

고조파 억제 응용을 위한 광대역 저역 통과 필터 설계

여준호¹ · 이종익^{2*}

Design of Wideband Low Pass Filter for Harmonic Suppression Applications

Junho Yeo¹ · Jong-Ig Lee^{2*}

¹School of Computer and Communication Engineering/Information and Communication Research Center,
Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

^{2*}Division of Mechatronics Engineering, Dongseo University, Busan 47011, Korea

요 약

본 논문에서는 고조파 억제 응용을 위한 광대역 저역 통과 필터(low pass filter; LPF)에 대한 설계 방법에 대하여 연구하였다. 제안된 광대역 LPF는 동일면 도파관(coplanar waveguide; CPW)의 접지면에 대칭적으로 추가한 4개의 크기가 다른 원형 슬롯 쌍으로 구성된다. 4개의 원형 슬롯 쌍은 결합접지구조 역할을 하며 광대역 저역 통과 특성을 가진다. 직경이 가장 작은 원형 슬롯이 포트 1 측에 위치하고 포트 2측으로 가면서 직경이 커지는 형태로 배치하였다. 각각의 원형 슬롯의 저역 통과 특성을 제안된 광대역 LPF와 비교하였다. 최종 설계된 LPF를 FR4 기판 상에 제작하고 특성을 실험한 결과, 측정된 S11 특성은 1.89–20.00 GHz 대역에서 -3.3 dB 이상을 유지하였고, S21 특성은 2.66–20.00 GHz 대역에서 -21.4 dB 이하를 유지하였다.

ABSTRACT

In this paper, a design method for a wideband LPF for harmonic suppression applications is investigated. The proposed wideband LPF is comprised of four circular slot pairs with different diameters, which are added symmetrically in the ground plane of a CPW transmission line. Four circular slot pairs act as a defected ground structure and provide a wideband low pass characteristic. The circular slot with the smallest diameter is located at the side of port 1, and the diameter of the circular slot is increased as it goes toward port 2. The low pass characteristics of each circular slot are compared with the proposed wideband LPF. The final designed LPF was fabricated on FR4 substrate, and its characteristics were tested. The measured S11 characteristic was maintained at over -3.3 dB in the frequency range of 1.89–20.00 GHz band, whereas the S21 characteristic was less than -21.4 dB in the frequency range of 2.66–20.00 GHz.

키워드 : 저역 통과 필터, 광대역, 고조파 억제, 결합 접지 구조, 원형 슬롯 쌍

Key word : Low pass filter(LPF), Wideband, Harmonic suppression, Defected ground structure(DGS), Circular slot pair

Received 22 August 2017, Revised 24 August 2017, Accepted 05 September 2017

* Corresponding Author Jong-Ig Lee(E-mail:leeji@gdsu.dongseo.ac.kr, Tel:+82-51-320-1761)

Division of Mechatronics Engineering, Dongseo University, Busan 47011, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2018.22.1.169>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 정보통신기술의 발전과 4차 산업혁명의 등장으로 스마트폰, 가전제품 및 자동차에 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 등과 같은 신기술들이 융합되어 사용자의 편의성이 크게 향상되고 있다[1]. 이에 따라 전선을 이용하지 않고 쉽고 편리하게 전력을 전송하여 충전할 수 있는 무선 전력전송 혹은 무선 충전 기술이 주목을 받고 있다[2,3].

무선전력전송은 전력 에너지를 무선 전송이 가능한 자기장이나 전자기파 형태로 변환시켜 전달하는 전력 전송 시스템이다. 근거리에서는 낮은 주파수의 자기장 결합에 의한 자기 유도 방식이나 코일 간의 자기공명 현상을 이용하는 자기공명 방식이 사용된다. 원거리에서는 안테나에서 방사되는 전자기파를 이용한 RF 방식 혹은 마이크로파 방식이 있다[4].

