
위상특성을 이용한 공진기의 외적 양호도(Q_e) 추출 방법

박영배* · 김기래**

Extracting Method of External Quality Factor(Q_e) Using Phase Response

Youngbae Park* · Girae Kim**

요 약

본 논문에서는 마이크로스트립 선로 공진기와 입출력 단자의 결합 위치에 따른 공진기의 외적 양호도를 위상 특성을 이용하여 구하는 방법을 제시한다. 마이크로파 필터 설계에서 단자 접속 구조로 많이 이용되는 접합 선로 구조와 결합 선로 구조에 대해 단자의 위치와 선로의 폭과 간격에 따른 결과를 제시한다. 이 방법으로 정확한 Q_e 값을 얻을 수 있었고, 이 결과는 결합공진기 필터 설계에 응용될 수 있다.

ABSTRACT

The external quality factor (Q_e) is controlled by coupling condition between resonator and input/output ports in design of microwave filter. In this paper, we represent extracting method of external quality factor using phase response for resonator with input/output ports according to position of feed line from microstrip line resonator. The results regarding to position, coupling gap and line width for tapped line and coupled line structure are represented, and we got the exact Q_e value from the this method. This results will be applied to coupled resonator filter design.

키워드

접합선로 공진기, 사각 개방루프 공진기, 위상특성, 외적양호도

Key word

junction microstrip line resonator, rectangular open loop resonator, phase characteristic ,External Quality Factor

* 준회원 : 신라대학교 전자공학과
** 종신회원 : 신라대학교 전자공학과 (교신저자)

접수일자 : 2011. 06. 10
심사완료일자 : 2011. 07. 06

I. 서론

최근 무선 통신용 마이크로파 시스템이 증가함에 따라 여러 가지 응용 분야에 사용되는 마이크로파 소자들이 개발되고 있다. 이러한 마이크로파 모듈에 쓰이는 여파기는 그 모양이나 특성, 규모, 설계 방법에 따라 다양한 형태를 가지며[1]-[3], 높은 주파수 선택도가 갖는 시스템과 선택도를 확보할 수 있는 필터가 요구되고 있다. 필터는 마이크로스트립 선로, CPW 선로, 도파관 선로 등과 같은 전송 선로를 기반으로 하여 설계 하는 방법과 인덕터, 커패시터 등과 같은 집중 소자를 통해 설계하는 방법, 그리고 FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)와 같은 특정 재료의 물리적 공진 특성을 이용하는 방법이 있다[4].

이러한 설계 방법 중 사용 주파수가 점차 고주파화 되어가는 상황에서 적절한 설계 방법은 전송 선로를 이용하는 방법이며, RF MEMS(Micro Electro-Mechanical System) 기술[5]에서는 이에 따른 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 전송 선로를 이용하는 필터 설계 방법의 하나인 탭 선로 (tapped-line)를 이용한 대역통과 필터는 1970년대 이후 콤라인(compline) 필터와 인터디지털 필터에 응용되면서 입, 출력 결합부의 높은 결합 계수를 해결하는 방법으로 제시되어 왔으며 현재는 전송 선로 구조를 갖는 대부분의 필터에서 응용되고 있다. 마이크로파 필터의 설계에 있어서 공진기의 특성은 필터의 삽입 손실과 스킨 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 공진기의 구조에 대한 연구는 필터의 소형화와 높은 양호도를 얻기 위해 많이 이루어지고 있다[6]-[7]. 마이크로파 필터 설계를 위한 마이크로 스트립 공진기의 구조는 그림 1과 같은 것들이 대표적이다. 공진기의 특성은 필터의 특성을 결정하기 때문에 중요한 요소이다. 특히 공진기의 양호도는 필터의 삽입손실과 스킨 특성을 결정하는 요소이다. 필터의 전체 Q는 식(1)과 같이 공진기의 고유 양호도 (Q_i)와 단자와의 결합에 의한 외적 양호도 (Q_e)에 의해 결정된다[8].

