두 개의 이중 모드 공진기를 이용한 소형 이중 대역 통과 필터

Compact Dual-Band Bandpass Filter Using Two Dual-Mode Resonators

김 경 근 · 이 자 현 · 임 영 석

Kyoungkeun Kim · Jahyeon Lee · Yeongseog Lim

요 약

본 논문에서는 두 개의 이중 모드 공진기를 이용하여 이중 대역 통과 필터를 구현하였다. 단락 스터브를 이용한 이중 모드 공진기는 inter-digital 커패시터와 계단형 임피던스를 이용하여 소형화 되었다. 두 개의 이중 모드 공진기는 각 통과 대역의 중심 주파수에서 동작하도록 설계되었다. 전송 영점이 통과 대역의 상측이나 하측에 위치하여 차단 특성을 향상시킬 수 있다. 이중 대역 동작을 위해 이중 급전 구조를 이용하였다. 제안된 구조는 WLAN 대역인 2.45/5.25 GHz에서 동작하도록 설계 · 제작되었다. 제안된 이중 대역 통과 필터의 크기는 10.83 mm×5.3 mm이다.

Abstract

In this paper, the design and the fabrication of dual-band bandpass filter using two dual-mode resonators is presented. Dual-mode resonator using a short stub is miniaturized by inter-digital capacitor and stepped impedance. Two dual mode resonators are designed to have different resonant frequencies, one for the lower passband and the other for the upper passband. Transmission zero is positioned at low or high rejection bands with a sharp skirt characteristic. Dual-band operation can be achieved using dual feeding structure. For WLAN, the proposed filter at 2.45/5.25 GHz is designed and fabricated. The size of the filter is as compact as 10.83 mm×5.3 mm.

Key words : Dual-Band, Dual-Mode, Source/Load Coupling, Coupling Matrix, Bandpass Filter, Dual Feeding, WLAN

Ⅰ. 서 론

최근 무선 통신 기술에 있어서 이중 대역 통과 필터에 관한 연구가 진행되고 있다. SIR(Stepped Impedance Resonator)을 이용한 이중 대역 통과 필터의 경우, SIR의 특성을 이용하여 두 번째 통과 대역을 쉽게 결정할 수 있다는 장점이 있다[1]. SIR의 특성을 이용하여 소형화된 헤어핀 공진기를 이용한 이중 대역 통과 필터나 SIR의 끝 단에 삽입된 공진기를 이용하여 이중 대역 통과 필터를 소형화 시키는 연구도 있다[2],[3]. 단락 또는 개방된 SIR을 이용한 이중 대역 통과 필터의 경우, 각 통과 대역의 중심 주파수에 해당하는 두 종류의 SIR을 설계하여 삽입하는 구조로 소형의 이중 대역 통과 필터의 구현이 간편하지만 각 통과 대역의 대역폭을 조절하기 어렵다[4],[5].

본 논문에서는 이중 대역의 각 통과 대역의 중심 주파수에 공진점을 갖는 두 개의 이중 모드 공진기들을 이용하여 이중 대역 통과 필터를 구현하였다. 각 통과 대역의 중심 주파수 결정과 차단 특성, 대역폭 조절이 용이하도록 이중 모드 공진기를 사용하였다. SIR에 inter-digital 커패시터와 단락 스터브를 삽입하여 소형의 이중 모드 공진기를 설계하였다[6]. 각

전남대학교 전자컴퓨터공학과(Department of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University)
· 논 문 번 호 : 20100827-122
· 교 신 저 자 : 임영석(e-mail : limys@chonnam.ac.kr)
· 수정완료일자 : 2010년 10월 29일

대역의 대역폭 조절을 용이하게 하기 위해 각 공진기에 결합 급전 선로를 이용하여 이중 급전하는 방법을 이용하였다. 논문에서 제안된 구조는 WLAN 대역인 2.45/5.25 GHz에서 동작하도록 설계 및 제작되었다.

