

변형된 원형 버섯 구조의 0차 공진을 이용한 메타 재질 대역 통과 여파기의 설계

Design of a Metamaterial Bandpass Filter Using ZOR of the Modified Circular Mushroom Structure

장 건 호 · 강 승 택

Geonho Jang · Sungtek Kahng

요 약

본 논문에서는 변형된 원형 버섯 구조의 메타 재질을 이용하여 새로운 대역 통과 여파기의 설계법을 제안한다. 0차 공진(Zeroth-Order Resonance: ZOR) 특성을 보이는 반원 형태의 버섯 구조 셀을 공진기로 이용하며, 각각의 이웃하는 0차 공진기 사이에 갭을 두어 용량성 결합을 유도한다. 제안된 메타 재질 대역 통과 여파기 설계법은 회로 해석 및 3차원 모의 실험과 측정을 통하여 해석 및 설계 목표와 비교 분석되어 그 타당성을 증명하였다. 0차 공진의 특수한 전계 분포 및 분산도를 통하여 메타 재질임을 증명하였으며, 대역 통과 여파기의 소형화에 대하여도 논의된다.

Abstract

In this paper, the design of a new bandpass filter based on the modified circular mushroom metamaterial structure is proposed. In detail, half circular mushroom cells are used as the zeroth order resonators(ZOR), and an intermediate gap is adopted to introduce the coupling between neighboring ZOR resonators. The proposed bandpass filter design is validated by the circuit and 3D EM simulations and measurements compared to the target specifications, and the metamaterial properties are proved by the ZOR field distributions and dispersion diagram. Also, the effect of size reduction is addressed.

Key words : Metamaterial, Mushroom, Bandpass Filter, ZOR

I. 서 론

최근, 이동 통신 기술이 발달하면서 이용자들은 다중 기능뿐만 아니라 높은 이동성을 겸비한 제품들을 선호하고 있다. 다중 대역을 기반으로 하는 제품의 경우, 작은 공간 내에 다양한 소자들이 집적되어야 하므로 부품의 소형화가 선행되어야 한다. 이러한 상황에서 특히 RF 수동 소자는 설계시 많은 제약을 받게 된다. 따라서 여파기나 커플러 등은 최신의

기술로 설계하여 그 성능을 극대화 되어야 한다.

이러한 여러 가지 설계의 제약을 극복하기 위하여 많은 기술들이 소개되고 있다. 특히, 메타 재질 (metamaterial) 구조에 대한 개념이 소개되면서 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.

그 중에서도 Composite Right/Left-handed(CRLH) 전송 선로는 초고주파 부품 설계에 있어서 많은 응용 사례에 적용되고 있다. 메타 재질 구조 응용 사례 중에서도 CRLH 전송 선로의 0차 공진(Zeroth-Order

「이 연구는 2010학년도 인천대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음.」

인천대학교 정보통신공학과(Department of Information and Telecommunication Engineering, University of Incheon)

· 논문 번호 : 20100604-07S

· 교신저자 : 강승택(e-mail : s-kahng@incheon.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 8월 12일

Resonance: ZOR) 개념은 부품의 소형화를 달성할 수 있는 핵심적인 기술로써 다양하게 연구되어 오고 있다. CRLH 전송 선로의 0차 공진점에서는 Right/Left-handed 전파 상수의 합인 β_{total} 이 0이 되어 파장이 무한대의 개념이 되므로 물리적인 길이와는 상관없이 동위상이 형성되며, 이를 잘 이용하면 부품의 소형화에 응용 가능하다^{[1]-[4]}.

메타 재질 구조의 0차 공진과 음의 공진을 위해서는 여러 셀의 직각 패치와 단락 편이 결합된 버섯 구조 공진기의 용량성 또는 유도성 결합을 이용하거나 SRR(Split Ring Resonator)를 포함한 금속 선로 등을 이용하여 형성할 수 있다.

서로 동일한 크기를 갖는 단위 셀들을 연속적으로 연결하는 구조의 경우, 기본 중심 주파수의 정수 배로 주기적인 차단 대역과 통과 대역을 갖기 때문에 대역 형성에서 설계 자유도가 제한된다^{[4],[5]}.

