J. Microelectron. Packag. Soc., 28(2), 39-44 (2021) https://doi.org/10.6117/kmeps.2021.28.2.039
Print ISSN 1226-9360 Online ISSN 2287-7525

밀리미터파 대역에서 액정 폴리머(Liquid Crystal Polymer) 기판을 이용한 대역통과필터 비교

오연정 · 이재영 · 최세환†

한국전자기술연구원 ICT · 디바이스패키징연구센터

Comparison of Band Pass Filter Performance Using Liquid Crystal Polymer Substrate in Millimeter-Wave Band

Yeonjeong Oh, Jaeyoung Lee, and Sehwan Choi†

ICT · device packaging Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI), Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea

(Received April 19, 2021: Corrected May 11, 2021: Accepted May 17, 2021)

초 록: 본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 헤어핀 타입과 인터디지털 타입 두 종류의 대역통과필터(BPF)를 LCP(Liquid Crystal Polymer)와 PTFE(Polytetrafluoroethylene) 두 종류의 기판을 이용하여 설계 하고 성능을 비교하였다. 제안된 BPF의 통과 대역은 26.5 GHz~27.3 GHz 대역이며, 필터의 차수는 3차로 선택하였다. 제안된 BPF의 성능 비교는 기판 종류와 타입에 따른 대역폭(Bandwidth)과 통과 대역 내 삽입손실(Insertion Loss)과 평탄도(in-band Flatness) 등을 비교하였다. S21이 -3 dB가 되는 대역폭을 비교하였을 때 제안된 4 개의 BPF 중 PTFE 기판에 설계된 인터디지털 타입이 7.8 GHz로 가장 넓게 설계되었으며, LCP 기판에 설계된 헤어핀 타입 BPF가 4.2 GHz로 가장 협소한 대역폭을 가지는 것으로 나타났다. 통과 대역 내 삽입손실은 PTFE 기판에 설계된 헤어핀 타입 BPF가 -0.667 dB 이상으로 가장 우수하고 LCP 기판에 설계된 헤어핀 타입 BPF가 -0.937 dB 이상으로 가장 낮았으나, 0.27 dB의 근소한 차이임을 확인했다. 통과 대역 내 평탄도의 경우 PTFE 기판에 설계된 인터디지털 타입 BPF가 0.017 dB로 가장 우수하였고, LCP 기판에 제작된 헤어핀 타입이 0.07 dB로 가장 낮았으나 0.053 dB의 근소한 차이였다. 따라서, 밀리미터파 대역에서 LCP 기판을 이용한 대역통과 필터는 PTFE 기판을 이용한 대역통과필터와 비슷한 성능을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract: In this paper, two types of BPF(Band Pass Filter) which are hair-pin and interdigital have been designed for millimeter-wave application using two types of material which are LCP(Liquid Crystal Polymer) and PTFE(Polytetrafluoroethylene) and also, their performances such as bandwidth, insertion loss, and in-band flatness are compared. The proposed BPF are designed as third-order filters, and their pass band is from 26.5 GHz to 27.3 GHz. Interdigital BPF using PTFE substrate has most wide -3 dB S21 bandwidth of 7.8 GHz and hair-pin BPF using LCP substrate has most narrow -3 dB S21 bandwidth among the proposed four BPF. For in-band insertion loss, hair-pin BPF using PTFE substrate achieves low insertion loss better than -0.667 dB, and hair-pin BPF using LCP substrate exhibits relatively high insertion loss among the proposed four BPF better than -0.937 dB. However, the maximum difference in insertion loss performance among the proposed four BPF is 0.27 dB, which is too small to negligible. For in-band flatness, interdigital BPF using PTFE substrate shows greatest performance of 0.017 dB, and hair-pin BPF using LCP substrate exhibits the lowest performance of 0.07 dB. There are tiny difference in in-band flatness performance of 0.053 dB. As a results, it is considered that the BPF using LCP substrate can derive the performances similar to that of the BPF using PTFE substrate in Millimeter-wave band.

Keywords: BPF, LCP, PTFE, Millimeter-wave

†Corresponding author
E-mail: shchoi@keti.re.kr

© 2021, The Korean Microelectronics and Packaging Society
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.

