

감쇄극을 갖는 초소형 적층 LTCC 대역통과 필터

이영신, 송희석, 방규석, 김준철, 박종철

전자부품연구원

Miniature Multilayer LTCC Bandpass Filter with Attenuation poles

Y.S. Lee, H.S. Song, K.S. Bang, J.C. Kim, J.C. Park

Korea Electronics Technology Institute

Abstract

In this paper, We proposed compact multi-layer LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) bandpass filter for Bluetooth module. A $\lambda/4$ coupled stripline resonators are designed, which composed of coupled strip-line section and loading capacitance. This resonator with a loading capacitor has slow-wave characteristics. Due to the slow-wave effect of the proposed resonator, it is possible to design and fabricate a compact bandpass filter with a wide upper stop band. Attenuation poles in the lower stop band are achieved using controlling of electro-magnetic coupling between resonators. Using multi-layer LTCC technology, we designed and fabricated band pass filter with a finite attenuation pole and wide upper stopband. The overall size of the filter is $1.2 \times 2.0 \times 1.0$ mm³.

Key words : Bandpass Filter, Multilayer LTCC, Attenuation pole, Bluetooth

1. 서론

최근 단말기 시장의 성장 약화로 LTCC 기술의 응용분야중 개별 부품들의 시장수요가 적어지는 반면, FEM(Front-end module)과 Bluetooth 모듈과 같이 부품집적도가 큰 제품들이 각광받고 있다. 하지만 필터, 발룬, 커플러, 다이플렉서, 듀플렉서 등 LTCC 개별 부품들의 설계, 제작 능력이 전제되어야 모듈의 제품화가 현실성을 가질 수 있으며 WLAN과 Bluetooth의 채용이 확대되면서 개인 휴대통신이외에서 신규 수요의 확대로 향후 개별 부품들의 수요 증가가 기대되고 있다. 이 중 적층 대역통과 필터는 휴대전화에서 요구하는 감쇄특성을 구현하는 데 어려움이 있어서 한정적인 채용에 머물렀지만, 2GHz 이상의 전송 주파수를 갖는 WLAN 등의 시스템에서는 채용이 늘고 있다.^[1]

본 연구에서는 최근 단말기로의 채용이 급속히 확산되고 있는 Bluetooth 모듈용 적층 대역통과 필터를 설계, 제작하였다. PCS 혹은 WCDMA 시스템은 기본적으로 헤테로다인(Heterodyne) 송수신 구조로 LO 주파수나 Half IF 등 이미지(Image) 주파수의 신호 억제가 중요하며 대역통과 필터는 이러한 요구를 만족시켜 주어야 한다. 설계된 필터는

단락된 $\lambda/4$ 공진기의 자계 커플링과 전계 커플링을 조정하여 원하는 주파수 대역에 감쇄극을 형성시켜 주었으며 부하 캐패시턴스를 이용하여 공진기의 길이를 줄임과 동시에 선로의 위상 속도를 지연시켜 상향 저지대역 특성도 향상시켰다. 제작된 적층 대역 통과 필터는 $1.2 \times 2.0 \times 1.0$ mm³ 사이즈의 초소형으로 구현되었으며 시스템 요구사항을 만족하는 우수한 주파수 응답 특성을 나타내었다.

2. 실험

2.1 감쇄극을 갖는 적층 대역통과 필터의 설계

표 1은 Bluetooth 모듈에 사용되는 대역통과 필터의 설계사양으로 PCS 및 셀룰라 대역의 감쇄특성이 중요한 사양으로 제시되어 있다.

그림 1은 제안된 대역통과 필터를 개별 소자를 이용하여 등가화한 회로이다.^[2]

필터의 설계 주파수는 중심주파수가 2.45GHz이고 중심주파수 대비 10%의 통과대역(Fractional bandwidth)을 가지도록 하였다. 0.1dB 통과대역 리플(Ripple)을 갖는 2단(n=2) 체비셰프(Chebyshev)

형태의 저역통과 필터를 이용하였으며, 일반적인 정규화된 저역통과 필터의 설계를 적용하면 저역통과 필터 각 소자들의 값은 $g_0=1, g_1=0.8431, g_2=0.6220, g_3=1.3554$ 가 된다. 필터합성법을 적용하여 대역통과 필터로 전환한 후 PCS 대역에서 감쇄극 주파수를 갖도록 공진기간 상호 인덕턴스와 캐패시터 값을 조절하였다.

