

# 유도 결합형 Inverter와 Metamaterial을 이용한 넓은 저지 대역을 갖는 소형 GSM 대역 통과 여파기의 설계

## Design of the Miniaturized UHF Bandpass Filter with the Wide Stopband Using the Inductive-Coupling Inverters and Metamaterials

주 정 호 · 강 승 택\*

Jeongho Ju · Sungtek Kahng\*

### 요 약

본 논문은, ‘불균형 조건의 메타 재질 구조’를 이용하여 GSM 대역에서 불요파 억제와 효과적인 소형화를 얻는 새로운 대역 통과 여파기 설계 기법을 제시한다. 기존의 반파장 및 0.25배 파장 공진기 기반의 여파기들과 비교하여, 본 CRLH 여파기는 처음으로 제안되는 유도성 결합 inverter에 의해 0차 공진기들이 결합되고, 이것을 사용함으로써 40~50 dB 하모닉 억제 효과와 80 %율의 소형화 얻는데 위한 우수한 성능을 보여준다. 이 기법의 타당성이 등가 회로와 분산도의 도출과 함께 성능 예측과 실험을 통해 검증된다.

### Abstract

This paper presents a novel bandpass filter design method for suppressing spurious response in the GSM band and effectively reducing the overall size with the unbalanced-conditioned metamaterials. Compared to the conventional bandpass filters based on half-or quarter-wave resonators, the CRLH(composite right/left-handed) bandpass filter works excellently in harmonic-suppression by 40~50 dB and 80 %-miniaturization using the zero-order resonators bridged by Inductive-coupling Inverters suggested first time. The proposed technique, with the equivalent circuit and dispersion diagram, is validated by performance predictions and experiments.

Key words : Bandpass Filter, Metamaterial, Spurious Rejection, Zero Order Resonance, Miniaturization

### I. 서 론

대역 통과 여파기는 회로상에서 중요한 역할을 하고 있다<sup>[1]~[7]</sup>. 일반적인 공진기는 반파장의 구조적 공진을 이용한다. 이러한 반파장 공진기를 이용한 여파기의 크기는 공진 주파수에 의존을 하며, 공진 주파수의 체배수 지점에서 불요 공진이 나타나게 되어 대역 저지 특성은 나빠진다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 metamaterial 전송선을 이용하여 부품의 크기를 줄이는 방법들이 최근에 소개되어지고

있다<sup>[1]~[4]</sup>. 그러나 metamaterial 전송선을 이용하는 경우라도 적합한 조건을 부여해야만 우수한 선택도와 대역 저지 특성을 만족시킬 수 있다<sup>[6]~[8]</sup>. 본 논문에서는 선택도와 넓은 차단 대역을 가지는 GSM 여파기의 새로운 프로토타입을 제시하고 이를 기반으로(lumped 소자는 없이) 순수한 metamaterial 공진구조와 유도 결합형 inverter로 연결하는 새로운 설계 기법을 이용하여 대역 통과 여파기를 설계하였다. 특히 실용화를 위해, 일반 마이크로스트립 구조로 구현하는 경제적인 방안을 쓴다. 설계된 대역 통과

한국전자통신연구원(Electronics & Telecommunication Research Institute)

\*인천대학교 정보통신공학과(Dept. of Info. & Telecomm. Eng., University of Incheon)

· 논문 번호 : 20071130-01S

· 수정완료일자 : 2008년 2월 12일

여파기의 등가 회로, 3차원 시뮬레이션, 제작품의 측정 결과의 비교를 통해 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

## II. 이론

일반 공진기와 CRLH(Composite Right-& Left Handed) 공진기는 위상이 180°나 배수가 되는 지점에서 공진이 발생하는 공통점이 있다. 하지만 두 공진기 간에는 차이점이 존재한다.