1. 서 론

IoT(Internet of Things), AR(Augmented Reality), 자율주행 등 다양한 분야의 발전으로 인해 데이터 트래픽의 양이 폭발적으로 증가하였다. 이에 대응하기 위해 기존 LTE-A 대비 data capacity, throughput, data rate 등의 통신 성능이 향상된 5G 밀리미터파 대역 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 5G 밀리미터파 대역은 24.25 GHz ~ 29.5 GHz의 대역과 37 GHz ~ 40 GHz의 대역으로 구성되며,[1] 24 GHz와 35 GHz 대역과 같이 차량용 레이더와 군용으로 사용하는 대역과 인접하기 때문에 해당 대역에 대한 신호 차단이 필요하다. 따라서, 통과 대역 이외의 불필요한 신호를 제거해주는 RF 필터 등의 소자가 필요하다. 특히 5G 밀리미터파 대역의 BPF의 경우, 고주파 대역에서 표피효과로 인해 도체 손실이 더욱 커지는 현상이 발생하기 때문에 삽입손실 특성이 중요하다.[2]

기존에 RF 회로에 많이 사용되는 epoxy 기반의 FR-4나 PI(Polymide) 소재는 높은 흡습율로 인한 손실이 커 밀리미터파 대역에서 부적합하다.[3,4] 따라서, 밀리미터파 대역 RF 부품 및 회로 구현에 있어 저 손실 특성과 제작이 용이한 특성을 가지는 기판의 선택이 중요하다.

LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramics), PTFE(Polytetrafluoroethylene)등의 소재는 저 손실 특성으로 인해 밀리미터파 대역에서의 활용을 위해 연구가 진행되고 있다. LTCC는 부품 소형화에 장점이 있고[5] 적층 구조에 용이하나, 공정 시 수축률에 따른 정밀도 저하와 대량생산의 어려움 등의 단점이 있어 널리 이용되진 못하고 있다. PTFE는 우수한 성능을 가졌으나 적층 가공의 한계와 비용이 높은 단점이 있다.[6]

또 다른 밀리미터파 대역 소재로 LCP에 대한 관심이 높아지고 있다. LCP는 전기적으로 안정된 특성을 가지는데, 110 GHz에 이르는 넓은 주파수 범위 내에서 3 이내의 유전율과 0.004 이내의 낮은 손실 탄젠트값을 가진다[7]. 또한, LCP의 열팽창 계수(CTE)는 17 ppm/°C로 Cu의 열팽창 계수와 거의 동일하여 공정 진행 시 변형이 잘 안 일어나, 타 재료에 비해 치수 안정성이 높다. 또한, 별도의 접착층 없이 LCP만으로 적층이 가능하여 제작이 용이한 장점이 있어 밀리미터파 대역과 테라헤르츠 대역에서 많이 적용되고 있다.[6,8] 그러나 밀리미터파 대역에서 많이 이용되고 있는 PTFE 소재와 LCP를 이용한 RF 필터 성능 비교 연구는 미비한 상태이다.

본 논문에서는 밀리미터파 26.5 GHz ~ 27.3 GHz 대역 통과, 평탄도 0.5 dB 이내, 삽입손실 -1 dB 이내의 특성을 갖는 헤어핀 타입과 인터디지털 타입의 BPF를 PTFE과 LCP 두 기판에 설계하고, 기판 종류와 필터 타입에 따른 대역폭, 삽입손실(Insertion Loss)과 삽입손실의 평탄도(Flatness) 등의 BPF 성능을 비교한다.

2. 본 론

2.1 BPF 설계 결과

본 논문에서는 LCP와 PTFE 두 기판을 이용하여 중심주파수 26.9 GHz에서 동작하는 3차 헤어핀 타입과 인터디지털 타입의 BPF을 설계하였다. 소형화된 필터를 구현하기 위한 방법 중에는 고 유전율 특성을 가지는 기판을 사용하는 방법이 있다.[9] 마이크로스트립 선로를 이용한 필터의 종류로 Parallel coupled line 타입이 있는데, 크기가 커지는 단점이 있다.[10] 이러한 단점을 보완한 마이크로스트립 필터로 인터디지털 BPF와 헤어핀 BPF가 있다. 인터디지털 BPF는 한 쪽은 오픈되고 반대편은 비아홀을 통해 그라운드면에 접지된 λ/4 공진기를 이용한다. 소형화와 더불어 공진기 사이 간격이 상대적으로 넓어 제작 시 오차가 적은 장점이 있다.[11] 헤어핀 BPF는 λ/2 오픈 공진기를 U자 모양으로 접어 병렬 결합한 형태로, 인터디지털 타입과 마찬가지로 소형화가 가능하다.[12]

