

論文2003-40TC-3-2

유전자알고리즘을 이용한 FBAR RF 대역통과여파기 설계기법 (Thin Film Bulk Acoustic Resonator(FBAR) Bandpass Filter Design Technique Using Genetic Algorithm)

李正欽*, 金炯東**

(Jeongheum Lee and Hyeongdong Kim)

요약

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용한 박막 체적 공진기 대역통과 여파기 설계기법을 제안하였다. 기존의 BVD등가모델을 이용한 여파기 설계기법은 공진 모드에서의 공진기의 임피던스 특성을 몇 개의 집중 소자로 근사함으로써 생기는 오차를 포함하고 있다. 본 논문에서는 공진기의 전기적 임피던스 특성식 자체를 이용한 최적화 FBAR여파기 설계기법을 제안하였다. 유전자 알고리즘을 적용하여 설계기준을 만족하도록 공진기의 두께 및 면적을 최적화하였다. 첫 번째 유전자 알고리즘은 사다리형 여파기의 직렬/병렬 공진기의 직렬/병렬 공진 주파수가 통과대역의 중심주파수와 일치하도록 각 공진기의 압전 물질 두께를 최적화하였다. 두 번째 유전자 알고리즘은 설계하고자하는 대역통과 여파기 특성을 만족시키기 위한 각 공진기의 면적을 최적화하였다. 제안된 방법을 이용하여 설계된 US-PCS 수신 대역통과 여파기는 기존의 방법 및 BVD모델을 이용한 설계결과와 비교하여 우수한 응답특성을 나타내었다.

Abstract

In this paper, genetic algorithm (GA)-based Thin Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) RF filter design technique is proposed. Since the BVD(Butterworth-Van Dyke) lumped element model is valid only around the resonance, FBAR filter design technique based on BVD circuit has an approximate error. Instead of using BVD model, optimizing filter design method utilizes an analytical electrical impedance equation of FBAR. The geometry of FBAR such as thickness of the piezoelectric layer and area which significantly affect the filter response is optimized by GA. US-PCS Rx Bandpass filter obtained by the proposed technique shows a better response comparing with the typical and BVD-based filter.

Keywords : FBAR, ladder filter, genetic algorithm

* 正會員, 漢陽大學校 電子通信電波工學科
(Dept. of Electrical & Computer Eng., Hanyang Univ.)

**正會員, 漢陽大學校 電子電氣컴퓨터工學部
(Div. of Electrical & Computer Eng., Hanyang Univ.)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00137-0)지원으로 수행되었음.

接受日字:2002年10月22日, 수정완료일:2003年2月13日

I. 서론

최근 다양한 무선통신 서비스의 급격한 발달과 더불어 경박단소화된 이동통신소자들에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히 여러 통신서비스간의 간섭을 줄이기 위해 높은 주파수 선택도를 가지면서 더욱 소형화된 대역통과 여파기의 설계가 절실히 요구되고 있다. FBAR는 압

전 물질의 음향 공진 현상을 이용하는 공진기로서, 압전 물질 내의 음향 전파속도가 전자파 속도에 비해 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 배 정도로 작으므로, 같은 주파수에 대해 음파의 파장이 훨씬 짧아서 보다 소형화된 공진기의 제작이 가능하다. 또한 기존의 유전체공진기나 SAW(Surface Acoustic Wave) 공진기 등에 비해 작은 삽입손실을 갖고 우수한 주파수 선택도를 나타내며, 특히 기존의 실리콘 반도체 공정과 결합하여 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit)화가 가능하다는 장점을 가지고 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FBAR여파기는 직렬/병렬 공진 특성을 갖는 단위 공진기를 사다리 형태로 연결한 사다리형 여파기와 두 개의 FBAR를 적층시킨 적층형(stacked) crystal 여파기 등이 있는데, 상대적으로 공정이 쉽고 경제적인 사다리형 여파기가 설계에 많이 쓰이고 있다¹⁾.

기존의 여파기 설계 기법은 각 FBAR 공진기 임피던스 특성을 전기적인 집중소자와 기계적인 집중소자들의 결합으로 이루어진 BVD(Butterworth-Van Dyke) 등가 모델^{2, 3)}로 나타낸 후, 이를 차례로 연결하여 여파기를 구현하였다³⁾. 하지만 BVD등가모델은 하나의 공진 모드 부근에서 공진기의 임피던스 특성을 몇 개의 집중소자로 근사화함으로써 발생한 오차를 포함하고 있다. 이런 단점을 보완하고자, 부가적인 소자를 포함시킨 수정된 BVD(Modified BVD)모델⁴⁾을 사용하여 여파기를 설계하는 방법⁵⁾이 제안되었지만 이 방법 역시 등가모델을 이용한다는 한계를 갖고, 또 MBVD모델의 각 소자 값을 추출하기 위한 과정을 필요로 한다.