첫 번째는 그림 3과 같이 일반 공진기는  $\beta^*l$ 이  $+n\pi$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ )에서 공진이 일어나며, CRLH 공진기는  $\beta^*l$ 가 0이나  $\pm n\pi$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ )에서 일어난다. 이런 현상은 크기의 제한으로 생성되는 문제로 기본적으로 CRLH 공진기는  $\lambda/4$ 보다 작아 인덕터나 캐패시터로 등가 모델을 꾸밀 수 있으며, LH(Left Handed) 전송선에 의하여  $\beta$ 의 값이 음의 값을 가지며 LH 전송선과 RH 전송선의 상호 영향에 의하여  $\beta$ 의 값이 0를 가진다. 위상도 설계에 따라 일반 전송선과 같은 기울기를 가질 수 있다. 이런 일반 전송선과 같은 위상 특성과 공진기의 크기가 중심 주파수에서  $\lambda/4$ 보다 작은 특성으로 인하여 CRLH 공진기를 LC ladder 형태로 등가화 할 수 있다. 하지만 일반 공진기는 공진 주파수의  $\lambda/2$ 을 가지므로 일반적인 LC ladder 형태로 등가화 할 수 없다. 그래서 LC 탱크 회로로 등가 회로를 구현하게 되며, 공진 주파수와 차단 주파수 사이에서 급격한 위상의 천이가 발생하는 특징을 가지고 있다.

아래 그림 1은 일반 전송 선로와 CRLH 전송 선로의 분산 다이어그램을 보여 주고 있으며, 그림 2는 각각 공진기의 등가 회로를 보여주고 있다.

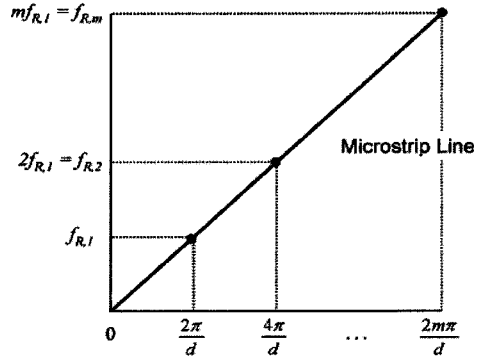
분산 다이어그램을 통해 다음과 같은 CRLH 공진기의 성질을 알 수 있다.

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} \quad (1)$$

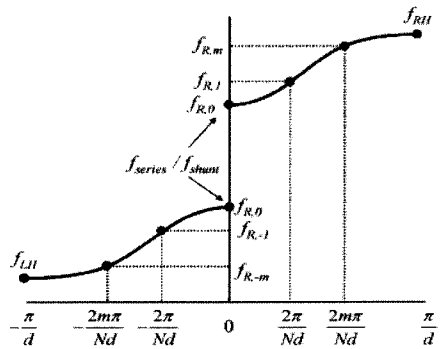
$$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{L_L C_L}} \quad (2)$$

$$Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (3)$$

$$Z_R = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (4)$$



(a) 기존 RH-전송 선로  
(a) Conventional right-handed transmission line



(b) CRLH 전송 선로  
(b) CRLH transmission line

그림 1. RH와 CRLH 분산 다이어그램  
Fig. 1. Dispersion diagrams for RH and CRLH lines.

$\omega_{se}$ 와  $\omega_{sh}$ 는 각각 CRLH 공진기의 직렬과 병렬 공진점이다. 마지막으로  $Z_L$ 과  $Z_R$  각각의 모드에서 특성 임피던스이다.

두 번째는 전송 선로 상에서 구현상의 문제로 일반 공진기는 공진 주파수의  $\lambda/2$ 로 설계된다. 하지만 CRLH 공진기는 공진 주파수의 파장 길이인  $\lambda/4$ 보다 작다는 조건하에서 L, C 등가 회로로 표현할 수 있다.

마지막으로 위상의 기울기 차이로 인해 Q-factor가 일반 공진기보다 전송 선로로 구현된 CRLH 공진기가 낮다는 점이다. 이런 점은 대역 통과 여파기 설계 시 스킵트 특성은 나빠지지만 대역폭은 확장시킬 수 있다.

