

논문 2009-46TC-12-9

차단특성의 초광대역화를 위한 X-밴드용 초소형 메타물질구조 여파기

(Miniaturized X-Band Metamaterial Filter for the Ultra-Wide
Stopband)

강 승 택*, 임 동 진**, 장 건 호**

(Sungtek Kahng, Dongjin Lim, and Geonho Jang)

요 약

본 논문을 통하여 Metamaterial 특성을 가지는 CRLH 전송선 구조를 이용하는 초광대역 대역저지 여파기의 설계를 제안한다. 기존에 사용되던 주기구조, 또는 다단의 CRLH 전송선이 아닌, 단일 셀 구조를 이용하여 기존 반파장 공진기 기반의 여파기나 임피던스 교번형 저역통과 여파기 등에서 나타나는 길이가 길어지며 Chebyshev형의 낮은 스킨트 특성을 가지는 단점을 보완하고, 기존에 없던 초소형 구조를 제시한다. 또한, 초광대역 저지특성을 위하여 계단형 임피던스 구조를 포함한 강결합 Metamaterial 구조를 제안하고 0차 공진을 이용한 초소형화 기법을 제시한다. 본 논문에서 제안하는 설계의 타당성은 3D EM 모의실험과 제작 및 측정을 통하여 검증하며 여파기의 크기를 $\lambda_g/10$ 이하로 감소, 12 GHz를 초과하는 차단대역, 통과대역의 0.7 dB 삽입손실 등의 주파수 영역 특성 결과를 보인다.

Abstract

In this paper, the design of a new bandstop filter with an ultra-wide stopband is proposed using the metamaterial CRLH-TL. Instead of conventional periodic structures and multi-staged CRLH-TLs, extremely small one-cell type is adopted to circumvent the setbacks of conventional filters such as the lengthened $\lambda_g/2$ -resonator ones or alternating impedance lowpass filter, and relatively slow skirt. Besides, for a very broad stopband, a strong coupling structure including stepped impedances is suggested and the zero-order resonance is made for effective size-reduction. The validity of the proposed design is proven through the fabrication and measurement, showing the overall size less than $\lambda_g/10$, the stopband wider than 12 GHz, 0.7 dB of the insertion loss.

Keywords : Bandstop filter, Metamaterial, Zero-Order Resonance, Miniaturization, Ultra-wide Stopband

I. 서 론

초고주파 무선 통신 시스템 설계에 있어서 수동부품 기술에 대한 요구사항이 까다로워지고 있고, 통신 장비

의 경량화 · 소형화에 따라 장비 내 구성부품들의 경량화 · 소형화도 함께 요구되고 있다. 특히, 통신품질을 극대화하기 위해서는 여러 주파수 지점에서 발생하는 잡음을 줄여야 하기 때문에 넓은 대역의 저지대역을 가지며, 스킨트 특성이 좋은 저역통과 여파기가 필요하다^[1]. 그런데 기존의 임피던스 교번형 저역통과 여파기나 주기구조의 Bandgap 기술을 이용하여 여파기를 설계할 경우, 여파기의 전체 길이가 길어지고, Chebyshev형의 낮은 스킨트 특성을 가지는 단점이 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 Metamaterial 구조를 이용한 여파기를 사용할 수 있다^[2~6]. 따라서, 본 논문에서는

* 정회원, 인천대학교 정보통신공학과
(University of Incheon)

※ This work was supported by the IT R&D program of MKE/IITA. [2009-S-001-01, Study of technologies for improving the RF spectrum characteristics by using the metaelectromagnetic structure]

접수일자: 2009년11월12일, 수정완료일: 2009년12월14일

Metamaterial 특성인 0차 공진 기반 X~Ka대역 초소형 초광대역 대역저지 여파기를 제안하고 3차원 EM 시뮬레이션 및 제작을 통해 타당성을 검증하였다.