표 1. Bluetooth용 대역통과 필터의 설계사양.

Freq. range	2400 ~ 2500 MHz
Insertion Loss	2 dB max.
Attenuation	30dB min at 880~960 MHz 30dB min at 1.71~1.91 GHz 10dB min at 2.1 GHz 30dB min at 5 GHz
Ripple	0.5 dB max.
VSWR	1.5 typ.
Characteristic Imp.	50 Ω

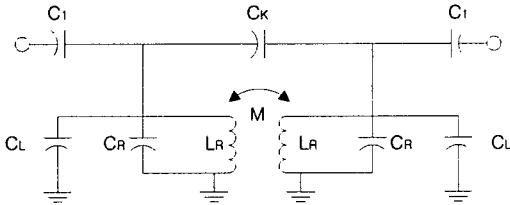


그림 1. 개별 소자를 이용한 등가회로.

다음의 그림 2는 제안된 필터의 회로해석을 위해 그림1의 등가회로를 변환시킨 것이다.^[3]

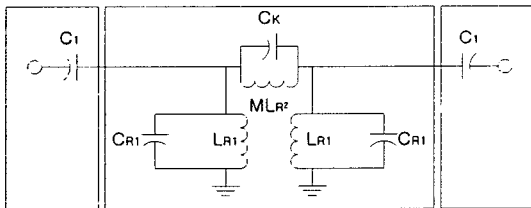


그림 2. 필터해석을 위한 등가회로.

그림에서 보듯 두 공진기 사이의 커플링 구조는 π 등가회로로 치환되었으며, 여기서

$$C_{R1} = C_L + C_R, \quad L_{R1} = \frac{L_R^2 M^2}{L_R - M}$$

이다. 그림과 같이 등가회로를 3개의 부분으로 나누고 각각이 직렬로 연결된 것으로 생각하고, 각 부분의 ABCD 파라미터를 이용하여 필터의 전달함수를 다음과 같이 (식. 1)로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{filter} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_2 \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_3 \quad (\text{식. 1})$$

여기서,

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{1,3} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{식. 2})$$

이고,

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_2 = \begin{pmatrix} 1 + \frac{C_{R1}(w^2 - a^2)}{C_K(w^2 - b^2)} & \frac{1}{jC_K} \frac{w}{(w^2 - b^2)} \\ jC_{R1} \left(2 + \frac{C_{R1}}{C_K} \right) \frac{(w^2 - a^2)(w^2 - c^2)}{(w^2 - b^2)} & 1 + \frac{C_{R1}(w^2 - a^2)}{C_K(w^2 - b^2)} \end{pmatrix} \quad (\text{식. 3})$$

이다. 여기서,

$$a^2 = \frac{1}{C_{R1}L_{R1}}, \quad b^2 = \frac{1}{L_R^2 M C_K},$$

$$c^2 = \left(2 + \frac{C_{R1}}{C_K} \right) \left(\frac{1}{C_K L_{R1}} + \frac{2}{L_R^2 M C_K} \right)$$

가 된다. (식. 2)와 (식. 3)을 (식. 1)에 대입해서 풀면, 여파기회로의 최종 ABCD 행렬을 구할수 있으며, 이로부터 다음의 (식. 4)와 같은 필터의 전달함수인 $S_{21}(j\omega)$ 를 구할 수 있다.

$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \frac{P(w)}{w^6 (w^2 - b^2)^2}} \quad (\text{식. 4})$$

이 식은 필터를 정의하는 일반적인 식과 일치하고 있으며, $P(w)=0$ 이 되는 주파수에서 Pole이 되며, Zero가 되는 $w=0, b$ 에서 감쇄극 주파수를 갖는다는

것을 알 수 있다.

PCS 대역에서 감쇄율을 갖게 하기 위해, 이론으로부터 얻어낸 등가회로의 정수값은 $L_{R1}=1.7nH$, $C_{R1}=1.22pF$, $M=0.39nH$, $C_K=0.97pF$, $C_1=0.83pF$ 이 된다.

