

임의의 주파수 특성을 갖는 표면음파 필터의 최적 설계

박석홍*, 손영찬*, 유상대*

The Optimal Design of SAW Filters with Arbitrary Frequency Characteristics

Seog-Hong Park*, Yeong-Chan Son*, Sang-Dae Yu**

요 약

이 논문은 임의의 주파수 특성을 갖는 표면음파 필터의 최적화 설계 방법에 관한 연구이다. 임의의 주파수 특성을 갖는 표면음파 필터를 설계하기 위하여 비제한 비선형 최적화 방법과 FFT 알고리즘을 이용한 설계 프로그램을 개발하였다. 설계의 예로서 비대칭 진폭과 비선형 위상 주파수 특성을 갖는 표면음파 TV IF 필터를 설계하였다.

Abstract

This paper presents the optimal design method of SAW filters with arbitrary frequency characteristics. The design program using the unconstrained nonlinear optimization method and FFT algorithm is developed for optimal design of SAW filters with arbitrary frequency characteristics. As a design example, a SAW TV IF filter with asymmetric-amplitude and nonlinear-phase frequency characteristics is designed.

1. 서 론

1885년 Rayleigh경이 표면음파(SAW: Surface Acoustic Wave)가 두 매질의 경계면을 전파할 수 있음을 보인 후 이에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 특히 지난 20년 동안 그 응용분야가 상당히 넓어졌다.

일반적으로 표면음파라 함은 두 매질의 경계면을 따라 전파하는 파로서, 그 진폭이 경계면에 수직인 방향으로 지수적으로 감소하여 대부분의 에너지가 경계면에서 한 파장 이내에 모여있는 파를 말한다. 이 파가 표면을 따라 전파할 때 표면상태를 변화시킴으로써 전달특성을 쉽게 조절할 수 있다. 이의 전달속도는 전파에 비해서 십만배 가량 느린 1~10km/s 정도이며, 사용

주파수는 보통 수 MHz에서 수 GHz에 이른다. 이러한 주파수 영역에서의 표면음파의 파장은 수 μm 에서 수백 μm 이고 집적회로 기술로 쉽게 얻을 수 있는 크기이다.

1967년 표면음파를 쉽게 발생시키고 검출할 수 있는 IDT(Interdigital Transducer)의 발명으로 대역통과 필터뿐만 아니라 지연선, 공진기, 발진기, 퓨리에 변환기 등의 신호처리 소자의 제작이 용이하게 되었다. 이러한 표면음파 소자들을 제작하려면 압전기판(piezoelectric substrate)을 필요로 하는데 그러한 물질로는 LiNbO₃, ZnO, GaAs, 석영 등이 있다.^{[1][2]}

필터의 설계 방법으로는 크게 나누어 윈도우잉(windowing) 방법, 빌딩 블록(building block) 방법, 주파수 샘플링 방법, 최적화 방법 등이 있다.^[3-7] 실제 표면음파 필터를 대량 생산할 때 단위 웨이퍼 면적당 많은 수량을 얻기 위해서는 칩의 면적이 작아야 한다. 그러나 이를 위해 전극수를 줄이면 천이대역의 폭이 넓어져서 원하는 주파수 특성을 얻을 수 없게 된다. 따라서 최적 설계를 통해 주어진 특성을 실현하면서 IDT의 전극수를 보다 적게 해야 할 것이다. 한편, 최적 설

* 경북대학교 전자전기공학부
(School of Electronic and Electrical Engineering,
Kyungpook Nat'l University)

** 본 연구는 한국과학재단의 95년 특정연구과제
연구비 지원에 의해 수행되었음.

<접수일자 : 1996년 3월 29일>

계 방법은 대칭 진폭과 선형 위상 주파수 특성을 갖는 필터에 대한 최적 설계 방법^{[4][7]}과 비대칭 진폭과 비선형 위상 주파수 특성을 갖는 필터에 대한 최적 설계 방법^[6]으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 기존의 비대칭 진폭과 비선형 위상 주파수 특성의 NTSC TV IF 필터와 같은 임의의 주파수 특성을 갖는 표면음파 필터의 최적 설계 프로그램을 개발하여 표면음파 NTSC TV IF 필터를 설계하였다.