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{Q_i} \quad (1)$$

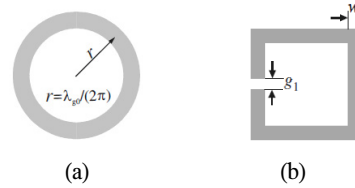


그림 1. 마이크로스트립 공진기 구조
(a) 링공진기 (b) 사각 개방루프 공진기
Fig. 1. Microstrip resonator (a) ring resonator
(b) rectangular open loop resonator

II. 단자 결합 공진기

마이크로스트립 필터 설계에서 입력/출력 단자와 공진기의 결합구조는 그림 2와 같이 접합선로 구조(a)와 결합선로 구조(b)가 많이 사용된다. 본 연구에서 공진기의 구조는 마이크로스트립 개방루프 형을 사용하였다. 공진기와 입력/출력 단자의 결합 위치에 따라 공진 특성이 달라지고, 이것으로 필터를 설계하면 특성이 달라지므로 정확한 외적 양호도를 계산하여야 한다. 대부분의 경우 공진기 양쪽에 포트1과 포트2를 만들어 2-포트 방식으로 S_{21} 을 측정하여 부하 양호도(loaded Q)를 구한다. 그러나 이것은 포트의 위치에 따른 공진기의 정확한 특성을 해석할 수 없다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 실제 공진기와 포트와의 결합 구조에서 1-포트 방식으로 S_{11} 의 위상 특성을 구하여 외적 양호도를 계산하는 방법을 제시한다.

그림 2(a)와 같은 접합 선로 구조는 50Ω 입력/출력 단자가 공진기에 직접 접합되어 있다. 이와 같은 구조에서 결합 계수와 외적 양호도(Q_e)는 입력/출력 단자의 접합 위치에 따라 결정된다. 공진기의 가상 접지인 중심선으로부터 거리 t 가 작으면 결합도가 낮고, 높은 외적 양호도(Q_e)를 갖는 특성을 나타낸다. 반대로 중심선으로부터 거리 t 가 클수록 결합도가 높아지고, 낮은 외적 양호도(Q_e)를 갖는다. 그림2(b)와 같은 결합 선로 구조는 결합 간격(g)과 선로의 폭(w)에 의해 결합 계수와 외적 양호도(Q_e)가 결정된다. 일반적으로 선로의 간격이 작고 폭이 좁으면 결합도가 크고, 낮은 외적 양호도(Q_e)를 갖는 특성을 나타낸다.

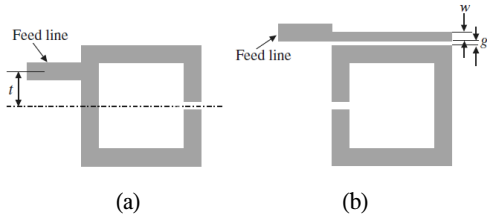


그림 2. 공진기의 단자 결합 구조
 (a) 접합 선로 구조 (b) 결합 선로 구조
 Fig. 2. Port coupling structure of resonator
 (a) Tapped line structure (b) Coupled line structure

III. 위상을 이용한 공진기의 Qe

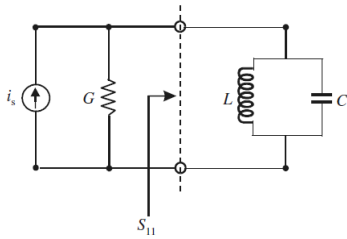


그림 3. 1-포트 공진기의 등가회로
 Fig. 3. Equivalent circuit for 1-port resonator

그림 2와 같은 입력 단자를 갖는 1-포트 공진기의 등가회로는 그림 3과 같이 표현될 수 있다. 여기서 G는 무손실 공진기에 접속된 도체의 컨덕턴스이고, 공진기의 고유한 특성은 무손실 LC 공진기로 나타낸다. 그림 3의 점선 부분에서 반사계수, S₁₁는 식(2)과 같이 표현된다.

$$S_{11} = \frac{G - Y_i}{G + Y_i} = \frac{1 - Y_i/G}{1 + Y_i/G} \quad (2)$$

여기서 공진기의 입력 어드미턴스, Y_i는 식(3)과 같다.

$$Y_i = j\omega C + \frac{1}{j\omega L} = j\omega_0 C \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (3)$$

여기서 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 는 공진주파수이다.