이러한 개별 소자로 설계된 필터를 3차원 적층구조로 변환 시, 일차적으로 공진기를 설계하여야 한다. 각각의 인덕터와 캐패시터를 분포소자로 구현하게 되면 제품의 사이즈가 커질 뿐 아니라 패턴 레이어의 수 및 비아의 수가 증가하게 되는 단점이 있기 때문에, 본 연구에서는 스트립라인 구조로 공진기를 구현하였으며 공진기간 결합선로의 전기적 길이를 조절하여 원하는 전자계 커플링을 구현하였다. 우선 병렬 공진 회로를 구현하기 위해 한 쪽 끝이 단락된 $\lambda/4$ 길이의 공진기를 이용하였으며 공진기의 다른 한쪽은 캐패시터를 부하로 연결시키는 구조를 이용하였다. 그림 3은 설계된 공진기의 주파수 특성으로 부하 캐패시턴스 값에 따른 공진기의 공진주파수와 1차 하모닉(Harmonic) 주파수를 나타내고 있다.^[4]

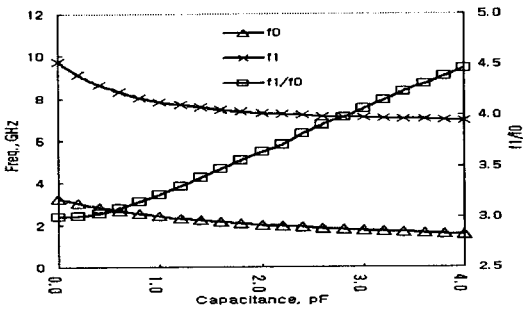


그림 3. 제안된 공진기의 주파수 응답 특성.

일반적으로 $\lambda/4$ 공진기는 기준공진 주파수의 3배 되는 주파수에서 첫 번째 하모닉 성분이 나타나지만 제안된 공진기의 경우 1차 하모닉 성분의 주파수가 부하 캐패시터의 용량에 따라 높아지는 경향을 보이고 있는데, 이는 공진기 선로가 위상 지연 효과(Slow-wave effect)를 보이는 것으로 이를 이용하면 필터의 상향 저지대역 감쇄특성을 향상시킬 수 있다. 그림에는 제안된 공진기의 주파수 성분들을 나타내고 있는데, 부하로 걸린 캐패시턴스 값의 변화에 따른 기준 공진 주파수 및 1차 하모닉의 주

파수와 두 주파수 성분의 비(Ratio)를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 부하가 거의 없는 경우에는 1차 하모닉 성분의 주파수가 이론과 유사한 특성을 보이나 부하 캐패시턴스의 증가에 따라 공진주파수가 내려가게 되어 공진기의 길이가 감소됨을 알 수 있었다.

다음의 그림 4는 3차원 구조로 최종 설계된 적층 필터의 HFSS 모델 및 시뮬레이션 결과이다. 그림에는 개별소자를 이용한 등가회로의 필터 특성도 보여주고 있다.

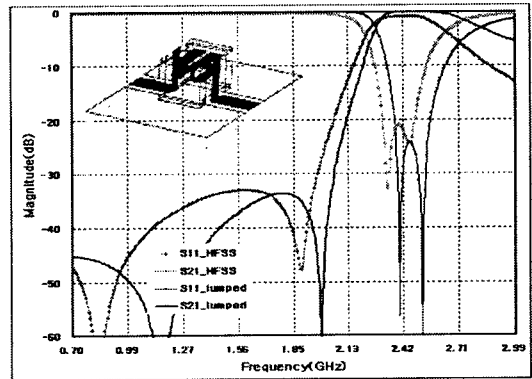


그림 4. 3차원 모델과 시뮬레이션 결과.

2.2 적층 대역통과 필터의 제작

적층 대역통과 필터의 제작에 사용한 저온 동시 소성용 유전체 재료는 RN2社의 RNE40으로 875°C에서 소성시 유전률은 33, $Q \cdot f$ 는 15,000이었다. RNE40을 그린 쉬트 두께 50 μm 으로 캐스팅하여 적층공정에 적용하였다. 그림 5는 패턴이 형성된 레이어(Layer)별 적층 개요도 및 단면도를 보여주고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 필터는 결합 스트립라인 공진기로 만들어졌으며, 캐패시터가 비아를 통해 공진기에 부하로 연결되어 있다. 패턴 레이어의 수를 줄이기 위해 입출력단과 공진기간 커플링 패턴은 동일 평면에 구현하였다. 전극의 두께는 회로 패턴의 경우 약 14 μm 이었으며 그라운드 패턴은 9 μm 정도였다.