본 논문에서는 변형된 원형 버섯 구조의 0차 공진 구조와 이웃한 공진기 사이에 갭을 이용한 용량성 결합을 통하여 대역 통과 여파기를 설계하는 새로운 설계 방법을 소개한다. 프로토타입 등가회로를 설계하고 원형 버섯 구조가 반원 형태의 버섯 구조로 변화하는 과정을 통하여 목표치에 최적화됨을 보인다. 제안된 대역 통과 여파기의 주파수 응답과 성능 목표치의 비교를 통하여 설계법의 적합성을 설명하고, 메타 재질 구조의 0차 공진 특성 또한 소형화 효과와 함께 언급된다.

제안된 대역 통과 여파기는 3차원 EM 모의 실험 기인 CST-MWS로 모의 실험하였으며, 이후 제작 및 측정 결과와의 비교를 통하여 그 타당성을 증명한다.

II. 이론 및 설계

2-1 성능 목표치와 등가회로

먼저, 성능 목표치가 주어지면 이를 수학적으로 표현하는 전달 함수를 구하고, 이를 바탕으로 등가회로를 얻을 수 있다.

표 1은 설계할 대역 통과 여파기의 성능 목표치를 나타낸 것이다. 표 1에 의거하여 전달 함수는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

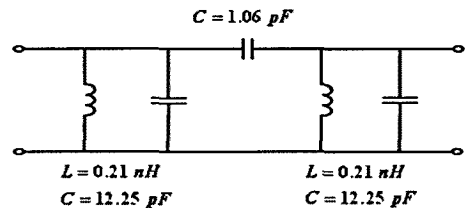
표 1. 대역 통과 여파기의 성능 목표치
Table 1. Specification of the bandpass filter.

구분	성능 목표치
중심 주파수	3 GHz
차수	2
대역폭	200 MHz
통과 대역 리플	0.5 dB

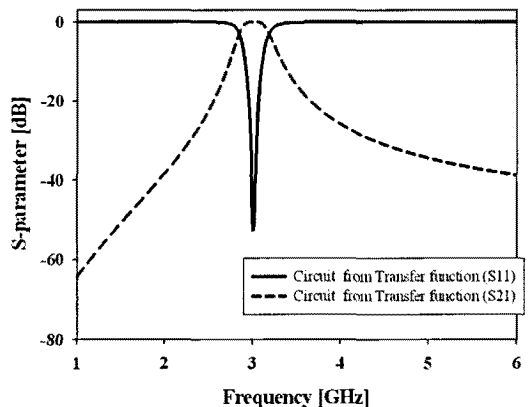
$$S_{21}(s) = \frac{1.965}{s^2 + 1.983s + 1.965} \quad (1)$$

단, $s = j\omega$ 이고, $\omega = 2\pi f$ 이다. 전달 함수 식 (1)은 등가회로를 도식화한 그림 1(a)와 같이 변환될 수 있다. 두 개의 동일한 병렬 공진기 사이에 직렬 커패시턴스 결합으로 구성되어 있다. 등가회로를 모의실험한 주파수 응답은 그림 1(b)와 같으며 S_{21} 통과 특성이 표 1의 성능 목표치와 잘 맞음을 알 수 있다.

2-2 등가회로를 위해 제안된 메타 재질 구조



(a) 대역 통과 여파기의 프로토타입
(a) Prototype of the bandpass filter



(b) 주파수 응답
(b) Frequency response

그림 1. 제안된 대역 통과 여파기의 프로토타입 회로
Fig. 1. A prorotype circuit of the proposed bandpass filter.

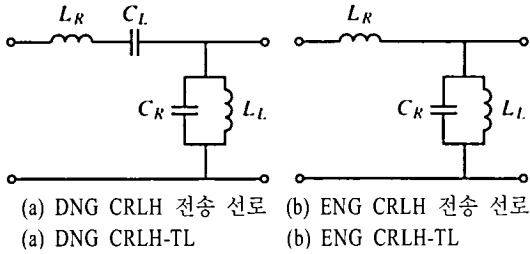


그림 2. DNG와 ENG CRLH 전송 선로의 회로 모델
Fig. 2. The circuit models of a DNG CRLH-TL and ENG-TL.

