

유전자 알고리즘을 이용한 압전 박막 음향 공진기에서의 물질 상수 추출 기법

Method of Material Constants Extraction in Thin-Film Bulk Acoustic Resonator(FBAR) using Genetic Algorithm

이 정 흠 · 정 재 용 · 김 형 동*

Jeong-Heum Lee · Jae-Yong Jung · Hyeongdong Kim*

요 약

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용한 FBAR(Thin-Film Bulk Acoustic Resonator)에서의 물질 상수 추출 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 유전자 알고리즘을 적용하여 FBAR의 입력 임피던스로부터 물질 상수를 추출하는 방법이다. 유전자 알고리즘의 적합도 함수를 결정하기 위해 물질 상수 변화가 FBAR의 임피던스 특성에 미치는 영향을 알아본 후, FBAR의 입력 임피던스로부터 구해지는 직렬/병렬 공진 주파수와 FBAR 대역폭으로 적합도를 평가하였다. 유전자 알고리즘의 흐름도와 제안된 물질 상수 추출 과정에 대해 설명하였고, 본 기법의 타당성을 검증하기 위해 물질 상수 추출 결과를 제시하였다.

Abstract

In this paper, the method of material constants extraction in a thin-film bulk acoustic resonator(FBAR) using a genetic algorithm(GA) is proposed. The material constants are extracted from the input impedance of a FBAR by a GA optimizer. The characteristics of the FBAR input impedance affected by the material constants were studied to decide the fitness function for GA. As a result, the fitness was estimated by the series- and parallel-resonance frequencies and the FBAR bandwidth, as determined from the input impedance of the FBAR. A flowchart for the GA and a procedure for the proposed extraction method are explained in detail, and the results of the material constants extraction are presented.

Key words : Genetic Algorithm, FBAR, Material Constants, Fitness Function

I. 서 론

기본적인 FBAR는 음향 전파속도를 갖는 압전물질과 제작상에 필요한 기관, 그리고 전원을 가하기 위한 전극으로 구성되며, 전자파와 음향파의 커플링을 이용하여 음향공진을 일으키게 된다. 이러한, 음향공진을 이용하는 FBAR로 필터를 설계할 경우 기

존의 필터에 비해 낮은 삽입손실과 높은 주파수 선택 특성을 가지면서 초소형 제작이 가능하고 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 공정에도 적합하여 무선 통신시장의 요구를 수용할 수 있는 필터로 주목을 받고 있다^[1].

FBAR 제작 과정에서의 물질 상수 변화는 전파속도, 음향 특성 임피던스 등에 영향을 주고 궁극적으

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

한양대학교 전자통신전파공학과(Dept. of Electrical & Computer Eng., Hanyang Univ.)

*한양대학교 전자전기컴퓨터공학부(Div. of Electrical & Computer Eng., Hanyang Univ.)

· 논문 번호 : 20021018-137

· 수정완료일자 : 2003년 2월 19일

로는 FBAR의 공진기 특성을 나타내는 성능지수 (Figure of Merit)인 유효결합계수(k_{eff}^2), 품질계수(Q)에 변화를 준다. 이러한 유효결합계수, 품질계수의 변화는 FBAR 필터를 구성하는 단위 공진기 대역폭, 손실의 변화를 초래한다. 따라서 물질 상수 추출은 FBAR의 공진기 특성 해석뿐만 아니라 필터 설계에도 중요한 역할을 한다. 기존에는 제작된 FBAR의 임피던스 특성과 물질상수의 직접적인 관계를 구하여 압전물질의 탄성강도계수, 밀도 및 전기-기계적 결합계수(K^2)을 구하는 방법^[2]이나 유효결합계수와 품질 계수로부터 전기-기계적 결합계수와 음향손실상수(η)를 구하기 위한 연구 등이 진행되었다^{[3],[4]}. 하지만 FBAR를 구성하는 각 층의 여러 가지 물질 상수를 동시에 추출할 수 있는 방법이 없었다. 실제로 측정된 FBAR의 임피던스 특성으로부터 물질 상수를 추출할 수 있다면, 제작 공정상에서의 오차를 파악할 수 있을 것이며, 설계된 FBAR 공진기에 대한 보다 실제적인 성능지수들을 얻을 수 있고, 이를 실제 필터 설계에 반영함으로써 보다 정확한 필터 설계가 가능할 것이다.