본 논문에서 사용된 LCP 기판의 유전율은 2.9이고 손실 탄젠트는 0.0025이다. Fig. 1은 본 논문에서 사용된 4층 LCP 단면을 보여준다. 각 50 μm의 높이를 가지는 3개의 LCP 층을 적층하여 기판 전체 150 μm의 높이를 가진다. 본 논문에서 사용된 PTFE 기판의 유전율은 2.2, 손실 탄젠트는 0.0009이며 기판의 높이는 0.254 mm(10mil)이다. 제안된 네 개의 BPF는 측정을 위해 커넥터 패드(그라운드면)을 입력과 출력 포트에 추가 하였으며, 비아홀을 이용해 그라운드면과 연결하여 BPF 성능에 미치는 영향을 최소화 하였다. Fig. 2는 본 논문에서 사용된 비아홀 구조를 보여준다. PTFE 기판의 비아홀과 달리, LCP 기판은 지름 250 μm의 비아 패드가 필요하다. 커넥터 패드의

		Layer	Thickness [μm]
Top	1L	Cu	19
		LCP	50
		LCP	50
		LCP	50
Bottom	1L	Cu	19

Fig. 1. Structure of 4-layer LCP substrate.

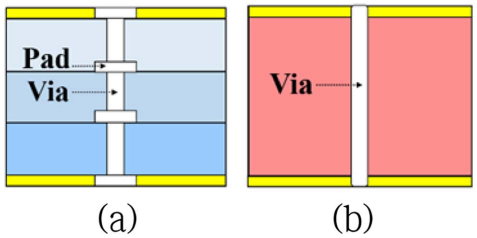

Fig. 2. Structure of via hole. (a) LCP substrate. (b) PTFE substrate.

비아홀은 지름 100 μm로 설계 되었으며, 인터디지털 타입 BPF의 그라운드면 접지를 위해 사용된 비아홀은 지름 150 μm로 설계 되었다. PTFE 기판은 커넥터 패드와 인터디지털 타입 BPF의 그라운드면 접지용 비아홀 모두 200 μm로 설계 되었다.

Fig. 3~5는 LCP 기판과 PTFE 기판을 사용하여 제안된 BPF의 구조와 제작된 사진을 보여준다. 제작된 BPF는 PCB 공정 상 제작 가능한 최소 도체 간격(PTFE 기판: 100 μm, LCP 기판: 50 μm)을 기준으로 최적화를 진행하였다. 제안된 BPF의 설계 파라미터와 크기는 Table 1~5에

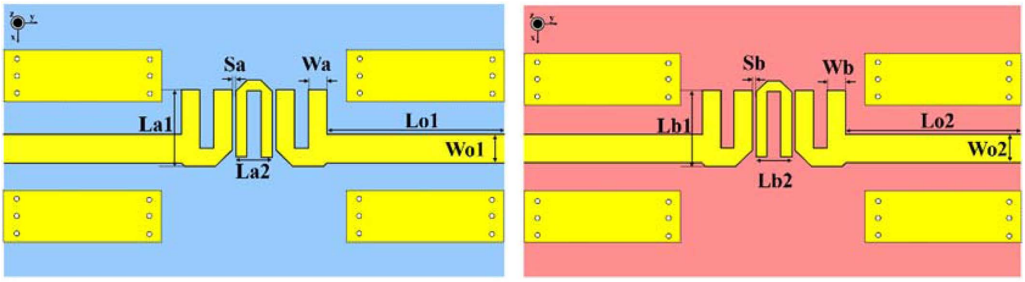

Fig. 3. Geometry of the proposed hair-pin BPF. (a) Using LCP substrate. (b) Using PTFE substrate.

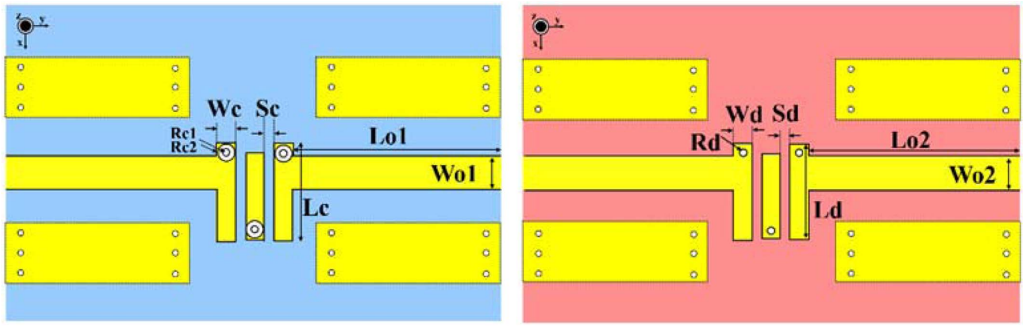

Fig. 4. Geometry of the proposed interdigital BPF. (a) Using LCP substrate. (b) Using PTFE substrate.