2. IDT의 모델

IDT의 모델에는 델타함수 모델, 임펄스 모델 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 Mason 등가회로부터 얻을 수 있는 임펄스 모델을 사용하였다. 이 모델의 시간 영역에서의 단위 셀은 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며 표면음파의 샘플링 함수는 다음과 같이 주어진다.^[8]

$$a_s(f) = \sqrt{f_n/f_0} [\delta(t+1/4f_n) - \delta(t-1/4f_n)] \quad (1)$$

여기서 $f_n = v/2L_n$ 이고, v 는 표면음파의 속도이며, f_0 는 설계하고자 하는 IDT의 중심주파수이다.

식 (1)을 Fourier 변환하면

$$A_s(f) = j2\sqrt{f_n/f_0} \sin(\pi f/2f_n) \quad (2)$$

이 된다. 한 IDT의 주파수 응답은

$$H(f) = A_s(f) \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j2\pi f n/v} \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서, $h(n)$ 은 임펄스 응답으로, IDT 전극의 겹쳐진 길이에 비례한다.

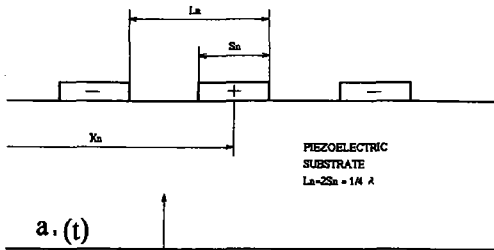


그림 1. IDT의 임펄스 모델을 나타내는 단위 셀.
Fig. 1. Unit cell representing impulse model of IDT.

3. 필터의 구조

표면음파 필터는 표면음파를 발생시키는 입력 IDT와 표면음파를 검출하는 출력 IDT로 그림 2와 같이 구성된다. Apodization된 IDT와 균일한 IDT로 구성된 표면음파 필터의 주파수 응답은 다음과 같은 형태로 주어진다.^[9]

$$H(f) = H_i(f)H_o^*(f) \exp(-j\omega\tau) \quad (4)$$

여기서 *는 공액 복소수 부호이며, τ 는 두 IDT간의 시간지연을 나타내고, $H_i(f)$ 와 $H_o(f)$ 는 각각 입력과 출력 IDT의 주파수 응답이다.

식 (4)에서 두 IDT간의 시간 지연 τ 는 선형위상 응답을 주므로 군지연(group delay)에는 상수항으로 기여하게 되며, 설계시에는 고려하지 않아도 된다. 그러나 두 IDT 사이의 간격을 너무 크게 하면 회절현상이 커지고 또 표면음파 전파시 손실이 증가하는 반면 두 IDT 사이의 간격을 너무 작게 하면 입력신호가 직접 출력 IDT에 전달됨으로 이를 고려해야 한다.

일반적으로 임의의 주파수 특성을 갖는 필터의 임펄스 응답은 다음과 같이 주어진다.^[10]

$$h(t) = 2h_p(t) \cos(2\pi f_0 t) + 2h_q(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (5a)$$

또는

$$h(t) = 2[h_p^2(t) + h_q^2(t)] \cos[2\pi f_0 t - \tan^{-1}(h_q(t)/h_p(t))] \quad (5b)$$

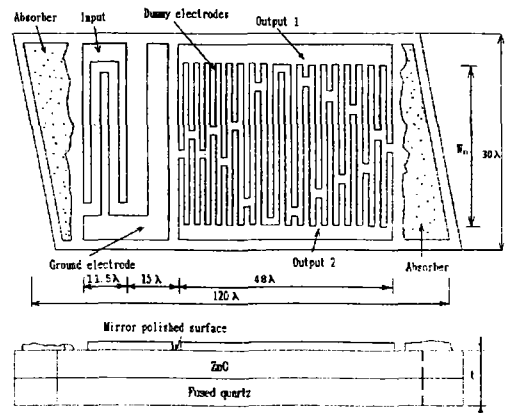


그림 2. SAW 필터의 칩 구성.
Fig. 2. Chip configuration of a SAW filter.