따라서 본 논문에서는 자연의 진화 개념을 기반으로 한 최적화 방법인 유전자 알고리즘(genetic algorithm)^[5]을 이용하여 FBAR의 물질 상수를 추출할 수 있는 기법을 제안하였다. 주어진 FBAR의 입력 임피던스로부터 공진주파수를 구한 후, 유전자 알고리즘을 통해 그 값을 최적화하여 FBAR의 물질 상수를 추출하는 방법이다. 유전자 알고리즘에 사용할 적합도 함수(fitness function)를 구하기 위해 FBAR 입력 임피던스 특성과 물질 상수의 관계를 알아보았다. 특히, 공진 특성에 영향을 주는 탄성강도 계수(elastic stiffness coefficient), 밀도(density), 그리고 압전 스트레스 계수(piezoelectric stress coefficient)를 추출하는 기법을 제안하였는데, 이는 주어진 임피던스로부터 여러 개의 공진 모드에 대한 FBAR 직렬 및 병렬 공진주파수, 그리고 FBAR의 대역폭을 구하고 적합도 함수에 적용하여 유전자 알고리즘을 통해 최적화하여 추출할 수 있다. 제안한 기법의 타당성을 검증하기 위해 문헌에 제시된 물질 상수로 해석적인 방법에 의해 입력 임피던스를 구한 후, 그 임피던스로부터 물질 상수를 추출해

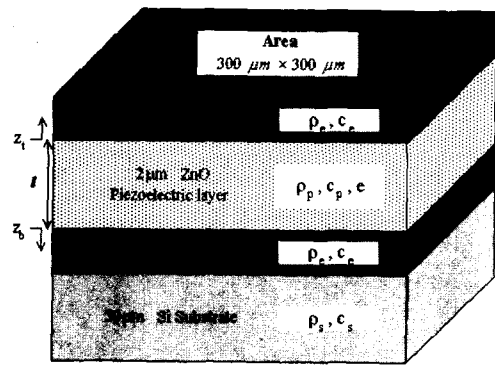


그림 1. Over-moded FBAR의 구조
Fig. 1. The structure of an over-moded FBAR.

보았다.

II. FBAR의 임피던스 특성과 물질 상수

그림 1은 기판과 두 개의 전극, 압전 물질 층으로 구성된 over-moded FBAR를 나타낸다. FBAR의 면적(A)과 압전물질, 전극, 기판의 두께(l, l_e, l_s)가 각각 주어졌을 때, 전기적 입력 임피던스는 압전물질 상/하부 기판들에 대해 전송선로 이론을 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다^[1].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left\{ 1 - \frac{K^2}{1+K^2} \frac{\tan(\beta l/2)}{\beta l/2} \times \frac{(z_1 - z_2) \cos^2(\beta l/2) + j \sin(\beta l)}{(z_1 - z_2) \cos(\beta l) + j(1 - z_1 \cdot z_2) \sin(\beta l)} \right\} \quad (1)$$

여기서 $C_0 = (\epsilon \cdot A) / l$, $K^2 = e^2 / (c_p \cdot \epsilon)$, $\beta = \omega \sqrt{\frac{\rho_p}{(c_p + e^2/\epsilon)}}$ 이고, z_1 와 z_2 는 각각 상부와 하부 전극 쪽으로 바라본 입력 임피던스를 특성 음향 임피던스로 정규화 한 것으로, 각 물질에서의 특성 임피던스는 각 물질의 탄성강도 계수와 밀도를 이용하여 $Z_0 = \sqrt{\rho c}$ 로 구할 수 있다. c, ρ 은 각 물질의 탄성강도 계수(elastic stiffness coefficient), 밀도(density)로 압전물질, 전극, 기판에서의 물질상수를 구분하기 위해 각각 아래첨자 p, e, s 를 사용하였다. e, ϵ 은 각각 압전물질의 압전 스트레스 계수(piezoelectric stress coefficient), 유전율(permittivity)를 나타낸다. 본 논문에서 사용한 알루미늄 전극, ZnO 압전물질, 실리콘 기판에서의 물질상수는 각각 다음과

