

# 일단 CRLH 전송선 구조를 이용한 소형 초광대역 대역 통과 여파기의 설계

## Design of the Miniaturized UWB BandPass Filter Using the 1 Unit of CRLH-TL

주 정 호 · 강 승 택

Jeongho Ju · Sungtek Kahng

### 요 약

본 논문을 통해, 메타 재질 특성을 가지는 CRLH-TL 구조를 이용하는 새로운 개념의 초광대역(UWB) 대역 통과 여파기의 설계법이 제시된다. 기존의 주기성 혹은 유한 다단 구조의 CRLH-TL가 아닌, 단일 구조만을 이용하여, 관내 파장의 0.25배 길이의 공진기를 기반으로 하는 여파기에서 가질 수 없는 초소형 구조를 형성한다. 특히 초광대역 통과 특성을 위해 필요한 강결합은 인터디지틀 평행 결합 선로 양단의 접지된 스텐드 구조를 통해 구현된다. 제안하는 설계 방안의 타당성은 전자기 모의 시험과 제작품의 측정을 통해 증명되며, 여파기의 전체크기가 ‘관내 파장/9.4’로의 축소, UWB 100 % 이상의 통과 대역폭, 1 dB 이하의 삽입 손실, 높은 평탄도의 군지연 등의 주파수 영역 특성 결과를 보인다.

### Abstract

This paper presents a new design method of the Ultra-Wide-Band BandPass Filter using the CRLH-TL(Composite Right- and Left-Handed Transmission-line) having the Metamaterials' properties. Instead of the periodic type or many cells of the CRLH-TL, only the unit cell is used to miniaturize the target component, which can not be realized by the conventional quarter guided-wavelength resonator-based filters. Particularly, the strong coupling essential to the Ultra Wide Band is enabled by the interdigital coupled lines between the grounded stubs. The proposed design scheme is validated by the electromagnetic simulation and measurement of the fabricated filter which shows the total size of 'the guided-wavelength/9.4', the 100 % fractional bandwidth for the UWB, the insertion loss of less than 1 dB and the flat group-delay.

Key words : CRLH-TL, UltraWideBand, Bandpass Filter, Microstrip Coupled Lines, Group-Delay

### I. 서 론

최근, 미합중국 FCC에 의해 UWB 통신의 이용과 개발이 일반에게 개방된 이래로, 많은 관련 연구가 있어 왔다. UWB 통신에 연관된 연구 활동 중의 하나인 대역 통과 여파기 개발 기술도 하나 둘 발표되고 있다<sup>[1]~[5]</sup>.

참고문헌 1의 Araki 등은 일반 전송선에 UWB 대역 가장자리에 해당하는 전달 영점을 가하여 대역 통과 여파기를 설계하였다<sup>[1]</sup>. 대역 가장자리에서만 차단 특성이 발생하여 저지 대역이 거의 없는 것이 큰 단점으로 나타난다. 참고문헌 2에서 H. Wang은 큰 대역폭과 참고문헌 1보다 더 넓은 저지 대역을 얻기 위해, 다중 공진 모드(MMR)와 관내 파장의

인천대학교 정보통신공학과(Dept. of Information & Telecommunication Engineering, University of Incheon)

· 논문 번호 : 20071015-115

· 수정완료일자 : 2007년 12월 10일

0.25배 공진기를 가지는 마이크로스트립과 코플래너 선로가 결합된 여파기를 제시하였다<sup>[2],[3]</sup>. 이 여파기 설계법의 기저는 저역 통과 및 고역 통과와의 합체인 것이다. 이와 유사한 합체형 UWB 여파기가 W. Menzel에서도 제시되었는데, 저역 통과형과 고역 통과형을 스트립라인으로 만들고 다른 평면에 배치한 것이다<sup>[4]</sup>. C. Hsu는 참고문헌 [5]에서 관내 파장의 0.25배 공진기가 일곱 개 혹은 여덟 개로 연속되게 연결하고, 저지 대역을 확보하기 위해 저역 통과 여파기를 추가하였다<sup>[5]</sup>.