RF를 이용한 무선전력전송을 위해서는 수신되는 RF 신호를 전원 공급에 필요한 DC 신호로 변환시켜주는 렉테나(rectenna)가 요구된다[5]. 렉테나는 정류기(rectifier)와 안테나(antenna)의 합성어로서, 안테나와 대역통과필터, 정류기, 저역 통과 필터(low pass filter; LPF), 부하저항으로 구성된다. 높은 주파수의 RF 신호를 정류하여 DC 신호를 만드는 정류기에는 다이오드가 사용된다. 다이오드는 비선형 소자로서 수신되는 RF 신호의 고조파(harmonic) 신호가 안테나를 통해 재방사할 수 있다. 이를 방지하기 위해 안테나와 정류기 사이에 대역통과필터를 별도로 사용한다. 이를 통해 RF-DC 변환 효율을 높일 수 있으나 렉테나의 크기를 증가시키는 단점이 있다.

별도의 대역통과필터를 사용하지 않고 렉테나의 크기를 소형화하기 위해 안테나의 구조를 변형하거나 급전 구조에 필터를 추가하는 방법들이 연구되어 왔다. 패치 안테나에 방사면 슬롯과 단락핀을 적절히 배치하여 고조파를 억압하는 방법이 제안되었으나, 2차 및 3차 고주파 주파수에는 공진하지 않으나 근처에 다른 공진주파수가 존재하여 완벽하게 고조파를 억압했다고 볼 수 없다[6]. 패치안테나의 기판에 작은 구멍을 뚫어 이차원 PBG(photonic bandgap) 구조를 이용해 2차와 3차 고조파를 억제하는 방법이 제안되었다[7]. 대역저지 필터를 구현하기 위해 CPW(coplanar waveguide; 동일면 도파관) 전송 선로의 접지면에 직사각형 모양의 슬

롯을 대칭적으로 추가한 결함접지구조(defected ground structure; DGS)가 제안되었다[8]. 크기가 다른 직사각형 슬롯을 루프 슬롯 안테나의 CPW 급전 선로에 추가하여 고조파를 억제하는 방법이 제안되었다[9]. 2차 고조파 억제는 제시되었으나 3차 이상의 고조파 억제 성능은 알 수 없다. 마이크로스트립 전송 선로의 접지면에 여러 개의 덤벨(dumbbell) 모양의 슬롯을 추가하여 광대역 대역저지 특성을 가지는 DGS가 제안되었다[10]. 반 링 모양 슬롯의 양 끝에 계단형 임피던스 공진기를 추가하여 크기를 소형화하고 4차 고조파까지 억제할 수 있는 CPW 급전 슬롯 안테나도 제안되었다[11]. 그러나 지금까지의 연구는 대부분 4차 고조파까지만 억제할 수 있어 5차 이상의 고조파는 억제할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 CPW 전송 선로의 DGS를 이용한 광대역 LPF에 대한 설계 방법에 대하여 연구하였다. 제안된 광대역 LPF는 CPW 전송 선로의 접지면에 대칭적으로 추가한 4개의 크기가 다른 원형 슬롯 쌍으로 구성된다. 4개의 원형 슬롯 쌍은 DGS 역할을 하며 광대역 저역 통과 특성을 가진다. 각각의 원형 슬롯 쌍의 대역의 특성을 분석하여 2.43-25.83 GHz 대역에서 억압값이 -19 dB이하인 광대역 LPF를 설계하였다. 1.25 GHz를 1차 공진주파수로 가정할 경우 2차 고조파부터 20차 고조파까지 억제할 수 있다. 상용 툴인 CST사의 Microwave Studio(MWS)를 이용하여 안테나의 특성을 시뮬레이션하고 설계 변수를 최적화하였다. 최종 설계된 LPF는 FR4 기판(비유전율 4.4, 두께 0.8mm) 상에 제작하여 특성을 확인하였다.