본 논문에서는 FBAR를 이용하여 사다리형 대역통과 여파기를 설계할 때, 기존의 BVD 등가모델을 이용하는 대신, FBAR에 대한 음파 경계치 문제 해법으로 얻어진 각 FBAR의 임피던스 방정식을 직접 이용한 최적화 FBAR 여파기 설계기법을 제안하였다. 최적화 기법으로 최근에 널리 사용되고 있는 유전자 알고리즘⁶⁾을 적용하여 설계기준에 부합하는 여파기 특성을 갖도록 단위 FBAR에 대한 구조를 최적화하였다. 제안된 방법을 이용하여 1900MHz대의 미국 PCS 수신 대역통과 여파기를 설계하고 기존의 방법 및 BVD모델을 이용한 설계방법과 비교하였다. II장에서는 기존의 FBAR 대역통과 여파기 설계기법을 고찰하였고, III장에서 본 논문에서 사용된 유전자알고리즘을 설명하였다. IV장에서는 제안된 방법을 적용하여 시뮬레이션한 결과를 제시하였다.

II. 기본 이론

사다리형 FBAR 대역 통과 여파기는 <그림 1(a)>와 같은 형태의 단위 공진기를 직렬/병렬로 차례로 연결한 형태로, 각 단위 공진기의 공진 특성은 임피던스 특성식이나 <그림 1(b)>와 같은 BVD 등가모델로 나타낼 수 있다. 따라서 사다리형 대역통과 여파기의 블록도는 <그림 1(c)>와 같고, 등가적으로 <그림 1(d)>와 같이 나타낼 수 있다.

단일 FBAR 공진기의 전기적 임피던스 특성은 압전 물질 내에서의 음향 파동방정식에 경계조건을 적용하여 구할 수 있다. 전극의 두께가 매우 얇아 그 영향을 무시할 수 있는, 하나의 압전 물질로 이루어진 이상적인 FBAR 공진기 임피던스특성은 다음과 같다¹⁾. 단, FBAR의 면적은 두께에 비해 아주 크다고 가정하였다.

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left(1 - \frac{K^2}{1 + K^2} \frac{\tan(kd/2)}{kd/2} \right) \quad (1)$$

여기서

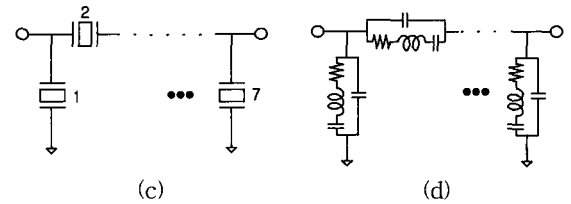
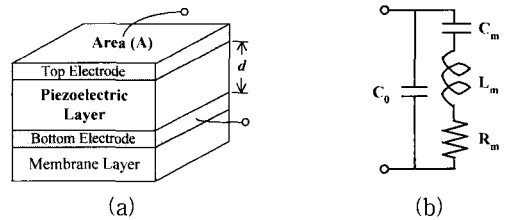


그림 1. (a) FBAR 공진기 구조 (b) FBAR 공진기의 BVD 등가 모델 (c) US-PCS 대역통과여파기 블록도 (N=7) (d) 사다리형 FBAR 대역통과 여파기의 등가모델

Fig. 1. (a) Cross section of FBAR (b) BVD equivalent circuit for FBAR (c) Block diagram for US-PCS bandpass filter (N=7) (d) Equivalent circuit of ladder type FBAR bandpass filter.

$$C_0 = \frac{\epsilon^s A}{d}, K^2 = \frac{e^2}{c^E \epsilon^s}, k = w \sqrt{\rho / \left(c^E + \frac{e^2}{\epsilon^s} \right)}$$

이고, d 는 압전층의 두께, A 는 공진기의 면적을 나타내고, c^E , e , ρ , ϵ^s 는 압전 물질의 탄성강도계수, 압전 스트레스상수, 밀도, 유전율을 나타낸다. 또한 전극과 기판의 영향을 고려해야 하는 경우, FBAR 공진기의 임피던스 특성은 압전 물질 위/아래의 기판들에 대해 전송선로 이론을 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다^[1].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left(1 - \frac{K^2}{1+K^2} \frac{\tan(kd/2)}{kd/2} \times \frac{(z_t - z_b) \cos^2(kd/2) + j \sin(kd)}{(z_t - z_b) \cos(kd) + j(1 - z_t z_b) \sin(kd)} \right) \quad (2)$$

여기서 z_t 와 z_b 는 각각 상부전극과 하부전극 쪽으로 바라본 임피던스를 압전 물질의 특성음향임피던스로 정규화한 것이다.