II. 본 론

1. Metamaterial CRLH 전송선 이론

현재 전자파 응용 분야에서 관심의 대상이 되고 있고, 활발히 연구 및 제작이 이루어지고 있는 Metamaterial 구조는, 일반 전자기 이론에서 설명하지 않는 특이한 특성을 보인다. 전자기파 분산 특성에서 유전율과 투자율이 음의 값을 가짐에 따라, 오른손 진행(Right Handed) 법칙이 아닌 왼손 진행(Left Handed) 법칙으로 전파 진행을 설명할 수 있다. 이 오른손 진행(RH) 법칙과 왼손 진행(LH) 법칙의 선로를 결합(CRLH)할 경우, 통과 및 차단 대역이 기존의 오른손 진행(RH) 법칙 선로만의 것과 다르게 형성되며, 이 특성을 이용한 여파기 연구가 활발히 진행되고 있다.^[2]

그림 1은 대역차단 여파기의 Dual CRLH 전송선 모델의 모습이며 세 개의 인접 단들을 보이고 있다. 그런데 이들은 물리적 구현에서 발생하는 기생소자들을 쓰면 CRLH-TL이 된다. 각각의 단은 두 쌍의 인덕터와 커패시터로 구성된다. 여파기를 설계하고 구현하는 과정에서는 (L_R, C_L)와 (C_R, L_L)의 독립적인 두 요소의 구조로 나뉜다. 하나의 요소 구조에서 L과 C는 자계와 전계 결합량을 의미한다. 일반적인 전송선 구조에서는 자계 결합과 전계 결합 중 한가지 특성만 가지도록 설계되었으나 본 논문에서는 두가지 결합 특성을 모두 취할 수 있도록 설계할 것이다. 그림 1의 전송선 모델에서 볼 수 있는 네 가지 성분들을 모두 이용하여 초광대역의 차단대역을 형성할 것이다.

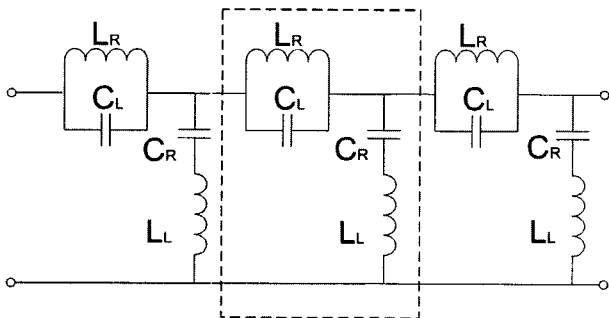


그림 1. 일반적인 주기적 Dual CRLH 전송선 모델
Fig. 1. Usual periodic Dual CRLH transmission line model.

2. 여파기의 설계와 등가회로 모델

CRLH 전송선의 주기적 구조나 다단 구조를 사용하면 차단 대역을 넓히거나 스킵트 특성을 향상시키는데 도움이 될 수 있지만, 단 수에 비례하여 여파기의 크기가 커진다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 주기 구조 혹은 다단구조를 사용하지 않고 단일 단 Dual CRLH 전송선만을 이용하여 여파기를 설계하였다. 그림 1에서 점선으로 된 사각형으로 표시한 한 단을 선택하고, 포트 2 정합 특성을 미리 고려하기 위하여 그림 2에서 보는 것과 같이 π 형 등가회로를 구성한다.

그림 2는 앞에서 설명한 그림 1과 같은 특성의 회로이다. 또 한 번 언급하지만, 위의 형식을 물리적 구현에서 필연적으로 생기는 기생소자를 포함하면 CRLH가 될 수 있다. 그림 2의 L_R, C_L, C_R, L_L 이 서로 관련되어 대역저지 특성을 얻기 위한 공진을 만들어 낸다.