식(3)에서 공진 주파수 근처 ($\omega = \omega_0 + \Delta\omega$) 에서는 $(\omega^2 - \omega_0^2)/\omega \approx 2\Delta\omega$ 이므로 식(3)은 식(4)로 간략화된다.

$$Y_i = j\omega_0 C \cdot \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \quad (4)$$

식(4)를 식(2)에 대입하고, $Q_e = \omega_0 C/G$ 이므로 반사계수, S₁₁는 식(5)과 같이 된다.

$$S_{11} = \frac{1 - jQ_e (2\Delta\omega/\omega_0)}{1 + jQ_e (2\Delta\omega/\omega_0)} \quad (5)$$

마이크로 스트립 필터를 설계할 때, 계산된 Q_e 값을 구현하기 위하여, 그림 2와 같은 구조 중에서 하나를 선택하고, 입력/출력 단자의 위치를 결정하거나, 선로의 간격과 폭을 결정하여야 한다. 이것은 선택한 구조에 대해 시뮬레이션 툴을 이용하여 특성 결과로부터 Q_e 값을 추출하여야 한다. 본 논문에서는 HFSS를 이용하여 정해진 구조에 대해 S₁₁의 위상 특성을 이용하여 구한다. 여기서 S₁₁의 크기는 공진기가 무손실이라고 가정했으므로 식(5)에서 알 수 있듯이 거의 1이다.

본 논문에서는 S₁₁의 위상을 이용하여 Q_e를 추출하는 방법을 제시한다. 주파수를 공진주파수 근처에서만 고려하면 공진기는 개방회로와 같이 동작하여 S₁₁의 위상은 그림 4와 같이 주파수에 따라서 변하게 된다. 그림 4에서는 $\Delta\omega/\omega_0$ 에 대한 S₁₁의 위상특성을 나타내었다. 위상이 $\pm 90^\circ$ 일 때 $\Delta\omega$ 의 해당 값은 식(6)과 같이 된다.

$$2Q_e \frac{\Delta\omega_{\pm 90}}{\omega_0} = \mp 1 \quad (6)$$

그러므로 위상 $\pm 90^\circ$ 점 사이의 대역폭은 식(7)과 같다.

$$\Delta\omega_{\pm 90} = \Delta\omega_+ - \Delta\omega_- = \frac{\omega_0}{Q_e} \quad (7)$$

위의 식으로부터 외적 양호도(Q_e)는 식(8)과 같이 된다.

$$Q_e = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{\pm 90^\circ}} \quad (8)$$

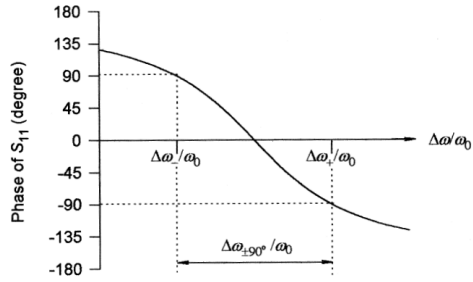
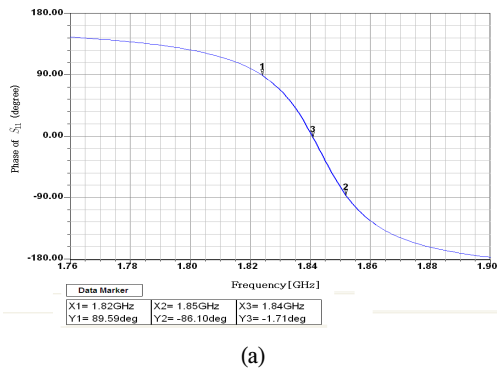
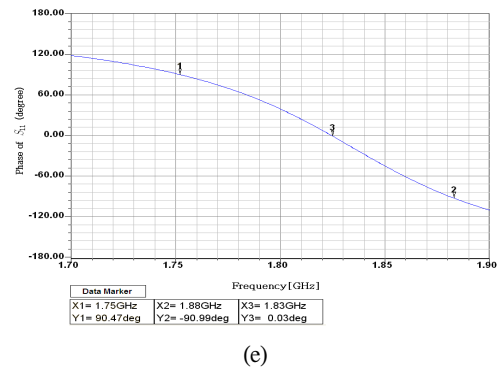
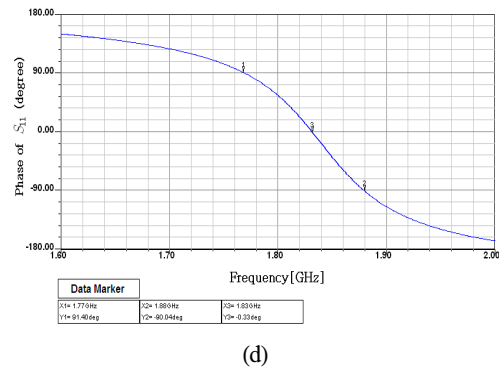
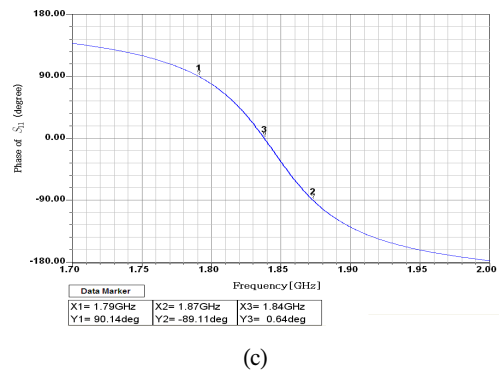
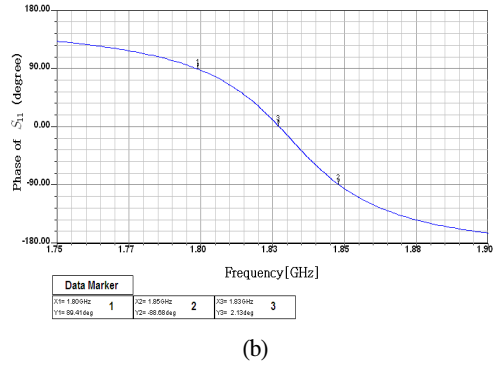


