THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2020 Sep.; 31(9), 751～757.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.9.751
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

4개의 전송 차단점을 갖는 초소형 LTCC 대역통과필터

A Compact LTCC Bandpass Filter with Four Transmission Zeros

강 인 호 · 가 오 린

In Ho Kang · Lin Gao

요 약

본 논문은 2.5 GHz 대역에서 LTCC 초소형 대역통과필터에 관한 것으로, 전송 차단점들이 4개 발생하는 특성을 갖게 되는 새로운 기술을 구현하였다. 초소형 대역통과필터의 구조는 결합선로의 양끝 단을 각각 단락시키고, 집중 캐패시턴스들로 구성되었으며, 4개의 전송 차단점을 구현하기 위해 결합선로를 수직적으로 쌓아가도록 하였다. 초소형 필터의 크기는 2×1.25×0.75 mm^2이고, 현재 발표된 LTCC 대역통과필터 자료 중에서는 가장 작은 크기 중의 하나이며, 이 대역에서의 선택도는 최대 24 dB/100 MHz가 됨을 측정하였다. 삽입손실은 1.67 dB이고, LTCC는 6층이며, SoC 적용에 맞게 구현되었다. HFSS 모의실험 과 측정결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper presents a new technique to improve the performance of a 2.5 GHz low-temperature co-fired ceramic(LTCC) miniaturized bandpass filter(BPF) with four transmission zeros. The BPF, which is composed of parallel coupled lines with end-shorted line and lumped capacitors, has vertically stacked coupled lines for realizing multiple transmission zeros. The compact LTCC filter has one of the smallest reported footprints(2×1.25×0.75 mm^2) and demonstrates the highest roll-off factor(24 dB / 100 MHz) in the 2.5 GHz band. The insertion loss with 6 layers is 1.67 dB and is realized for thin system-in-package(SIP) applications. The measured and simulated results obtained using High Frequency Structural Simulation(HFSS) are in good agreement.

Key words: Bandpass Filter(BPF), Low Temperature Co-Fired Ceramic(LTCC), Transmission Zeros(TZ), Parallel Coupled Line, Selectivity

Ⅰ. 서 론

최근 무선 통신 시스템의 급격한 발전은 더 작게 그리고 가벼운 형태로 더 정교한 기능, 높은 특성, 낮은 비용을 요구하고 있다. 특히 하나의 통신시스템 내에 Bluetooth, WiFi, GPS, 지역에 따른 GSM 시스템을 다 포함해야 하므로 이동통신 제품에서 이러한 기술들의 통합은 소형화, 간섭에 대한 강한 내성을 요구하고 있다. 대역통과 여파기(bandpass filter: BPF)는 위에 언급된 무선 통신 시스템에서 가장 큰 면적을 차지하는 소자 중에 한 소자라고 할 수 있다. 따라서 높은 선택도를 갖는 BPF의 크기를 줄이는 것은 전체 시스템의 크기를 줄이는 것뿐만 아니라, 시스템 내의 자기 간섭도 완화시킬 수 있다.

필터를 소형화시키기 위해서 전통적으로 분포 소자보다는 집중 소자들이 LTCC(low temperature co-fired ceramic: 저온 소결 세라믹)와 같은 3차원 기술들과 함께 많이 사

한국해양대학교 전파공학과(Dept. of Radio Communication Engineering, Korea Maritime & Ocean University)
· Manuscript received February 10, 2020 ; Revised April 1, 2020 ; Accepted September 21, 2020. (ID No. 20200210-010)
· Corresponding Author: In Ho Kang (e-mail: ihkang@kmou.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

용되어 왔다. 특히 LTCC는 SoP(system-on-package) 위에 다른 회로들과 다층적으로 통합적으로 사용할 수 있는 장점이 있다.