앞서 언급된 여파기들은 모두 ‘관내 파장/4’의 정수배 크기를 가지기 때문에, UWB 대역을 유지한 상태로, 여파기 전체를 초소형으로 만드는 데는 적합하지 않다. 기존방식의 크기 제한점 등을 해결하기 위해, 본 논문에서는 참고문헌 [6]의 CRLH-TL의 기본 개념을 이용하여 초광대역 대역 통과 여파기를 설계하는 방법을 제안한다. 그런데 참고문헌 [6]에서 주기 구조나 많은 수의 단단을 쓰는 방식과 다르게, 1단의 CRLH-TL을 취하여 관내 파장의 0.25배보다 훨씬 작은 크기로 강결합의 공진을 유도해낸다. 그리고 코플래너 구조와 혼용하는 것이 아닌, 마이크로스트립 구조만을 가지고 여파기를 구현할 것이다. 특히 강결합을 위해 인터디지털 결합 선로를 사용하는데, 다른 문헌에서 나오는 인터디지털에 의한 전계형 결합만을 사용하는 것이 아니라, 대표적인 메타 재질 특성인 균형 조건(balanced condition) 공진점을 초광대역 중심 주파수에 형성하기 위해, 인터디지털 선로의 전계형 결합도뿐만 아니라, 자계형 결합도인 유효 인덕턴스까지 함께 이용할 것이다. 또한, 기존의 CRLH-TL의 단위 셀을 본 연구에서 설계하는 초광대역에 구조에 맞도록 Pi-형으로 수정하고, 인터디지털 선로의 양단에 끝단이 접지된 스테브들을 두어 자계형 결합 및 전계형 결합을 모두 사용할 것이다. 전자기 모의 시험 과정을 통해 설계치의 타당성을 확인한 뒤, 일반 마이크로스트립 구조 공정으로 여파기를 제작한다. 그리고 제작품의 측정 결과로써 설계 방안의 품질을 확인한다. 실험 결과, 설계한 여파기는 전체 크기가 ‘관내 파장/9.4’인 초소형화를, 100 % 이상의 통과 대역폭, 1 dB 이하의 삽입 손실, 높은 평탄도의 균지연 등의 만족할만한 주파수 영역 특성을 가짐을 확인할 수 있

## II. 설계 이론

근래 전자파 응용 분야에서 관심의 대상이 되고 있는 메타 재질 구조는, 일반 전자기 이론에서 언급하지 않았던 특이한 현상을 보인다. 분산 특성에서 군속도와 위상속도가 다른 부호를 가져, 오른손 진행 법칙이 아닌 왼손 진행 법칙으로 전파 진행이 설명된다. 한 예로, 자유 공간에서 메타 재질로 전자파가 진행할 때, 투과파의 횡 방향 성분이 입사파의 것과 반대가 된다. 오른손(RH) 진행 법칙의 선로(RH-TL)와 왼손 진행(LH)법칙의 선로(LHTL)를 결합할 경우, 통과 및 차단 대역이 기존의 RHTL만의 것과 다르게 형성되는 점을, 참고문헌 [6]은 그림 1의 모델과 함께 응용, 연구해 오고 있다.

그림 1은 전체적으로 CRLH-TL의 주기적 모습으로 세 개의 인접 단들을 보이고 있다. 각각의 단은 두 쌍의 인덕터와 커패시터로 구성된다. ( $C_{Ri}, L_{Ri}$ )은 RHTL을, ( $C_{Li}, L_{Li}$ )은 LHTL 현상을 설명하기 위한 것이다. 그런데 이들 쌍은 동일 공진기에 속하지 않아, 설계와 구현 과정에서 ( $L_{Ri}, C_{Li}$ )와 ( $C_{Ri}, L_{Li}$ )인 독립적인 요소 구조로 나뉜다. 하나의 요소 구조에서  $L$ 과  $C$ 는 자계 및 전계 결합함을 의미한다. 일반적인 요소 구조는 자계 결합과 전계 결합 중 한 가지만 가지도록 사용되었으나, 본 연구에서는 두 개의 다른 결합 방식을 모두 취하도록 물리적 치수를 결정할 것이다. 즉  $L_{Ri}, C_{Li}, C_{Ri}, L_{Li}$  모두가 이용되어 초광대역을 형성할 것이다.

서론에서 언급되었듯이, CRLH-TL의 주기적인 구조라든지 단단 구조를 사용하지 않고 단일 단만을 이용하려고 한다. 위의  $i$ 번째 단을 선택하고 2 포트 정합 특성을 미리 고려하기 위해 그림 2와 같이  $\pi$

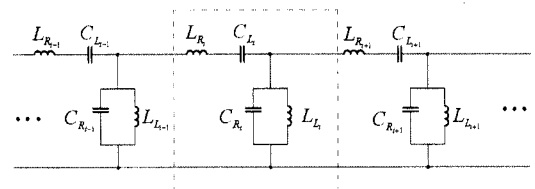


그림 1. 주기적 CRLH-TL의 모델  
Fig. 1. Periodic CRLH-TL model.