그림 4. 공진기의 S_{11} 의 위상 특성
Fig. 4. Phase Response of S_{11}

IV. 결과 및 검토

4.1. 접합선로 구조

그림 2(a)의 구조에 대해 Ansoft의 HFSS를 이용한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 외적 양호도(Q_e)를 추출하였다. 중심 주파수 1.8GHz에서 공진이 일어나는 반파장 개방루프 공진기를 설계하고 여기에 입력 단자위치를 변화시키면서 S_{11} 위상특성을 시뮬레이션한 결과를 그림 5에 나타내었다. 포트의 위치가 중심선에서 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 7mm, 8mm, 9mm 일 때 위상 특성을 나타내었다. 시뮬레이션 결과에서 Data Marker의 1은 $+90^\circ$ 의 위상을 2는 -90° 의 위상을 3은 ω_0 를 나타낸다. 시뮬레이션 결과의 값과 식(8)을 이용하여 외적 양호도(Q_e) 값을 추출할 수 있다.



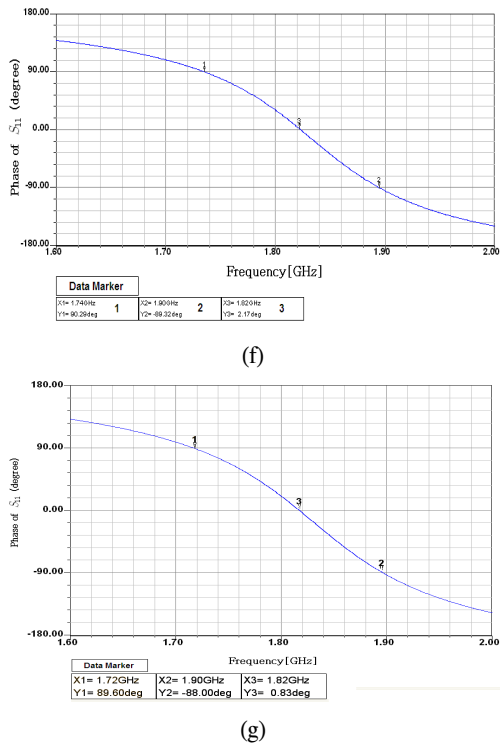


그림 5. 선로 위치(t)에 대한 S_{11} 위상특성
 (a) $t=3\text{mm}$ (b) $t=4\text{mm}$ (c) $t=5\text{mm}$ (d) $t=6\text{mm}$
 (e) $t=7\text{mm}$ (f) $t=8\text{mm}$ (g) $t=9\text{mm}$
 Fig. 5. S_{11} Phase response for port position
 (a) $t=3\text{mm}$ (b) $t=4\text{mm}$ (c) $t=5\text{mm}$ (d) $t=6\text{mm}$
 (e) $t=7\text{mm}$ (f) $t=8\text{mm}$ (g) $t=9\text{mm}$

그림5에서 확인 할 수 있듯이 간격이 중심선으로부터 멀어질수록 대역폭이 넓어진다. 이 결과를 바탕으로 선로의 위치에 따른 외적 양호도(Q_e) 값을 계산하여 그림 6과 같이 그래프로 나타내었다.