BPF의 선택도를 향상시키기 위한 원론적인 방법은 필터의 차수(order)를 증가시키는 것이지만 이것은 필터의 크기를 증가시키고 삽입손실 특성을 악화시키는 문제가 있다. 또, 다른 대안으로 TZ(transmission zeros, 전송차단점)을 대역폭 바로 옆에 있도록 설계하는 것이다. 이것은 궤환(feedback) 캐패시터를 BPF의 인버터의 입출력에 연결함으로써 구현하는데, 이 경우 BPF의 선택도가 개선된다는 연구를 발표하였다[1]~[3]. 그러나 이런 연구들은 집중소자로 구현된 인덕터를 이용하여 BPF를 발표하였는데, 본질적으로 집중소자로 구현된 인덕터는 Q값이 낮아서 선택도와 삽입손실 특성이 악화되며, 통과 대역 내의 평탄도가 좋지 않은 구조적인 문제점이 있다.

본 연구는 집중소자 인덕터가 아닌 분포 소자 인덕터가 적용된 소형화한 대역통과필터의 공간적인 구조를 조정함으로써 통과대역필터 양쪽 모두에 두 개의 TZ (transmission zeros, 전송 차단점)을 만들어서 선택도를 높일 수 있도록 하였다.

제작된 회로의 측정값과 simulation 결과 값은 잘 일치하였으며, 높은 선택도(24 dB/100 MHz)와 매우 작은 크기의 필터(2×1.25×0.75 mm^2)를 구현할 수 있었다.

Ⅱ. 전송차단점이 있는 초소형 BPF의 설계

2-1 초소형 BPF

초소형 BPF에 대한 소개를 간단하게 한다면, 그림 1 (b)는 그림 1(a)에 포함되어 있는 $\lambda/4$ 전송선로를 등가 집중 회로로 나타낸 것이다. 여기서 Z_o는 그림 1(a)의 전송선로 특성 임피던스이고, C_1은 그림 1(b)의 병렬 캐패시턴스를 나타낸다. 이 경우 C_1은 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 = \frac{1}{wZ_o} \tag{1}$$

그림 1(b) 회로에서 그림 2(a)와같이 양단에 공진 회로를 삽입한다면 일반적인 BPF를 구현할 수 있다. 이 때 그림에서 점선안의 집중회로는 그림 2(b)와 같이 분포 회로

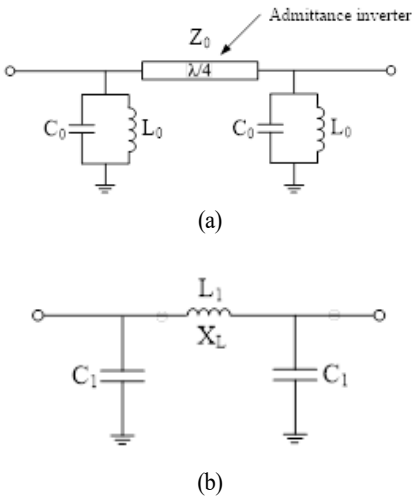

그림 1. (a) 일반적인 대역통과 필터 구조 및 (b) $\lambda/4$-전송선로의 등가 집중 회로

Fig. 1. (a) Schematic of the generalized bandpass filter and (b) the equivalent lumped circuit of the quarter-wavelength transmission line.

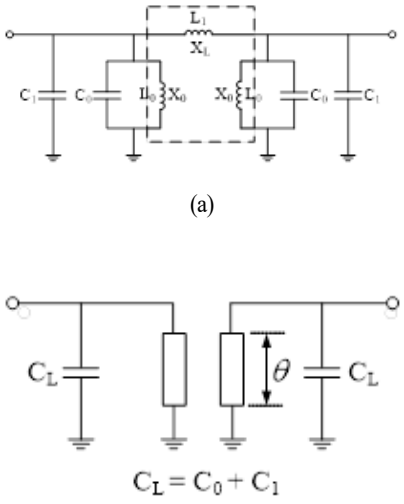

그림 2. (a) 일반적인 대역 통과 필터의 등가 집중 회로 및 (b) 끝이 단락된 평행 결합선로와 병렬 부하 연결된 것을 기초로 한 소형 대역 통과 필터

Fig. 2. (a) The equivalent lumped circuit of the generalized BPF and (b) its miniaturized BPF based on the parallel short-ended coupled-line with capacitive loading.

