

이중 모드 SIR과 평행 결합선로를 이용한 소형 3중-대역 대역통과 필터 설계

Compact Tri-Band Bandpass Filter Using Dual-Mode Stepped-Impedance Resonators and Parallel Coupled-Lines

성규제^{1*} · 김영²

¹한경대학교 전자전기공학부

²금오공과대학교 전자공학부

Gyuje Sung^{1*} · Young Kim²

¹School of Electronic and Electrical Engineering, Hankyong National University, Gyeonggi-do 17579, Korea

²School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do 39177, Korea

[요약]

본 논문은 이중 모드 SIR(steped-impedance resonator)과 평행 결합선로를 이용한 3중-대역 대역통과 필터를 제안한다. 제안된 필터는 단락 종단을 갖는 inter-digital 및 comb-line 형태의 평행 결합선로와 개방형 스텝을 갖는 U-자형 SIR로 구성되었다. 개방형 스텝이 있는 2개의 U-자형 SIR은 첫 번째와 세 번째 통과 대역을 만들고, 중앙의 평행 결합선로 공진기는 두 번째 통과 대역을 만든다. 5개의 공진기와 평행 결합선로 구조의 우/기모드 입력 임피던스를 해석하여 3중-대역 대역통과 필터의 산란 파라미터를 유도하였다. 유도된 산란 파라미터를 이용하여 새로운 3중-대역 대역통과 필터를 설계하고 제작하였다. 제작된 필터는 $0.2 \times 0.19 \lambda_g^2$ 의 작은 크기를 가지며, 측정 결과는 높은 대역 격리도를 보여 주고 있다.

[Abstract]

This paper proposes a tri-band bandpass filter using dual-mode stepped-impedance resonators (SIRs) with parallel coupled structures. The proposed filter adopts U-shaped SIRs with open stubs and parallel coupled lines (PCLs) that have inter-digital and comb-line shorted ends. Two U-shaped SIRs with open stubs build the first and third passband, and the central PCL resonators build the second passband. Five resonators and coupling structures are theoretically analyzed to derive the scattering parameters of the proposed filter. A novel tri-band bandpass filter is designed and fabricated using the induced scattering parameters. The measured result of the fabricated tri-band bandpass filter shows a good agreement with the simulated one.

Key word : Bandpass filter, Dual-mode resonator, Parallel coupled line, Stepped-impedance resonator.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.1.57>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 20 December 2022; **Revised** 31 January 2023

Accepted (Publication) 13 February 2023 (28 February 2023)

***Corresponding Author; Gyuje Sung**

Tel: +82-31-670-5195

E-mail: gjsung@hknu.ac.kr

I. 서론

최근의 무선/이동 통신 시스템은 통신 트래픽의 증가에 대응하기 위해 다중 서비스 또는 다중 대역 서비스가 요구되고 있다. 이에 따라 RF front-end 단의 주요 부품 중의 하나인 다중 대역 필터는 이러한 요구를 충족시키는 중요하고 필수적인 구성 요소이다. 마이크로스트립 다중 대역 필터는 작은 크기와 쉬운 제작 방법, 저렴한 비용 등에서 장점을 갖고 있어, 다중 모드 공진기(multi-mode resonators, MMR), 계단형 임피던스 공진기 (stepped-impedance resonators, SIR), 스텝 연결 공진기 (stub-loaded resonators, SLR) 등의 다양한 형태로 폭 넓게 다중 대역 통신 시스템에 적용되고 있다.

다중 모드 사각 링 공진기를 이용한 이중 대역 필터 [1], 스텝 연결 4중 모드 공진기 (quad-mode resonator, QMR)를 이용한 이중 대역 필터 [2], 개방 스텝 연결 SIR을 이용한 2중/3중/4중 대역 필터 [3], 다중 SLR을 이용한 다중 대역 필터 [4] 등 다양한 구조의 다중 대역 필터가 제안되었다. 접지된 반파장 SIR과 결합선로를 이용한 3중-대역 필터 [5], 3단 SIR을 이용한 3중-대역 필터가 제안되었다 [6]. 비대칭 SIR을 이용한 2중-대역 필터는 중심 주파수와 대역폭을 조절하기 위해 SIR에 스텝 브를 연결하였다 [7]. 이중 모드 SLR 안에 SRR(split ring resonators)를 배치하여 크기를 줄이고 세 번째 대역 주파수를 조정하기 쉬운 3중-대역 필터가 제안되었다 [8]. 첫 번째 및 세 번째 통과 대역의 중심 주파수를 조절할 수 있는 3중-대역 필터를 구성하기 위해 2개의 스텝브가 연결된 공진기가 제안되었으며 [9], 개방 및 단락 스텝브를 사각 링 공진기에 연결하여 저지 대역 감쇄를 개선한 3중-대역 필터가 제안되었다 [10].