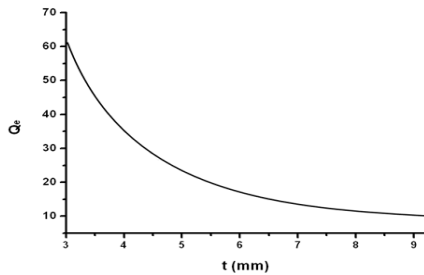
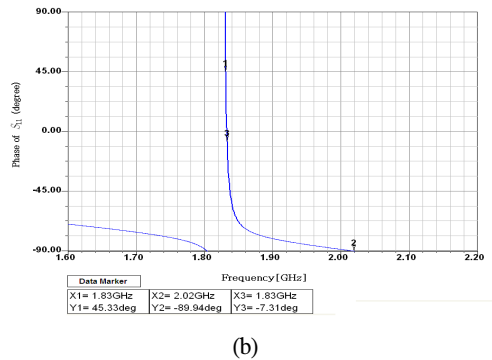
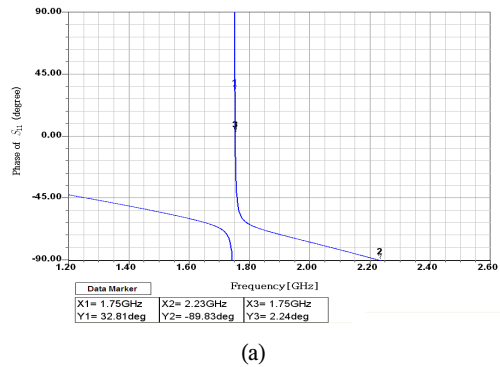


그림 6. 선로의 위치에 대한 Q_e 값
 Fig. 6. Q_e result for port position

그림 6에서는 입력/출력 단자의 위치, t 가 작을수록 $\Delta\omega$ 가 작게 되어 높은 Q_e 값을 가지며, 선로의 위치가 중심선으로부터 멀수록 낮은 Q_e 값을 갖는다.

4.2. 결합 선로 구조

그림 2(b)의 구조에 대해서도 앞의 그림 2(a)의 시뮬레이션과 같은 HFSS 시뮬레이션과 중심 주파수 1.8GHz에서 공진이 일어나는 반파장 개방루프 공진기를 설계하고 여기에 입력 단자의 구조를 변화시키면서 S_{11} 위상특성을 시뮬레이션 하여 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 2(b)의 구조에서 선로의 폭(w)과 공진기와의 간격(g)의 변화시키면서 위상 특성의 변화를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서는 간격(g)을 1mm로 고정하고, 포트의 선로 폭을 각각 0.25mm, 0.5mm, 0.75mm, 1.0mm일때 S_{11} 의 위상특성을 나타내었다. 선로 폭이 좁고 공진기로부터의 간격이 가까울수록 대역폭이 넓어진다. 이 결과를 바탕으로 식(8)을 사용해서 선로의 위치에 따른 외적 양호도(Q_e) 값을 계산하여 그림 8과 같이 그래프로 나타내었다.



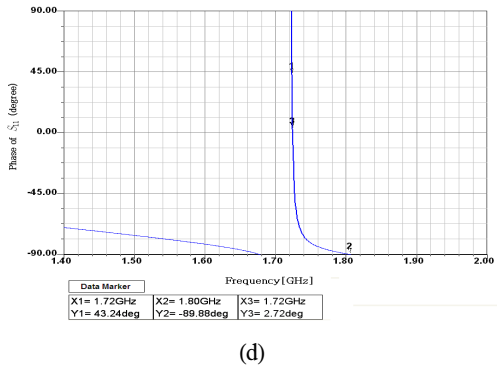
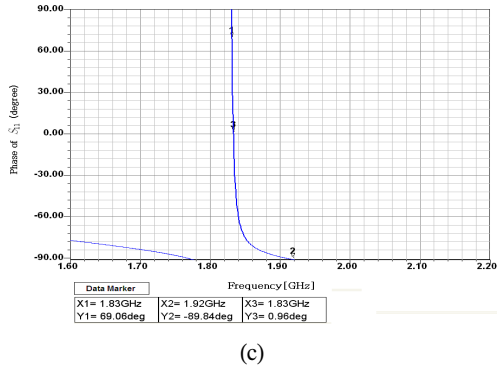