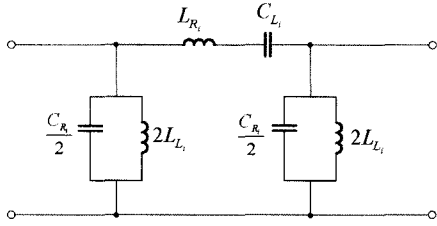


그림 2. 제안하는  $\pi$  형 1단 CRLH-TL 등가 회로  
Fig. 2. Proposed  $\pi$ -type 1-stage CRLH-TL equivalent circuit.

형 등가 회로를 취한다.

그림 1의 1단과 그림 2는 동일한 특성의 회로들이다. 그림 2에서도  $L_{Ri}$ ,  $C_{Li}$ ,  $C_{Ri}$ ,  $L_{Li}$ 이 요구되는 대역 특성을 얻기 위해 서로 서로 관련된다. 이들은 우리가 필요로 하는 RH 하한 주파수와 LH의 상한 주파수를 같게 만드는 기법인 균형 조건 하에서 3~10 GHz 대역을 형성하는데 이용한다. 설계 변수 결정에 사용되는 식은 다음과 같다.

$$f_{Li} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Li}C_{Li}}}, \quad f_{Ri} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Ri}C_{Ri}}}$$

$$f_{sei} = f_{shi} = f_0, \quad f_0 = \sqrt{f_{Li}f_{Ri}} \quad (1)$$

단,

$$f_{sei} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Ri}C_{Li}}}, \quad f_{shi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Li}C_{Ri}}}$$

본 설계에서 추구하는 균형 조건에 의해 ( $L_{Ri}$ ,  $C_{Li}$ )와 ( $C_{Ri}$ ,  $L_{Li}$ )에 의한 공진 주파수  $f_{sei}$ 와  $f_{shi}$ 는 같게 놓여진다. 그리고  $f_{Li}$ ,  $f_{Ri}$ ,  $f_{sei}$ ,  $f_{shi}$ 와  $f_0$ 는 각각 대역 하한 주파수, 대역 상한 주파수, 직렬 공진 주파수, 병렬 공진 주파수, 대역 중심 주파수에 해당된다. 위의 방정식들을 풀게 되면 주요 설계 변수들인  $L_{Ri}$ ,  $C_{Li}$ ,  $C_{Ri}$ ,  $L_{Li}$ 가 구해진다.

초광대역을 가지는 대역 통과 여파기 설계에서 요구되는  $L_{Ri}$ ,  $C_{Li}$ 를 얻기 위해, 강결합형 인터디지틀 결합 선로 구조를 이용한다. 이 구조 이외에도 여러 종류의 후보 구조가 있겠지만 공정이 비싸지 않으면서 두 개의 설계 변수들을 물리적으로 얻어낼 수 있는 형상을 선택한 것이다.

우선 요구되는 전계 결합량  $C_{Li}$ 이 결정되었으므로, 해당되는 물리적 치수의 초기치들을 아래의 근

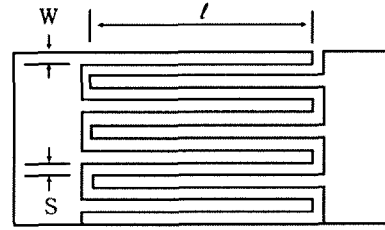


그림 3. 마이크로스트립 인터디지틀 결합 선로  
Fig. 3. Microstrip interdigital coupled line.

사 관계식을 이용하여 계산한다.

$$C(pF) = \frac{\epsilon_{re} 10^{-3} K(k)}{18\pi K'(k)} (n_{DF} - 1)l \quad (2)$$

단,

$$k = \tan^2\left(\frac{a\pi}{4b}\right), \quad a = \frac{W}{2}, \quad b = \frac{W+S}{2}$$

$K(\cdot)$ 와  $K'(\cdot)$ 는 1종의 완전 타원 적분(Complete Elliptic Integral of the 1st kind)과 해당 상보(complement) 함수이다. 위의 식을 통해  $C_{Li}$ 를 만족하는 평행 선로들의 공통 길이, 폭, 간격, 선로 쌍의 개수를 결정하게 된다. 또한, 그림 3의 마이크로스트립 선로형 인터디지틀 결합 선로의 자체 결합용  $L_{Ri}$ 와 치수들 초기치와의 근사적 관계식은 참고문헌 [7]로부터 참조할 수 있다. 이상은 그림 2의 직렬 공진 회로 구현에 대한 것이었다. 다음은  $\pi$  형 1단 CRLH-TL 등가 회로의 병렬 공진의 구현 단계이다. 접지된 병렬 인터디지틀에 가장 적합한 구조는 그림 4의 단락된 스텐브이다.