본 논문에서는 이중 모드 SIR과 평행 결합선로를 이용하여 높은 대역 격리도와 충분한 저지대역 감쇄 특성을 갖는 소형 3중-대역 대역통과 필터를 제안한다. 대칭적인 구조를 갖고 있어 우모드/기모드 입력 어드미턴스를 구하여 산란행렬을 계산하고, 새로운 구조의 3중-대역 대역통과 필터를 설계, 제작하고자 한다.

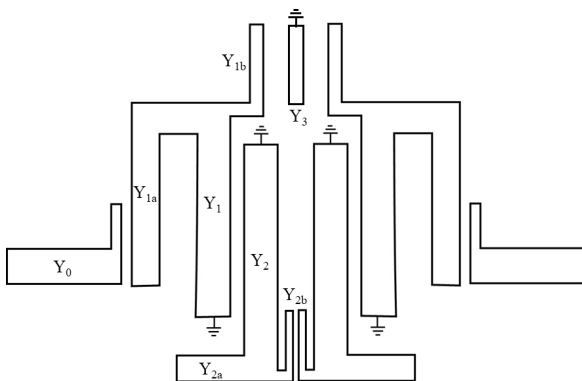


그림 1. 제안된 3중-대역 대역통과 필터
Fig. 1. A proposed tri-band bandpass filter

II. 3중-대역 대역통과 필터의 등가회로 해석

그림 1은 제안된 3중-대역 대역통과 필터이다. 2개의 이중 모드 SIR과 2개의 단일 모드 SIR, 3개의 평행 결합선로, 1개의 3-라인 평행 결합선로로 구성되었고, 각 전송선로의 특성 어드미턴스를 표시하였다. 평행 결합선로 및 3-라인 평행 결합선로의 특성을 우모드/기모드에 대해 해석하기 위해 그림 2와 같이 대칭면을 기준으로 반쪽회로만을 고려하였다.

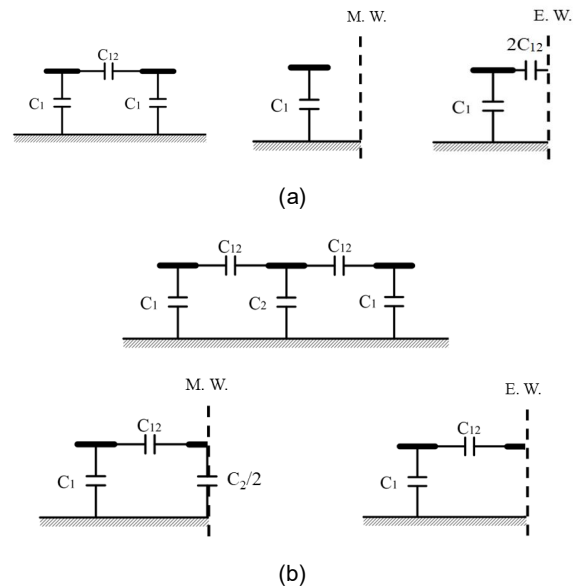


그림 2. 평행 결합선로의 우모드/기모드 구조 (a) 평행 결합선로, (b) 3-라인 평행 결합선로
Fig. 2. Even/odd mode characteristics of parallel coupled lines. (a) parallel coupled lines, (b) triple-line parallel coupled lines

그림 1의 3중-대역 대역통과 필터의 평행 결합선로 사이의 단위 길이 당 선로 커패시턴스를 표시하면 그림 2(a)와 같다. C_i 는 전송선로와 접지사이의 선로 커패시턴스이고 C_{ij} 는 전송선로 사이의 결합을 만들어 주는 선로 커패시턴스다. 각 선로 커패시턴스는 각 전송선로의 특성 어드미턴스에 대응된다.