$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L C_L}}, \quad f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}}$$

$$f_{se} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_L}}, \quad f_{sh} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L C_R}} \quad (1)$$

위 수식은 각각 네 개의 공진 주파수에 대한 수식이다. 본 논문에서 공진 주파수 f_L 은 고 주파수 영역의 통과 대역을 형성하며, f_R 은 저 주파수 영역의 통과 대역을 형성한다. 또한 f_{se} 는 차단대역을 저주파 영역으로 확장시키는 역할을 하며, f_{sh} 는 차단대역을 고주파 영역으로 확장시키는 특성을 가지고 있다.

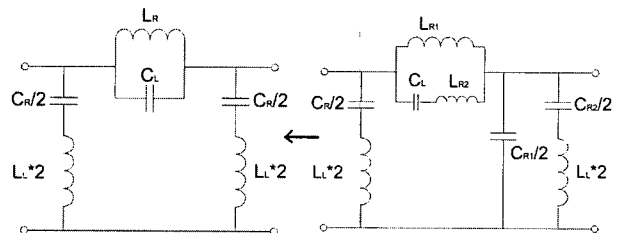


그림 2. 제안된 1단 여파기의 등가회로 모델
Fig. 2. Equivalent circuit of the proposed one cell Dual CRLH filter.

표 1. 제안 구조의 등가회로 모델에 대한 소자 값
Table 1. Values of the elements for the proposed equivalent circuit.

C_L	C_R	L_L	L_R
0.2 pF	0.15 pF	0.3 nH	0.616 nH

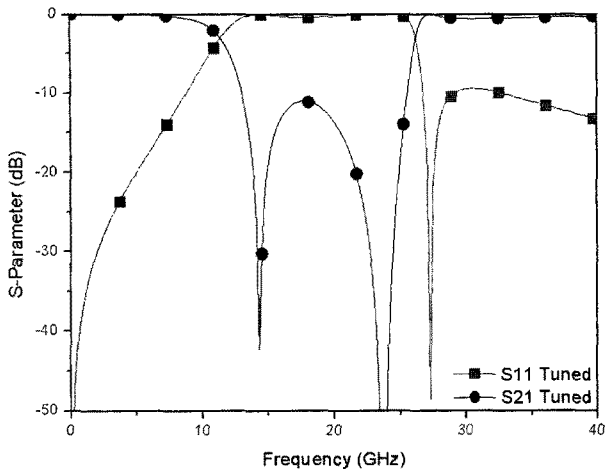


그림 3. 제안 구조의 등가회로 모델 해석 결과
Fig. 3. Simulation of the proposed equivalent circuit.

몇 차례의 반복적인 계산을 통하여 본 논문에서 제안하는 성능을 보이는 등가회로 모델에 필요한 C_L , C_R , L_L , L_R 값들을 얻어낼 수 있었고, 그 값들은 표 1에서 볼 수 있다. 표 1의 값들을 이용하여 구성한 등가회로 모델의 해석 결과는 그림 3을 통하여 볼 수 있다.

3. 여파기의 물리적 구조

그림 4에서 본 논문에서 제안하는 여파기의 구조를 볼 수 있다. 강결합형 인터디지틀 선로가 중심에 위치하고 인터디지틀 하단에 비정형적 선로를 추가하여 저주파 대역의 통과특성을 향상시켰다. 또한 인터디지틀 상단의 선로를 이용하여 부족한 인덕턴스를 보상하고 계단 임피던스 구조를 이용하여 설계의 자유도를 향상시켰다. 각 부분에 대한 수치는 표 2에서 볼 수 있다.

그림 5를 통하여 Stubby LPF와의 크기 비교를 볼 수

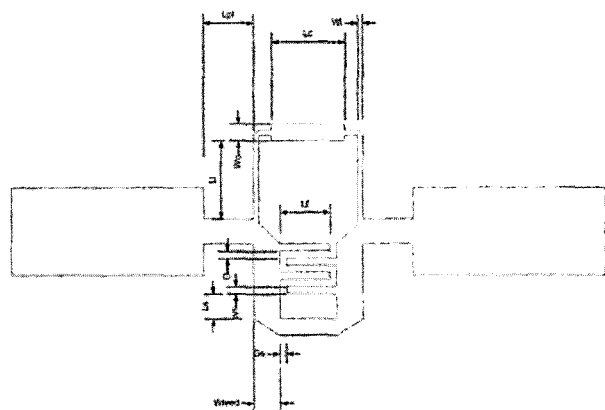


그림 4. 제안하는 여파기의 물리적 구조
Fig. 4. Physical structure of the proposed filter.