Ⅱ. 공진 특성

그림 1은 제안된 공진기의 기본 구조이며, inter-digital 커패시터가 삽입된 공진기의 가운데에 단락 스터브를 추가하였다. T-T'에서 대칭인 구조이므로 even-odd 분석을 통해 공진 주파수의 변화를 살펴보았다[7],[8]. 그림 2는 공진기의 등가회로를 나타내며, SIR의 가운데에 단락 스터브와 SIR의 양 끝단에 C_{ic} 커패시터가 삽입되었다. C_{ic}는 inter-digital 커패시터로 odd 모드에서만 동작하고, even 모드에서는 동작하지 않는다. 따라서 C_{ic} 값 변화를 통해서 odd 모드 공진 주파수만을 변화시킬 수 있다. 반면에 단락 스터브는 even 모드에서만 동작하고, odd 모드에서는 동작하지 않는다. 그림 3에 s_l 값을 4.7 mm로 고정시키고 C_{ic} 값 변화에 따른 odd 모드 공진 주파수 변화를 나타내었다. C_{ic} 값이 커질수록 odd 모드 공진 주파수가 낮아짐을 알 수 있다. 그림 4에는 C_{ic} 값을 0.23 pF으로 고정시키고, 단락 스터브의 길이 변화에 따른 공진 주파수 변화를 나타내었다. 단락 스터브의 길이가 길어질수록 even 모드 공진 주파수는 낮아짐을 알 수 있다. 또한, 단락 스터브는 even 모드 공진 주파수만 변화시키고 odd 모드 공진 주파수는 변화시키지 않는다. 이를 이용하여 상, 하측 대역의 중심 주파수에 해당하는 공진기를 설계하여 이중 대역 통과 필터를 설계할 수 있다.

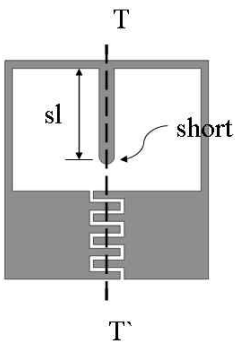


그림 1. 제안된 공진기의 기본 구조
Fig. 1. Basic structure of the proposed resonator.

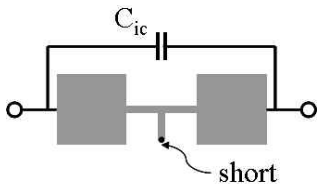


그림 2. 제안된 공진기의 등가 회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the proposed resonator.

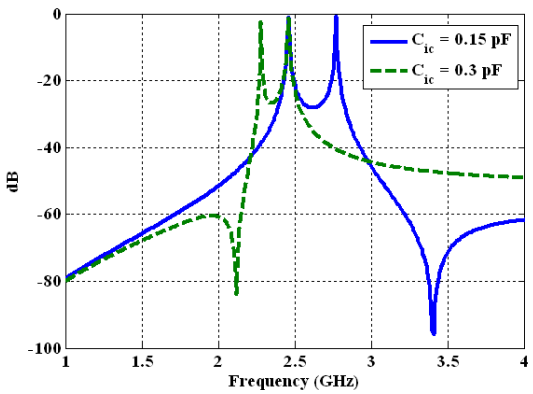


그림 3. C_{ic} 값 변화에 따른 공진 주파수
Fig. 3. Resonant frequencies with various C_{ic}.

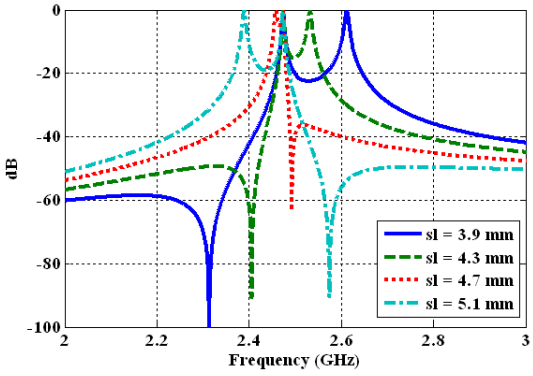


그림 4. s_l 길이 변화에 따른 공진 주파수
Fig. 4. Resonant frequencies with various s_l.

Ⅲ. 대역 통과 필터 설계

그림 5는 입출력과 공진기 간의 다중 결합 구조를 나타낸 것이다. 공진기 1은 대칭면 T-T'에 전기벽이 있는 odd 모드 공진을, 공진기 2는 대칭면 T-T'에 자기벽이 있는 even 모드 공진을 나타낸다. 입출력 다중 결합 회로망의 특성 방정식을 통해 상호 결합 계

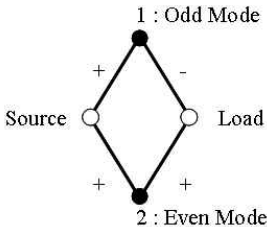


그림 5. 입출력 다중 결합 구조
Fig. 5. Source/load multi-resonator coupling scheme.