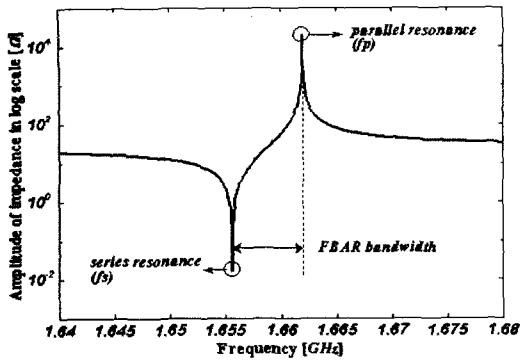
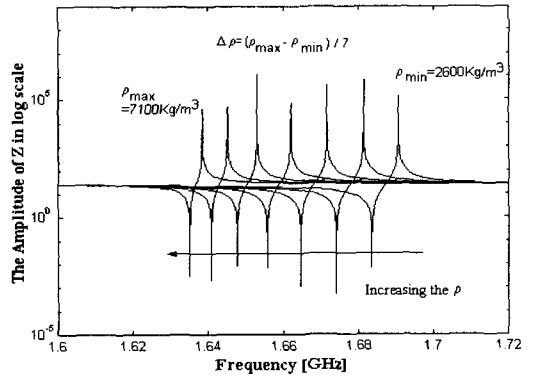


그림 2. FBAR의 협대역 임피던스 특성
Fig. 2. The narrow-band impedance characteristics of FBAR.

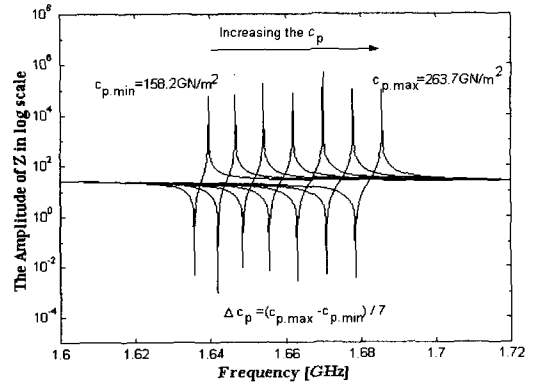
같다^[6]. $c_e=1.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $\rho_e=2,695 \text{Kg/m}^3$, $c_p=2.11 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $\rho_p=5,680 \text{Kg/m}^3$, $e=1.32 \text{C/m}^2$, $\epsilon=10.2 \times \epsilon_0$, $c_s=1.66 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $\rho_s=2,332 \text{Kg/m}^3$ 이다.

FBAR의 임피던스 특성은 압전물질이 유전율을 가지고 있음으로 생기는 정전용량 C_0 에 의한 임피던스 곡선과 전자파와 음향파의 커플링으로 인한 공진 특성이 나타난다. 공진 현상은 반파장에서 나타나는 주모드(main mode)와 기판의 영향으로 나타나는 오버모드(overmode)가 발생한다. 각각의 모드에서 공진주파수는 물질 상수에 따라 변하게 된다. 그림 2의 협대역 임피던스 특성에서 임피던스가 0으로 가는 최소점을 직렬(series) 공진주파수(f_s)라고 하고, 임피던스가 무한대로 가는 최대점을 병렬(parallel) 공진주파수(f_p)라고 하고 이 두 주파수 사이의 차를 FBAR의 대역폭(bandwidth)라고 정의한다^[3].

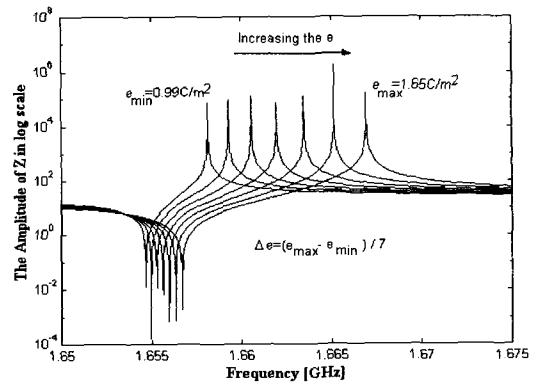
식 (1)에서 보듯이 FBAR의 임피던스 특성은 물질상수들의 함수로서, ϵ 은 C_0 를 변화시켜 전반적인 임피던스 곡선에 영향을 주고, ρ_p , c_p , e 는 전기기계적 결합 상수 K^2 과 음향 전파상수 β 를 변화시켜 공진 현상에 영향을 준다. ρ_p , c_p , e 의 변화에 따른 임피던스 변화를 살펴보면 그림 3과 같다. 그림 3에 나타난 바와 같이, 압전물질인 ZnO의 물질상수가 문헌에 제시된 값의 최대 $\pm 25\%$ 범위로 변한다고 했을 때, 이 구간을 7개의 등간격으로 나눈 값으로 변화시키면서 그에 따른 임피던스 변화를 살펴 보았다.



