 대표이사

<관심분야>

무선중계기, 기지국시스템, 기술경영