II. 대역 저지 필터의 구조 및 설계

2.1. 필터 구조

제안된 광대역 LPF의 구조가 그림 1에 나타나 있다. LPF는 FR4 기판(비유전율 = 4.4, 두께 = 0.8 mm, 손실 탄젠트 = 0.025)의 한 면에 인쇄되어 있다. 기판의 길이와 폭은 각각 L 과 W 이고, 기판의 두께는 h 이다. CPW 전송 선로의 신호선의 폭은 w_r 이고 신호선과 접지면 사이의 간격은 g_r 이며, 입력 임피던스 50 오옴과 정합되도록 설계하였다. 광대역 저역 통과 특성을 얻기 위해 4개의 직경이 다른 원형 슬롯 쌍($cs1, cs2, cs3, cs4$)이 CPW

전송 선로의 접지면에 대칭적으로 추가되었으며, 각각의 직경은 d_1, d_2, d_3, d_4 이다. 원형 슬롯 쌍 사이의 간격은 각각 s_1, s_2, s_3 이다. 각 원형 슬롯과 접지면이 만나는 지점에는 g_s 만큼의 홈이 파져있다. 직경이 가장 작은 원형 슬롯 쌍이 포트 1 측에 위치하고 위쪽으로 가면서 직경이 커지는 형태로 배치하였다.

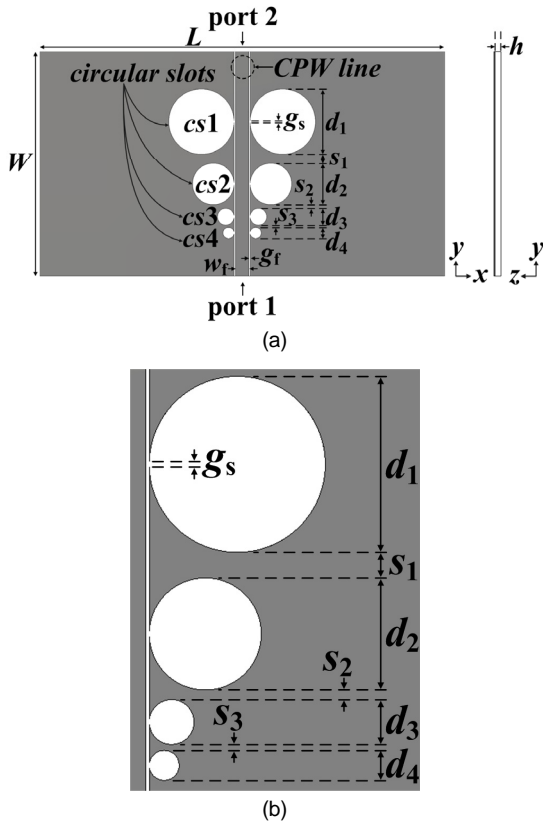


Fig. 1 Geometry of proposed wideband LPF : (a) whole view and (b) circular slots with different diameters

Table. 1 Design parameters of proposed wideband LPF

Parameter	Value(mm)	Parameter	Value(mm)
L	91	d_4	2.5
W	50.5	s_1	2.1
w_f	3	s_2	0.8
g_f	0.3	s_3	0.5
d_1	14.7	g_s	0.5
d_2	9.3	h	0.8
d_3	3.7		

제안된 광대역 LPF의 최적화된 설계 변수들이 표 1에 나타나 있다. 최적화된 설계 변수는 주요 설계 변수를 변화시켜 저역 통과 특성을 분석하여 결정하였다.

2.2. 특성 시뮬레이션

본 절에서는 제안된 광대역 LPF를 구성하는 4개의 직경이 다른 원형 슬롯 쌍의 각각의 저역 통과 특성을 비교하였다. 그림 2에 나타나있는 것처럼 주어진 CPW 전송 선로의 중앙에 한 쌍의 원형 슬롯을 접지면에 대칭적으로 배치하고 슬롯의 직경(d)을 변화시켜 가면서 S11과 S21 특성을 비교하였다.