여기서 $h_p(t)$, $h_q(t)$ 는 in-phase, quadrature 임펄스 응답이다. 원하는 주파수 특성을 가진 표면음파 필터로 얻기 위해서는 전극의 겹쳐진 길이(IDT weighting)와 그 간격이 필요한 데 이것은 임펄스 응답 $h(t)$ 의 극대, 극소점을 샘플링함으로써 얻을 수 있다. 식 (5a)를 사용할 경우 $\cos(\omega_0 t)$ 와 $\sin(\omega_0 t)$ 가 각각 ± 1 일 때 샘플링해야 하는데 이는 샘플링 주파수가 $4f_0$ 에 해당되며 샘플링 간격, 즉 전극간격이 균일하다. 식 (5b)을 사용할 경우 $\cos[2\pi f_0 t - \tan^{-1}(h_q(t)/h_p(t))] = \pm 1$ 일 때 샘플링해야 하는데 이는 샘플링 주파수가 $2f_0$ 에 해당하는 반면 전극간격이 균일하지 않게 되어 정밀한 포도 리소그래피 기술을 필요하게 된다. 여기서는 마스크 제작시 오차를 최소화하기 위해 샘플링 주파수를 $4f_0$ 로 하였다.

Unapodization된 입력 IDT의 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h_i(m) = \begin{cases} 1, & m = 0, 1, 4, 5, \dots \\ -1, & m = 2, 3, 6, 7, \dots, M-1 \end{cases} \quad (6)$$

Apodization된 출력 IDT의 응답은 식 (4)의 전체응답에서 unapodization된 입력 IDT의 응답으로 나누어서 얻으며 그것의 임펄스 응답 $h_o(n)$ 과 그 길이 N 을 통과대역의 리플과 천이대역의 폭을 고려하여 최적값을 찾아야 한다. 입력 IDT와 출력 IDT의 주파수 응답은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$H_i(f) = j2\sqrt{2} \sin(\pi f/4f_0) \sum_{m=0}^{M-1} h_i(m) e^{-j2\pi f x_m/v} \quad (7)$$

$$H_o(f) = j2\sqrt{2} \sin(\pi f/4f_0) \sum_{n=0}^{N-1} h_o(n) e^{-j2\pi f x_n/v}$$

또 필터의 주파수 응답은

$$\begin{aligned} H(f) &= 4 \sin^2(\pi f/4f_0) e^{-j2\pi f x/v} \sum_{m=0}^{M-1} h_i(m) e^{-j2\pi f m/4f_0} \\ &\quad \sum_{n=0}^{N-1} h_o(n) e^{-j2\pi f n/4f_0} \\ &= A(f) e^{j\theta(f)} \\ &= R(f) + jX(f) \end{aligned} \quad (8)$$

이고, 여기서 x_B 는 두 IDT의 첫번째 전극사이의 거리로 선형위상 응답을 준다. $A(f)$ 와 $\theta(f)$ 는 FFT를 사용하여

$$\begin{aligned} H(k) &= 4 \sin^2(\pi k/L) \sum_{m=0}^{M-1} h_i(m) e^{-j2\pi m k/L} \\ &\quad \sum_{n=0}^{N-1} h_o(n) e^{-j2\pi n k/L} \\ &= A(k) e^{j\theta(k)} \\ &= R(k) + jX(k) \end{aligned} \quad (9)$$

로 계산되며, 여기서 L 은 FFT의 길이이며, 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{f}{4f_0} = \frac{k}{L} \quad (10)$$