성능 목표치에 합당한 등가회로를 얻은 뒤, 이에 상응하는 전기적 특성을 얻기 위하여 그림 1(a)의 병렬 공진기는 메타 재질 구조의 공진기로 대체 설계가 가능하다. 앞서 소개하였듯이 다른 메타 재질 구조와는 달리, 본 논문에서는 물리적 구조로서 원형 버섯 구조를 이용한다. 원형 버섯 구조는 주로 주기적인 EBG에 많이 사용되어 왔으며, 원형 패치와 중앙에 접지된 단락 핀으로 구성되어진다.

일반적인 원형 버섯 구조는 본 논문에서 필요로 하는 직렬 커패시턴스를 가지고 있지 않다. 그러나 원형 버섯 구조 자체는 병렬 공진기 특성을 가지고 있으며, 패치 표면의 직렬 인덕턴스까지 고려할 때 0차 공진 현상을 유도할 수 있기 때문에 소형 공진기 설계의 출발점이 될 수 있다. 따라서 최종적으로 제안하는 반원형 버섯 구조 공진기 설명에 앞서 공진기로서의 일반 원형 버섯 구조의 특징을 먼저 언급하고자 한다. 입·출력 급전 선로와 공진기 사이에 갭이 없기 때문에 원형 버섯 구조는 DNG(Double Negative)라기 보다는 ENG(Epsilon Negative)로 등가화 된다.

그림 3과 같이 원형 버섯 구조가 입·출력 급전 선로와 연결되면, 금속 패치, 기판에 의한 선로와 접지와의 간격, 중앙에 연결된 단락 핀은 각각 그림 2(b) ENG 회로의 직렬 인덕턴스, 병렬 커패시턴스, 병렬 인덕턴스로 해석될 수 있다.

원형 버섯 구조의 3차원 EM 모의 실험은 유효 유전율 $\epsilon_r=4.4$, 두께=1.2 mm, $P_r=10$ mm, $V_r=1$ mm의 재원으로써 수행되었다.

그림 4에서 확인할 수 있듯이 원형 버섯 구조는 ZOR에서 균일한 벡터의 전계 분포를 확인할 수 있으며, 오른손 법칙 영역에 불요 공진점이 발생한다.

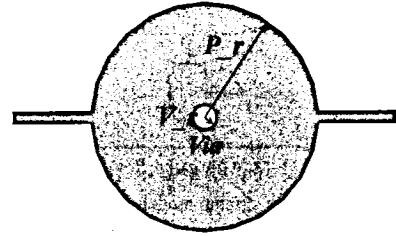
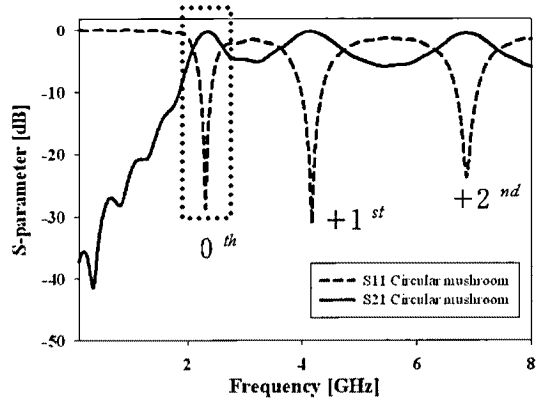
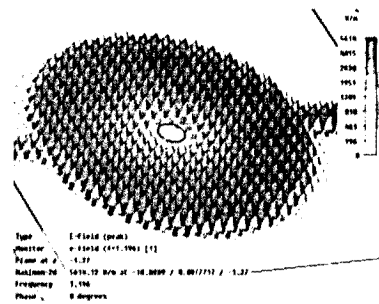


그림 3. 원형 버섯 구조
Fig. 3. A full circular mushroom structure.



(a) 주파수 응답: 0차 공진
(a) Frequency response: ZOR



(b) ZOR의 전계 분포
(b) Electric field distribution at the ZOR

그림 4. 원형 버섯 구조의 ZOR과 RH 불요 공진점
Fig. 4. ZOR and its right-handed of a full circular mushroom structure.

여파기의 특성을 얻기 위하여 복수의 공진기를 사용하는 차수를 높인 다수의 원형 버섯 구조를 사용해야만 하는데, 여파기의 소형화 측면에 효율적이지 못하다. 또한 높은 대역의 불요 공진점들을 보다 효율적으로 조절하기 위해 용량성 결합 전후에 두 개의 변형된 반원형 버섯 구조가 있는 구조를 제안한다.