(a) 밀도 증가
(a) Increase of the density vs. Impedance.



(b) 탄성강도 계수 증가
(b) Increase of the elastic stiffness coefficient vs. impedance.



(c) 압전스트레스 상수 증가
(c) Increase of the piezoelectric stress coefficient vs. impedance.

그림 3. 물질 특성상수 증가에 따른 임피던스 특성 변화
Fig. 3. Impedance variation according to the increase in the material constants.

그림 3(a)에서는 밀도 ρ_p 가 증가함에 따라 공진주파수가 감소하는 것을 볼 수 있고, 그림 3(b)에서는 탄성강도 계수 c_p 가 증가함에 따라 공진주파수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 3(c)는 압전 스트레스 상수 e 가 증가함에 따른 임피던스의 공진 특성을 나타낸 것인데, 공진주파수도 증가하면서 FBAR 대역폭도 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 압전물질 내부에서의 위상속도(phase velocity)로 설명할 수 있는데, 위상속도는

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{c_p + e^2/\epsilon}{\rho_p}} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있고, $v_p = f \cdot \lambda$ 에서 공진주파수와 비례관계를 갖는다^[3]. 따라서 식 (2)에서 보면 밀도와 위상속도가 반비례관계에 있으므로, ρ_p 가 증가하면 위상속도는 느려지고 공진주파수는 감소하게 된다. 반대로 c_p 와 e 는 위상속도와 비례관계에 있으므로 위상속도를 빠르게 하여 공진주파수를 증가시킨다. 이와 같은 물질 상수 변화에 따른 임피던스의 공진 특성 변화의 관계는 유전자 알고리즘의 초기 탐색 범위 설정 및 적합도 함수를 구하는 중요한 정보가 된다.

III. 유전자 알고리즘의 적용

유전자 알고리즘은 생물 진화의 원리를 기반으로 초기화된 정보가 여러 가지 변화와 적자선택(selection of the fittest) 등을 통해 보다 최적화(optimization)되는 혁신적인 알고리즘이다. 또, 유전자 알고리즘은 간단하면서도 최적화하려는 조합의 수가 클 때 다른 알고리즘에 비해 수렴 속도가 매우 빠르고, 지역해에 빠지지 않는 특성을 가지고 있다^[5].

그림 4는 FBAR의 물질 상수를 추출하기 위하여 사용한 유전자 알고리즘의 흐름도를 나타내는데, 크게 개체군 생성, 적합도 평가, 재생산의 세 과정으로 이루어진다. 우선, 최적화 하고자 하는 물질 상수 값들을 각각 2진 코드화한 하나의 염색체(chromosome)로 표현한다. 그리고 염색체들의 조합으로 개체(individual)를 형성하는데, 각 개체는 다른 개체와는 독립적으로 자신만의 특징을 가지게 된다. 이러한 개체가 모여 개체군(population)을 생성하여 한

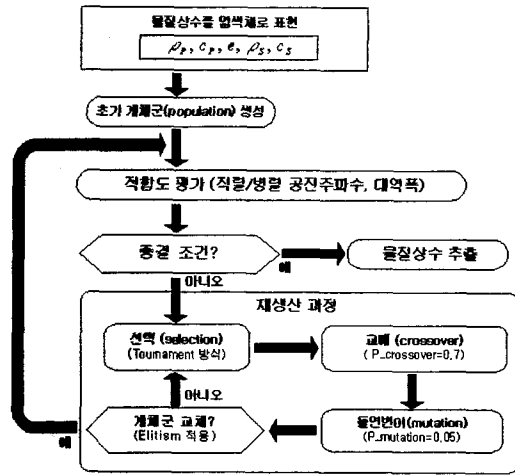


그림 4. 물질 상수 추출을 위한 유전자 알고리즘의 흐름도

Fig. 4. Flowchart of a genetic algorithm for material constants extraction.