4. 표면음파 필터의 최적화 설계

본 연구에서 사용된 비대칭진폭 비선형위상의 임의의 주파수 특성을 갖는 필터의 설계 방법은 T. Kodama에 의해 제안된 방법^[6]에 근간을 두고 있으며, 이 방법에서는 최초의 파라미터 값을 최적화를 위하여 통과대역을 $f_o = 0$ 에 중심을 두도록 baseband로 이동하여 변수의 수를 줄여 최적화한 후 보간하여 통과대역으로 이동한다. 이는 최적화하는데 필요한 계산시간을 줄이고자 하는데 목적이 있다.

한편, 본 연구에서는 통과대역을 baseband로 이동하지 않고 통과대역에서 바로 최적화한다. 이는 컴퓨터의 능력이 발전된 현재에 있어서 계산시간이 많이 더 필요로 하지 않고, 주파수 이동과 보간을 하지 않으므로 설계가 직접적이고 원리적인 형태로 되는 장점을 갖는다.

임의의 주파수 특성을 갖는 필터의 진폭규격과 위상규격은 다음과 같이 주어진다.

진폭 규격

$$\text{중간값} : A_C(f_k) : f_k \in F_A$$

$$\text{상한값} : A_U(f_k) : f_k \in F_U$$

$$\text{하한값} : A_L(f_k) : f_k \in F_L$$

위상 규격

$$\text{중간값} : \theta(f_k) : f_k \in F_P$$

여기서 F_A , F_U , F_L 은 진폭규격의 중간값, 상한값, 하한값을 가지는 주파수 영역이고, F_P 는 위상규격을 가지는 주파수 영역이다. 이와 같은 필터의 진폭규격과 위상규격의 예를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 점선은 지정한 진폭 규격을 만족하는 특성을 갖는 예를 나타낸다.

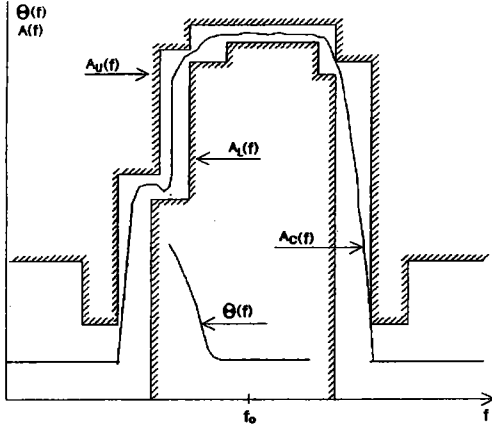


그림 3. 필터의 진폭규격과 위상규격.

Fig. 3. Amplitude and phase specifications of a filter.

식 (9)로부터 unapodization된 입력 IDT의 임펄스 응답 $h_i(m)$ 은 1 또는 -1이고, 이로부터 최적화 문제는 apodization된 출력 IDT의 임펄스 응답 $h_o(n)$ 을 조정하여 진폭규격과 위상규격을 만족하는 주파수 특성을 얻는 것이다. 즉,

$$C = C_T + C_P$$

를 최소화하는 것이다. 여기서 C , C_T , 그리고 C_P 는 각각 objective, target, penalty 함수이며 다음과 같다.

$$C_T = \sum_{f_k \in F_A} w_A \left[\frac{A(f_k)}{A_C(f_k)} - 1 \right]^2$$

$$+ \sum_{f_k \in F_P} w_P [\theta(f_k) - \theta_c(f_k)]^2$$

$$C_P = \sum_{f_k \in F_U} w_U \left[\text{Max} \left(1, \frac{A(f_k)}{A_U(f_k)} \right) - 1 \right]^2$$

$$+ \sum_{f_k \in F_L} w_L \left[\text{Min} \left(-1, \frac{A(f_k)}{A_L(f_k)} - 2 \right) - 1 \right]^2 \quad (11)$$