$$Y_i = v C_i \tag{1}$$

$$Y_{ij} = v C_{ij} \tag{2}$$

여기서 v 는 전송선로상 전자파의 위상속도이다. 따라서 평행 결합선로의 우모드 특성 어드미턴스는 $Y_e = v C_e = v C_1$ 이 되고, 기모드 특성 어드미턴스는 $Y_o = v C_o = v(C_1 + 2C_{12})$ 이 된다. 그림 2(b)의 3-라인 평행 결합선로는 우모드의 경우, C_1 과 $C_2/2$ 로 구성된 평행 결합선로가 되고, 기모드의 경우, 병렬의 C_1 과 C_{12} 를 갖는 단일 전송선로로 등가화시킬 수 있다. 이때, 기모드 단일 전송선로의 특성 어드미턴스는

$$Y' = v(C_1 + C_{12}) = v \frac{C_o + C_e}{2} = \frac{Y_o + Y_e}{2} \tag{3}$$

가 된다. 여기서, Y_e, Y_o 는 C_1 과 C_{12} 로 구성된 평행 결합선로

의 우모드/기모드 특성 어드미턴스이다.

그림 2의 평행 결합선로 해석을 이용하여 제안된 3중-대역 대역통과 필터의 우모드/기모드 등가회로를 그림 3과 같이 구할 수 있다 [11]-[13]. 각 경우의 입력 어드미턴스를 구하면,

$$Y_{in,i} = j\omega C_{01} \frac{Y_{1a}(Y_{1a} - Y_{in1,i} \tan\theta_{1a})(Y_{in1,i} + Y_{1a} \tan\theta_{1a})}{\omega C_{01}(Y_{1a} - Y_{in1,i} \tan\theta_{1a}) + Y_{1a}(Y_{in1,i} + Y_{1a} \tan\theta_{1a})} \quad (4)$$

여기서, 첨자 i 는 우모드의 경우 e 를, 기모드의 경우 o 를 대신 하고, 그림 3의 노드 1에서의 입력 어드미턴스 $Y_{in1,i}$ 는 우모드의 경우,

$$Y_{in1,e} = Y_{cpl} - Y_1 \cot\theta_1 + Y_{12} \frac{(Y_{2a} \tan\theta_{2a} + Y_{2b,e} \tan\theta_{2b} - Y_{2,e} \cot\theta_2) + Y_{12} \tan\theta_{12}}{Y_{12} - (Y_{2a} \tan\theta_{2a} + Y_{2b,e} \tan\theta_{2b} - Y_{2,e} \cot\theta_2) \tan\theta_{12}} \quad (5)$$

$$Y_{cpl} = 2 \left[(Z_{1b,e} + Z_{1b,o}) \cot\theta_{1b} - \frac{(Z_{1b,e} - Z_{1b,o})^2}{(Z_{3,e} + Z_{3,o})} \csc(2\theta_{1b}) \right]^{-1} \quad (6)$$

기모드의 경우,

$$Y_{in1,o} = Y_{1b}' \tan\theta_{1b} - Y_1 \cot\theta_1 + Y_{12} \frac{(Y_{2a} \tan\theta_{2a} + Y_{2b,o} \tan\theta_{2b} - Y_{2,o} \cot\theta_2) + Y_{12} \tan\theta_{12}}{Y_{12} - (Y_{2a} \tan\theta_{2a} + Y_{2b,o} \tan\theta_{2b} - Y_{2,o} \cot\theta_2) \tan\theta_{12}} \quad (7)$$