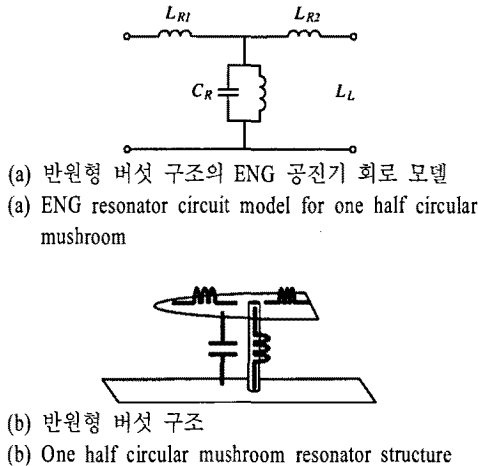


그림 5. 반원형 ENG 버섯 구조의 공진 회로 및 물리 모델

Fig. 5. The circuit and physical models of a half circular mushroom as an ENG resonator structure.

반원형 버섯 구조의 공진회로의 기본 설계시 3 GHz를 중심 주파수로 하였으며, 각각 소자의 값은 회소 요소와 물리적 치수의 관계 근사 공식을 이용하여 구할 수 있다. 이로부터 얻어진 초기 값을 바탕으로 전자장 해석 툴을 활용해 변수를 조정하였으며, 원하는 특성에 맞는 값으로 $L_{R1}=6$ nH, $L_{R2}=11$ nH, $C_R=4.8$ pF, $L_L=0.7$ nH를 갖도록 하였다. 단락 핀의 위치가 중앙에 위치하되 반원 형태로 좌우 대칭이 아니기 때문에 T-형태이면서 각각의 직렬 인덕턴스의 값이 다르게 증가화 될 수 있다.

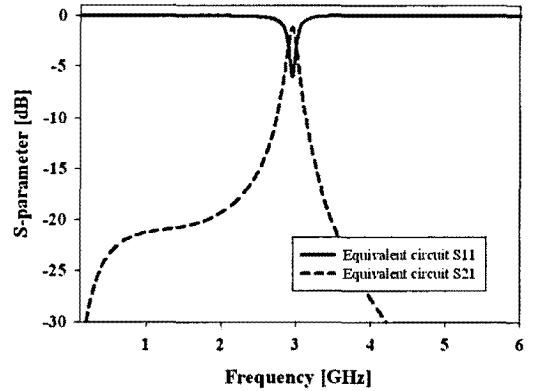
그림 5의 반원형 버섯 구조의 등가회로를 모의실험한 주파수 응답 결과와 분산도는 그림 6과 같다.

통과 특성 S_{21} 결과를 보면 3 GHz에서 0차 공진이 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

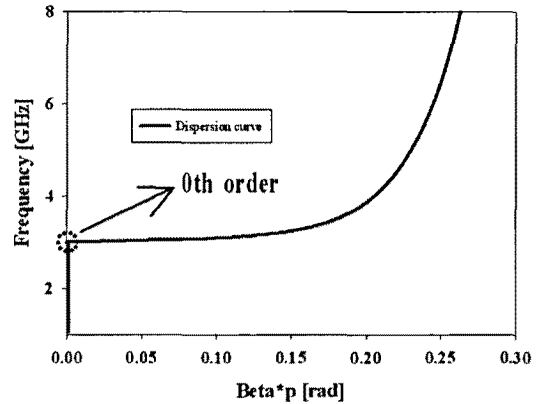
지금까지는 제안하는 공진기 구조였으며, 대역 통과 여파기의 대역폭과 반사 손실 특성을 만족시키기 위하여 공진기 개수인 차수를 2차로 늘리되 2개의 반원형 버섯 구조 사이에 겹을 두어 용량성 결합을 유도한다.

III. 제안된 ZOR 대역 통과 여파기의 설계

대역을 형성하기 위한 2차의 반원형 버섯 구조 공진기 사이의 결합량을 결정하는데 2가지 요소가 작용한다. 겹의 간격과 겹의 길이, 그리고 단락 핀의 위



(a) 반원형 버섯 구조 공진기 등가회로의 주파수 응답
 (a) Frequency response



(b) 분산도
 (b) Dispersion diagram

그림 6. 반원형 버섯 구조의 0차 공진 특성

Fig. 6. The S-parameters and the dispersion diagram of on half circular mushroom ZOR.