수 행렬을 구하기 위해, 구현하고자 하는 이중 모드 공진기의 필터 구조에 따른 형태는 식 (1)과 같다. 상호 결합 계수 행렬 M의 주대각 성분의 M_{11}과 M_{22}는 영이 아닌 값을 갖게 되는데, 이는 그림 5에서 보인 것처럼 서로 다른 공진 주파수를 갖는 공진기들에 의한 것이다. 또한, 각 공진기 간의 커플링(coupling)이 없기 때문에 M_{12}와 M_{21} 값은 0이 된다[9]~[11].

$$M=\begin{bmatrix} 0 & M_{S1} & M_{S2} & 0 \\ M_{S1} & M_{11} & 0 & M_{1L} \\ M_{S2} & 0 & M_{22} & M_{2L} \\ 0 & M_{1L} & M_{2L} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

통과 대역 내 반사 손실은 20 dB이며, 중심 주파수 2.45 GHz에서 상호 결합 계수 행렬은 다음과 같다. M_1은 통과 대역의 하측에 전송 영점(transmission zero)이, M_2는 통과 대역의 상측에 전송 영점이 위치하는 상호 결합 계수 행렬이다.

$$M_1=\begin{bmatrix} 0 & 0.85 & 1.10 & 0 \\ 0.85 & 2.20 & 0 & -0.85 \\ 1.10 & 0 & -1.97 & 1.10 \\ 0 & -0.85 & 1.10 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_2=\begin{bmatrix} 0 & 0.85 & 1.10 & 0 \\ 0.85 & -2.20 & 0 & -0.85 \\ 1.10 & 0 & 1.97 & 1.10 \\ 0 & -0.85 & 1.10 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$M_{S1}=-M_{1L}$이고, M_{11}은 odd 모드 공진 주파수를, M_{22}는 even 모드 공진 주파수를 결정하는 계수이다.

따라서 주어진 상호 결합 계수 행렬로부터 제안된 공진기는 다음과 같은 순서로 설계하여 필터를 구현하게 된다. 먼저 SIR의 양 끝단에 C_{ic} 커패시턴스 값을 구현할 수 있는 inter-digital 커패시터를 설계하여 SIR의 낮은 임피던스 부분을 설계한다. 다음으로 높은 임피던스 부분은 선로 길이와 폭 조절을 통해 odd 모드 공진 주파수를 결정하고, 단락 스터브의 길이 조절을 통해 even 모드 공진 주파수를 결정한다. 그림 6에 2.45 GHz 대역의 대역 통과 필터의 구조를 도시하였다. 그림 7에 상호 결합 계수 행렬에 따른 주파수 응답과 모의실험 주파수 응답을 비교하였다. 통과 대역의 상측이나 하측에 전송 영점이 위치하도록 설계하였다. HFSS를 이용하여 모의실험을 하였으며, 유전율 3.5, 두께 0.76 mm의 테프론(teflon) 기판을 사용하였다. 결합 급전 선로를 이용하였으며, 표 1과 표 2에 구조 변수 값을 나타내었

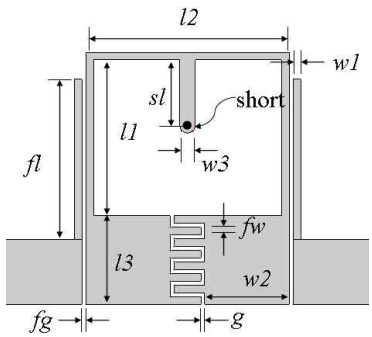


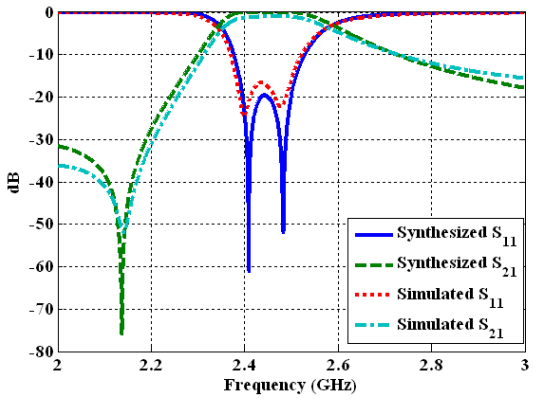
그림 6. 대역 통과 필터 구조
Fig. 6. Structure of bandpass filter.

표 1. 대역 통과 필터 M_1의 구조 변수와 값
Table 1. Geometry values of bandpass filter M_1.