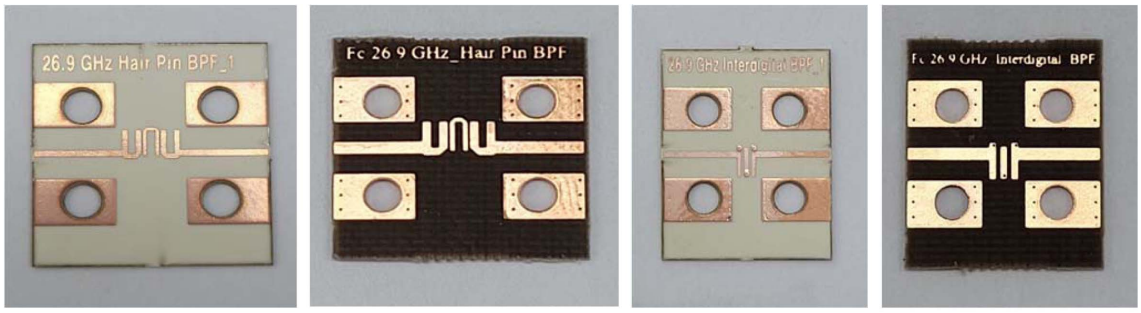

Fig. 5. Photograph of the fabricated BPF. (a) Hair-pin BPF using LCP substrate. (b) Hair-pin BPF using PTFE substrate. (c) Interdigital BPF using LCP substrate. (d) Interdigital BPF using PTFE substrate.

Table 1. Design parameters of the proposed hair-pin BPF using LCP substrate [mm]

L01	W01	La1	La2	Wa	Sa
5.02	0.38	1.78	0.9	0.3	0.1

Table 2. Design parameters of the proposed hair-pin BPF using PTFE substrate [mm]

L02	W02	Lb1	Lb2	Wb	Sb
5.02	0.78	2.12	1	0.5	0.1

Table 3. Design parameters of the proposed interdigital BPF using LCP substrate [mm]

L01	W01	Lc	Wc	Sc	Rc1	Rc2
5.02	0.38	2.1	0.25	0.2	0.15	0.25

Table 4. Design parameters of the proposed interdigital BPF using PTFE substrate [mm]

L02	W02	Ld	Wd	Sd	Rd
5.02	0.78	2.25	0.45	0.22	0.2

Table 5. Dimensions of the proposed BPF using LCP and PTFE substrate [mm]

LCP		PTFE	
Hair-pin	Interdigital	Hair-pin	Interdigital
13.24×13.89×0.15	11.24×14×0.15	14.04×13.89×0.254	11.8×13.89×0.254

정리하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 LCP 기판과 PTFE 기판을 사용하여 제안된 헤어핀 BPF의 산란 파라미터의 모의실험 및 측정 결과를 나타내며, 모의실험 결과와 측정 결과는 각각 점선과 실선으로 표기하였다. LCP 기판의 경우, 4.2 GHz (24.5 GHz ~ 28.7 GHz)의 대역폭을 가진다. 통과 대역 내 삽입손실은 최소 -0.867 dB와 최대 -0.937 dB로 확인 되었으며, 0.07 dB의 평탄도를 가진다. PTFE 기판의 경우, 5.6 GHz (23.5 GHz ~ 29.1 GHz)의 대역폭을 가진다. 통과 대역 내 삽입손실은 최소 -0.639 dB와 최대 -0.667 dB로 나타났으며, 0.028 dB의 평탄도를 가진다.

LCP 기판과 PTFE 기판에 제안된 헤어핀 BPF의 모의실험 결과를 비교했을 때, PTFE 기판이 LCP 기판보다 1.4 GHz 더 넓은 대역폭을 가지는 것으로 나타났다. PTFE 기판에 제안된 헤어핀 BPF가 LCP 기판에 제안된 헤어핀 BPF의 삽입손실에 비해 최소 0.228 dB에서 최대 0.27 dB, 평탄도는 0.042 dB 높았다. 따라서, 헤어핀 BPF의 경우 PTFE 기판에 설계된 경우가 LCP 기판에 설계된 경우에 비해 우수한 특성을 가지지만, 그 차이는 근소한 수치임을 확인하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 LCP 기판과 PTFE 기판을 사용하여 제안된 인터디지털 BPF의 산란 파라미터 모의실험 및 측정 결과를 나타내며, 모의실험 결과와 측정 결과는 각각 점선과 실선으로 표기하였다. LCP 기판의 경우 6.02 GHz (23.86 GHz ~ 29.88 GHz)의 대역폭을 가지며, 통과 대역 내 최소 -0.843 dB 최대 -0.866 dB의 삽입손실을, 0.023 dB의 평탄도를 가진다. PTFE 기판에 제작된 경우 대역폭은 7.8 GHz (23.48 GHz ~ 30.1 GHz)로 확인되었다. 통과 대역 내 삽입손실은 최소 -0.703 dB와 최대 -0.720 dB이며, 0.017 dB의 평탄도를 가진다.