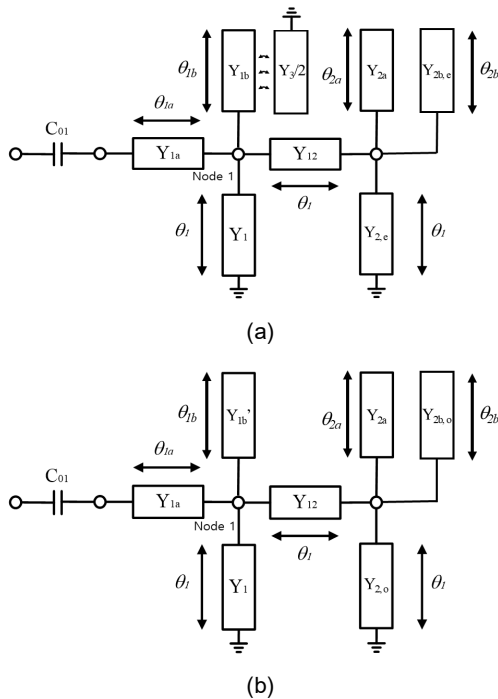


그림 3. 제안된 3중-대역 대역통과 필터의 (a) 우모드 등가회로, (b) 기모드 등가회로

Fig. 3. Equivalent circuits of the proposed tri-band band pass filter. (a) the even mode, (b) the odd mode

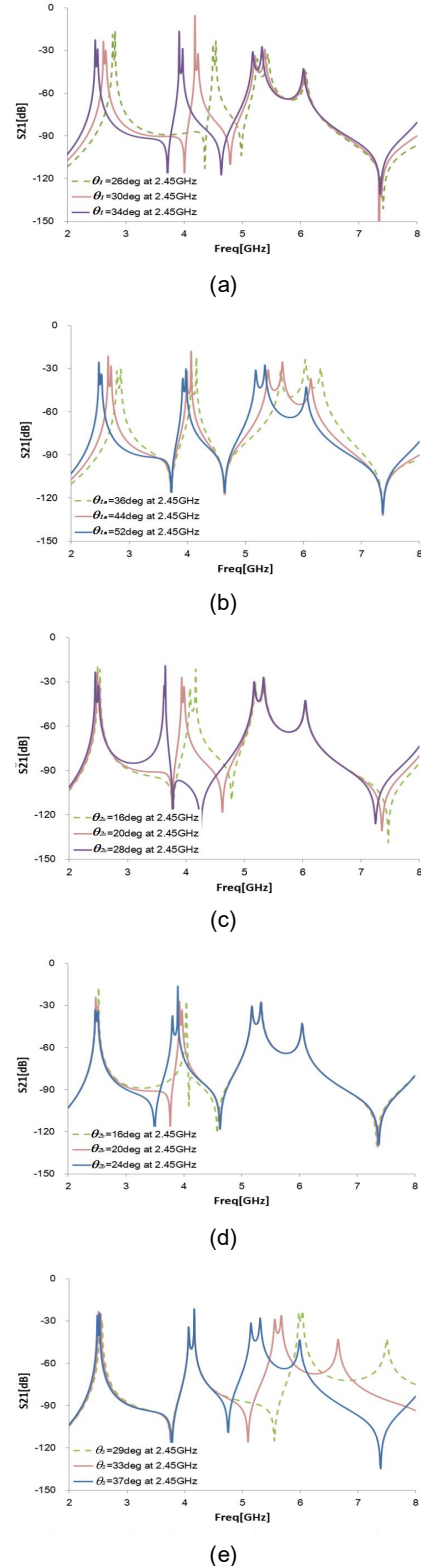


그림 4. 제안된 필터의 공진기 전기적 길이에 따른 공진 특성 (a) θ_1 , (b) θ_{1a} , (c) θ_{2a} , (d) θ_{2b} , (e) θ_3

Fig. 4. Resonant characteristics of the proposed BPF of weak coupling to the resonator electrical length (a) θ_1 , (b) θ_{1a} , (c) θ_{2a} , (d) θ_{2b} , (e) θ_3

가 된다. 여기서,

$$Y_{1b}' = \frac{Y_{1b,o} + Y_{1b,e}}{2} \tag{8}$$

이다. 따라서 제안된 3중-대역 대역통과 필터의 s-파라미터는

$$S_{21} = \frac{(Y_{in,o} + Y_{in,e}) Y_0}{(Y_{in,o} + Y_0)(Y_{in,e} + Y_0)} \tag{9}$$

와 같이 구할 수 있다. Y_0 은 입출력 포트의 특성 어드미턴스이다.