식 (1)과 식 (2)는 FBAR 공진기의 구성물질, 구조에 따른 공진 특성을 정확하게 나타내지만, 여파기 설계에 직접 이용하기가 어려워서, 기존의 여파기 설계는 이러한 임피던스 식에 대응하는 <그림 1(b)>와 같은 BVD 등가모형을 이용하여 이루어졌다^[1]. BVD등가회로는 전기적인 용량성 리액턴스 성분(C_0)과 기계적인 손실(R_m), 유도성(L_m), 용량성 리액턴스(C_m)를 나타내는 소자로 이루어져 있다. 이상적인 FBAR에 대한 BVD등가회로 소자의 값은 직렬 공진 주파수(f_s)와 병렬 공진 주파수(f_p), 물질상수에 따라 결정되는 전기 기계적 결합계수(K^2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다^[3].

$$C_0 = C_0(f_s/f_p)^2, C_m = C_0[1 - (f_s/f_p)^2], \\ L_m = 1/(2\pi f_s C_m), R_m = \frac{\pi^2}{8} \frac{X_0}{Q_s K^2} \quad (3)$$

여기서 $C_0 = (\epsilon^s A/d)(1+K^2)$ 이고, X_0 는 C_0 에 의한 리액턴스, $Q_s = \frac{f}{2} \frac{\partial \angle Z}{\partial f} \Big|_{f=f_s}$ 로 구해지는 직렬공진 품질계수를 나타낸다. 식 (3)에 의하면, BVD등가회로를 구성하는 각 소자 값은 압전 물질을 구성하는 물질과, 공진기의 두께에 의해 결정되는 직렬/병렬 공진 주파수, 공진기의 면적으로부터 결정됨을 알 수 있다. 하지만 이 회로는 공진 모드 근처에서만 만족하는 근사식^[7]으로, FBAR의 임피던스 특성에 대한 근사 오차를 포함한다.

Agilent Technology사에서는 기존의 BVD모형을 보완하기 위해 전기적인 커패시터(C_0)에 직렬저항(R_s)을 추가한 수정된 BVD(modified BVD)모형을 제안하였다. 하지만 이 모델도 기존의 BVD모형을 기반으로 하고 있으며, 상용소프트웨어^[8]에 내장된 최적화 알고리즘을 적용하여 FBAR의 임피던스 특성과 일치하는 BVD 소자 값을 추출하는 과정을 필요로 한다^[5].

따라서 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 적용하여 대역통과 여파기의 특성에 커다란 영향을 미치는 FBAR의 구조를 최적화하고, BVD모형을 이용하는 대신, 각 공진기의 임피던스 특성식을 직접 이용하여 모델링 오차를 줄이는 방법을 제안하였다.

III. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 적자생존의 법칙을 따르는 생물진화의 원리를 모방한 최적화 방법의 하나로써, 식 (4)에 보인 것처럼, n 개의 FBAR를 이용한 사다리형 대역통과 여파기의 전달특성(S_{21})과 같이 FBAR의 물질상수(c^E, e, ϵ^s, ρ), 각 층의 두께(d), 면적(A)에 따라 변화하는 다변수함수문제 최적화에 적합한 방법이다.

$$S_{21} = f(c_1^E, e_1, \epsilon_1^s, \rho_1, d_1, A_1, \dots, c_n^E, e_n, \epsilon_n^s, \rho_n, d_n, A_n) \quad (4)$$

또한 프로그래밍이 간단하면서도 최적화 변수가 많을수록 다른 최적화 알고리즘에 비해 수렴속도가 빠르고, 지역 해에 빠지지 않는 특성을 가지고 있어 최적화 방법으로 각광을 받고 있다.

일반적인 유전자 알고리즘 순서도는 <그림 2>와 같이 크게 개체군생성, 적합도 평가, 재생산의 세 과정으로 이루어진다. 우선 최적화 하고자 하는 변수($c^E, e, \epsilon^s, \rho, d, A$)를 임의로 생성된 N비트크기를 갖는 2진수 형태의 유전자로 나타낸다. 이러한 유전자들을 결합하여 한 개체의 특성을 결정짓는 염색체들을 이루고, 이러한 염색체의 집합이 M개의 개체로 이루어진 초기 개체군을 형성한다. 초기 개체군의 개체들은 각 개체들이 원하는 최적화특성(fitness function)과 어느 정도 일치하는지를 나타내는 적합도(fitness)에 따라 다음 세대를 형성하기 위한 부모개체로 선택된다. 적합도가 클수록 다음 세대로 특성이 전달될 확률이 높아서 여러 번의 반복과정을 거치면서 최적의 해로 수렴하게 된다. 선택된 부모개체로부터 교배를 거쳐 두 개의 자손개체가