그림 7. 선로의 폭과 간격에 대한 S_{11} 위상특성
 (a) $w=0.25\text{mm}$ $g=1\text{mm}$ (b) $w=0.5\text{mm}$ $g=1\text{mm}$
 (c) $w=0.75\text{mm}$ $g=1\text{mm}$ (d) $w=1\text{mm}$ $g=1\text{mm}$
 Fig. 7. S_{11} Phase response for port structure
 (a) $w=0.25\text{mm}$ $g=1\text{mm}$ (b) $w=0.5\text{mm}$ $g=1\text{mm}$
 (c) $w=0.75\text{mm}$ $g=1\text{mm}$ (d) $w=1\text{mm}$ $g=1\text{mm}$

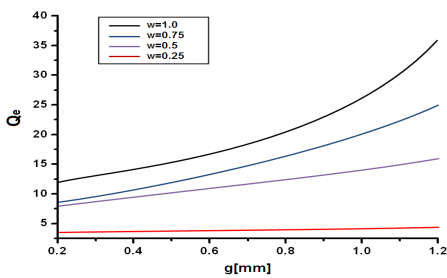


그림 8. 선로의 폭과 간격에 대한 Q_e 값
 Fig. 8. Q_e results for port condition

그림 7에서는 입력/출력 단자의 선로 폭(w)이 좁고 공진기와의 간격(g)이 적을수록 $\Delta\omega$ 가 커지게 되어 낮은 외적 양호도(Q_e) 값을 가지며, 반대로 선로의 폭(w)이 넓

고, 공진기와의 간격(g)이 커질수록 결합도가 낮아지게 되어 외적 양호도(Q_e)는 높은 값을 가지게 된다. 또한 그림 8의 선로의 폭과 간격에 대한 Q_e 그래프에서 알 수 있듯이 선로의 폭이 작을수록 공진기와의 간격에 대한 변화는 크지 않음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 위상을 이용한 외적 양호도의 추출 방법을 제시하였다. 공진기의 Q_e 는 필터의 삽입손실과 스킵트 특성을 결정하는 요소이다. 이러한 공진기의 Q_e 는 마이크로파 필터 설계에서 공진기와 단자간의 결합 조건에 의해 공진기의 Q_e 가 결정된다. 이러한 Q_e 를 추출하기 위하여 본 논문에서는 위상을 이용하여 구하기 위한 수식을 유도하고, 시뮬레이션 결과를 수식에 적용하여 구하였다. 계산된 결과는 위치에 대한 Q_e 값을 그래프로 나타내었다. 본 논문에서 제시한 방법으로 정확한 Q_e 값을 얻을 수 있었고, 이 결과는 결합공진기 필터 설계에 응용될 수 있다.

참고문헌

- [1] S. B. Cohn, "Parallel-coupled transmission line resonator filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 6, pp. 223 - 231, 1958.
- [2] S. Caspi and J. Adelman, "Design of combline and interdigital filter with tapped-line input", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 36, pp.759 - 763, 1988.
- [3] G. L. Matthaei, "Comb-line bandpass filter of narrow or moderate bandwidth", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 6, pp. 82 - 91, 1963.
- [4] U. H. Gysel, "New theory and design for hairpin-line filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 22, pp. 523 - 531, 1974.
- [5] E. G. Cristal, S. Frankel, "Hairpin-line and hybrid hairpin-line half-wave parallel-coupled-line filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 20, pp. 719 - 728, 1972.

- [6] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Cross-coupled microstrip hairpin-resonator filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, pp. 118 - 122, 1998
- [7] G. L. Matthaei, N. O. Fenzi, R. J. Forse, and S. M. Rohlfing, "Hairpin combfilters for HTS and other narrow-band applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, pp. 1226 - 1231, 1997.
- [8] Hong, J.-S. and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley and Sons Inc., pp. 258-262, 2001.

저자소개



박영배(Young-bae Park)

2010년 신라대학교 전자공학과
공학사

2010년~현재 신라대학교
전자공학과 석사 재학 중

※ 관심분야: 마이크로파 회로 설계

김기래(Gi-Rae Kim)

한국해양정보통신학회논문지
제 15권 제8호 참조