세대(generation)를 초기화한다. 다음으로 각 개체들의 적합도를 바탕으로 유전자 알고리즘의 특징인 교배(crossover)와 돌연변이(mutation) 과정을 거쳐 다음 세대를 재생산(reproduction)하게 된다. 이 재생산 과정에서 각 개체들은 진화하여 최적화된 물질 상수 값을 구할 수 있다. 또한, 재생산 과정에서 가장 적합도가 높은 개체를 다음 세대에 그대로 남기는 방법인 엘리티즘(elitism)^[5]을 사용하여 우수한 개체가 교배나 돌연변이에 의해 파괴되는 것을 막고, 진화 속도를 증가시켰다.

IV. 물질 상수 추출 과정

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 임의의 FBAR의 임피던스 특성을 최적화하여 그 물질 상수를 추출하는 기법을 제안하였다. 제안된 유전자 알고리즘을 이용한 물질 상수 추출 과정은 그림 5와 같다. 측정을 통해 얻어진 또는 임의로 알고 있는 FBAR의 입력 임피던스를 Z_{given} 이라 하면, 이 임피던스로부터 직렬 공진주파수($f_{s-given}$)와 병렬 공진주파수($f_{p-given}$), 그리고 각 모드에서 직렬과 병렬 공진주파수의 차인 FBAR 대역폭(BW_{given})을 계산할 수 있다. 다음으로 추출하고자 하는 물질 상수 탄성강도 계수 c , 밀도 ρ , 압전스트레스 상수 e 를 임의

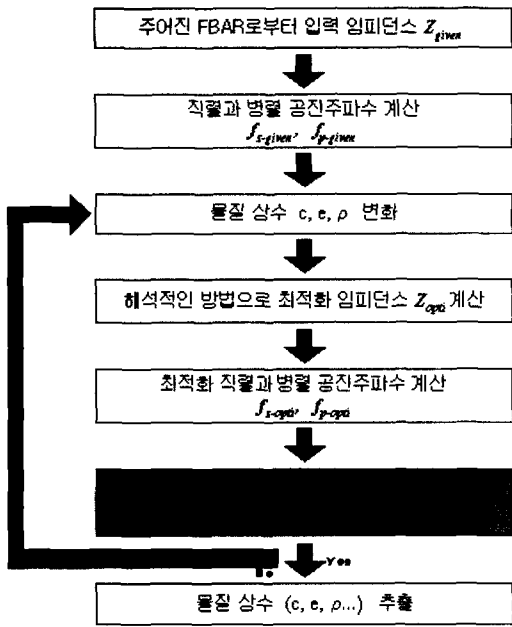
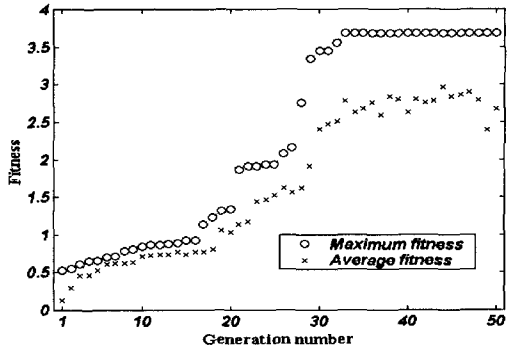


그림 5. 제안된 물질 상수 추출 과정
Fig. 5. The proposed procedure for the material constants extraction.