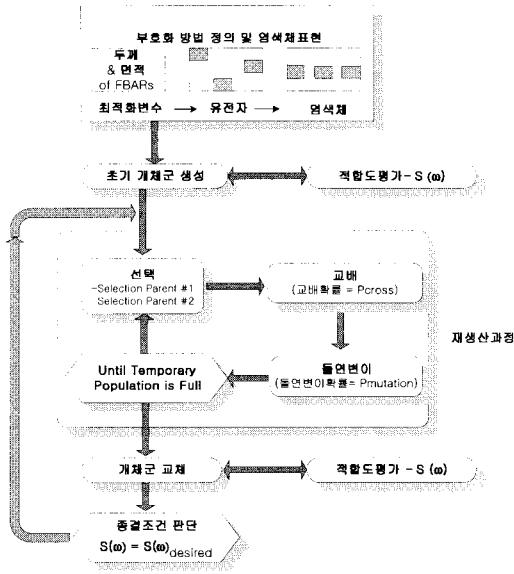


그림 2. 유전자 알고리즘의 흐름도
Fig. 2. Flowchart of genetic algorithm.

생성되고, 지역 해에 수렴하는 것을 막기 위해 돌연변이가 가해진다. 교배와 돌연변이는 각각 정해진 확률 (p_{cross} , $p_{mutation}$)에 따라 실행된다. 이렇게 해서 새로 생성된 개체군에 대해 적합도를 계산한 후, 정확한 해에 도달하거나, 정해진 오차범위 안에 수렴하면 반복과정이 종료되고, 유전자알고리즘은 최적개체, 즉 해를 찾아낼 수 있게 된다.

본 논문에서는 유전자알고리즘을 적용하여 임의 구조의 FBAR 임피던스 특성으로부터 여파기 전달특성인 S_{21} 을 구한 후, 설계하고자 하는 대역통과 여파기의 설계기준과 비교하여 최적의 여파기 응답특성을 나타내는 공진기 구조를 결정하였다. 유전자 알고리즘에서 부호화 방법, 개체선택방법, 교배, 돌연변이, 적합도 함수 등은 다양한 방법이 존재하는데, 그 중에서 특히 해당 문제에 대한 적절한 적합도 함수의 선택이 중요하다. 해의 수렴 속도는 염색체의 크기(N), 개체수(M), 선택방법, 교배확률, 돌연변이확률 등에 의존하는데, 본 논문에서는 수렴 속도를 높이고, 각 세대에서 최대의 적합도를 갖는 세대가 누락되는 것을 막기 위해 엘리트즘(Elitism)^[6]을 사용하였다.

본 논문에서 사용된 유전자 알고리즘 연산자는 다음과 같다.

- 염색체의 비트수(N) = 16
- 개체군의 개체수(M)=100

- 교배 확률(Pcross)=0.7
- 돌연변이 확률(Pmutation)=0.04
- 토너먼트 선택

IV. 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 결과

제안된 방법을 이용하여 US-PCS 수신 대역 여파기를 설계해 보았다. 여파기의 구조는 <그림 1(a)>와 같은 구조의 단위 공진기를 4개는 병렬, 3개는 직렬로 차례로 연결한 형태이다. 압전 물질 및 전극, 기판의 물질 상수들과 각 공진기의 두께, 면적을 모두 최적화 변수로 할 경우, 프로그램 수행시간이 매우 커지게 된다. 따라서 각 공진기들의 물질상수는 기존의 문헌들^[7, 9]에 나와 있는 값을 사용하였고, 공진기의 두께와 면적을 변수로 하여 최적의 여파기 응답을 나타내는 공진기의 구조를 구하였다. 각 FBAR 공진기는 <그림 1(a)>와 같이 $0.8\mu\text{m}$ Si_3N_4 기판, $0.15\mu\text{m}$ Mo 전극, AlN 압전 물질, $0.15\mu\text{m}$ Mo 전극으로 이루어져있다. 압전 물질의 탄성강도계수, 압전 스트레스트상수, 밀도, 유전율은 각각 395GPa, $1.55\text{C}/\text{m}^2$, $3260\text{Kg}/\text{m}^3$, $9.5 \times 10^{-11}\text{N}/\text{m}^2$, 전극과 기판의 탄성강도계수, 밀도는 각각 408.9GPa, $10300\text{Kg}/\text{m}^3$, 295GPa, $3440\text{Kg}/\text{m}^3$ 를 사용하였다^[9].

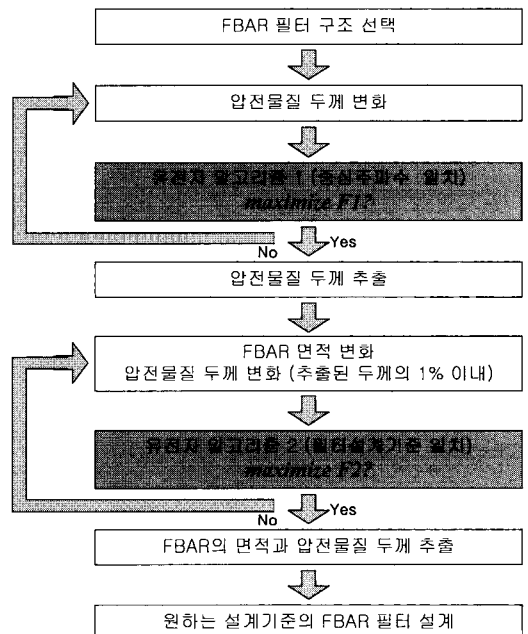


그림 3. 제안된 FBAR 대역통과 여파기 설계 절차
Fig. 3. Proposed FBAR bandpass filter design procedure.