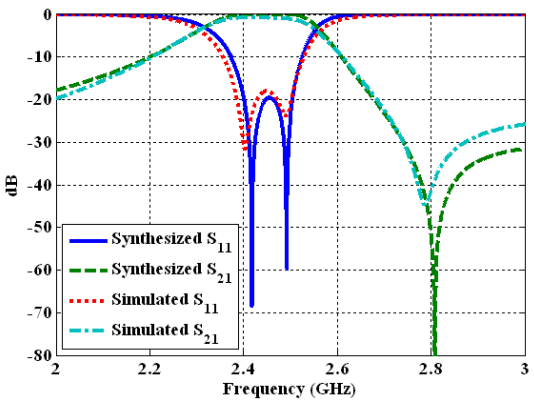
구조 변수	값	구조 변수	값
l_1	4.05 mm	w_1	0.2 mm
l_2	5.3 mm	w_2	2.2 mm
l_3	2.3 mm	w_3	0.4 mm
f_l	4.16 mm	f_w	0.2 mm
s_l	1.7 mm	f_g	0.1 mm
50 Ω 선로 폭	1.69 mm	g	0.1 mm

표 2. 대역 통과 필터 M_2의 구조 변수와 값
Table 2. Geometry values of bandpass filter M_2.

구조 변수	값	구조 변수	값
l_1	3.3 mm	w_1	0.2 mm
l_2	5.3 mm	w_2	2.2 mm
l_3	2.3 mm	w_3	0.4 mm
f_l	4.06 mm	f_w	0.2 mm
s_l	2.83 mm	f_g	0.1 mm
50 Ω 선로 폭	1.69 mm	g	0.1 mm



(a)



(b)

그림 7. 상호 결합 계수 행렬 (a) M_1, (b) M_2에 따른 주파수 응답과 모의실험 주파수 응답

Fig. 7. Frequency responses according to coupling matrix (a) M_1, (b) M_2 and simulated result.

다. 필터의 크기는 급전 선로를 제외하고 6.55 mm ×5.3 mm이다. 이는 2.45 GHz에서 전기적 크기가 0.088 λ_g×0.071 λ_g로 매우 작은 크기임을 알 수 있다. 단락 스터브의 via-hole의 직경은 0.2 mm이다. 5.25 GHz를 중심 주파수로 하는 대역 통과 필터도 위와 같은 방식으로 설계할 수 있다.

Ⅳ. 이중 대역 통과 필터의 설계 및 제작

3장에서 설계된 단일 대역의 필터를 이용하여 이중 대역 필터를 설계하였다. 그림 8에 설계된 이중 대역 필터의 구조와 구조 변수를 나타내었다. 이중 대역의 상측과 하측의 중심 주파수에 해당하는 공진기를 설계하고, 결합 급전 선로를 통해 각 공진기에 이중 급전하는 구조이다. 따라서 상측 대역과 하측

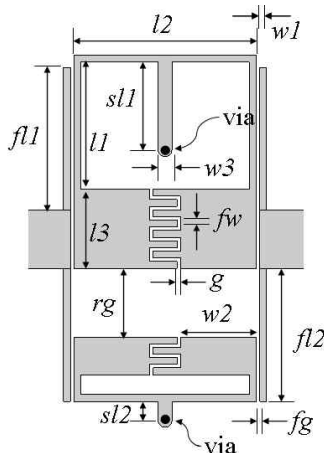


그림 8. 제안된 이중 대역 필터의 구조

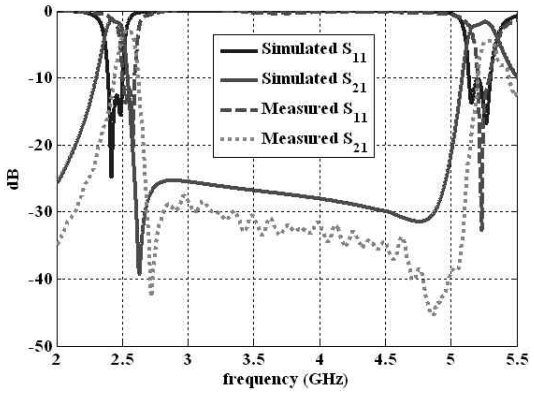
Fig. 8. Structure of the proposed dual-band bandpass filter.