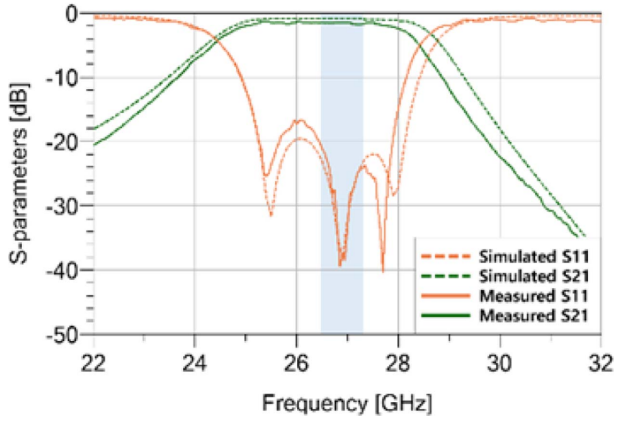

Fig. 6. Simulated and measured S-parameters of the proposed hair-pin BPF using LCP substrate.

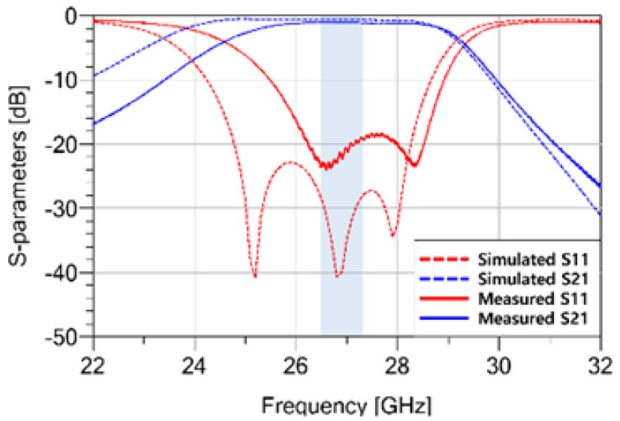

Fig. 7. Simulated and measured S-parameters of the proposed hair-pin BPF using PTFE substrate.

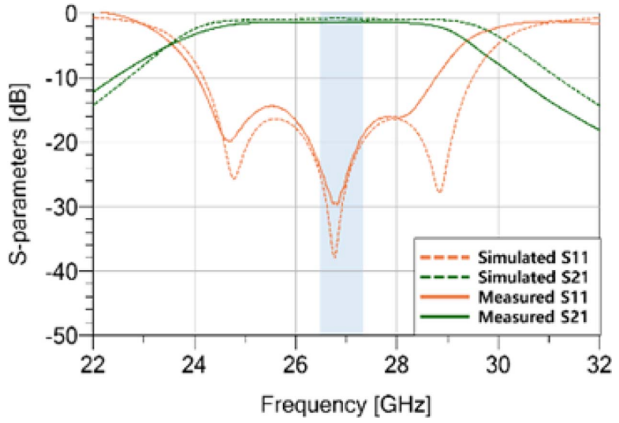

Fig. 8. Simulated and measured S-parameters of the proposed interdigital BPF using LCP substrate.

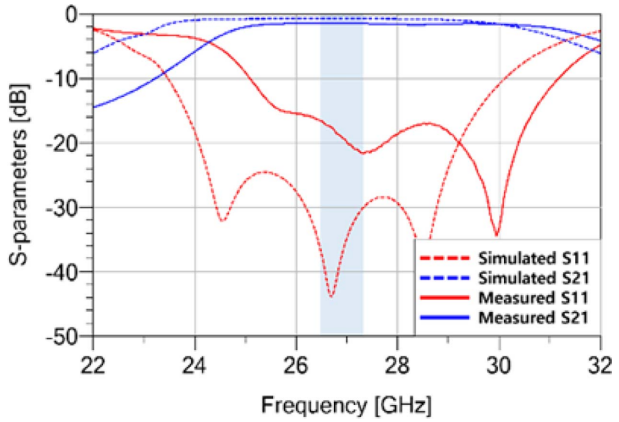

Fig. 9. Simulated and measured S-parameters of the proposed interdigital BPF using PTFE substrate.