## III. 설계 및 결과

L-Coupling(유도 결합)을 이용해서 대역 통과 여

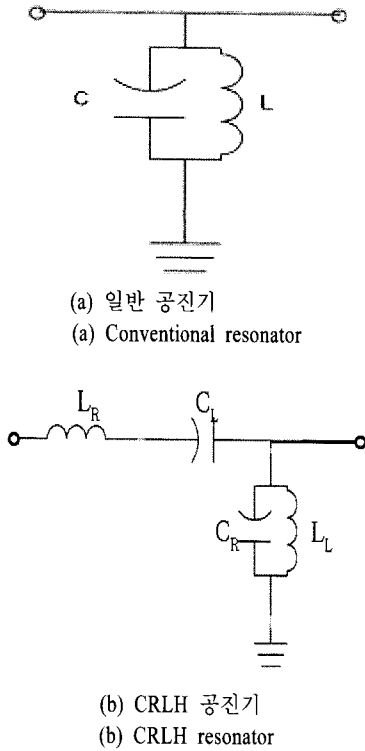


그림 2. 공진기의 등가 회로

Fig. 2. Equivalent circuits of RH and CRLH resonators.

파기를 설계하면 유도 결합은 전송선과 같은 위상 특성을 가지므로 전체 결합보다 넓은 대역 통과 특성을 얻을 수 있다. 이와 같은 이유로 GSM 대역용 여파기 설계에 자계 결합을 이용하였다. CRLH 공진기를 사용하여 설계된 대역 통과 여파기는 그림 3과 같으며, 대역 통과 여파기의 전체 크기는 25.8×24.5 mm이다. 신호의 입력단은 50 Ω 전송선을 사용하였고, 입력단과 CRLH 공진기, CRLH 공진 기간의 사이에는 자계 결합을 생성하기 위하여 전송선의 폭과 길이를 조절하면서 최적화 된 전송선이 위치해 있다. 전송선의 크기는 각각 첫 번째 전송선 길이는 0.75 mm, 너비 0.44 mm이고 두 번째는 길이 0.51 mm, 너비 0.5 mm이다. 그리고 첫 번째 전송선과 세 번째 전송선의 크기가 같으며, 두 번째와 네 번째의 전송선의 크기가 같다.

대역 통과 여파기를 구성하는 CRLH 공진기의 크기는 그림 3, 표 1과 같다.

이렇게 구해진 CRLH 공진기와 유도 결합 역할

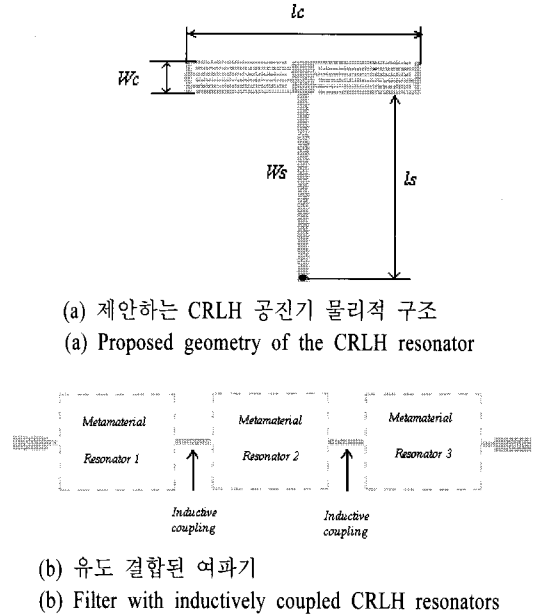


그림 3. CRLH 공진기와 유도 결합된 여파기

Fig. 3. Schematic of CRLH resonators combined by inductive coupling inverters.

표 1. CRLH 공진기의 물리적 크기

Table 1. Physical dimensions of the CRLH resonator.

	CRLH 공진기 1	CRLH 공진기 2
$l_c$	7.68 mm	3.98 mm
$w_c$	1.8 mm	1.8 mm
$l_s$	15.92 mm	22.7 mm
$w_s$	0.4 mm	0.4 mm

을 하는 전송선은 pi 등가 모델을 통하여 회로 소자 값으로 추출하였다. 추출 방법은 참고문헌<sup>[1]</sup>을 참고하였다. 추출되어진 각 소자의 값은 다음 표 2와 같다.