기존의 삽입 손실 법을 이용한 LC 여파기 설계 시, 홀수단 여파기는 입력 측과 출력 측의 원형소자가 서로 대칭적인 값을 갖는다. 이와 마찬가지로, 3개의 직렬 공진기와 4개의 병렬 공진기가 π 형태로 결합된 US-PCS 대역통과여파기도 병렬 공진기 FBAR 1과 FBAR 7, FBAR 3과 FBAR 6, 직렬 공진기 FBAR 2, FBAR 6은 동일한 구조를 갖게 하였다. 따라서 유전자 알고리즘의 최적화 변수는 FBAR 1, FBAR 2, FBAR 3, FBAR 4의 두께와 면적이 된다. 정해진 두께와 면적에 대해 FBAR 공진기는 여러 개의 공진 모드를 나타내므로, 두께와 면적을 동시에 최적화 변수로 간주하고 유전자 알고리즘을 적용할 경우, 해의 수렴속도가 느려지게 된다. 따라서 <그림 3>과 같이, 우선 각 FBAR의 기본 공진 모드가 설계하고자 하는 대역통과 여파기의 중심주파수에 일치하도록 단위 FBAR의 두께를 최적화하고, 원하는 여파기 설계기준을 만족하도록 하는 FBAR의 면적을 구하였다.

1. 기본 공진을 통과대역 중심주파수에 일치시키기 위한 공진기 두께 최적화

첫 번째 유전자 알고리즘은 사다리형 여파기를 구성하는 직렬/병렬 공진기가 통과대역의 중심주파수에서 기본 공진을 일으키도록 하는 두께를 구하였다. 각 공진기 두께의 초기 범위는 전체 공진기의 두께가 압전 물질의 반파장 공진 두께에서 전극과 기판의 두께를 뺀 값의 0.5~1배 범위 내에서 생성되도록 하였다. 식 (5)의 적합도 함수(F1)를 이용하여 FBAR 2, FBAR 4의 직렬 공진 주파수(f_{series}^{GA})와 FBAR 1, FBAR 3의 병렬공진 주파수(f_{shunt}^{GA})를 US-PCS의 수신대역 중심주파수(f_0)인 1960MHz에 일치하도록 하였다. 최적화된 직렬/병렬 공진기의 압전층 두께는 각각 1.2536 μm , 1.3126 μm 로, 기본 직렬/병렬 공진 주파수가 1960MHz에 정확히 일치하였다.

$$F1 = \frac{1}{1 + \sqrt{(f_0 - f_{series}^{GA})^2 + (f_0 - f_{shunt}^{GA})^2}} \quad (5)$$

2. 최적의 여파기 특성을 만족시키기 위한 공진기 면적 최적화

두 번째 유전자 알고리즘에서는 첫 단계에서 구해진 두께를 바탕으로, 각 공진기의 면적을 최적화하였다. 이때, 여파기 특성 조정을 위한 자유도를 늘려 최적화를 더욱 쉽게 하기 위해, IV.1에서 구해진 공진기의 두께를

$\pm 1\%$ 변화시켰다. 직렬/병렬 공진기의 초기 면적은 각각 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$, $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ 범위에서 임의로 생성하였다. 이렇게 임의로 생성된 초기 두께와 면적에 대해 각 공진기의 임피던스 특성을 구하였다. 사다리형 여파기는 이 임피던스 특성을 갖는 공진기의 직렬연결형태이므로, 각 공진기의 임피던스를 요소로 갖는 ABCD행렬을 구하고, 이들 ABCD행렬의 곱한 결과로부터 식 (6)의 관계식을 이용하여 산란계수로 변환함으로써 각 개체에 대한 여파기 특성을 구하였다.

$$S_{21} = \frac{2}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$$

$$S_{11} = \frac{A + B/Z_0 - CZ_0 - D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D} \quad (6)$$

여파기의 특성파라미터로는 3dB 주파수($f_{3dB, low}$, $f_{3dB, high}$), 통과대역내의 리플크기(Ripple pass), 저지대역에서의 감쇠(Atten. stop), 통과대역내의 최대 S_{11} 크기($|S_{11}|_{max}$)를 이용하였다. 적합도 함수는 식 (7)과 같이 임의의 두께와 면적에 대한 여파기 특성 파라미터와 설계기준 파라미터의 오차가 작을수록 큰 값을 갖는 함수를 사용하였다.