위상의 상한, 하한값에 대한 penalty 함수는 생략하였으며, w_A , w_P , w_U , w_L 는 weighting 계수이다. 진폭의 상한, 하한의 제한조건을 C_P 로 표시함으로써 비제한 비선형 최적화(unconstrained nonlinear optimization) 문제로 변환시킨 것이다. 목적 함수 C 를 최소화하기 위해 sequential quadratic programming 방법^[8]을 사용할 수 있으며, 이 때 필요한 변수 $h_o(n)$ 에 대한 C 의 미분값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial h_o(n)} = \text{Real} \left[\sum_{k=0}^{L-1} G_1(f_k) e^{-j2\pi kn/L} \right] + \text{Imag} \left[\sum_{k=0}^{L-1} G_2(f_k) e^{-j2\pi kn/L} \right] \quad (12)$$

여기서,

$$G_1(f_k) = U_A(f_k)X(f_k) + U_P(f_k)R(f_k)$$

$$G_2(f_k) = U_A(f_k)R(f_k) - U_P(f_k)X(f_k)$$

$$U_A(f_k) = U_1(f_k) + U_2(f_k) + U_3(f_k)$$

$$U_1(f_k) = \begin{cases} \frac{2w_A}{A_C(f_k)A(f_k)} & f_k \in F_A \\ 0 & f_k \notin F_A \end{cases}$$

$$U_2(f_k) = \begin{cases} \frac{2w_U}{A(f_k)A_U^2(f_k)} & f_k \in F_U \\ 0 & f_k \notin F_U \end{cases}$$

$$U_3(f_k) = \begin{cases} \frac{2w_L}{A(f_k)A_C(f_k)} \left[\frac{A(f_k)}{A_L(f_k)} - 2 \right] & f_k \in F_L \\ 0 & f_k \notin F_L \end{cases}$$

$$U_P(f_k) = \begin{cases} \frac{2w_P}{A^2(f_k)} & f_k \in F_P \\ 0 & f_k \notin F_P \end{cases}$$

최적화를 위한 $h_o(n)$ 의 초기값은 필터의 주파수 응답 규격을 IFFT(inverse fast Fourier transform)하여 그 중 N 개를 취하였다. 그림 4는 표면음과 필터의 최적화 설계의 CAD 순서도이다.

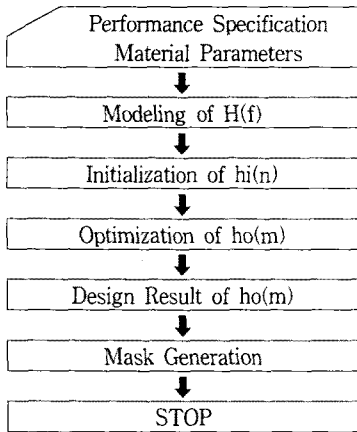


그림 4. 표면음파 필터 설계의 CAD 흐름도.
Fig. 4. CAD flow chart of the SAW filter design.

5. 표면음파 필터의 설계 결과

표면음파 필터의 최적화 설계의 예로서 비대칭 진폭과 비선형 위상 주파수 특성을 갖는 NTSC TV IF 필터를 설계하였다. 설계규격은 표 1과 같은 전형적인 NTSC TV IF 필터의 진폭규격과 위상규격을 사용하였다. NTSC TV IF 필터를 설계하기 위하여 unapodization된 IDT를 입력 IDT로 하였으며, apodization IDT를 출력 IDT로 하였다.

표 1. TV IF 설계에 사용된 진폭규격과 위상규격.
Table 1. Amplitude and phase specification for TV IF design.