접지된 스텐브의 치수를 사용하여 앞서 계산된  $C_{Ri}$ ,  $L_{Li}$ 를 만족시켜야 한다. 먼저  $L_{Li}$ 에 해당하는 길



그림 4. 접지된 마이크로스트립 선로 스텐브  
Fig. 4. Grounded microstrip line stub.

이와 폭의 초기치를 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$L(nH) = 2 \times 10^{-4} \left[ \ln\left(\frac{l}{W+t}\right) + 1.193 + 0.224 \frac{W+t}{l} \right] \cdot K_g \quad (3)$$

단,

$$K_g = 0.57 - 0.145 \ln\left(\frac{W}{h}\right)$$

$h$ 와  $t$ 는 순서대로 유전체 기판의 두께와 금속의 두께를 의미한다. 실제로 식 (3)은 인터디지털 선로의 직렬 자계 결합  $L_{Li}$  결정에 사용될 수 있다. 단락 스테브의  $L_{Li}$ 를 얻을 때, 참고문헌 [7]에 수록된 커패시턴스의 공식을 이용하여  $C_{Ri}$ 도 함께 구현한다. 이상과 같이 얻어진 물리적 치수의 초기값을 가지는 인터디지털 결합 선로와 단락된 스테브를 결합한 구조에 대해 3차원 전자기 모의 시험을 수행하고 원하는 결과를 얻기 위해 치수 최적화 작업을 거쳐 간다.

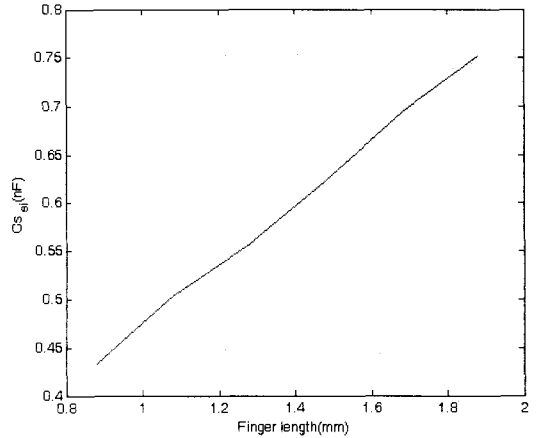
### III. 구현 및 측정 결과

첫번째로, UWB 대역 통과 특성을 만족하는 인터디지털 결합 선로에서 필요한  $C_{Li}$   $L_{Ri}$ 가 각각 0.477 pF와 5.53 nH로 계산되었다. 그림 5는 초기 치수를 찾기 위한 과정이다.

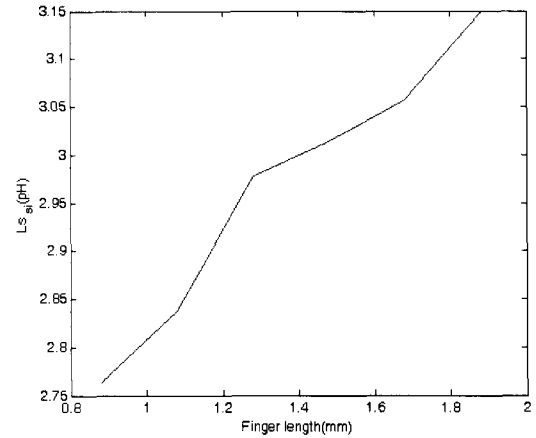
몇 번의 반복 과정을 거쳐  $C_p$ ,  $C_s$ ,  $L_s$ ,  $L_p$ 에 맞는 치수를 얻게 된다. 따라서  $W$ ,  $l$ ,  $S$ 와  $n_{DF}$ 의 초기치는 0.20 mm, 1.30 mm, 0.12 mm and 14가 된다.