표 2. 제안하는 구조의 세부 수치
Table 2. Physical dimensions of the proposed geometry.

Variable	Value(mm)	Variable	Value(mm)
Lf	1.2	Ge	0.16
Lc	1.75	Wf	0.17
Ll	2	Wfeed	0.63
Lpl	1.2	Wc	0.4
Ls	0.6	Wl	0.12
G	0.17		

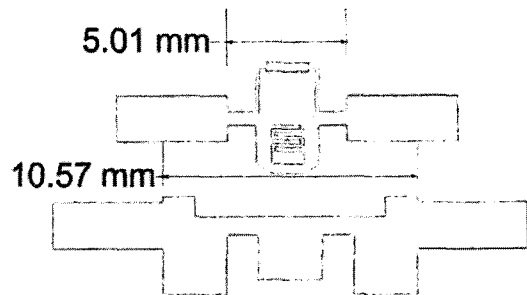


그림 5. Stubby LPF와의 제안된 구조의 크기 비교
Fig. 5. Comparing the sizes of the stubbed LPF with the proposed geometry.

있다. Stubby LPF와 비교하여 크기가 1/2 이하로 감소하였다.

III. 실험

앞에서 제안한 구조에 대하여 $\epsilon_r=4.4$, $\tan\delta=0.02$ 를 갖는 FR-4 기판을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 그림 6은 본 논문에서 제안한 구조의 각 수치의 변화에 따른 EM 모의실험 결과를 나타낸다. 그림 6(a)에서는 인터디지틀 길이(Lf)를 조절한 것인데, 이 값이 길어짐에 따라서 차단대역이 저주파로 이동하고, 그림 6(b)는 인터디지틀의 간격(G)이 넓어짐에 따라서 차단대역이 고주파로 이동하는 것을 나타내고 있다. 그림 6(c)와 (d)는 각각 하단과 상단의 전송선 길이(Ls, 이동)의 길이에 따른 변화를 나타내고 있는데, 이 길이가 길어질수록 차단대역이 저주파로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그림 6(a)에서는 길이가 길어짐에 따라 C_L 이 증가하게 되며 차단대역이 저주파로 이동하는 것은 그림 2의 회로와 식(1)에 의하여 f_L 과 f_{se} 가 작아져서 나타나는 것으로 설명할 수 있다. 그림 6(b)에서는 간격이 멀어짐에 따라 C_L 이 감소하게 되며 반대로 f_L 과 f_{se} 가 커져서 나타나는 것으로 설명할 수 있으며, 그림 6(c)와 (d)는 L_R 이 증가함에 따라 f_R 과 f_{se} 가 작아져서 나타나는