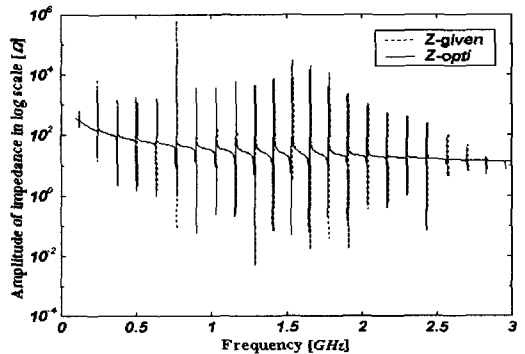
의 난수 형태로 발생하여 유전자 알고리즘의 개체로 표현한다. 그리고 각 개체에 대해 식 (1)로부터 최적화 임피던스 Z_{opti} 를 구한 후, 이 임피던스에서 각 개체들의 최적화 직렬 공진주파수(f_{s-opti})와 병렬 공진주파수(f_{p-opti}), 그리고 최적화 FBAR 대역폭(BW_{opti})을 계산한다. 그리고 나서 적합도 함수를 이용하여 임의의 개체로부터 구해진 최적화 값들(f_{s-opti} , f_{p-opti} , BW_{opti})과 주어진 값들($f_{s-given}$, $f_{p-given}$, BW_{given})간의 차이를 구하게 된다. 이 적합도 함수는 각각의 개체를 독립적으로 특징지음으로써, 각 개체들의 우열을 판단하여 주어진 임피던스 특성과 일치하는 최적화된 물질 상수 값을 추출할 수 있게 해준다. 물질 상수를 추출하는데 사용한 적합도 함수는 그림 3에서 살펴본 바와 같이 물질 상수의 변화에 따른 FBAR의 공진주파수 및 대역폭의 변화를 동시에 고려한 함수로 식 (3)과 같다.

$$F = \frac{1}{\sqrt{|f_{s-given} - f_{s-opti}|^2 + |f_{p-given} - f_{p-opti}|^2 + |BW_{given} - BW_{opti}|^2}} \quad (3)$$

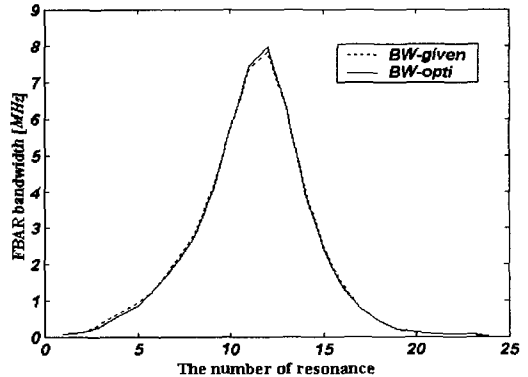
주어진 공진특성들($f_{s-given}$, $f_{p-given}$, BW_{given})과 최



(a) 유전자 알고리즘의 수렴도
(a) Convergence of the genetic algorithm.



(b) 주어진 임피던스와 최적화된 임피던스
(b) Given impedance and optimized impedance.



(c) 주어진 FBAR 대역폭과 최적화된 FBAR 대역폭
(c) Given FBAR bandwidth and optimized FBAR bandwidth.

그림 6. 물질 상수 추출 결과
Fig. 6. Result of the material constants extraction.

적화 공진특성들(f_{s-opti} , f_{p-opti} , BW_{opti})의 오차가 작을수록 적합도 함수 F 는 큰 값을 갖게 되는데, F 가 최대값을 가질 때, 개체로 대입된 물질 상수 값이 우

리가 구하고자 하는 최적화된 물질 상수가 된다. 실제 수치해석에 적용한 적합도 함수는 효과적인 최적화를 위해 각 경우에 맞게 스케일링(scaling)을 하였다^[5].

V. 물질 상수 추출 결과

본 논문에서 제시한 기법을 검증하기 위해 그림 1과 같은 구조의 over-moded FBAR에 대해서 물질 상수를 추출해 보았다. 일반적으로 전극은 상대적으로 두께가 얇기 때문에 그 영향을 무시하고, 문헌 [6]에 제시된 물질 상수를 이용하여 식 (1)에 의해 구한 임피던스 Z_{given} 으로부터 역으로 유전자 알고리즘을 이용하여 압전물질의 물질 상수 c_p, ρ_p, e 와 기관의 c_s, ρ_s 를 추출함으로써 제안한 방법을 검증하였다.

그림 6(a)는 유전자 알고리즘의 수렴 과정을 나타낸 것으로, 엘리티즘을 적용했기 때문에 최대 적합도가 계속 증가하며 결국 일정한 값으로 수렴하여 최적화되었음을 알 수 있다. 그림 6(b)는 정확한 물질 상수를 갖는 FBAR의 임피던스 특성과 임의로 생성된 물질상수로부터 최적화를 거쳐 추출한 물질 상수로 구성된 FBAR의 임피던스 특성을 나타낸다. 그리고 그림 6(c)는 각 경우의 대역폭을 나타낸 것으로 두 곡선이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