대역의 대역폭 조절이 용이하다. 설계된 이중 대역 통과 필터는 2.45 GHz에서 비대역폭이 0.06이고, 5.25 GHz에서 비대역폭이 0.04로 WLAN 대역에서 동작한다. 두 공진기 간의 원하지 않는 결합을 최소화하기 위해 2 mm(r_g) 정도의 간격을 두었다. r_g 값을 충분히 크게 함으로써 두 공진기 간의 결합을 무시하게 할 수 있지만 크기의 소형화를 위해 2 mm의 간격을 두고 설계하였다. 따라서 이중 대역 통과 필터 설계 시 두 공진기 간의 결합에 의한 특성 변화를 스터브 길이 등의 변화를 통한 조절이 필요하다. 하측 대역은 통과 대역의 상측에 전송 영점이 위치하고, 상측 대역은 통과 대역의 하측에 전송 영점이 위치하도록 하였다. 설계된 이중 대역 통과 필터의 구조 변수 값들을 표 3에 정리하였다. 그림 9에 모의실험

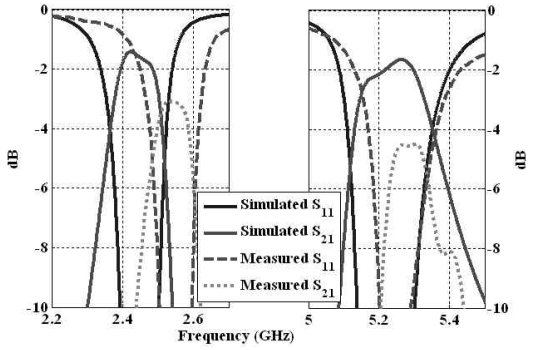
표 3. 이중 대역 통과 필터의 구조 변수와 값

Table 3. Geometry values of the dual-band bandpass filter.

구조 변수	값	구조 변수	값
l_1	3.7 mm	w_1	0.2 mm
l_2	5.3 mm	w_2	2.2 mm
l_3	2.3 mm	w_3	0.4 mm
f_{l1}	4.16 mm	f_w	0.2 mm
f_{l2}	3.88 mm	f_g	0.1 mm
s_{l1}	2.55 mm	g	0.1 mm
s_{l2}	0.55 mm	r_g	2 mm



(a)



(b)

그림 9. 제안된 이중 대역 통과필터의 (a) 차단 대역과 (b) 통과 대역 주파수 응답

Fig. 9. (a) Out-of band and (b) passband frequency responses of the proposed dual-band bandpass filter.

결과와 제작 결과를 비교 도시하였다. 모의실험에서는 삽입 손실이 각 1.5 dB와 1.9 dB였으나, 측정 결과 삽입 손실은 하측 대역에서 3 dB이고, 상측 대역에서 4.5 dB이다. 이것은 단락시키기 위한 via-hole 제작 과정에서의 손실 및 중심 주파수 이동으로 인한 손실로 예상된다. 하측 통과 대역폭은 2.48～2.6 GHz이고, 상측 통과 대역폭은 5.2～5.35 GHz이다. 필터의 크기나 구조 변수 값이 매우 작은 값을 가지고 있기 때문에, 제작상의 오차로 인해 측정 결과가 모의실험 결과보다 상향 이동되었으나, 비슷한 주파수 응답을 나타냄을 알 수 있다. 제작된 이중 대역 필터의 크기는 급전 선로를 제외하고 10.83 mm×5.3 mm이며, 2.45 GHz에서 전기적 크기가 0.146 λ_g×0.071 λ_g로 매우 작은 크기임을 알 수 있다. 제작된 이중 대역 필터의 사진을 그림 10에 나타내었다. 표 4에

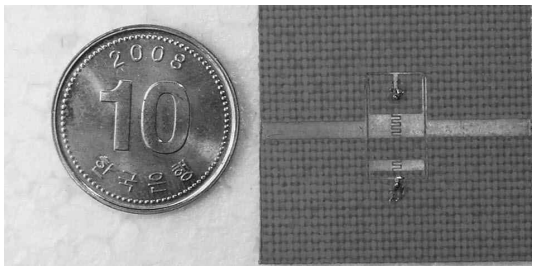


그림 10. 제안된 이중 대역 통과 필터의 제작 사진

Fig. 10. Photograph of the proposed dual-band bandpass filter.

표 4. 다른 이중 대역 통과 필터와 크기 비교

Table 4. Comparison with various dual-band BPFs.