치에 따라 결합량이 달라져 대역 형성 및 불요 공진점 등을 용이하게 조절할 수 있다.

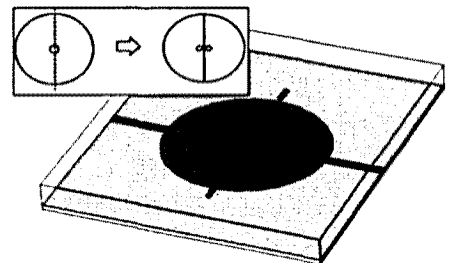


그림 7. 용량성 결합을 이용한 2차 반원형 버섯 구조의 공진기 기반 대역 통과 여파기

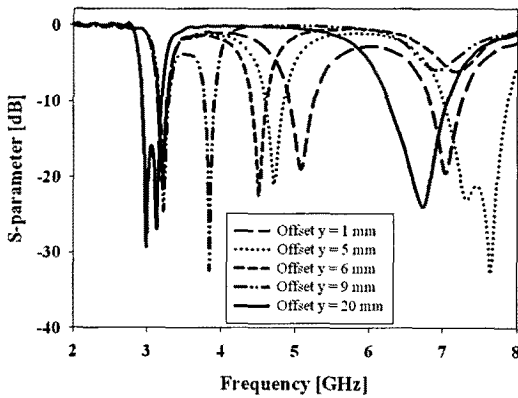
Fig. 7. Two coupled half circular mushroom ZORs with coupling for a BPF.

그림 7의 화살표 방향과 같이 갭과 단락 핀에 대한 변수를 바꿔가면서 성능 목표치에 합당한 최적화된 값을 찾을 수 있다. 단락 핀의 거리와 갭의 간격 및 길이에 따라 불요 공진점이 조절됨을 알 수 있다.

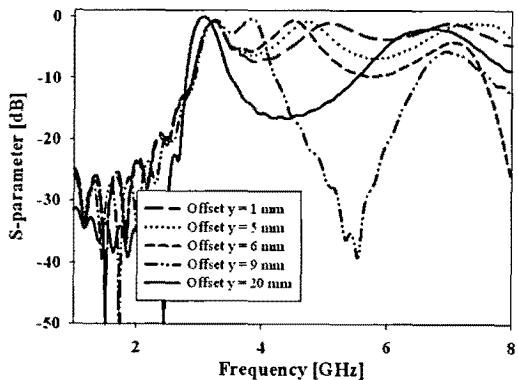
3가지 결합 요소들 중, 다른 변수들은 고정된 상태에서 갭의 길이의 변화에 따른 주파수 응답 특성을 확인한 결과, 갭의 길이가 화살표 방향으로 길어짐에 따라서 +1차 공진점이 낮은 주파수 대역으로 이동함을 확인할 수 있다.

원형 패치가 완전히 나누어졌을 경우 중심 주파수인 3 GHz에서 대역이 형성되며 불요 공진점 또한 조절된 모습을 볼 수 있다.

각각의 결합 요소들에 대하여 최적화된 값은 갭



(a) 갭의 길이에 따른 S_{11} 특성 변화
(a) Gap length vs. S_{11}



(b) 갭의 길이에 따른 S_{21} 특성 변화
(b) Gap length vs. S_{21}

그림 8. 갭의 변수에 따른 주파수 응답 특성 변화
Fig. 8. A coupling factor is varied and its resultant S-parameters.