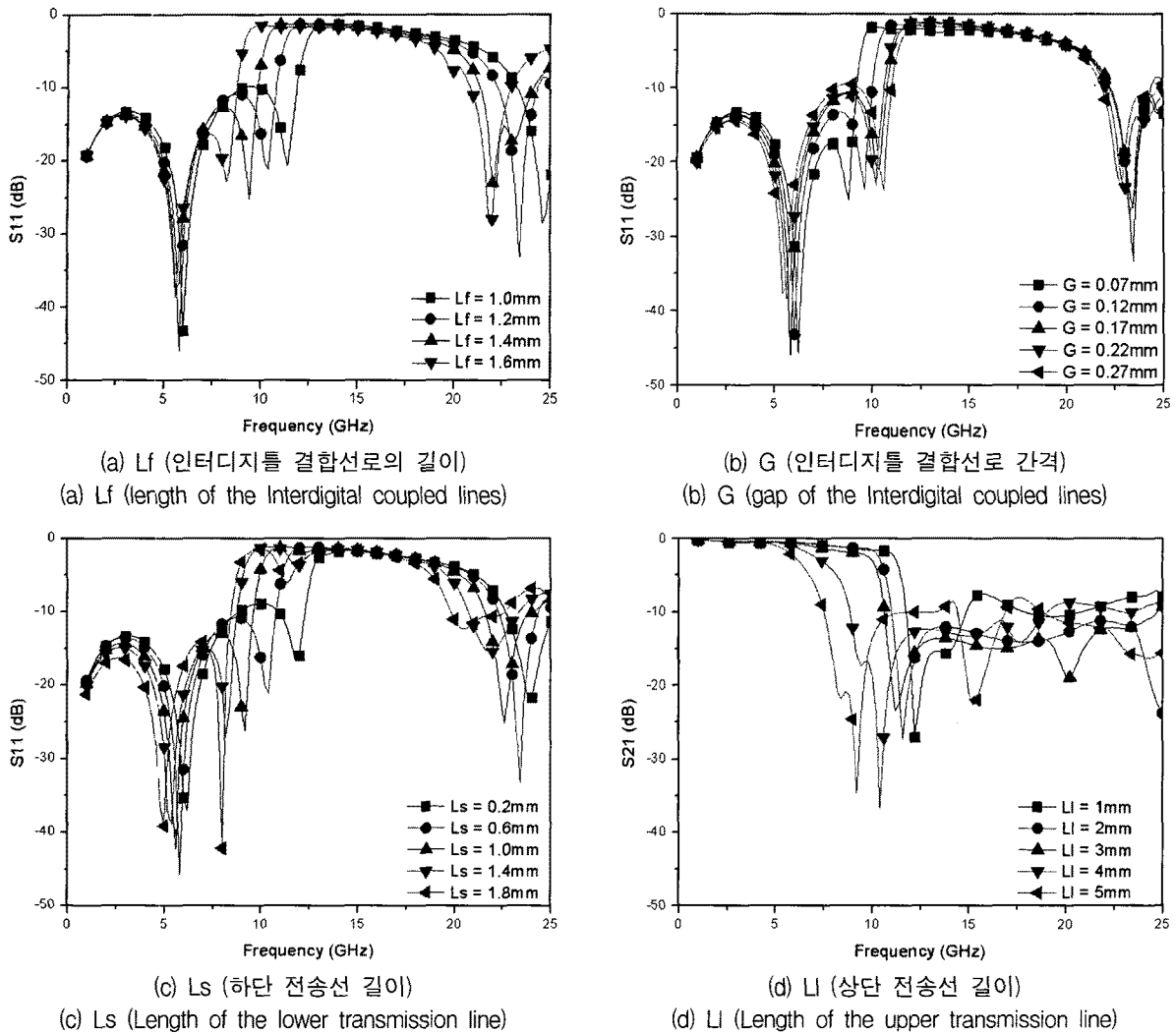


그림 6. 제안한 여파기 구조의 주요 치수들의 변화에 따른 EM 모의실험 결과

Fig. 6. EM simulations vs variation of representative physical dimensions of the proposed geometry.