의 형태로 대체할 수 있으며, 다음과 같은 수식 관계를 가지고 있다[4].

$$X_0 = Z_{oe}\tan\theta \tag{2}$$

$$X_L = \frac{2Z_{oe}Z_{oo}}{Z_{oe}-Z}\tan\theta \tag{3}$$

여기서 Z_{oe}, Z_{oo}는 각각 결합선로의 even mode 임피던스 및 odd mode 임피던스이다. 그림 2 (a)는 최종적으로 그림 2 (b)와 같은 간단한 초소형 BPF로 구현할 수 있다. 이 때 C_L은 다음과 같다.

$$C_L = \frac{1}{wZ_o} + \frac{1}{wZ_{oe}\tan\theta} \tag{4}$$

이 회로에서 θ값을 줄일수록 BPF의 크기가 줄어드는 것을 알 수 있다[5].

2-2 TZ가 발생되는 초소형 BPF 구조

그림 3은 그림 2(b)의 회로를 LTCC 공정에 적용하기 위하여 한쪽 끝이 단락되고, 반대쪽 끝에 캐패시턴스를연결한 결합 선로를 평면이 아닌 수직으로 결합이 되도록 배치하였다. 수직으로 배치된 결합 선로 간에 간섭을 없애기 위해서 중간에 간섭 차단용 접지 평면을 배치하였

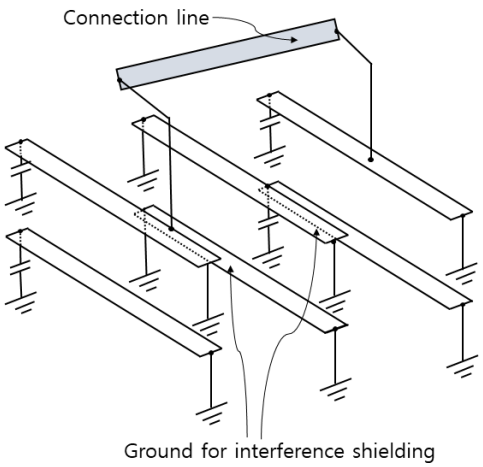

그림 3. LTCC 공정용 초소형 대역통과필터 구조
Fig. 3. The structure of minaturized BPF for LTCC process.

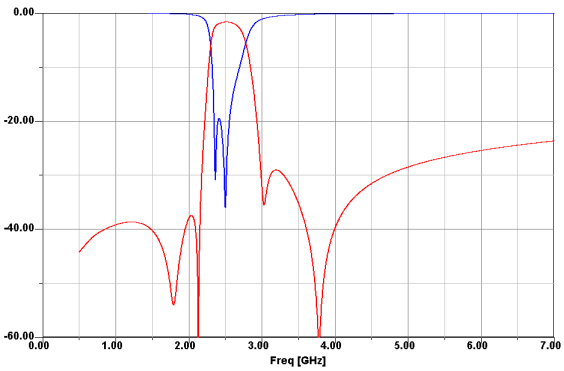

그림 4. HFSS에서 LTCC 공정용 초소형 대역 통과 필터의 TZ 발생
Fig. 4. The occurrences of the transmission zeros in the BPF for LTCC process in HFSS.

고, 결합 선로의 연결은 결합 선로 위쪽에 접속선로로 연결하였다. 이 회로를 high-frequency structure simulator (HFSS) 를 이용하여 전자기적으로 시뮬레이션하면, 그림 4와 같이 통과대역 양쪽에 전송 차단점이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 BPF에서 전송 차단점을 구현하기 위해서는 직렬회로에서 어드미턴스 값이 0이 되는 공진회로를 배치하든지 혹은 병렬회로에서 임피던스 값이 0이 되는 공진회로를 배치해야 된다. 본 연구에서는 직렬회로에서 어드미턴스가 0이 된다든지, 병렬회로에서 임피던스가 0되는 회로를 배치하지 않은 상태에서 그림 3 회로 자체만을 사용했을 때 전송 차단 점이 통과 대역 양옆에 각각 2개가 발생해서 결과적으로 선택도가 획기적으로 개선되는 것을 확인할 수 있다.

현재까지 확인된 바로는 이러한 특이한 현상이 발생되는 과정을 명확하게 도출하지 못하였지만, 이러한 현상의 발견은 최초이자 획기적 진전이라고 생각된다.