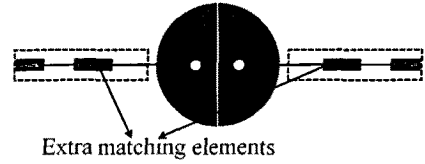
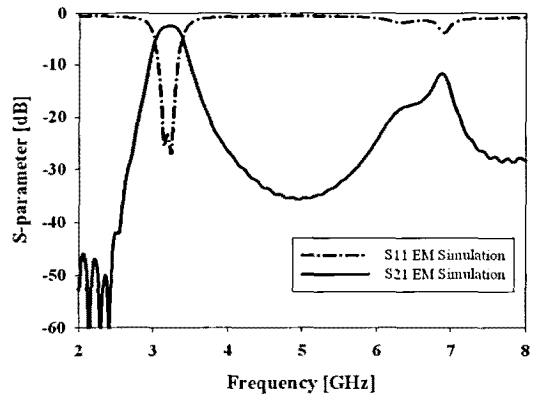
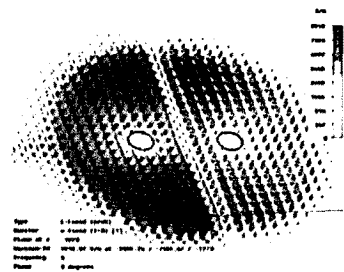


그림 9. 용량성 결합을 이용한 2차 반원형 버섯 구조의 공진기 기반 여파기의 최종 구조
Fig. 9. Finalized BPF based on two coupled half circular mushroom ZORs with coupling.



(a) 제안된 여파기의 주파수 응답
(a) Frequency response of the proposed BPF

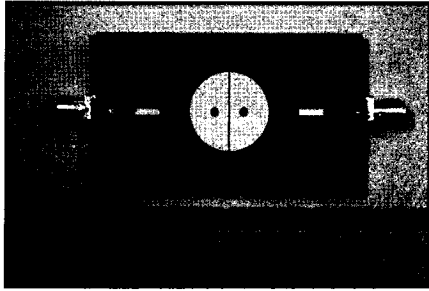


(b) 제안된 대역 통과 여파기의 0차 공진 특성
(b) ZOR characteristic of the proposed BPF

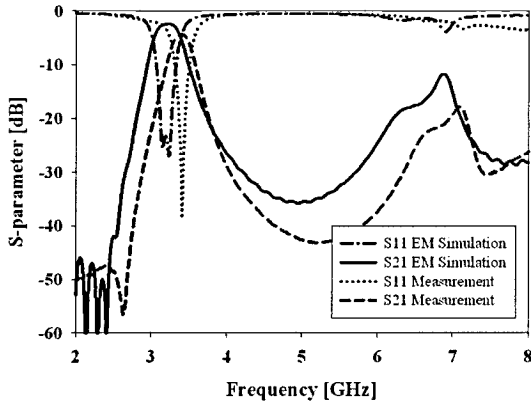
그림 10. 제안된 메타 재질 0차 공진 대역 통과 여파기의 성능
Fig. 10. The performance of the proposed metamaterial ZOR bandpass filter.

의 간격 $gap=0.2$ mm, 단락 핀 사이의 거리 $via_g=7.2$ mm이다.

중심 주파수인 3 GHz에서 대역이 형성되고, 가장 가까운 불요 공진점은 멀어지면서 차단 대역이 증가하지만 7 GHz 근처의 통과 대역이 새롭게 형성됨을 볼 수 있다.



(a) 제작된 대역 통과 여파기
(a) Fabricated bandpass filter



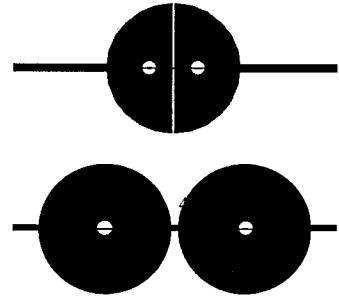
(b) 3D EM 모의실험과 측정 결과 비교
(b) 3D EM simulation vs. measured result

그림 11. 제작된 메타 재질 대역 통과 여파기
Fig. 11. Fabricated metamaterial bandpass filter.

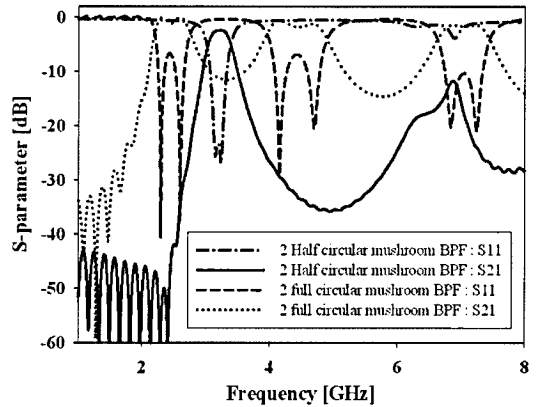
더 넓은 차단 대역을 형성하여 격리도를 향상시키기 위하여 그림 9와 같이 입·출력 급전 선로에 간단한 임피던스 정합 선로를 추가하여 차단 영역을 확장시켰다.