표 2. CRLH 공진기의 등가 회로 값

Table 2. Equivalent circuit elements of the CRLH resonator.

	CRLH 공진기 1	CRLH 공진기 2
$L_R$	6.24 nH	4.88 nH
$C_L$	0.32 pF	0.12 nF
$C_R$	2.47 pF	2.03 nF
$L_L$	8.76 nH	12.26 nH

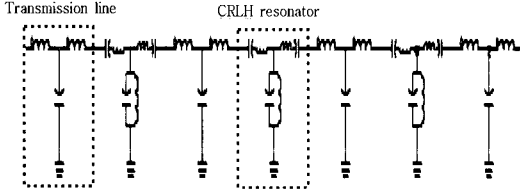


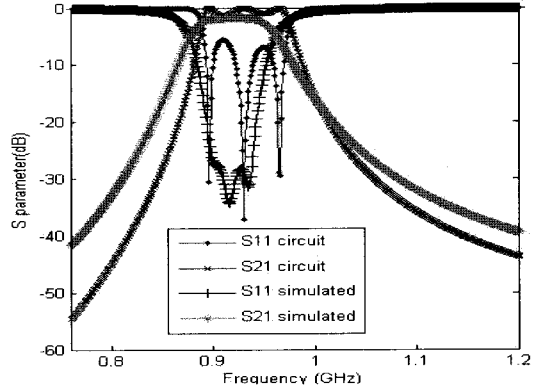
그림 4. CRLH 대역 통과 여파기의 등가 회로  
 Fig. 4. Equivalent circuit of the proposed filter with CRLH resonators combined by inductive coupling inverters.

추출된 등가 회로에서 각각의 CRLH 공진기의 특성을 알아볼 수 있다. 첫 번째 CRLH 공진기는  $f_{sh1} = 1.08$  GHz,  $f_{se1} = 3.56$  GHz,  $Z_{R1} = 50.28 \Omega$ ,  $Z_{L1} = 165.73 \Omega$ ,  $f_{cL1} = 0.87$  GHz,  $f_{cR1} = 4.44$  GHz의 값을 가지며, 두 번째 CRLH 공진기는  $f_{sh} = 1.01$  GHz,  $f_{se} = 6.58$  GHz,  $Z_R = 49.06 \Omega$ ,  $Z_L = 319.58 \Omega$ ,  $f_{cL} = 0.91$  GHz,  $f_{cR} = 7.33$  GHz이다. 추출된 회로 소자 값을 이용한 대역 통과 여파기의 등가 회로는 그림 4와 같다.

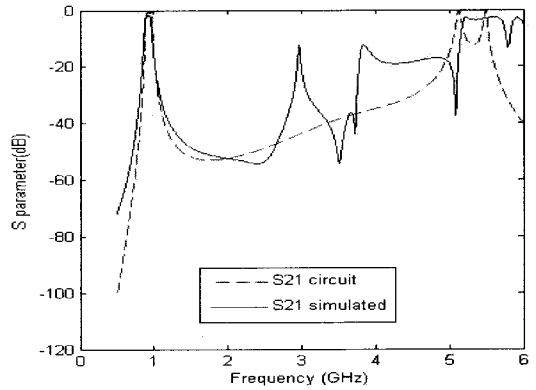
3D 시뮬레이션과 등가 회로 시뮬레이션의 결과를 비교한다. 특히 3D 시뮬레이션에 사용된 기판의 유전율은 10.2이고, 기판의 두께는 50 mil, 유전체 손실은 0.003이다. 먼저 두 경우의 크기들은 다소 차이가 있지만 이것은 문제가 되지 않고, 불균형 조건의 CRLH 여파기 절점들(통과 대역과 차단 대역)이 두 경우 잘 맞는다는 것이 핵심이다. 위의 그림에서 보듯이 삽입 손실은 최소 -1.82 dB이고, 3 dB 대역폭은 880~960 MHz의 대역폭을 가지며, 반사 손실은 -28 dB 이하며, 2.78 GHz( $3f_0$ )까지 -40 dB의 차단 대역을 형성하였다. -1.82 dB의 삽입 손실은 유전체 손실과 도전율에 의한 손실 때문에 기인한다. 3D 시뮬레이션에서 2.78 GHz, 3.9 GHz에서 불요 공진점이 발생하는 이유는 각 공진기의 2차 공진점에 의한 것이다.