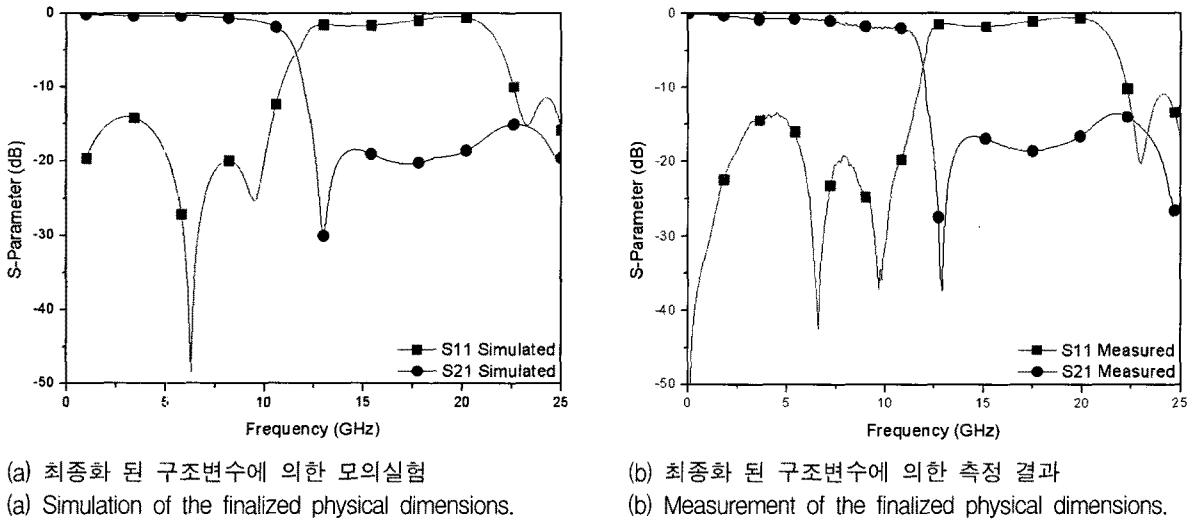


그림 7. 최종화 된 여파기의 구조변수의 EM 모의실험 결과와 제작된 여파기의 측정 결과

Fig. 7. Simulation and measurement of the finalized physical dimensions.

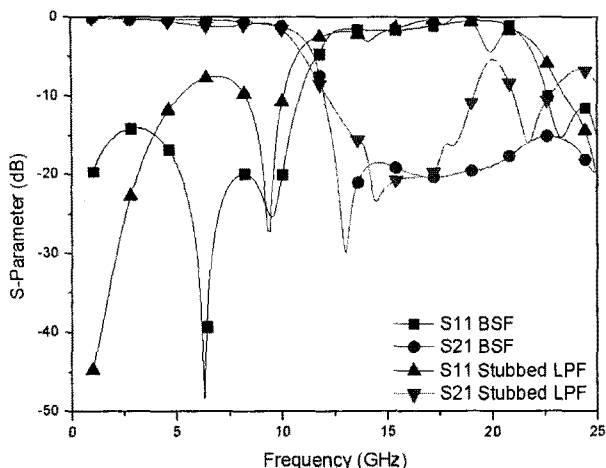


그림 8. 제안구조와 기존 stubbed LPF와의 성능 비교
 Fig. 8. Proposed filter VS. Stubbed LPF.

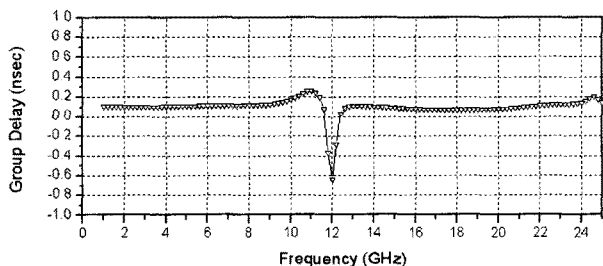


그림 9. 제안된 여파기의 군지연 특성
 Fig. 9. Group-delay of the proposed filter.

것으로 설명할 수 있다.

그림 7은 제안한 여파기의 EM 모의실험 결과와 제작된 여파기의 측정 결과를 나타내고 있다. 통과영역에서의 안정적인 반사손실과, 차단대역에서의 우수한 삽입손실을 나타내고 있으며, 제작 후 측정된 결과에서도 모의 실험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 8은 Stubbed 저역 통과 여파기와의 비교 결과를 나타내고 있다. 기존 여파기와 비교하여 통과대역에서의 반사손실이 눈에 띄게 향상되었으며 기존 구조에서는 차단대역이 좁고 불안정한 결과를 보이는 반면에 제안한 구조에서는 향상된 스퀘트 특성과 안정적인 차단대역을 보인다.