최종 구조의 모의 시험 결과는 그림 10과 같으며, 제안된 설계 결과 주파수 응답은 성능 목표치와 매우 일치함을 알 수 있다.

200 MHz의 대역폭과 1 dB 이하의 삽입 손실, -20 dB 이하의 반사 손실, 2 GHz 이상의 차단 특성이 나타났으며, 그림 10(b)는 공진기의 균일한 전계 분포를 통해 0차 공진 특성을 보여주고 있다. 다음 그림 11은 제안된 메타 재질 대역 통과 여파기의 제작된 모습과 측정 결과이다. 제작시 기관 두께 및 유전율의 미세한 오류와 급전부의 선로 오차로 대역폭과 중심 주파수가 다소 차이가 있었지만 매우 일치한 특성을 확인할 수 있다. 모의실험과 측정 결과, 모두



(a) 2차 반원형과 원형 머쉬룸 여파기 비교
(a) Comparison between half and full circular mushroom



(b) 주파수 응답 비교
(b) Frequency response

그림 12. 2차 원형 버섯 구조 대역 통과 여파기
Fig. 12. The performance of the 2nd order full circular mushroom.

삽입 손실이 발생하였으며, 이는 유전체 손실, 전도 손실과 더불어 방사 손실에 관계된다. 하지만 이 경우, 측정 결과의 반사 손실 성능이 우수하므로 방사 손실은 존재할지라도 유전체 손실보다 훨씬 작다고 판단된다.

마지막으로 2차 원형 버섯 구조 ZOR을 이용하여 대역 통과 여파기를 설계한 결과와 반원형 버섯 구조 ZOR 결합 여파기를 비교하였을 경우, 그림 12와 같이 제안된 여파기가 2배의 소형화 효과를 나타낼 수 있으며, 인접 대역의 격리도 측면에서도 넓은 차단 대역을 확보함으로써 우수한 특성을 나타낼 수 있다.

IV. 결 론

0차 공진 특성을 나타내는 메타 재질의 반원형 버

섯 구조 셀을 공진기로 사용하고 두 개의 공진기 사이에 갭을 두어 용량성 결합을 이용하여 대역 통과 여파기를 설계하였다. 중심 주파수는 3 GHz로 대역 폭은 200 MHz, 삽입 손실 1 dB 이하, -20 dB 이하의 반사 손실을 얻었다. 원형 버섯 구조를 연결한 대역 통과 여파기와 비교하여 약 2배로 소형화시킬 수 있었으며, 차단 영역이 확장되어 격리도가 향상되었다.

참 고 문 헌

[1] S. Kahng, J. Ju, "Design of the UWB bandpass filter based on the 1 cell of microstrip CRLH-TL", *Proc. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(IEEE-ICMMT 2008)*, vol. 1, pp. 69-72, 2008.

[2] S. Kahng, J. Ju, "Realized metamaterial CRLH band-

pass filter for UHF-band WLAN with harmonics suppressed", *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on: Art of Miniaturizing RF and Microwave Passive Components, IMWS 2008*, pp. 98-101, Dec. 14-15, 2008.

[3] S. Kahng, J. Ju, "Design of a dual-band metamaterial bandpass filter using Zeroth Order Resonance", *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 12, pp. 149-162, Mar. 2010.

[4] C. Caloz, C. T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Application*, John Wiley & Sons, 2006.

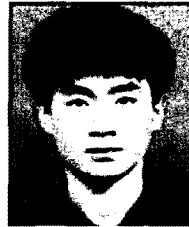
[5] R. Marques, et al., *Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, 2008.

장 건 호



2009년 2월: 인천대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2009년 3월~현재: 인천대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] Metamaterial, RF 부품, 적층형 및 고이득 안테나, SI/PI 등

강 승 택



2000년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)
 2000년 4월: 한양대학교 산업과학연구소 연구원
 2004년 2월: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
 2004년~현재: 인천대학교 정보통신

공학과 교수

[주 관심분야] 전자파 수치 해석 및 응용, EMI/EMC 대책, 초고주파 부품 및 안테나 설계