2-3 TZ을 갖는 BPF를 HFSS로 구현

그림 5는 LTCC 공정에 맞도록 대역통과필터를 조금 더 체계적으로 HFSS로 구현한 구조이다. 이해를 돕기 위해서 신호 흐름을 번호로 매겨서 설명하면, 신호가 입력라인(1)을 통과하면 하늘색 결합선로가 상하로 결합되어 있는데, 이 결합(coupling, 2)을 통하여 신호가 위로 올라간다. 연결선(3)을 통하여 또 다른 결합선로에 연결되며,

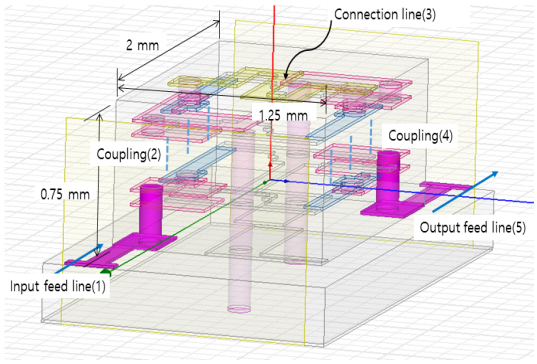

그림 5. 초소형 대역통과필터의 입출력 포트
Fig. 5. The input and output port of miniaturized BPF.

결합(4)을 통하여 출력(5)되는 형태이다. LTCC 공정 전문 회사인 RN2 Technology(주)의 설계 규칙에 근거해서 설계되었으며, 초소형 제작을 위해 ϵ_r는 41.5를 사용하였다. 공진기의 분포 인덕터로써 사용되는 단락 전송 선로의 전기적 길이는 $\lambda/12$로 일반적인 $\lambda/4$를 1/3의 크기로 소형화하였다. 이 길이를 식 (2), 식 (3)에 적용하면 Z_{oe}=86.6 Ω, Z_{oo}=28.9 Ω이 도출된다. 따라서 전체적인 초소형 BPF의 크기는 2×1.25×0.75 mm^2로 구현되었다. 그림에서 입출력 선에서 결합 선로의 연결은 상하 간에 비어 홀(via hole)로 연결시켰다. LTCC 구조에서 모두 6개의 평면 층이 사용되었다. 그림 6은 바닥으로부터 3번째, 4번째 층에 결합선로를 각각 배치하여, 상하 간에 결합이 발생하도록 하였다. 그림 7은 BPF내의 접지 평면 부분을 나타낸다. 결합선로 끝부분의 캐패시턴스 값을 크게 하기 위해서 그림 7의 접지 평면을 그림 6의 결합선로 끝부분에 있는

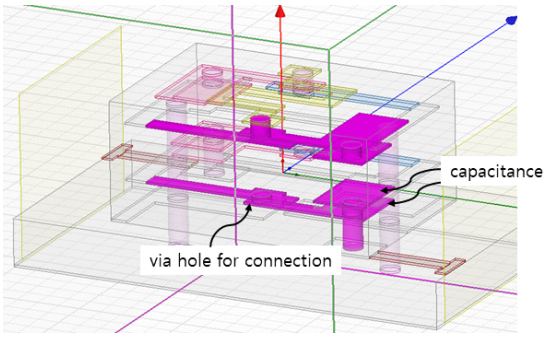

그림 6. 초소형 대역통과를 위한 결합 선로쌍
Fig. 6. The coupled line pair for the miniaturized BPF.

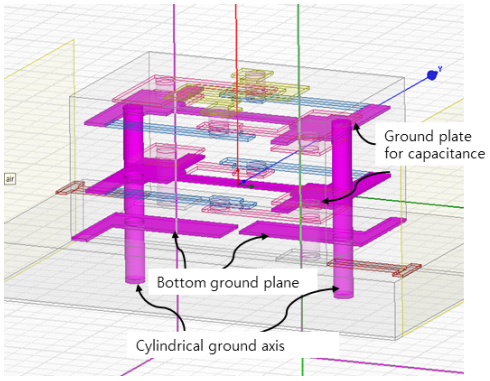

그림 7. 초소형 대역통과필터의 접지 평면
Fig. 7. The ground plane in the miniaturized BPF.