$L_{Li}$ 가 1.13 nH이고  $C_{Ri}$ 가 0.20 pF로 요구되는 단락 스테브는  $W$ 는 0.5 mm를,  $l$ 은 5.0 mm를 가진다. 이 값들에 의해 설계 대역에 걸쳐 있는 RH와 LH 영역을 그림 6(a)에서 확인할 수 있다. FR4 기판을 고려한 전자기 모의 시험으로 특성을 예측한 결과는 그림 6(b)와 같이 얻어진다. 제작품에 대한 VNA의  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 을 측정 결과인 그림 6(c)와 예측치를 비교시, 전달 영점의 위치를 포함한 산란계수의 특성들이 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

또한, 그림 6의 실험 결과로부터, 제안된 구조가 UWB의 100 % 이상의 대역폭, 1 dB 이하의 삽입 손실, 15 dB 이상의 반사 손실을 가져 초광대역 통신에 적합하다고 판단할 수 있다. 이들과 함께 설계의 중요한 목표인 군지연 특성을 그림 7을 통해 확인해



(a) 결합 선로 길이 vs. Cs  
(a) Finger length vs. Cs



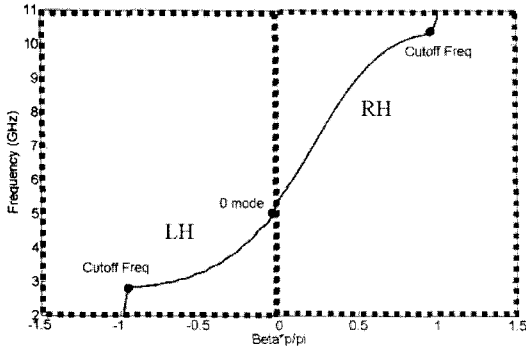
(b) 결합 선로 길이 vs. Ls  
(b) Finger length vs. Ls

그림 5. 결합 선로 길이 vs. Cs와 결합 선로 길이 vs. Ls

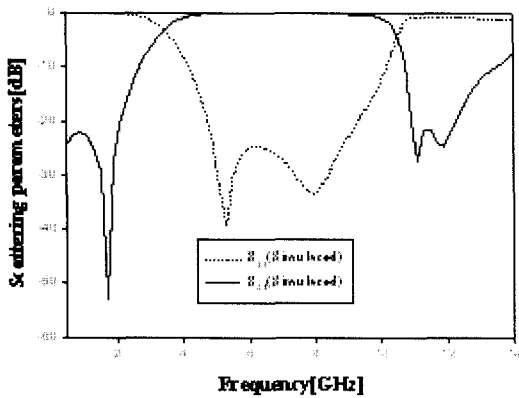
Fig. 5. Finger length vs. Cs and Finger length vs. Ls.

보았다. 대역 여파기 설계시 흔히 경험하는 것으로, 중심 주파수로부터 대역 가장자리로 갈수록 군지연은 증가하게 된다. 군지연의 증가율이 클수록 수반되는 위상에 의한 신호 왜곡이 커지므로 군지연의 대역내 평탄도가 매우 중요하다. 본 설계의 경우, 그림 7의 초광대역 내에서 군지연의 변화폭은 0.25 nsec 이하로 아주 작다. 즉, 평탄도가 우수하다고 할 수 있다. 마지막으로 설계된 초광대역 여파기의 제작품을 그림 8에서 볼 수 있다.

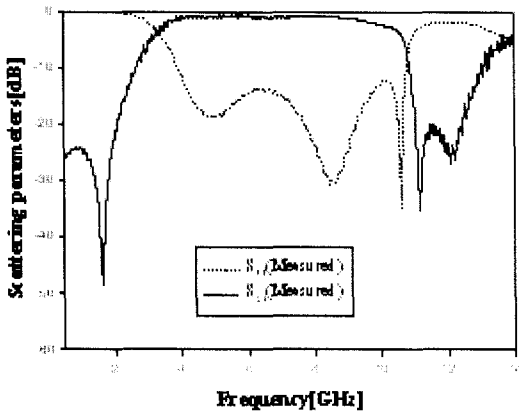
주화와의 비교를 통해 초소형화 된 모습을 확인



(a) 분산 특성 곡선  
(a) Dispersion diagram



(b) 모의 시험  
(b) Simulation



(c) 측정 결과  
(c) Measurement

그림 6. 제안된 UWB BPF의  $S_{11}$ 과  $S_{21}$  설계  
Fig. 6.  $S_{11}$  and  $S_{21}$  of the proposed UWB BPF.