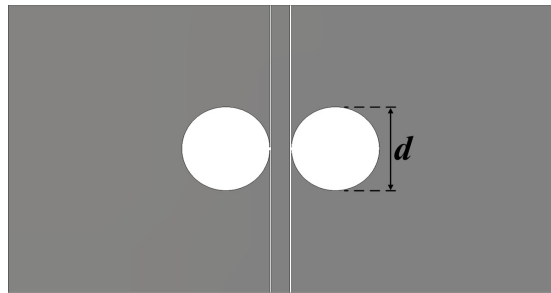
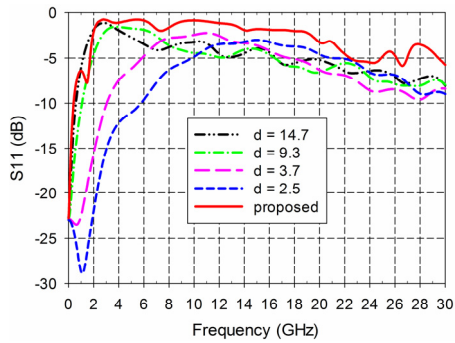


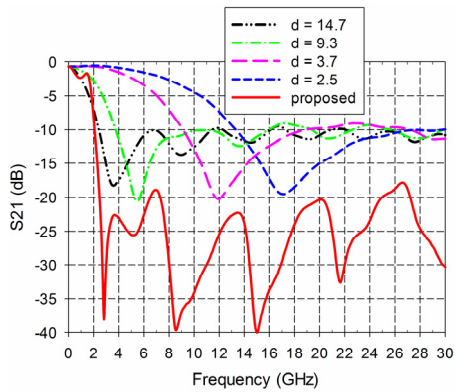
Fig. 2 Geometry to evaluate performance of circular slot pair

그림 3에서 슬롯의 직경이 $d = 14.7 = d_1$ 인 경우는 그림 1에서 직경이 가장 큰 슬롯인 cs1만 있는 경우에 해당되며, S21 특성의 -3 dB 차단 주파수가 1.17 GHz이고, 2.35 GHz 이후에서 -9.5 dB 이하를 유지하여 광대역 차단 특성을 보인다. 슬롯의 직경이 $d = 9.3 = d_2$ 인 경우, -3 dB 차단 주파수가 2.10 GHz이고, 3.57 GHz 이후에서 -9.0 dB 이하를 유지한다. $d = 3.7 = d_3$ 인 경우, -3 dB 차단 주파수가 5.67 GHz이고, 8.77 GHz 이후에서 -9.0 dB 이하를 유지한다. $d = 2.5 = d_4$ 인 경우, -3 dB 차단 주파수가 8.43 GHz이고, 13.27 GHz 이후에서 -9.9 dB 이하를 유지한다.

그림 3에서 제안된 광대역 LPF의 S21 특성을 보면 -3 dB 차단 주파수가 1.70 GHz이고, 2.39 GHz 이후에서 -17.8 dB 이하로 유지되어 광대역 차단 특성을 보인다. S11 특성을 보면 1.87-19.80 GHz 대역에서 -3 dB 이상을 유지한다. 또한 하나의 슬롯 쌍이 있는 경우에 비해 여러 개의 슬롯 쌍이 있을 경우 S11과 S21의 차단 특성이 더 좋아지는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 Comparison of S11 and S21 characteristics of circular slot pairs : (a) S11 and (b) S21

III. 필터 제작 및 실험 결과

그림 4는 제작된 광대역 LPF의 사진이다. 제작된 안테나의 크기는 91 mm(L) × 50.5 mm(W)이다.