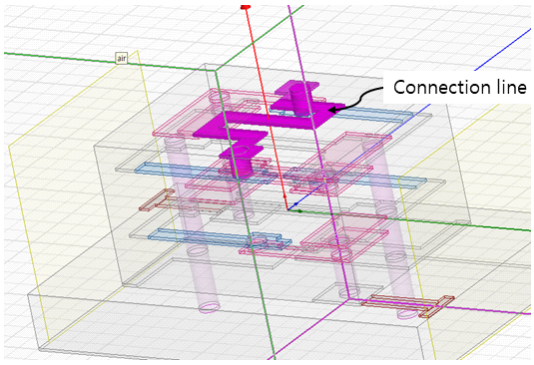

그림 8. 초소형 대역통과 필터의 내부 연결선
Fig. 8. The inter-stage connection transmission line in the miniaturized BPF.

상하의 평면 사이에 삽입하는 방식을 취했다. 그림 6의 연결용 via hole은 결합선로 끝부분을 접지시키기 위하여 결합 선로를 접지 평면이 있는 층으로 옮기는 역할을 한다. 그림 7의 바닥 접지판 밑부분은 전체 접지판이며, 두 개의 큰 via hole을 3개의 접지판과 수직으로 연결하여 3개의 접지판이 접지 기능을 하도록 하였다. 그림 8의 연결선은 via hole을 활용하여 그림 3에 나타난 접속선로를 맨 위층에 배치하도록 하였다.

Ⅲ. TZ가 있는 초소형 BPF의 모의실험

그림 3의 구조로 결합 선로를 배치했을 때 전송 차단점이 발생하지만 명확한 인과관계를 규명하지 못하였기 때문에 전송 차단점이 발생하는 주요한 요소를 HFSS를 통하여 반복적으로 수행(try and error)해서 그 영향을 찾는

방법을 택하였다. 결과적으로 주요 요소는 결합선로의 간격, 중간연결선 등으로 생각할 수 있었다.

3-1 결합 선로 사이의 간격의 영향

수직으로 결합된 결합 선로 사이의 간격(slot)은 결합도를 강화하여 대역폭을 넓히는 역할도 하지만 대역폭을 넓히고, 통과대역의 한쪽 측면 감쇄영역에 선택도를 악화시키는 역할을 한다. 그림 9에서 본 바와 같이 결합선로 간격이 넓으면 우측 로브 특성이 악화되고, 좁으면 좌측 로브 특성이 악화되는 것을 알 수 있다.

3-2 접속선로의 영향

그림 8에 나타난 바와 같이 두 결합선로의 연결선로를 맨 위에 배치하고, 연결선의 길이에 대한 주파수 특성을 그림 10에 나타내었다. 길이가 길어지면 중심주파수는 변화는 없지만, 대역폭 측면 로브가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이상과 같이 TZ이 적절하게 발생하도록 하기 위해서는 slot나 연결선의 길이를 원하는 특성에 맞게 조절할 수 있음을 알 수 있다.

Ⅳ. 모의실험 값과 측정 값 과의 비교

그림 3의 BPF 구조를 모의시험 해서 TZ이 통과대역의 양옆에 발생하는 것을 증명하기 위하여 RN2 Technology (주)의 LTCC 공정을 사용하여 제작하였다. 제작한 BPF를

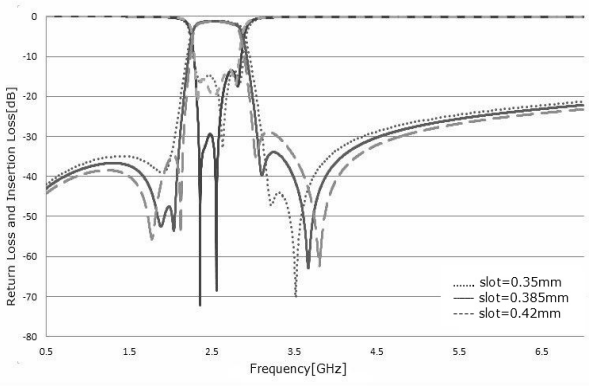

그림 9. 초소형 대역통과필터의 결합도의 영향
Fig. 9. Slot effect on the performance of the filter.