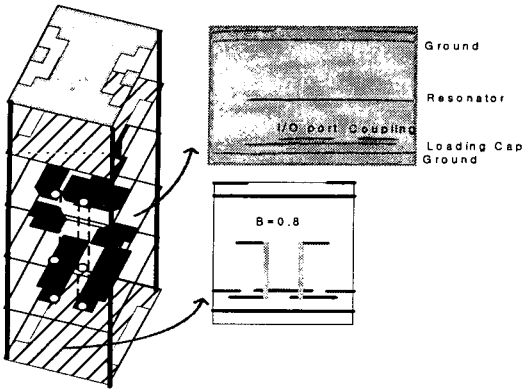


그림 5. 레이어 별 적층 개요도와 단면.

그림 6은 제작된 적층 대역통과 필터의 실물 사진으로 전체 크기는 1.2×2.0×1.0 (W×L×T) mm 이다.

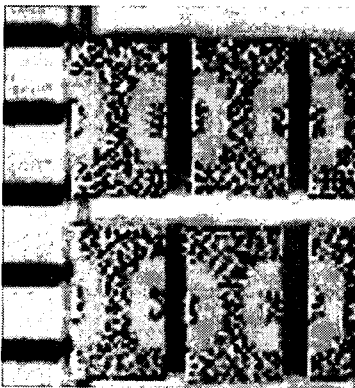


그림 6. 제작된 2012사이즈 적층 대역통과 필터의 사진.

3. 결과 및 고찰

휴대 단말기에 응용되는 Bluetooth 모듈용 대역통과 필터는 채용 단말기의 주파수 대역에서 감쇄극을 형성시켜 높은 신호저지 특성을 나타내야 한다. 제작된 필터는 공진기간 전자계 커플링 및 커플링 패턴을 통한 전계 결합을 이용하여 감쇄극을 형성시켰으며 감쇄극 주파수의 조절을 위해 커플링 패턴에 변화를 주었다. 그림 7은 커플링 패턴의 변화에 따른 필터의 감쇄극 및 통과 대역 특성의 변화를 시뮬레이션 결과와 함께 보여주고 있다, 커플링 패턴의 변수는 패턴의 폭과 길이 및 패턴의

위치로 하였다. 기준은 폭(W) 0.8mm, 길이(L) 0.5mm이며 폭은 0.1mm씩, 길이는 0.05mm씩 변화를 주었고 패턴의 위치(S)는 0.1mm씩 공진기의 단락점으로 이동시켰다. 표2에 측정결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

표 2. 커플링 변수에 따른 감쇄극 주파수와 삽입손실의 변화.

변수	감쇄극 주파수(GHz)		삽입손실(dB) min.		
	Smul	Meas.	Simul	Meas.	
W	0.8 A	1.95	1.89	0.91	1.4
	0.7 B	1.97	1.9	0.89	1.39
	0.6 C	1.99	1.93	1.02	1.41
L	0.5 A	1.95	1.89	0.91	1.4
	0.45 D	1.96	1.91	1.04	1.5
	0.4 E	1.98	1.92	1.18	1.7
S	0 E	1.98	1.92	1.18	1.7
	0.1 F	2.0	1.98	1.11	1.53
	0.2 G	2.0	1.98	1.12	1.54

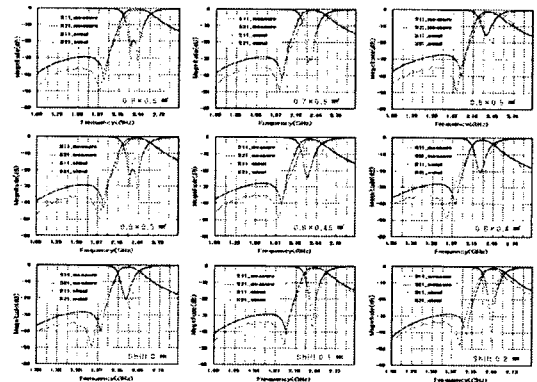


그림 7. 커플링 패턴 변화에 따른 주파수 응답특성.