3D EM 모의실험을 통하여 제안된 여파기의 군지연 특성을 확인해 보았다. 대역 여파기 설계 시 흔히 중심 주파수로부터 대역 가장자리로 갈수록 군지연이 증가하게 되는데, 군지연의 증가율이 클수록 위상차에 의한 신호 왜곡이 커지므로 통과 대역 내에서의 군지연 평탄도 또한 설계시 중요하게 생각해야 할 점이다. 본 논문의 구조에서는 저주파 통과대역에 해당하는 DC~10.8GHz 대역에서 군지연의 변화폭이 약 0.15nsec로 아

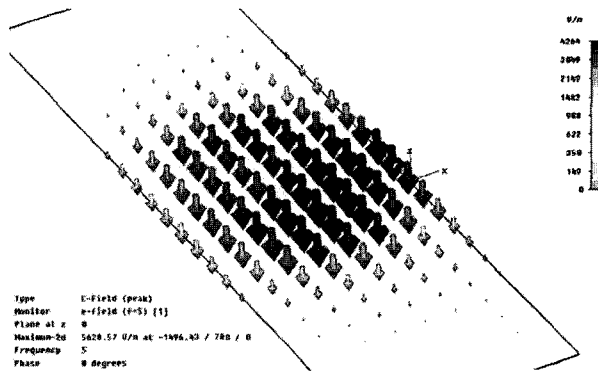


그림 10. 제안된 여파기의 통과대역 0차 공진점에서의 전계 분포
 Fig. 10. E-field distribution at the zero order resonance frequency, of the proposed filter.

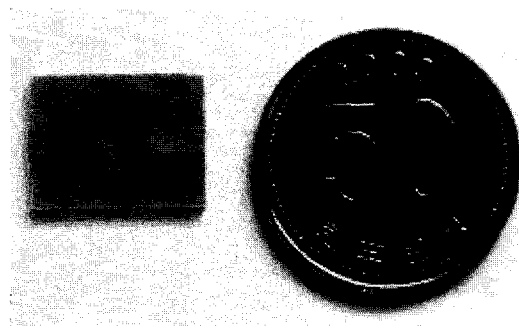


그림 11. 제작된 여파기의 크기 비교 사진
 Fig. 11. Proposed filter far less than a coin.

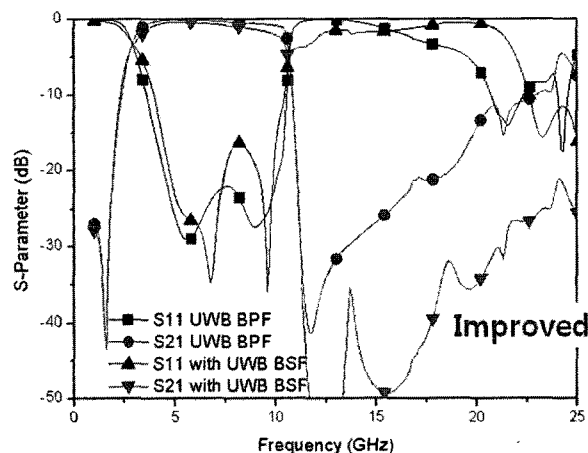


그림 12. 기존 제작된 UWB 대역 통과 여파기와의 결합
 Fig. 12. Composite with pre-designed UWB Band-pass Filter.

주 작다. 다시 말하면, 평탄도가 우수하다고 할 수 있다.

그림 10에서 본 논문에서 제안한 여파기의 '0차 공진' 주파수에서의 전계분포를 볼 수 있다. 여파기 구조 전체에 걸쳐 전계가 같은 방향으로 분포해, Metamaterial 조건을 만족한다.