헤어핀 BPF와 동일하게 인터디지털 BPF도 LCP 기판에 설계된 경우보다 PTFE 기판에 설계된 경우가 더 우수한 성능을 나타내었다. 삽입손실은 최소 0.14 dB에서 최대 0.146 dB, 평탄도는 0.006 dB 차이가 났다. PTFE 기판과 LCP 기판에 설계된 경우의 삽입손실과 평탄도 성능은 거의 비슷한 수준임을 알 수 있다. 대역폭은 1.78 GHz 차이가 났다. 두 기판에 설계된 경우 모두 헤어핀 타입에 비해 인터디지털 타입이 더 넓은 대역폭 특성을 나타내었고, 기판 소재에 따른 대역폭 차이는 인터디지털 타입이 약간 더 큰 것을 알 수 있다.

2.2 BPF 측정 결과

측정을 위해 Southwest사의 K-타입 커넥터가 사용되었다.[13] LCP 기판에 제작된 헤어핀 BPF 측정 결과 3.5 GHz (24.7 GHz ~ 28.2 GHz)의 대역폭을 가지는 것으로 측정되었으며, Fig. 6에 실선으로 표시되었다. 측정된 통과 대역 내 삽입손실은 최소 -1.414 dB, 최대 -1.8 dB로 나타났으며, 0.386 dB의 평탄도를 가지는 것을 확인하였다. PTFE 기판에 제작된 헤어핀 BPF는 4.2 GHz (24.9 GHz ~ 29.1 GHz)의 대역폭을 가지는 것으로 측정되었으며, Fig. 7에 실선으로 표시되었다. 측정된 통과 대역 내 삽입손실은 최소 -1.081 dB, 최대 -1.147 dB로 나타났으며, 0.066 dB의 평탄도를 갖는 것을 확인하였다. LCP 기판에 제작된 헤어핀 BPF의 경우, 대역폭 특성의 측정 결과와 모의실험 결과 사이 오차가 700 MHz 발생하였는데, 이는 제작된 네 종류의 BPF 중 가장 작은 수치의 오차였다. 삽입손실의 경우 모의실험 결과에 비해 측정 결과가 최소 0.547 dB 최대 0.863 dB로 낮은 것으로 측정되었다. 평탄도의 모의실험과 측정 결과 사이 0.316 dB의 오차가 발생하였는데, 이는 제작된 네 종류의 BPF 중 가장 큰 수치의 오차였다. PTFE 기판에 제작된 헤어핀 BPF는 측정된 대역폭이 모의실험 결과에 비해 1.4 GHz 감소했는데, 이는 LCP 기판에 제작된 헤어핀 BPF 대역폭의 모의실험 결과와 측정 결과 사이 700 MHz 차이가 나는 것에 비해 더 큰 차이이다. 반면, PTFE 기판에 제작된 헤어핀 BPF 삽입손실의 모의실험과 측정 결과 사이 오차는 최소 0.442 dB 최대 0.48 dB로, LCP 기판에 제작된 경우에 비해 더 작은 오차가 발생하였다. 평탄도의 경우 측정 결과와 모의실험 결과 사이 오차가 0.038 dB로 모의실험 결과와 거의 유사한 수준이었으며, LCP 기판에 제작된 경우보다 더 좋은 성능을 보였다.

LCP 기판에 제작된 인터디지털 BPF의 측정된 대역폭은 Fig. 8에 실선으로 표시되었으며, 5.01 GHz (24.11 GHz ~ 29.12 GHz) 대역폭을 가지는 것으로 나타났다. 통과 대역 내 삽입손실은 최소 -1.275 dB 최대 -1.444 dB로 평탄도는 0.169 dB로 측정되었다. PTFE 기판에 제작된 인터디지털 BPF는 6.9 GHz (24.61 GHz ~ 31.51 GHz) 대역폭을 가지는 것으로 측정되었으며, Fig. 9에 실선으로 표시되었다. 통과 대역 내 삽입손실은 최소 -1.442 dB 최대 -1.483 dB, 평탄도는 0.041 dB로 측정되었다.