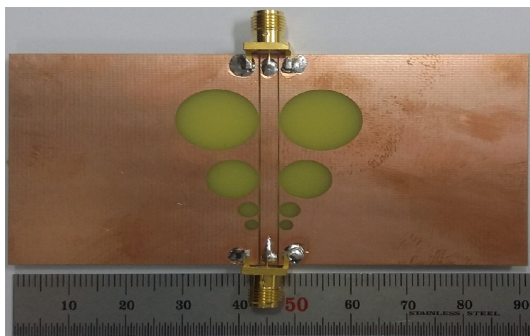
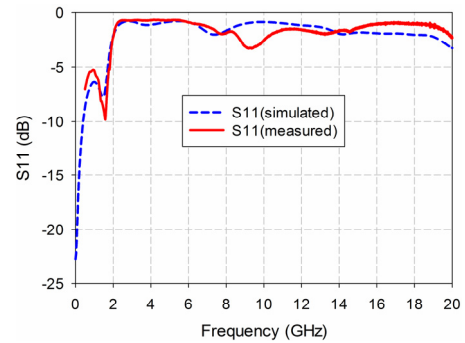
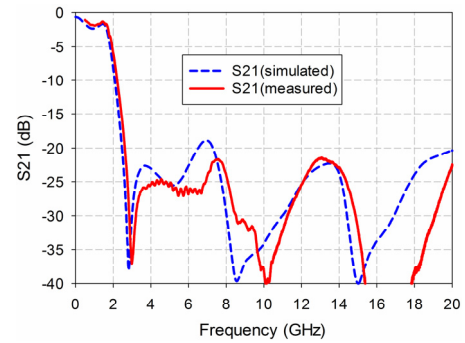


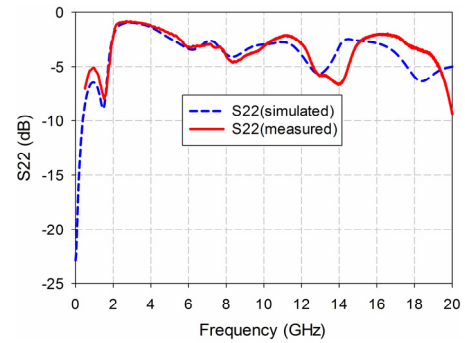
Fig. 4 Photograph of fabricated wideband LPF



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 S-parameters of fabricated wideband LPF : (a) S11, (b) S21, and (c) S22

제작된 광대역 LPF의 S파라미터를 네트워크분석기 (Agilent사 N5230A, 주파수 범위: 300 KHz ~ 20 GHz)를 이용하여 측정하였고, 결과는 그림 5에 나타나 있다. 측정 결과, S11 특성은 1.89–20.00 GHz 대역에서 -3.3 dB 이상을 유지하고, S21 특성은 -3 dB 차단 주파수가 1.77 GHz이고 2.66–20.00 GHz 대역에서 -21.4 dB 이하를 유지한다. S11과 S21의 경우 시뮬레이션 결과에 따르면 20 GHz 이상의 주파수 대역에서도 이러한 성능을

유지할 것으로 예상되나 측정에 사용된 네트워크 분석기의 상한 주파수인 20 GHz까지만 측정할 수 있었다. 측정된 S22 특성은 1.91–7.72 GHz 대역에서 -3.3 dB 이상을 유지하여 S11과 비교할 때 대역폭이 많이 줄어들 수 있다. 따라서 제안된 LPF를 고조파 억제 특성을 갖도록 안테나에 연결할 때에는 슬롯의 직경이 큰 쪽인 포트 2를 안테나에 연결하고, 슬롯의 직경이 작은 쪽인 포트 1으로 급전하는 것이 광대역 특성을 얻는데 유리하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고조파 억제 응용을 위한 광대역 LPF에 대한 설계 방법에 대하여 연구하였다. 제안된 광대역 LPF는 CPW 전송 선로의 접지면에 대칭적으로 추가한 4개의 크기가 다른 원형 슬롯으로 구성된다. 직경이 가장 작은 원형 슬롯이 포트 1쪽에 위치하고, 포트 2쪽으로 가면서 직경이 커지는 형태로 배치하였다.