$$F2 = \frac{1}{1 + \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2}} \quad (7)$$

여기서 $A = f_{3dB, low}^{spec} - f_{3dB, low}^{GA}$, $B = f_{3dB, high}^{spec} - f_{3dB, high}^{GA}$, $C = \text{Ripple}_{pass}^{spec} - \text{Ripple}_{pass}^{GA}$, $D = \text{Atten.}_{stop}^{spec} - \text{Atten.}_{stop}^{GA}$, $E = |S_{11}|_{max}^{spec} - |S_{11}|_{max}^{GA}$ 로, 각각 설계기준과 임의의 두께와 면적에 대한 대역폭, 통과대역내의 리플크기, 저지대역에서의 감쇠, 통과대역 내에서의 S_{11} 사이의 오차를 나타낸다. 알고리즘이 반복될수록 적합도가 큰 개체, 즉, 작은 오차를 나타내는 개체가 선택되므로 결국 최적의 여파기 특성을 나타내는 각 단일 FBAR의 면적과 두께를 구할 수 있다. US-PCS 수신 대역통과 여파기의 설계기준으로는 대역폭 3%, 통과대역내의 리플크기 0.4dB, 1850MHz~1910MHz의 저지대역 감쇠 50dB, 통과대역내의 S_{11} 크기 -10dB이하가 되도록 하였다.

<표 1>은 기존의 방법으로 구현한 대역통과여파기의 각 FBAR공진기 압전물질 두께와 면적을 나타낸다. 압전물질의 두께는 직렬/병렬 FBAR가 각각 1.96GHz에서 직렬/병렬 공진을 나타내는 두께로 IV.1에서 구한 결과

와 같다. 한편 직렬공진기와 병렬공진기의 면적은 두 공진기의 면적비를 1:1부터 1:2까지 변화시켜가며 US-PCS 대역통과여파기 특성과 유사한 응답을 나타낼 때의 값으로 정하였다. 이 때 직렬 FBAR는 직렬

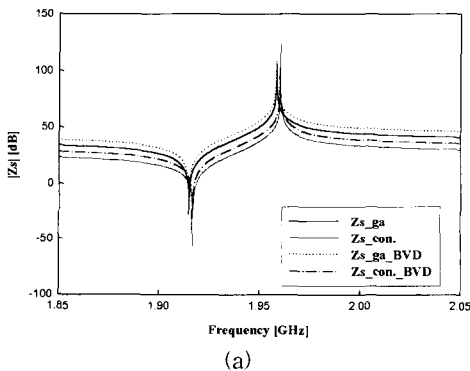
표 1. 기존의 방법으로 구해진 AIN두께, 공진기 면적과 이에 대응하는 BVD 모델 값
Table 1. AIN thickness, area of FBAR obtained by conventional method and corresponding BVD element values.

	FBAR1	FBAR2	FBAR3	FBAR4	FBAR5	FBAR6	FBAR7
AIN두께 (μm)	1.3126	1.2536	1.3126	1.2536	1.3126	1.2536	1.3126
면적 ($\mu m \times \mu m$)	220×220	110×110	220×220	110×110	220×220	110×110	220×220
C_0 [pF]	1.972	0.506	1.972	0.506	1.972	0.506	1.972
C_m [fF]	90.774	22.761	90.774	22.761	90.774	22.761	90.774
L_m [μH]	0.760	0.290	0.760	0.290	0.760	0.290	0.760

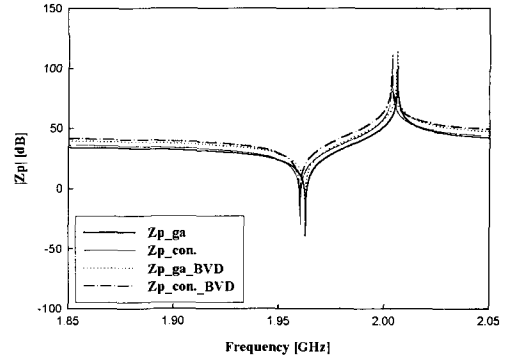
표 2. GA를 이용하여 최적화 된 AIN두께, 공진기 면적과 이에 대응하는 BVD 모델 값

Table 2. GA-optimized AIN thickness, area of FBAR and corresponding BVD element values.