그림 11에서 제작된 여파기가 소형주화 보다 매우 작음을 알 수 있다.

본 연구팀에서 기존에 제작한 UWB 여파기^[3]의 차단 영역이 다소 좁다는 단점을 본 논문에서 제안한 여파기와 결합을 통해 개선하였다. 그림 12에서 보는바와 같이 차단영역이 향상된 결과를 얻었다.

IV. 결 론

본 논문은 Metamaterial 구조인 CRLH 전송선과 Metamaterial 특징인 0차 공진을 이용하여 1단 구조의 초광대역 대역 저지 여파기를 제안하였고, 인터디지털 평행 결합 선로와 하단과 상단에 우회 전송선을 연결하여 초광대역의 통과대역과 차단대역을 형성하였다. 설계 결과 여파기의 전체 크기가 약 5mm로 $\lambda_g/10$ 이하의 초소형 구조이며, UWB 대역의 통과 대역과, Ku, Ka대역에 이르는 차단대역을 가지는 결과를 보였다. 이 여파기는 기존 UWB 대역 통과 여파기와 결합하여 더욱 우수한 효율성을 기대할 수 있으며, 특히 통신 장비의 소형화에 도움이 될 것을 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Hong J.-S., Lancaster M.J., "Microstrip filters for rf/microwave applications", John Wiley&Sons, 2001
- [2] Christophe Caloz, Tatsuo Itoh, "Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave application", John Wiley&S, 2006
- [3] 강승택, 주정호, "일단 CRLH 전송선 구조를 이용한 소형 초광대역 대역 통과 여파기의 설계", 한국전자과학회논문지, 제18권, 제12호, 1402-1407, 2007.12
- [4] Jeongho-Ju, Sungtek Kahng, "The Compact UHF CT-Type Bandpass Filter with a mixed Coupling" JOURNAL OF THE KOREA ELECTROMAGNETIC ENGINEERING SOCIETY, VOL. 7, NO. 3, SEP. 2007.
- [5] 강승택, 주정호 "초소형 메타 재질 구조와 스텔브를 이용한 통과특성과 차단 대역이 향상된 초광대역 대역통과 여파기" 등록 번호:10-0895617
- [6] 주정호, 강승택, "E- 결합 인버터를 가지는 메타재질 구조와 스텔브를 이용한 초소형 UHF 대역용 대역 통과 여파기" 등록 번호:10-0895616
- [7] 신은철, 강승택, "Zero-Order Resonator 결합의 Metamaterial 구조를 응용한 T-DMB 대역 통과

여파기의 소형화와 차단 대역 특성의 개선," 한국전자과학회 논문지 제 19권 제12호, pp. 1462-1469, 2008.12

- [8] 강승택, 주정호, "Design of the UWB BandPass Filter of Microstrip CRLH-TL Metamaterial Cell Type with Improved Rejection Performance", 전자공학회 논문지, 제45권 TC편, 제8호, 624-629, 2008.08

저 자 소 개



강 승 택(정회원)

1996년 3월~2000년 2월
한양대학교 전자통신
공학과 (공학박사)

2000년 2월~2000년 4월
한양대학교 산업과학
연구소 연구원

2000년 4월~2004년 2월 한국전자통신연구원
통신위성개발센터 선임연구원

2004년 3월~현재 인천대학교 정보통신공학과
교수

<주관심분야 : 전자파 수치해석 및 응용,
EMI/EMC 대책, 초고주파 부품 및 안테나 설계>



임 동 진(정회원)

2003년~현재 인천대학교 정보
통신공학과 (2010년 2월
졸업예정)

<주관심분야 : Metamaterial, RF
수동회로, 안테나, EMI/EMC>



장 건 호(정회원)

2009년 인천대학교 정보통신
공학과 학사졸업.

2009년~인천대학교 정보통신
공학과 석사과정.

<주관심분야 : Metamaterial, RF
부품, 적층형 및 고이득 안테나,
SI/PI 등>