할 수 있다. 실측된 여파기의 길이는 약 4.7 mm로, 관내 파장의 1/9.4배에 해당된다. 메타 재료의 RH-

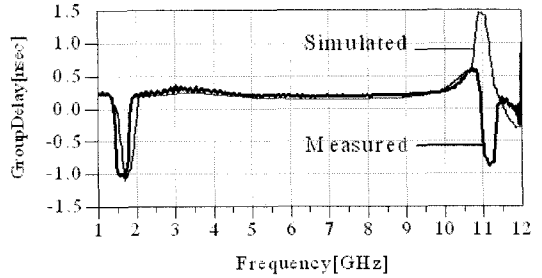


그림 7. 제안된 UWB BPF의 군지연 특성: 모의 시험과 측정 결과

Fig. 7. Group-delay of the proposed UWB BPF: Simulation and measurement.

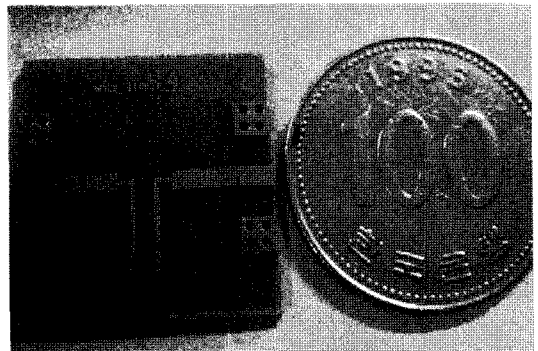


그림 8. 제작된 초광대역 대역 여파기  
Fig. 8. Picture of the fabricated UWB BPF.

LH 위상 보상 특성을 적합하게 구현해 낸 결과, 기존의 여파기 소형화 기술의 한계점을 해결할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문은 CRLH-TL 1단 구조만을 취하여, 메타 재료 특성을 갖는 초광대역(UWB) 대역 통과 여파기를 설계하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 구조는 인터디스틀 평행 결합 선로 양단의 접지된 스티브 구조로 구성되어, 강결합과 초광대역을 형성하였다. 설계 결과, 여파기의 전체 크기가 '관내 파장/9.4'로의 축소, UWB 100% 이상의 통과 대역폭, 1 dB 이하의 삽입 손실, 높은 평탄도의 군지연 등의 주파수 영역 특성 결과를 보였다. 이는 우수한 통신 품질이 요구되는 초광대역 시스템에 사용될 수 있으며, 특히 소형화에 도움이 될 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

[1] H. Ishida, K. Araki, "Design and an alysis of uwb bandpass filter with ring filter", in *IEEE MTT-S Intl. Dig.*, pp. 1307-1310, Jun. 2004.

[2] H. Wang, L. Zhu, and W. Menzel, "Ultra-wideband bandpass filter with hybrid microstrip/CPW structure", *IEEE Microwave And Wireless Components Letters*, vol. 15, pp. 844-846, Dec. 2005.

[3] S. Sun, L. Zhu, "Capacitive-ended interdigital coupled lines for UWB bandpass filters with improved out-of-band performances", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, pp. 440-442, Aug. 2006.

[4] W. Menzel, M. S. R. Tito, and L. Zhu, "Low-Loss Ultra-Wideband(UWB) filters using suspended stripline", in *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf.*, vol. 4, pp. 2148-2151, Dec. 2005.

[5] C. -L. Hsu, F. -C. Hsu, and J. -T. Kuo, "Microstrip bandpass filters for ultra-wideband(UWB) wireless communications", in *IEEE MTT-S Intl. Dig.*, pp. 675-678, Jun. 2005.

[6] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, Wiley-Interscience, John-Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ 2006.

[7] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House Inc., Norwood, MA 1996.

[8] 강승택, 주정호, "초소형 메타재질구조와 스테르브를 이용한 통과 특성과 차단대역이 향상된 초광대역 대역 통과 여파기", 특허청 출원 번호: 10-2007-0097825.

[9] 주정호, 강승택, "E-결합 인버터를 가지는 메타재질구조와 스테르브를 이용한 초소형 UHF 대역 대역 통과 여파기", 특허청출원 번호: 10-2007-0098-085.

주 정 호



2006년 2월: 인천대학교 정보통신공학부 (공학사)  
 2006년 3월~현재: 인천대학교 정보통신공학과 석사과정  
 [주 관심분야] Metamaterial, RF 부품소자, 안테나, 필터 등

강 승 택\*



1996년 3월~2000년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)  
 2000년 2월~2000년 4월: 한양대학교 산업과학연구소 연구원  
 2000년 4월~2004년 2월: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원

2004년 3월~현재: 인천대학교 정보통신공학과 교수  
 [주 관심분야] 전자파 수치해석 및 응용, EMI/EMC 대책, 초고주파 부품 및 안테나 설계

\*교신저자