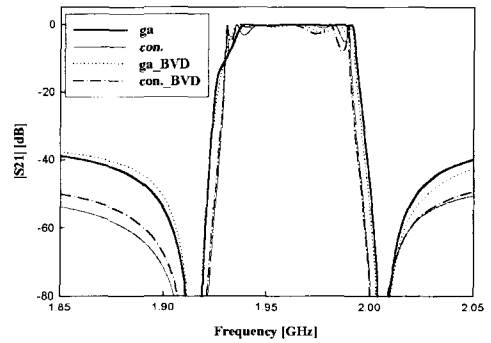
	FBAR1	FBAR2	FBAR3	FBAR4	FBAR5	FBAR6	FBAR7
AIN두께 (μm)	1.315	1.250	1.312	1.250	1.312	1.250	1.315
면적 ($\mu m \times \mu m$)	118.7×118.7	124.2×124.2	216.4×216.4	98.6×98.6	216.4×216.4	124.2×124.2	118.7×118.7
C_0 [pF]	0.574	0.646	1.909	0.407	1.909	0.646	0.574
C_m [fF]	26.363	28.963	87.632	18.289	87.632	28.963	26.363
L_m [μH]	0.262	0.227	0.079	0.359	0.079	0.227	0.262



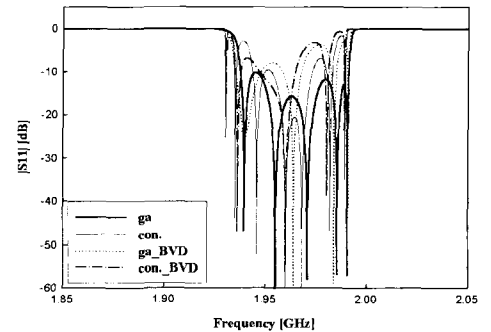
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. (a) GA 방법과 기존 방법을 이용하여 구해진 직렬 FBAR의 임피던스특성(Z_s) (b) GA 방법과 기존 방법을 이용하여 구해진 병렬 FBAR의 임피던스특성(Z_p) (c) GA 방법과 기존 방법을 이용한 US-PCS 수신대역통과여파기의 S_{21} 특성 (d) GA 방법과 기존 방법을 이용한 US-PCS 수신대역통과여파기의 S_{11} 특성

Fig. 4. (a) Impedance of series FBARs (Z_s) obtained by GA and typical method (b) Impedance of shunt FBARs (Z_p) obtained by GA and typical method (c) S_{21} of the GA-optimized BPF and conventionally obtained BPF for US-PCS Rx (d) S_{11} of the GA-optimized BPF and conventionally obtained BPF for US-PCS Rx.

FBAR끼리, 병렬 FBAR는 병렬 FBAR끼리 동일한 면적을 가진다고 가정하였다. 이렇게 얻어진 두께, 면적과 물질 상수 값으로부터 식 (3)을 이용하여 BVD모델 값을 구하였다. 저항 값(R_m)은 식 (3)에서 보는 바와 같이 공진 주파수에서의 임피던스 위상변화 기울기로부터 구할 수 있는 공진기의 품질계수와 반비례관계에 있는데, 손실이 없는 공진기의 경우, 각 공진 주파수에서 위상변화는 무한대이므로, 품질계수 Q 는 무한대가 된다. 따라서 BVD 모델의 저항 성분은 모두 0이 된다. <표 2>는 본 논문에서 제안된 유전자 알고리즘을 통해 최적화 된 각 공진기의 압전 물질 두께와 공진기 면적을 나타낸다. 마찬가지로 각각의 두께, 면적, 물질 상수로부터 식 (3)을 이용하여 BVD모델 값을 구하였다.

<그림 4(a)>과 <그림 4(b)>는 각각 <표 1>에 주어진 구조를 갖는 직렬/병렬 공진기의 임피던스 특성과 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화된 직렬/병렬 공진기의 임피던스 특성을 나타낸다. <표 1>에 주어진 구조의 경우 정확하게 1.96GHz에서 각각 직렬/병렬 공진을 나타내지만, 제안된 방법으로 최적화 된 구조는 공진주파수가 약간 이동하였음을 볼 수 있다. 또한 각 경우의 직렬/병렬 공진기에 대한 BVD등가모델의 임피던스 특성도 함께 나타내었다. 식 (2)의 임피던스 특성식을 이용한 경우와 BVD모델을 이용한 경우 모두 공진 주파수 특성은 정확히 일치하지만, 임피던스 크기는 차이가 있다. 이러한 오차는 공진기에 대한 해석적 임피던스 특성식을 3개의 소자로 이루어진 집중소자의 임피던스 특성으로 근사하면서 발생한 오차이다. <그림 4(c)>와 <그림 4(d)>는 <표 1>에 제시된 구조를 갖는 여파기와 제안된 유전자알고리즘을 이용하여 최적화된 구조의 여파기 응답 및 각 경우의 BVD등가모델을 이용하여 구한 여파기의 S_{21} , S_{11} 특성이다. <표 1>에 제시된 구조의 여파기 응답은 통과대역 내에서 심한 리플로 인해 45.4MHz의 3dB대역폭을 갖으며, S_{11} 크기는 -6.85dB로 크게 나타났다. 저지대역에서의 감쇠는 -53.7dB로 양호하지만 이 여파기는 통과대역특성을 개선시킬 필요가 있다. 제안된 방법을 이용하여 최적화된 구조의 대역통과 여파기는 1960MHz중심주파수에 대해 56.1MHz의 대역폭을 갖으며, 통과대역내의 리플크기는 최대 0.44dB로 평탄한 응답특성을 갖고, 저지대역에서의 감쇠는 38.8dB, 통과대역내의 S_{11} 크기는 -10.15dB로 US-PCS 수신 대역통과 여파기 특성을 만족시켰다. 저지대역의 감쇠가 높아지는 대신 통과대역의 대역폭, 리플크기, S_{11}