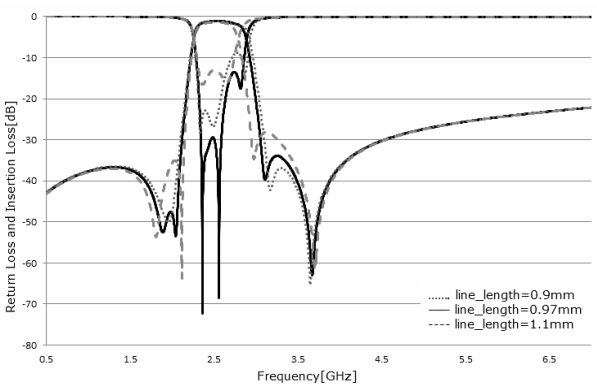

그림 10. 초소형 대역통과필터의 연결선의 영향
Fig. 10. The influence of the connection line length to the filter.

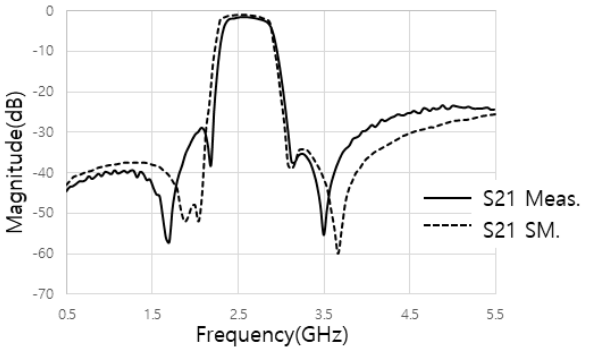

그림 11. 초소형 대역통과필터의 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 11. Measurement and simulation results of miniaturized BPF.

측정한 것과 모의 시험한 것을 비교한 것이 그림 11에 나타난 바와 같이 거의 일치하는 것을 알 수 있었으며, 동시에 TZ이 통과대역 양옆 두 군데에 나타나는 것을 알 수 있었다. 저자들이 아는 한 초소형 결합기를 사용하여 4개의 공진기가 있는 초소형 BPF에서 TZ 두 곳이 통과 대역 양옆에 있으면서 2×1.25×0.75 mm^2까지 소형화한 BPF는 최초인 것으로 알고 있다. 통과 대역 외의 영역에서 6 GHz까지 20 dB 이상, 10 GHz까지는 10 dB 이상 차단 효과가 나타나는 것을 알 수 있다.

삽입 손실이 모의실험 했을 때에는 0.9 dB이고, 측정에서는 1.6 dB이다. 약간의 높은 주파수로의 편이(5 %)와 추가적인 삽입손실은 오믹 손실과 로스 탄젠트 효과로

표 1. 본연구와 기존의 발표된 자료와의 성능 비교.
Table 1. Comparison between this work and the published literature.

Ref.	f_o (GHz)	Vol. (mm^2)	Selectivity (dB/100 MHz)*		IL (dB)	FBW*	Layers
			Roll-up	Roll-row			
[1]	2.5	4.59	12.5	7.7	1	15	4
[2]	1.3	23.7	12	5.5	1	27	8
[3]	1.57	7.6	16.7	10	2.7	5	4
[6]	2.4	1.26	2	11.5	2.3	8	4
[7]	2.44	4	2.1	10	1.7	14	10
[8]	1.55	24	8	13.8	2.8	6	8
[9]	2.4	0.786	1.9	7.5	1.8	12	9
This work	2.6	2.19	17	24	1.7	16	6

* 선택도와 부분대역폭은 발표된 자료로부터 측정.

추정된다.

표 1은 이제까지 LTCC 대역통과필터로 발표된 논문과 본 연구와의 주요 특성을 비교한 것이다.