LCP 기판에 제작된 인터디지털 BPF는 측정된 대역폭이 모의실험 결과에 비해 1.1 GHz 감소하였다. 측정된 통과 대역 내 삽입손실은 모의실험 결과에 비해 최소 0.432 dB 최대 0.578 dB 감소하였다. 평탄도의 경우 모의실험과 측정 결과 사이 오차는 0.146 dB로 나타났다. PTFE 기판에 제작된 인터디지털 BPF는 모의실험 결과에 비해 대역폭이 900 MHz 감소하였는데, 이는 LCP 기판에 제작된 인터디지털 BPF 대역폭의 모의실험과 측정 결과 사이 오차와 비슷한 수준이었다. 측정된 통과 대역 내 삽입손실은 모의실험 결과에 비해 최소 0.739 dB 최대 0.763 dB 낮은 것으로 측정되었다. 평탄도의 경우 모의실험과 측정 결과 사이 오차가 0.024 dB 차이로 거의 비슷한 수준으로 나타났다.

통과 대역 내 최대 삽입손실을 기준으로 삼았을 때, PTFE 기판에 제작된 헤어핀 BPF의 모의실험과 측정 결과 사이 오차가 가장 적었으며, LCP 기판에 제작된 인터디지털 BPF, PTFE 기판에 제작된 인터디지털 BPF, LCP 기판에 제작된 헤어핀 BPF 순으로 오차가 컸다. 제작된 네 종류의 삽입손실 오차는 최소 0.442 dB에서 0.863 dB로 나타났다. 평탄도의 경우 모의실험과 측정 결과 사이 오차가 가장 작은 BPF는 PTFE 기판에 제작된 인터디지털 BPF였고, 그 다음으로 PTFE 기판에 제작된 헤어핀 타

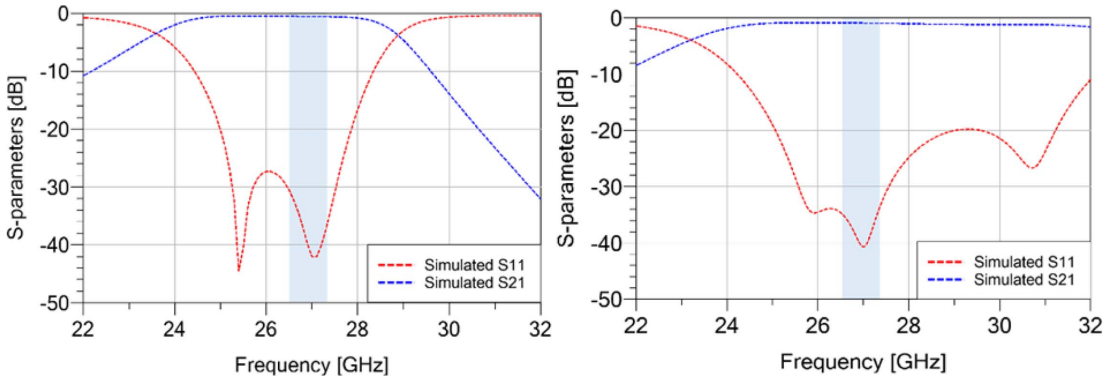

Fig. 10. Simulated S-parameters of the BPF according to the measured dimension size of fabricated one. (a) Hair-pin BPF using PTFE substrate. (b) Interdigital BPF using PTFE substrate.

입 BPF, LCP 기판에 제작된 인터디지털 BPF, LCP 기판에 제작된 헤어핀 BPF 순이었다. PTFE 기판에 제작된 두 종류의 BPF 모두 모의실험과 측정 결과 사이 0.005 dB 이내의 매우 적은 오차가 있었다. 삽입손실과 평탄도 모의실험과 측정 결과 사이 오차 및 성능의 열화는 K-타입 커넥터 연결에 의한 영향으로 보인다. 네 가지 BPF 모두 측정 결과가 모의실험 결과에 비해 대역폭과 삽입손실 성능의 열화가 있었다. PTFE 기판에 제작된 BPF의 측정 결과 공진 주파수가 이동하였다.