CRLH 공진기들의 분산 다이어그램을 그림 6과 같이 비교해서 나타냈다. 추출 과정에서 사용된 단위 셀의 수는 10개로 하였고, SRF가 발생하기 전 영역을 기준으로 분산 다이어그램을 구했다.

위 분산 다이어그램을 보면 각각의 공진기의  $f_{sh}$ 는 1.085 GHz, 1.035 GHz에 형성된다. 즉, 불균형(un-



(a) 통과 대역 인접 영역의 특성  
 (a) Performance on the near-pass-band region



(b) 광대역 결과  
 (b) Performance on the extended-band region

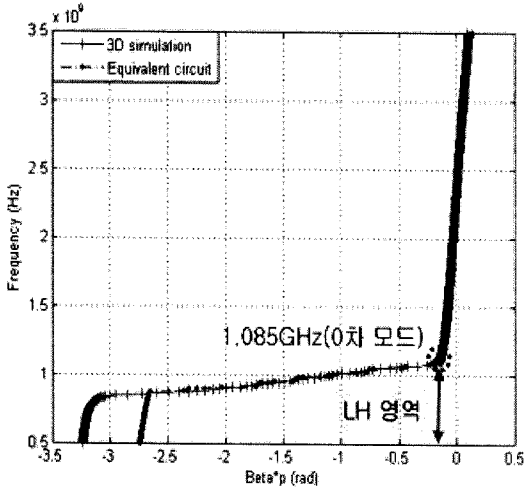
그림 5. 시뮬레이션 결과  
 Fig. 5. Comparing the 3D simulation to the equivalent circuit on the proposed filter with CRLH resonators combined by inductive coupling inverters.

balanced) 조건의 CRLH에 의해 저지 대역이 넓게 형성된다는 것이다.

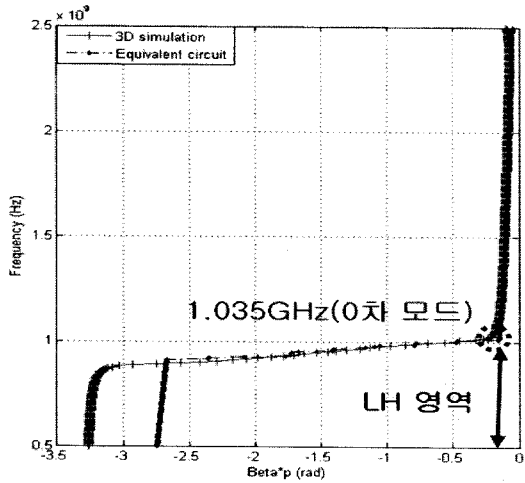
위와 같은 설계 사양으로 기존의 평행 결합 선로로 설계한 대역 통과 여파기는 그림 7과 같으며, 특성은 그림 8과 같다. 이때 크기는 135×16 mm이다.

기존의 평행 결합 선로로 대역 통과 여파기를 설계하면 크기가 CRLH 대역 통과 여파기보다 5배 이상 컸으며, 대역 저지 특성은 대역 통과 밖에서 체배수 주파수 영역에서 대역 통과 특성이 나타나게 되어 대역 저지 특성이 나빠지게 된다.

제작된 CRLH 대역 통과 여파기는 그림 9와 같으



(a) 첫(세) 번째 공진기  
(a) First(third) resonator



(b) 두 번째 공진기  
(b) Second resonator

그림 6. 여파기의 CRLH 공진기의 분산 다이어그램  
Fig. 6. Dispersion diagram for each CRLH resonator in the proposed filter.