참고문헌 [1]과 참고문헌 [2]에서 삽입손실이 1 dB로 측정되지만, 이 실험은 공진기가 2개 사용되었고, 본 실험에서는 4개의 공진기가 사용되었다는 점에서 차이가 있다. 이외의 항목인 크기에서 공진기를 2개 사용하였음에도 2~10의 차이가 있었으며 선택도는 17, 24 dB/100 MHz로써 5.5~12.5 dB/100 MHz보다 압도적으로 특성이 좋은 것을 알 수 있다. 참고문헌 [9]에서는 크기는 작았지만 선택도가 7.5, 1.9 dB/100 MHz로 나타나 본 실험과의 선택도 특성에서 차이가 많이 나는 것을 확인할 수 있다. 상기 참고한 모든 LTCC 필터는 공통적으로 집중소자 형태의 인덕터를 사용했으므로, 낮은 Q로 인하여 전반적인 특성이 본 연구의 실험 결과 값보다는 좋지 않은 것을 확인할 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 초소형 BPF를 구성하는 공진 회로 내에 있는 인덕터를 집중소자로 사용하지 않고, 분포 전송 선로를 사용하여 초소형 LTCC BPF를 구현하는데 있어서 TZ이 통과 대역 양옆에 각각 2개가 나타나도록 하는 것을 최초로 구현하였다. 2개의 TZ 발생으로 선택도가 획기적으로 개선되는 것을 확인하였다. 모의실험 결과 값과 측정한 값으로부터 예측한데로 TZ이 대역 양 옆에 2곳에서 발생하였으며 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 통과 대역 양옆에 TZ이 발생하는 논리적인 설명을 하지는 못하지만 이전에 발표가 되었던 많은 연구 자료의 TZ이 있는 LTCC BPF와 비교했을 때 선택도, 삽입손실, 크기 등 BPF를 특정짓는 전반적인 주요 특성이 우수한 것을 확인하였다. 통과대역 양옆에 TZ이 2곳 발생하는 이유를 이론적으로 설명하는 것이 앞으로 도전해야할 필요가 있는 연구 과제라고 생각된다.

References

[1] L. K. Yeung, K. L. Wu, "A compact second-order LTCC bandpass filter with two finite transmission zeros," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 2, pp. 337-341, Feb. 2003.

[2] B. Yuan, W. H. Yu, H. J. Sun, and X. Lv, "A bandpass filter using LTCC system-on-package(SOP) technology," in *International Confernce on Microwave Technology and Computational Electromagnetics(ICMTCE 2009)*, Nov. 2009, pp. 257-260.

[3] E. Arabi, M. Lahti, T. Vähä-Heikkilä, and A. Shamim, "A 3-D miniaturized high selectivity bandpass filter in LTCC technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 24, no. 1, pp. 8-10, Jan. 2014.

[4] G. L. Mattaei, L. Young, and E. M. Jones, *Microwave Filters*, *Impedance Matching Networks*, *and Coupling Structures*, Dedham, MA, Artech House, 1980.

[5] X. G. Wang, Y. Yun, and I. H. Kang, "Compact multi-harmonic suppression LTCC bandpass filter using parallel short-ended coupled-line structure," *ETRI Journal*, vol. 31, no. 3, pp. 254-262, Jun. 2009.

[6] S. Hwang, S. Min, M. Swaminathan, V. Sundaram, and R. Tummala, "Thin-film high-rejection filter integration

in low-loss organic substrate," *IEEE Transaction Component Package Manufacture Technology*, vol. 1, no. 8, pp. 1160-1170, Aug. 2011.

[7] C. F. Chang, S. J. Chung, "Bandpass filter of serial configuration with two finite transmission zeros using LTCC technology," *IEEE Transaction Microwave Theory and Technology*, vol. 53, no. 7, pp. 2383-2388, Jul. 2005.

[8] G. Brzezina, L. Roy, and L. MacEachern, "Design enhancement of miniature lumped-element LTCC bandpass filter," *IEEE Transaction Microwave Theory and Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 815-823, Apr. 2009.

[9] Y. S. Dai, H. S. Zhang, G. P. Qi, D. L. Lu, Z. L. Tao, and G. X, Qian, et al., "LTCC bandpass filter for Bluetooth™ application with dual transmission zeros," in *2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT'08)*, Nanjing, Apr. 2008, vol. 1, pp. 284-286.

강 인 호 [한국해양대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0002-9272-0384

1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

1989년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

1996년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

1996년 3월: 한국해양대학교 전파공학과 전임강사

2007년～현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수

[주 관심분야] 초소형 수동소자

가 오 린 [한국해양대학교/석사]

2011년 2월: 중국 청도대학 전자통신공학과 (공학사)

2013년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)