모의실험과 측정 결과 사이의 오차를 분석하기 위해 PTFE 기판에 제작된 헤어핀 타입과 인터디지털 타입 BPF의 치수를 측정하고 설계 파라미터와 비교하였다. PTFE 기판에 제작된 헤어핀 타입과 인터디지털 타입 BPF는 패턴 선 폭과 길이는 설계 파라미터보다 좁고 짧게 가공되었으며, 패턴과 패턴 사이 간격은 넓게 제작된 것을 확인하였다. Fig. 10은 제작된 BPF의 치수 오차를 반영하여 모의실험한 결과이다. PTFE 기판에 제작된 헤어핀 BPF의 모의실험 결과, 측정 결과와 유사하게 2개의 공진이 나타났다. 치수 오차를 반영해 PTFE 기판에 제작된 인터디지털 BPF의 모의 실험한 결과 25.9 GHz, 26.98 GHz, 30.72 GHz의 세 주파수에서 공진이 나타났다. 이는 측정 결과에서 25.72 GHz, 27.36 GHz, 29.96 GHz의 세 주파수 대역에서 공진이 발생한 것과 유사함을 알 수 있다. 따라서 제작 시 발생한 치수 오차를 고려했을 때, 모의실험과 측정 결과 사이 오차는 작은 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 헤어핀 타입과 인터디지털 타입 두 종류의 BPF를 LCP와 PTFE 두 종류의 기판을 이용하여 설계, 제작하고 성능을 비교하였다. 기판 소재에 따른 성능은 PTFE 기판에 설계한 BPF가 LCP에 제작한 BPF보다 대역폭, 삽입손실, 평탄도의 성능이 우수하나, 그 차이는 근소한 것을 확인하였다. 최근 PTFE 기판을 접착층을 이용하여 다층기판으로 만들거나, FR-4기판과 적층하여 밀리미터파 대역 회로 구성을 많이 하고 있으나, 손실이 큰 접착층으로 인해 시뮬레이션을 통한 성능 예측이 어렵고, 손실이 커지는 단점이 있다. LCP 소재의 경우, LCP 접착층을 이용하여 현재 국내 기술로 4층의 동일한 LCP 소재로 이뤄진 4층 기판을 형성할 수 있기 때문에, 내부의 2층과 3층 레이어를 활용하여 공진부를 설계하면, 별도의 삽입손실 없이 BPF를 소형화 가능할 것으로 예측되며, 이를 위한 연구를 진행할 것이다. 또한, 밀리미터파 대역에서 LCP 기판 소재는 PTFE 등의 저손실 PCB 기판 소재를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. 3GPP, http://www.3gpp.org
2. G. Shen, W. Che, W. Feng, Y. Shi and Y. Shen, “Low Insertion-Loss MMIC Bandpass Filter Using Lumped-Distributed Parameters for 5G Millimeter-Wave Application”, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 11(1), (2021).
3. Y. ji, Y. Bai, X. Liu and K. Jia, “Progress of liquid crystal polyester (LCP) for 5G application”, Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, (2020).
4. R. Hosono, Y. Uemichi, Y. Hasegawa, Y. Nakatani, K. Kobayashi and N. Guan, “Development of millimeter-wave devices based on liquid crystal polymer (LCP) substrate”, IEICE Electronics Express, 14(20), (2017).
5. Y. S. Lee, H. S. Song and J. C. Park, “A 2012 Size Multilayer LTCC BPF for 2.4 GHz Band”, J. Microelectron. Packag. Soc., 10(1), 19, (2003)
6. S. H. Choi, J. I. Ryu, J. Y. Lee, J. Y. Lee, and B. Ch. Nam, “Transmit-receive Moudle for Ka-band seekers using Multilayered Liquid Crystal Polymer Substrates”, Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, 20(5), (2020).
7. D. C. Thompson, O. Tantot , H. Jallageas, G. E. Ponchak, M. M. Tentzeris, J. Papapolymerou, “Characterization of liquid crystal polymer (LCP) material and transmission lines on LCP substrates from 30 to 110 GHz”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques”, 52(4), (2004).
8. J. Y. Lee, J. I. Ryu, S. H. Choi, and J. Y. Lee, “Implementation of Capacitor and Inductor applied LCP substrate for 35-GHz frequency band”, J. Microelectron. Packag. Soc., 27(4), 1, (2020).
9. J. N. Yoon, H. J. Lee, Y. B. Oh, and C. W. Lee, “The Study of 5.8 GHz Thin BPF Design”, Proceedings of the International Microelectronics and Packaging Society Conference, (2003).
10. B. Adli, R. Mardiati, and Y. Y. Maulana. “Design of Microstrip Hairpin Bandpass Filter for X-Band Radar Navigation”, 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), (2018).
11. N. D. Indira, K. Nalini, and H. Khan, “Design of interdigital bandpass filter”, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2(4), (2013).
12. M. Ali, F. Liu, A. Watanabe, and P. M. Raj, “Miniaturized high-performance filters for 5G small-cell applications”, 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference, (2018).
13. Southwest, Southwest. Inc. May(2021) (from https://mpd.southwestmicrowave.com/