표 1은 정확한 물질 상수와 추출한 물질 상수, 그리고 상대 오차를 나타내는데, 모든 물질 상수의 오차 범위는 1% 이내로 정확하다. 따라서 제안된 방법을 이용함으로써 거의 정확하게 물질 상수 값을 추출할 수 있음을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용한 FBAR

의 물질 상수 추출 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 적용한 추출 결과로부터 그 타당성을 검증할 수 있었다. 다변수함수의 최적화에 효율적인 유전자 알고리즘으로 장점으로 인해 기존의 추출 기법보다 더 많은 물질 상수를 한번에 추출할 수 있었으며, 그 결과 또한 매우 정확했다. 본 논문에서는 문헌에 제시된 물질 상수를 이용한 임피던스로부터 역으로 물질 상수를 추출해 보았지만, 실제 측정된 임피던스로부터 본 논문에서 제시한 물질 상수 추출 과정을 적용하여 물질 상수를 추출하면 제작상의 오차로 인한 물질 상수 변화를 찾을 수 있어, FBAR의 공진 특성 변화에 대한 보다 정확하게 반영할 수 있을 것으로 기대된다. 현재는 측정상의 잡음을 고려한 경우와 FBAR에서의 손실을 고려한 경우의 물질 상수 추출에 대해 연구가 진행 중이다.

참 고 문 헌

[1] K. M. Lakin, G. R. Kline and K. T. McCarron, "High-Q microwave acoustic resonators and filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, pp. 2139-2146, Dec. 1993.

[2] Y. Zhang, Z. Wang, Y. Zhang, J. D. N. Cheeke and F. S. Hickernell, "Direct Characterization of ZnO Films in Composite Resonators by the Resonance Spectrum method", *1999 Ultrasonics Symposium*, pp. 991-994, Sep. 1999.

[3] R. S. Naik, "Bragg reflector thin-film resonators for miniature PCS bandpass filters", *Ph. D. Thesis, Dept. of Material Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA*, 1998.

[4] R. S. Naik, J. J. Lutsky, R. Rief and C. G. Sodini,

표 1. 물질상수 추출 결과

Table 1. Results of the material constants extraction.

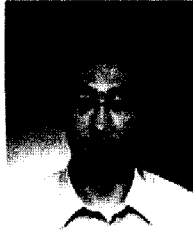
	압전물질 (ZnO)			기관 (Si)	
	c_p (N/m ²)	ρ_p (kg/m ³)	e (C/m ²)	c_s (N/m ²)	ρ_s (kg/m ³)
정확한 물질 상수	2.11×10^{11}	5680	1.32	1.66×10^{11}	2332
추출한 물질 상수	2.12×10^{11}	5727	1.32	1.64×10^{11}	2326
상대오차(%)	0.47	0.83	0	1.20	0.26

"Electromechanical Coupling Constant Extraction of Thin-Film Piezoelectric Materials using a Bulk Acoustic Wave Resonator", *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 45, no. 1, pp. 257-263, Jan. 1998.

[5] Y. Rahmat-Samii, E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization By Genetic Algorithms*, John Wiley & Sons, Inc., 1999.

[6] V. M. Ristic, *Principles of Acoustic Devices*, John Wiley & Sons, Inc., 1983.

이 정 흠



1997년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
1999년 2월: 한양대학교 전자통신 전파공학과 (공학석사)
2002년 2월: 한양대학교 전자통신 전파공학과 박사수료
[주 관심분야] RF 소자 및 안테나

설계, 전자파 수치해석

김 형 동



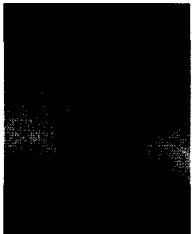
1984년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1992년 5월: 텍사스 오스틴 주립대학교 (공학박사)
1992년 6월~1993년 1월: 텍사스

오스틴 주립대학교 Post. Doc. Fellow

1993년 3월~현재: 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수

[주 관심분야] 마이크로파 회로, 이동통신용 안테나, 초음파 공학, 전자파 수치해석, 웨이블릿 변환의 수치해석 응용, EMI/EMC 해석, SDR

정 재 용



2001년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 한양대학교 전자통신 전파공학과 (공학석사)
2003년 2월~현재: 삼성전자
[주 관심분야] FBAR 필터 설계, 전자파 수치해석