그림 4는 제안된 필터의 공진기의 전기적 길이에 따른 공진 특성을 보여 주고 있다. 그림 4(a)에서는 그림 3의 θ_1 을 변화시킬 때, 1번째 통과대역과 2번째 통과대역 공진 주파수의 변화가 크게 나타나고 있고, 그림 4(b)에서는 θ_{1a} 를 변화시킬 때, 1번째 통과대역과 3번째 통과대역 공진 주파수의 변화가 크게 나타나고 있다. 그림 4(c)는 θ_{2a} 를 변화시킬 때, 2번째 통과대역 공진 주파수의 변화가 크게 나타나는 것을 보여 주고 있고, 그림 4(d)는 θ_{2b} 를 변화시킬 때, 1번째 통과대역과 2번째 통과대역 사이의 감쇠극 주파수의 변화가 크게 나타나는 것을 보여 주고 있다. 그림 4(e)는 $\theta_3 (= \theta_{1b})$ 를 변화시킬 때, 3번째 통과대역 공진 주파수의 변화가 크게 나타나는 것을 보여 주고 있다. 이상의 공진 특성을 통해 1번째 통과대역은 Y_1, Y_{1a} 특성 어드미턴스를 갖는 전송선로에 의해 형성되고, 2번째 통과대역은 Y_2, Y_{2a} 특성 어드미턴스를 갖는 전송선로에 의해 형성되고, 3번째 통과대역은 Y_{1a}, Y_{1b} 특성 어드미턴스를 갖는 전송선로와 Y_3 특성 어드미턴스를 갖는 전송선로에 의해 형성되는 것을 알 수 있다. 따라서 Y_1, Y_{1a}, Y_{1b} 특성 어드미턴스를 갖는 전송선로 구조는 1번째 통과대역과 3번째 통과대역을 형성하는 이중 모드 공진기로 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

III. 3중-대역 대역통과 필터의 설계 및 제작

제안된 이중 모드 SIR과 평행 결합선로를 이용한 3중-대역 대역통과 필터를 설계하였다. 설계된 특성을 확인하기 위하여 비유전율 3.66이고 두께 0.762 mm인 Rogers사의 RO4350 기판을 사용하여 제안된 필터를 제작하였다. 10 GHz에서 기판의 손실 탄젠트 0.004이다. 그림 5는 제작된 이중 모드 SIR과 평행 결합선로를 이용한 3중-대역 대역통과 필터이다. 설계된 각 공진기의 특성임피던스와 전기적 길이를 이용하여 마이크로스트립 구조의 물리적 크기의 초기 값을 구하였고, Ansys사의 HFSS를 이용한 전자기 시뮬레이션을 통해 재설계하였다. 제작된 필터의 물리적 수치는 표 1과 같다. 필터의 전체 크기는 16.25 mm × 15.2 mm 이고 0.2 λ_g × 0.19 λ_g 가 된다. λ_g 는 첫 번째 통과대역 중심 주파수에서의 관내 파장이다. Anritsu사의 37347C 벡터 회로망 분석기를 이용하여 측정하였고, 그림 6은 그 결과를 전자기 시뮬레이션 결과와 비교하여 보여 주고 있다. 2.45 GHz

의 첫 번째 통과대역에서는 2.72 dB의 삽입손실을 얻었고, 3.5 GHz의 두 번째 통과대역에서는 2.28 dB의 삽입손실을 얻었고, 5.75 GHz의 세 번째 통과 대역에서는 2.95 dB의 삽입손실을 얻

표 1. 제안된 3중-대역 대역통과 필터의 물리적 크기

Table 1. Physical dimension of the proposed tri-band band pass filter.

#	l [mm]	w [mm]	g [mm]
1	5.1, 2.0	2.2	0.1
2	4.5	0.5	0.15
3	4.5	1.0	1.2
4	7.0	1.5	0.235
5	11.25	1.25	0.2
6	2.0, 3.0, 3.0	0.5	
7	4.25	1.25	
8	4.0	0.265	
9	7.52	0.2	