크기 등이 개선되었음을 볼 수 있다. 각각의 경우에 대해 BVD 등가 모델을 이용하여 구한 여파기 특성은 공진기의 임피던스 특성식을 이용하여 구한 여파기 특성과 차이를 나타냈다. 이것도 임피던스 식을 BVD등가 모델로 근사하면서 생긴 오차이다.

따라서 본 논문에서 제안된 방법을 사용함으로써 원하는 여파기 응답을 갖도록 사다리형 여파기의 각 FBAR 구조를 최적화 할 수 있고, 공진기 임피던스 특성을 근사함으로써 발생하는 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

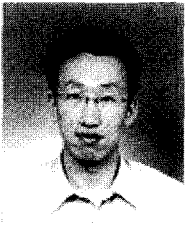
본 논문에서는 FBAR RF 대역통과기 여파기 설계를 위해 유전자 알고리즘을 이용하는 기법을 제안하였다. 사다리형 여파기를 구성하는 단위 FBAR의 두께와 면적을 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화함으로써 대역통과 여파기 응답특성을 최적화하였고, 단위 FBAR에 대한 BVD등가모델을 이용하는 대신, 해석적 임피던스 방정식을 이용하여 FBAR를 등가 모델로 근사함으로써 발생하는 오차를 줄일 수 있었다. 본 논문에서 제안된 방법은, 시행착오를 통한 기존의 설계방법에 비해 경제적, 시간적인 손실을 줄일 수 있어서 FBAR 대역통과 여파기 설계에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] K. M. Lakin, G. R. Kline and K. T. McCarron, "Development of Miniature Filters for Wireless Applications," IEEE Trans. on MTT, vol. 43. no. 12, pp. 2933~2939, Dec. 1995.
- [2] K. M. Lakin, "Modeling of Thin Film Resonators and Filters," MTT-S Digest, pp. 149~152, 1992.
- [3] K. M. Lakin, G. R. Kline and K. T. McCarron, "Thin Film Bulk Acoustic Wave Filters for GPS," IEEE Ultrasonics symposium, pp. 471~476, 1992.
- [4] J. Larson III, P. Bradley, S. Wartenberg, and R. Ruby, "Modified Butterworth-Van Dyke Circuit for FBAR Resonators and Automated Measure-

- ment System," IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 863~868, Oct. 2000.
- [5] R. Ruby, P. Bradley, J. D. Larson III and Y. Oshmyansky, "PCS 1900MHz duplexer using thin film bulk acoustic resonators(FBARs)," Electronics Letters, pp. 794~795, 1998.
- [6] Y. Rahmat-samii and E. Michielssen, Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithm, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [7] J. J. Lutsky, A sealed cavity thin-film acoustic resonator process for RF bandpass filters, Ph. D Thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, 1997.
- [8] Microwave Design System(MDS), release 7.0, 1996, HP EEsof Corp., Westlake Village, CA. W. P. Mason.
- [9] V. M. Ristic, Principles of Acoustic Devices, John Wiley & Sons, Inc., 1983.

저 자 소 개



李正欽(正會員)

1997년 2월 : 한양대학교 전파공학과(공학사). 1999년 2월 : 한양대학교 전자통신전파공학과(공학석사). 2002년 2월 : 한양대학교 전자통신전파공학과 박사수료. <주관심분야 : RF 소자 및 안테나 설계, 전자

파 수치해석>



金炯東(正會員)

1984년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사). 1986년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학석사). 1992년 5월 : The University of Texas at Austin (Ph. D), 안테나 및 마이크로파 공학 전공. 1989년 5월~1992

년 5월 : Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Eng., The University of Texas at Austin: Research assistant. 1992년 6월~1993년 1월 : Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Eng., The University of Texas at Austin: Postdoctoral fellow. 1993년 3월~1996년 2월 : 한양대학교 전파공학과 전임강사. 1996년 3월~2001년 2월 : 한양대학교 전파공학과 조교수. 2001년 3월~현재 : 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수. <주관심분야 : 마이크로파 회로, 이동통신용 안테나, 초음파 공학, 전자파 수치해석, 웨이블릿 변환의 수치해석 응용, EMI/EMC 해석>