	Frequency (MHz)	Specifications		
		Lower (dB)	Nom. (dB)	Upper (dB)
Amplitude Response	39.75	-80.0	-60.0	-
	41.25	-17.0	-15.0	-13.0
	41.75	-9.0	-8.0	-7.0
	42.17	-5.4	-3.0	-2.0
	42.50	-4.0	-3.0	-2.0
	43.00	-3.0	-2.0	-1.0
	44.00	0.0	0.0	0.0
	45.00	-1.5	-1.0	-0.5
	45.75	-6.0	-5.0	-4.0
	46.25	-13.0	-11.5	-10.5
47.25	-80.0	-60.0	-	
Group Delay Response	40.50	-20.0	0.0	20.0
	41.25	280.0	300.0	320.0
	42.0	-20.0	0.0	20.0
	46.50	-20.0	0.0	20.0

Unapodized된 입력 IDT의 전극수가 M 일 경우 첫 번째 트랩 주파수 w_t 는 샘플링 주파수 w_s 에 대해

$$w_t = \frac{w_s}{M}$$

로 일반화할 수 있으며,^[12] 대역통과 필터의 경우에는 w_t 는 $w_t - w_o$ 에 대응되며, NTSC TV IF 필터의 경우

$$M < \frac{w_s}{w_t - w_o} = \frac{2\pi 174}{2\pi(47.25 - 43.5)} = 46.4$$

가 되어야 한다. 입력 IDT의 전극수가 이보다 많을 경우 통과대역이 좁아지고, 통과대역에서의 감쇄가 커지게 되어 출력 IDT에서 감쇄를 보상할 수 없고, 그 수가 너무 적으면 삽입손실이 커지게 되므로, 입력 IDT의 전극수를 45개로 함으로써 NTSC TV IF 필터의 트랩 주파수 39.75MHz와 47.25MHz 근처인 39.63MHz와 47.36MHz에 트랩을 형성할 수 있으므로 본 연구에서는 입력 IDT의 전극수를 45개로 결정하였다.

또한, 출력 IDT의 전극수 N 는 천이대역폭에 의해

$$N > \frac{w_s}{BW_T}$$

로 주어지며,^[13] 여기서 BW_T 는 필터의 천이대역폭이다. NTSC TV IF의 천이대역폭은 $BW_T = 47.25 - 46 = 1.25$ MHz로 정할 수 있으며, 이때 N 은 139개 이상이며 통과대역에서의 리플(ripple)을 고려하여 출력 IDT의 전극수를 192개로 결정하였다.

회절효과를 줄이기 위해 모든 전극은 개구부 폭 (aperture) W_o 에 대한 Fresnel 영역내에 위치시켜야 함으로 다음 조건을 만족해야 한다.^[14]

$$\left(\frac{W_o}{2}\right)^2 > L_o$$

여기서 W_o 는 IDT의 개구부 폭이고, L_o 은 필터의 전체 길이이다. 본 설계의 경우 필터의 입력 IDT의 폭이 11.25λ 이고, 출력 IDT의 길이가 48λ 이고, 입력 IDT와 접지 전극사이의 간격, 접지전극의 폭, 접지전극과 출력 IDT의 간격이 5λ 이므로, 개구부 폭은 18λ 이상이면 위의 조건을 만족하는데 본 연구에서는 30λ 로 하였다.

앞에서 기술한 설계 규격과 전극구조를 사용하여

최적 설계를 한 결과, 최적화 회수가 64회이고, 설계시간은 개인용 컴퓨터 486DX2-66에서 20분이었다. 최적화 설계된 필터의 진폭 특성과 위상 특성은 그림 5와 같이 규격을 잘 만족하였으며 정지대역의 감쇄는 70dB 이상이었다. 마스크 패턴은 각 IDT의 겹쳐진 길이로부터 모조전극을 고려하여 레이아웃하였으며, 그림 6은 설계된 필터의 마스크 레이아웃이다.

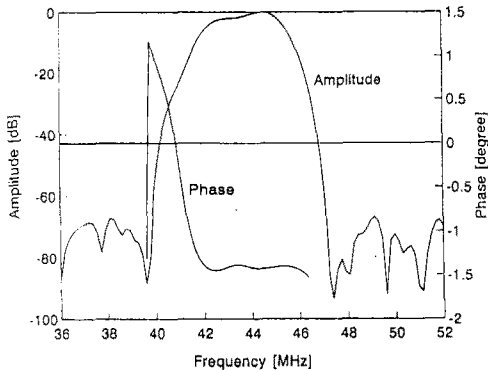


그림 5. 표면음파 필터의 주파수 특성.