그림 7. GSM 대역 평행 결합 선로 대역 통과 여파기  
Fig. 7. Conventional parallel edge coupled GSM filter.

며, 측정 결과는 그림 10과 같다. 그림 9의 측정 결과에서  $-1.8$  dB 삽입 손실을 가지며, 3 dB 대역폭은 837~929 MHz였다. 반사 손실은  $-40$  dB 이하로 측

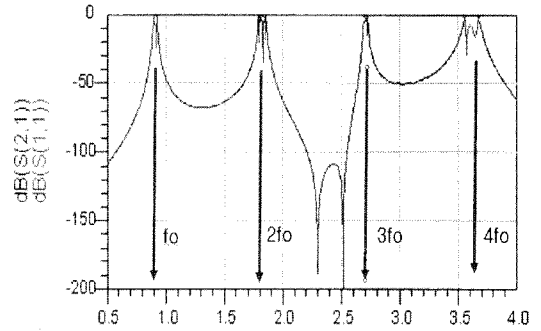


그림 8. 기존의 평행 결합 선로 대역 통과 여파기 특성  
Fig. 8. Frequency response of the conventional parallel edge coupled GSM filter.

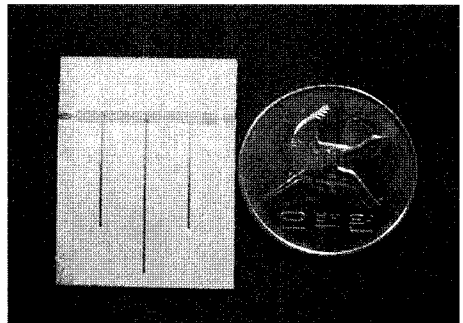
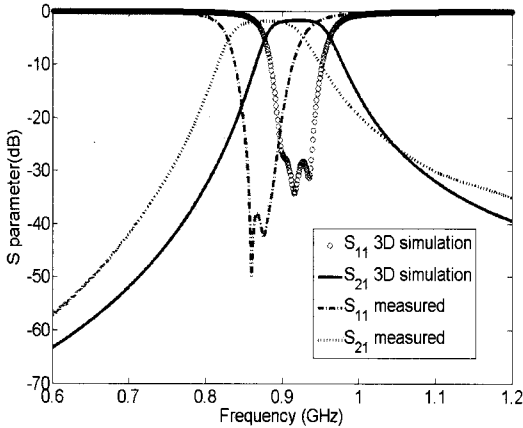


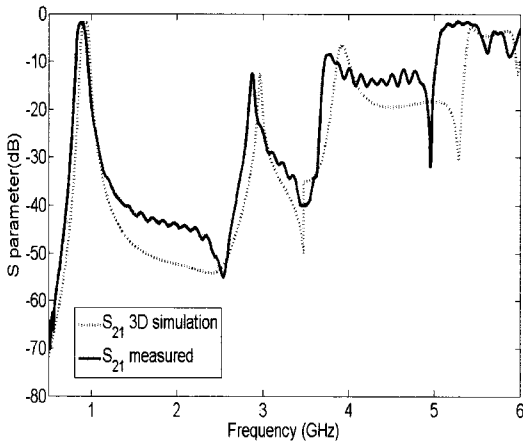
그림 9. 제작된 CRLH GSM 대역 통과 여파기  
Fig. 9. Fabricated CRLH GSM BPF.

정되었으며, 2.78 GHz까지  $-40$  dB 이하의 대역 저지 특성을 보였다. 그런데 그림 13에서 측정 결과가 3D 시뮬레이션 결과보다 통과 대역이 30 MHz 하향 이동하였다. 이런 오차는 제작시 금속의 두께가 커져  $C_R$ 이 변화하고  $f_{sh}$ 의 값이 낮아져서 0차 공진 모드의 공진점이 낮아지면서 생기는 현상이다. 그러나 확장된 대역에서는 설계와 제작 결과가 잘 일치하며, 저지 대역 특성이 크게 향상되었음을 확인할 수 있다.