각각의 원형 슬롯의 저지 대역의 특성을 분석하여 최종 설계된 LPF를 FR4 기판 상에 제작하고 특성을 실험한 결과, S11 특성은 1.89–20.00 GHz 대역에서 -3.3 dB 이상을 유지하였고, S21 특성은 -3 dB 차단 주파수가 1.77 GHz이고 2.66–20.00 GHz 대역에서 -21.4 dB 이하를 유지하였다. S11과 S21의 경우 20 GHz 이상의 주파수 대역에서도 이러한 성능을 유지할 것으로 예상되나 측정에 사용된 네트워크 분석기의 상한 주파수인 20 GHz까지만 측정하였다.

제안된 LPF는 CPW 전송 선로로 급전되는 안테나의 급전 구조에 바로 적용하여 추가적인 공간 차지 없이 소형으로 광대역에 걸쳐 고조파를 억제하는데 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] J. Wan, H. Cai and K. Zhou, "Industrie 4.0: enabling technologies," *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*, pp. 135-140, Jan. 2015.
- [2] A. Uchida, S. Shimokawa, K. Matsui, and H. Oshima, "Three-dimensional wireless power transfer method to realize efficient charging of IoT devices," *FUJITSU Science & Technology Journal*, vol. 53, no. 2, pp. 51-56, Feb. 2017.
- [3] COST Action IC1301 Team, "Europe and the future for WPT : European contributions to wireless power transfer technology," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 56-87, Jun. 2017.
- [4] R. Shadid, S. Noghmanian and A. Nejadpak, "A literature survey of wireless power transfer," *2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, pp. 782-787, 2016.
- [5] C. R. Valenta and G. D. Durgin, "Harvesting wireless power: survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 108-120, Jun. 2014.
- [6] S. Kwon, H. K. Yoon, and Y. J. Yoon, "Harmonic tuning antennas using slots and short-pins," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1, pp. 118-121, 2001.
- [7] Y. Horii and M. Tsutsumi, "Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 13-15, Jan. 1999.
- [8] Y. Q. Fu, G. H. Zhang and N. C. Yuan, "A novel PBG coplanar waveguide," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 11, pp. 447-449, Nov. 2001.
- [9] X. C. Lin and L. T. Wang, "A broadband CPW-fed loop slot antenna with harmonic control," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 323-325, 2003.
- [10] J. K. Xiao, Y. F. Zhu and J. S. Fu, "Non-uniform DGS low pass filter with ultra-wide stopband," *9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, pp. 1216-1219, 2010.
- [11] J. Yeo and J. I. Lee, "Compact CPW-fed half-ring-shaped slot antenna for harmonic suppression applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 5, pp. 1102-1104, May 2015.



여준호(Junho Yeo)

1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 8월 : 미국 Pennsylvania State University 전기공학과 (공학박사)
1994년 3월 ~ 1999년 6월 : 국방과학연구소 연구원
2003년 9월 ~ 2004년 6월 : 미국 Pennsylvania State University 박사 후 과정
2004년 8월 ~ 2007년 2월 : 한국전자통신연구원 RFID 시스템연구팀 선임연구원
2007년 3월 ~ 현재 : 대구대학교 정보통신공학부 부교수
※관심분야 : AMC, EBG, FSS 설계 및 안테나 응용, RFID 및 광대역 안테나, 전자파 산란



이종익(Jong-ig Lee)

1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년 8월 : 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
1998년 3월 ~ 12월 : 금오공과대학교 연구교수
2016년 7월 ~ 2017년 6월 : University of Florida 방문학자
1999년 3월 ~ 현재 : 동서대학교 메카트로닉스 융합공학부 교수
※관심분야 : 평면 안테나, 전자파 산란