Fig. 5. Frequency response of a SAW filter.

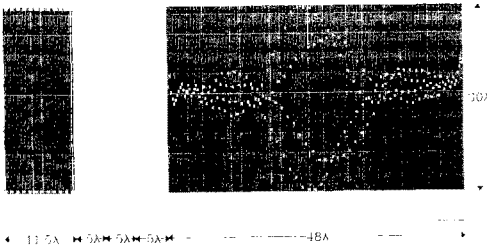


그림 6. 표면음파 필터의 마스크 레이아웃.

Figure 6. Mask layout of SAW filter.

6. 결론

임의의 주파수 특성을 갖는 표면음파 필터의 최적 설계용 프로그램을 개발하여 최적 칩 크기를 갖는 TV IF 표면음파 필터를 설계하고, 레이아웃 하였다. 설계된 표면음파 TV IF 필터는 정지대역의 감쇄가 70dB이고, 통과대역의 리플이 1dB이하이고, 군지연 리플이 5ns이하로 진폭규격과 위상규격을 만족하였다.

참고 문헌

- [1] C. K. Campbell, "Applications of Surface Acoustic and Shallow Bulk Acoustic Wave Devices," *Proc. of the IEEE*, vol. 77, no. 10, pp. 1453-1483, Oct. 1989.
- [2] C. C. W. Ruppel, et al, "SAW Devices for Consumer Communication Applications," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, vol. 40, no. 5, pp. 438-452, Sep. 1993.
- [3] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., pp. 239-251, 1975.
- [4] E. C. Ifeachor and B. W. Jervis, *Digital Signal Processing: A Practical Approach*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1993.
- [5] R. L. Miller and A. J. DeVries, "A Simple "Building Block" Method for Design of SAW Filters Having Non-Linear Phase Response," *Proc. 1976 Ultrason. Symp.*, pp. 553-557, 1976.
- [6] T. Kodama, "Optimization Techniques for SAW Filter Design," *1979 Ultrasonics Symposium*, pp. 522-526, 1979.
- [7] A. S. Rukhlenko, "Optimal and Suboptimal Design of SAW Bandpass Filters Using the Remez Exchange Algorithm," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec., Freq. Contr.*, vol. 40, no. 5, pp. 453-458, Sep. 1993.
- [8] T. L. Szabo, K. R. Laker, and E. Cohen, "Interdigital Transducer Models: Their Impact on Filter Synthesis," *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, vol. 26, no. 5, pp. 321-333, 1979.
- [9] H. Matthews, ed, *Surface Wave Filters*, John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [10] B. J. Hunsinger and R. J. Kansy, "SAW Filter Sampling Technique," *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, vol. 22, no. 4, pp. 270-273, 1975.
- [11] C. Lawrence, J. L. Zhou, and A. L. Tits, *User's Guide for CFSQP Version 2.2*, University of Maryland, 1995.
- [12] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood

Cliffs, N.J., Chaper 4, 1975.

[13] S. Datta, *Surface Acoustic Wave Devices*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1986.

[14] G. S. Kino, *Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., 1987.

著 者 紹 介



박 석 홍

1969년 3월 3일생. 1992년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관

심 분야: 집적회로 설계, 아날로그 설계 자동화, 표면음파 필터.



유 상 대

1958년 2월 12일생. 1980년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1982년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자

전기공학부 부교수. 주관심 분야: 집적회로 설계, 반도체 소자 모델링, 표면음파 필터.



손 영 찬

1965년 2월 25일생. 1991년 8월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관

심 분야: 집적회로 설계 검증, 특정용도 집적회로 설계.