참고문헌	대역(GHz)	유전율	크기
[1]	2.45/5.75	3.25	50 mm ×10 mm
[2]	2.45/5.2	3.2	24.5 mm ×15.25 mm
[3]	2.45/5.7	2.2	15 mm ×13.5 mm
[4]	2.4/5.2	3.38	14.2 mm ×20 mm
[5]	2.45/5.25	3.38	19 mm ×5.2 mm
제안된 구조	2.45/5.25	3.5	10.83 mm ×5.3 mm

다른 이중 대역 통과 필터와 크기를 비교하여 정리하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 공진점을 갖는 공진기들을 이용하여 소형의 이중 대역 통과 필터를 제안하였다. 각 통과 대역의 중심 주파수 결정과 차단 특성, 대역폭 조절이 용이하도록 이중 모드 공진기를 사용하였다. 각 대역의 이중 모드 공진기는 이중 급전을 통해 각각 결합 선로로 급전된다. 단락 스터브가 삽입된 이중 모드 공진기는 계단형 임피던스와 inter-digital 커패시터로 소형화 하였다. 소형화된 공진기는 2.45 GHz에서 전기적 크기가 0.088 λ_g×0.071 λ_g로 매우 작은 크기이다. 또한, 입출력 다중 결합 분석으로부터 이중 모드 공진기의 특성을 이용하여

상측 통과 대역의 상, 하측부에 자유롭게 전송 영점이 위치하여 필터의 차단 특성을 향상시키고 대역폭 조절이 가능하다. 제안된 소형의 공진기를 각 통과 대역의 중심 주파수에서 동작하도록 설계하여 각각 결합 급전 선로를 통해 급전함으로써 소형의 이중 대역 통과 필터를 설계 및 제작하였다. 제작된 이중 대역 통과 필터의 크기는 10.83 mm×5.3 mm로 다른 평판형 이중 대역 필터에 비해 매우 작은 크기이다.

참 고 문 헌

[1] S. F. Chang, Y. H. Jeng, and J. L. Chen, "Dual-band step-impedance bandpass filter for multimode wireless LANs", *Electrnics Letters*, vol. 40, no. 1, pp. 38-39, Jan. 2004.

[2] S. Chaimooll, P. Akkaraekthalinl, "Resonator-embedded four-pole cross-coupled dual-band microstrip bandpass filters", *Int'l Symp. Communication and Information Tech.*, Bangkok, Thailand, pp. 1076-1079, 2006.

[3] C. -Y. Chen, C. -Y. Hsu, and H. -R. Chuang, "Design of miniature planar dual-band filter using dual-feeding structures and embedded resonators", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, no. 12, pp. 669-671, Dec. 2006.

[4] Y. M. Chen, S. F. Chang, C. C. Chang, and C. Y. Chou, "A dual-band bandpass filter by interleaving heterogeneous stepped impedance resonators", *Proceedings of the 37th European Microwave Conference*, Munich, Germany, pp. 854-857, Oct. 2007.

[5] P. K. Singh, S. Basu, and Y. H. Wang, "Miniature dual-band filter using quarter wavelength stepped impedance resonators", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 2, pp. 88-90, Feb. 2008.

[6] 이자현, 김경근, 정진우, 이현진, 임영석, "용량성 부하를 이용한 공진기의 소형화와 필터 응용", 한국전자파학회 전자파기술 하계학술대회, 군산, p. 33, 2010년 7월.

[7] M. Makimoto, S. Yamashita, *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communications*, *in Springer Series in Advanced Micro-Electronics*, New York: Springer, 2001.

[8] J. S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, New York: Wiley, 2001.

[9] C. -K. Liao, P. -L. Chi, and C. -Y. Chang, "Microstrip realization of generalized Chebyshev filters with box-like coupling schemes", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, no. 1, pp. 147-153, Jan. 2007.

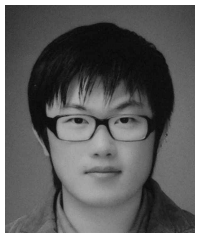
[10] S. Amari, U. Rosenberg, and J. Bornemann, "Adaptive synthesis and design of resonator filters with source/load-multi-resonator coupling", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, pp. 1969-1978, Aug. 2002.

[11] U. Rosenberg, S. Amari, "Novel coupling schemes for microwave resonator filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, pp. 2896-2902, Dec. 2002.

김 경 근

2005년 2월: 전남대학교 정보통신공학부 전자공학전공 (공학사)
2007년 8월: 전남대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2007년 9월～현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정
[주 관심분야] 전자파 수치 해석, RF 소자 설계

이 자 현



2007년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 전자공학전공 (공학사)
2009년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사)
2009년 3월～현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, RF 소자 설계

임 영 석

1980년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1989년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학박사)
1984년 9월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수
[주 관심분야] 전자파 수치 해석, 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계, 안테나