(식. 3)과 (식. 4)에 따르면 커플링 패턴의 폭과 길이가 줄어들어 따라 공진기간 커플링(C_k)이 약해져 감쇄극 주파수는 증가하게 된다. 측정 결과에서도 역시 감쇄극 주파수가 증가했으며 또한 커플링의 약화로 대역폭의 감소와 삽입손실의 증가가 발생하였다. 따라서 삽입손실과 대역폭의 변화를 감안하여 감쇄극 구현을 위한 커플링 구조를 설계해야 한다. 그림에서 보듯 시뮬레이션과 측정 결과간 차이가 나타나는 데, 이는 전극의 수축이 설계와 차이를 보였기 때문이며 또한 전극 두께의 편차

도 영향을 미친 것으로 본다.

그림 8은 제작된 필터의 광대역 저지대역 특성을 보여주고 있는데 시뮬레이션 결과와 유사한 경향성을 나타내었다. 앞서 기술한 바와 같이 공진기의 위상 지연 특성으로 인하여 이론적으로는 $\lambda/4$ 공진기의 1차 하모닉 성분이 기준 공진주파수의 3배되는 지점(약 7.4GHz)에서 발생해야 하나 측정 결과 11GHz 근처에서 발생했다. 또한 0.8GHz와 5.8GHz에서도 감쇄극이 나타나는데 이는 입출력간 커플링에 의한 것이다. 표 3에 제작된 필터의 측정결과를 정리하였다. 저지대역 신호 억제특성은 매우 우수한 특성을 보였으나 상대적으로 삽입손실이 다소 크게 나왔다. 이는 측정기판 및 샘플 외부단자 전극에서 발생하는 손실이 크게 기인한 것으로 보여진다.

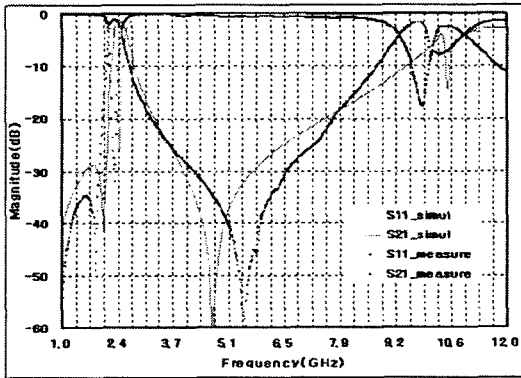


그림 8. 제안된 필터의 저지대역 응답특성(시뮬레이션 결과와 측정결과 비교).

표 3. 제작된 적층 대역통과 필터의 측정결과.
(Example : Sample G)

Freq. range	2340 ~ 2530 MHz
Insertion Loss	1.54~2.03 dB
Attenuation	50dB min at 880~960 MHz 45dB min at 1.71~1.91 GHz 14dB min at 2.1 GHz 40dB min at 5 GHz
Ripple	0.5 dB max.
VSWR	1.5 typ.
Characteristic Imp.	50 Ω

4. 결 론

본 논문에서는 최근 부품 집적화 기술로 주목받고 있는 LTCC 기술을 이용하여 적층 대역통과 필터를 설계, 제작하였다. $\lambda/4$ 결합 스트립 공진기를 이용한 2단 대역통과 필터의 등가회로로부터 필터의 전달함수를 유도하여 감쇄극 주파수를 이론적으로 유도하였으며 이로부터 특정 주파수에서의 감쇄극을 구현하기 위한 3차원 구조를 설계했다. 또한 공진기의 부하 캐패시터를 이용하여 공진기의 하모닉 특성을 향상시켜 필터의 상향 저지대역 특성도 개선하였다.

제작된 필터의 전체 사이즈는 1.2×2.0×1.0(mm)의 초소형으로 단말기에 채용되는 Bluetooth 모듈로의 채용이 용이하다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Navian Market report, "Advanced LTCC Technology 2003", p.27-33, 2003
- [2] A.Sutono, J. Laskar, and W.R. Smith, "Development of three dimensional integrated Bluetooth image reject filter", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Vol. 1. P.339-342, 2000
- [3] Lap Kun Yeung, Ke-Li Wu, "A Compact Second-Order LTCC Bandpass Filter With Two Finite Transmission Zeros", IEEE Trans. on MTT, Vol. 51, No. 2, p.337-341, 2003
- [4] 이영신, 송희석, 박종철, "2.4GHz 대역 2012 사이즈 적층 LTCC 대역통과 필터의 설계 및 제작", Journal of the Microelectronics & Packaging Society, Vol. 10, No. 1, p.19-24, 2003