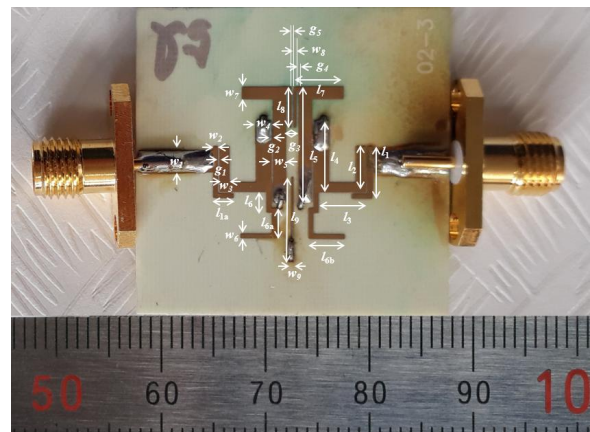


그림 5. 제작된 3중-대역 대역통과 필터
Fig. 5. Fabricated tri-band bandpass filter.

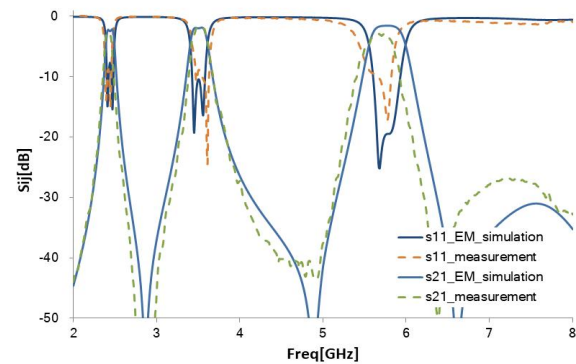


그림 6. 3중-대역 대역통과 필터의 전자기 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 6. EM simulated and measured frequency responses of the proposed tri-band bandpass filter.

표 2. 3중-대역 대역통과 필터의 특성 비교
Table 2. Comparison of tri-band bandpass filters.

Ref.	[8]	[9]	[10]	[14]	[15]	본 논문
Center Freq. [GHz]	1.575 2.4 3.45	1.85 3 4.1	2.4 3.5 5.2	1.57 2.45 3.5	4.17 6.14 14.44	2.45 3.5 5.75
Fractional BW [%]	10 5 11	8.3 11.2 7.3	6.3 4.4 5.9	4.3 9.1 8.9	5.3 8.6 2.1	2.9 4 4.9
Isolation [dB]	>40 >35	>45 >35	>35 >55	>35 >42	>5 >15	>50 >42
Insertion Loss [dB]	0.7 1.14 0.3	1.9 1.4 1.7	1.2 1.8 1.5	1.86 0.98 1.49	2.1 1.35 4.08	2.72, 2.28, 2.95
Size [λ_g^2]	0.44 x 0.56	0.21 x 0.14	0.29 x 0.17	0.42 x 0.2	0.5 x 0.17	0.2 x 0.19

을 수 있었다. 삽입손실이 시뮬레이션 결과 보다 크게 나온 것은 시뮬레이션에서는 고려되지 않은 커넥터 손실의 영향으로 판단된다. 첫 번째 중간대역에서는 최대 50dB 이상, 두 번째 중간대역에서는 최대 42dB 이상의 대역 격리도를 가져 설계 결과와 잘 일치하는 특성을 보여 주고 있다. 표 2는 제안된 3중-대역 대역통과 필터의 특성을 기존의 3중-대역 대역통과 필터 특성과 비교한 것이다. 본 논문의 필터는 높은 대역 격리도를 보여 주고 있고, 다른 3중-대역 대역통과 필터 보다 작은 크기로 설계되었다.

IV. 결론

무선/이동 통신 시스템의 통신 트래픽의 증가에 대응하기 위해 다중 대역 서비스가 요구되고 있어, RF front-end 단의 다중 대역 필터는 중요하고 필수적인 부품이 되고 있다. 이러한 요구를 수용하기 위하여 이중 모드 SIR과 평행 결합선로를 이용한 새로운 소형 3중-대역 대역통과 필터를 설계, 제작하였다. 이중 모드 SIR과 평행 결합선로의 구조를 해석하여 우/기모드 입력 임피던스와 산란 파라미터를 유도하고, 개방형 스테르브를 갖는 U-자형 SIR이 이중 모드 공진기로 동작함을 확인하였다. 첫 번째 중간대역에서 대역 격리도를 높이기 위하여 중앙의 평행 결합선로 사이에 기생의 평행 결합선로를 만들어 50 dB 이상의 대역 격리도를 얻었다. 제작된 필터는 $0.2 \times 0.19 \lambda_g^2$ 의 작은 크기를 갖고, 높은 대역 격리도 갖는 설계 결과와 잘 일치하는 측정 결과를 보여 주었다.