광대역 관측에서, 본 구조가 기존의 여파기보다 우수한 점을 찾을 수 있다. 흔히 사용되는 평행 결합 선로 여파기의 불요파 주파수(그림 8) 지점에서 그림 10의  $S_{21}$ 을 확인해 보면 40 dB에서 50 dB 하모닉들이 억제되었음을 알 수 있다. 이들은 일반 스테르브로 억제할 수 없는 넓은 주파수 영역상의 억제 특성을 보여주는 것이다.



(a) 통과 대역 인접 영역의 특성 측정 결과  
(a) Performance on the near-pass-band region



(b) 광대역 결과  
(b) Performance on the extended-band region

그림 10. 3D 시뮬레이션 결과와 측정 결과 비교  
Fig. 10. Comparing the 3D simulation to the measurement of the fabricated CRLH resonators combined by inductive coupling inverters.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 GSM용 대역 통과 여파기를 lumped 소자를 쓰지 않고 metamaterial 특성을 이용하여 설계하였다. 특히 유도 결합의 inverter들을 0차 공진기(Z.O.R.)와 결합시키는 방식을 처음으로 제안하여 통과 대역 특성을 향상시켰다. 제안된 여파기는 기존의 평행 결합 선로 대역 통과 여파기와 비교해서 80%의 크기 감소, 2.78 GHz( $3f_0$ )까지 -40 dB로 저

지 대역 향상시켰다. 그리고 등가 회로와 분산 다이어그램을 통해 공진점 규명과 제안된 해석 방법의 유용성을 예측 특성과 측정 결과로 검증하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. A. Allen, K. M. Leong, and T. Itoh, "Design of microstrip resonators using balanced and unbalanced composite right/left-handed transmission lines", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, on vol. 54, Issue 7, pp. 3104-3112, Jul. 2006.
- [2] Zhou Jiafeng, Wang Yi, and M. Lancaster, "Compact coplanar filters using resonators with left-hand characteristics", *Microwave Conference, 2006. 36th European*, pp. 332-333, Sep. 2006.
- [3] L. Zhu, V. K. Devabhaktuni, and C. Wang, "CAD of left-handed transmission line bandpass filters", *Piers Online*, vol. 3, no. 1, 2007.
- [4] J. -X. Niu, X. -L. Zhou, "Analysis of balanced composite right/left handed structure based on different dimensions of complementary split ring resonators", *Progress In Electromagnetics Research, PIER 74*, 341.351, 2007.
- [5] 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.
- [6] 주정호, 강승택, "E-결합 인버터를 가지는 메타물질 구조와 스티브를 이용한 초소형 UHF 대역 대역 통과 여파기", 특허청출원 번호: 10-2007-00-98085.
- [7] 강승택, 주정호, "초소형 메타 재질 구조와 스티브를 이용한 통과 특성과 차단 대역이 향상된 초광대역 대역 통과 여파기", 특허청 출원 번호: 10-2007-0097825.
- [8] 주정호, 강승택, "메타물질 CRLH 구조를 이용한 넓은 차단 대역을 갖는 UHF WLAN용 소형 대역 통과 여파기의 설계", *대한전자공학회논문지(TC)*, 44(12), pp. 1-7, 2007년.

## 주 정 호



품소자, 안테나 개발

2006년 2월: 인천대학교 정보통신  
공학부 (공학사)

2006년 3월~2008년 2월: 인천대학  
교 정보통신공학과 (공학석사)

2008년 1월~현재: 한국전자통신연  
구원 원천기술연구팀 연구원

[주 관심분야] Metamaterial, RF 부

## 강 승 택\*



1996년 3월~2000년 2월: 한양대학  
교 전자통신공학과 (공학박사)

2000년 2월~2000년 4월: 한양대학  
교 산업과학연구소 연구원

2000년 4월~2004년 2월: 한국전자  
통신연구원 통신위성개발센터 선  
임연구원

2004년 3월~현재: 인천대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 부품 및 안테나 최적 설계, Me-  
tamaterial 연구 및 응용, EMI/EMC 대책, 소자모델링, 전  
자파 수치해석기법 개발 및 응용

\* 책임저자