Acknowledgments

본 연구는 한경대학교 2022년도 학술연구조성비의 지원에 의한 것임.

References

- [1] H. Liu, B. Ren, X. Guan, J. Lei, and S. Li, “Compact dual-band bandpass filter using quadruple-mode square ring loaded resonator (SRLR),” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 23, No. 4, pp. 181-183, April. 2013.
- [2] S. J. Sun, T. Su, K. Deng, and B. Wu, “Compact microstrip dual-band bandpass filter using a novel stub-loaded quad-mode resonator,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 23, No. 9, pp. 465-467, Sep. 2013.
- [3] J. Xu, W. Wu, and C. Miao, “Compact microstrip dual-/tri-/quad-band bandpass filter using open stubs loaded shorted stepped-impedance resonator,” *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 61, No. 9, pp. 3187-3199, Sep. 2013.
- [4] L. Gao, X. Y. Zhang, B. J. Hu, and Q. Xue, “Novel multi-stub loaded resonators and their applications to various bandpass filters,” *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 62, No. 5, pp. 1162-1172, May 2014.
- [5] Y. Mo, K. Song, and Y. Fan, “Miniaturized triple-band bandpass filter using coupled lines and grounded stepped impedance resonators,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 24, No. 5, pp. 333-335, May 2014.
- [6] R. Ghatak, M. Pal, P. Sarkar, A. K. Aditya, and D. R. Poddar, “Tri-band bandpass filters using modified tri-section stepped impedance resonator with improved selectivity and wide upper stopband,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 7, Iss. 15, pp. 1187-1193, 2013.
- [7] C.-Y. Hsu, C.-Y. Chen, and H.-R. Chuang “Shunted-line stepped-impedance resonator,” *IEEE Microwave magazine*, Vol. 13, Iss. 5, pp. 34-48, July-Aug. 2012.
- [8] M. U. Rahman, D.-S. Ko, and J.-D. Park, “A compact tri-band bandpass filter utilizing double mode resonator with 6 transmission zeros,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 60, Iss. 7, pp. 1767-1771, 2018.
- [9] J.-X. Xu, L. Gao, J. Xiang, and Q. Xue. “Compact tri-band bandpass filter with controllable frequencies,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 58, Iss. 3, pp. 573-577, 2016.
- [10] L. Liu, X. Liang, R. Jin, X. Bai, H. Fan, and J. Geng, “A compact and high-selectivity triband bandpass filter based on symmetrical stub-loaded square ring resonator,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 62, Iss. 2,

pp. 1-7, 2020.

- [11] G. Sung, "Design of compact UWB bandpass filter with improved out-of-band performance using distributed CRLH transmission lines," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 338-343, 2015.
- [12] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2012.
- [13] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Dedham, MA, Artech House, 1980.

- [14] L. Chen, J. Y. Peng, M. Wang, T. T. Zhang, and F. Wei, "Compact balanced tri-band bandpass filter based on stub loaded resonator with high selectivity," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 31, Iss. 12, 2021: e22911.
- [15] O. C. Massamba, P. M. Mpele, F. M. Mbango, and D. Lilonga-Boyenga, "Tri-Band Bandpass Filter Using Mixed Short/Open Circuited Stubs and Q-Factor with Controllable Bandwidth for WAS, ISM, and 5G Applications," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 119, pp. 177-190, 2022.



성 규 제 (Gyuje Sung)

1986년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사),
1988년 2월 ~ 1993년 7월 : 국방과학연구소 연구원,
1998년 3월 ~ 현재 : 한경대학교 전자전기공학부 교수
※ 관심분야 : RF 및 Microwave 필드해석 및 회로 설계

1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학박사)



김 영 (Young Kim)

1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사),
1988년 1월 ~ 1993년 5월 : 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원, 1993년 6월 ~ 1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원
1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수 2002년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
2003년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계