

임펄스 모델에 의한 SAW Transversal Filters의 주파수 응답 특성

손헌영, 윤영섭

인하대학교 전자재료공학과

Tel. 032-873-1345, Fax. 032-875-5882, E-mail. ag910808@hanmail.net

Frequency Response Properties of SAW Transversal Filters by Impulse Modeling

Hun Yung Shon and Yung Sup Yoon

Dept. of Electronic Materials and Devices Engineering, Inha University

Inchon 402-751, Korea

Tel. 032-873-1345, Fax. 032-875-5882, E-mail. ag910808@hanmail.net

Abstract

Frequency responses of the surface acoustic wave(SAW) filters are simulated by using the impulse modeling. The simulation technique of the SAW filters is to use the Fourier transformation to make a correspondence between the impulse response of the filter and the taps in the delay line. Since the Fourier series must be truncated after a finite number of terms, window functions are often used to weight the coefficients to obtain the desirable side-lobe level and bandwidth. The filter design is operated through the iterative simulation procedures. The design process is capable of yielding filters with optimized frequency response characteristics.

I. 서론

표면 탄성파는 압전기판(piezoelectric substrate)의 표면을 따라 전송되는 탄성파로써, 이를 이용한 탄성 표면파 기술은 다양한 신호 처리 응용 분야에서 많은 관심을 끌고 있다. 이는 무엇보다도 표면 탄성파(SAW) 소자가 소형으로 신호를 처리할 수 있으며, 무

게가 가볍고, 확립된 planar 공정을 사용할 수 있다는 장점이 있기 때문이다. 하지만, 실제 응용에서, 주변 회로가 복잡하고, SAW Transversal 필터의 Delay line에는 많은 tap들이 연결되어 있기 때문에 전체 회로를 세부적으로 다루기가 힘들어 필터 설계에 많은 어려움이 있어 왔다. 따라서 본 연구에서는, 이러한 어려움을 극복할 수 있는 SAW 필터 설계 기술에 대해 연구하고자 하였다. 즉, 시간의 양자화에 따라 거의 모든 특성이 결정되며 전극에 의한 음파의 반사를 전혀 고려하지 않고 설계할 수 있는 Impulse Modeling을 기초로 한 주파수 응답 특성을 얻고자, 수치 해석이 필요 없는 시뮬레이터를 표면 탄성파 필터에 응용할 수 있는 방법을 제시하였다. Uniform IDT의 경우에 전극의 개수와 주파수를 변화시켰을 경우의 주파수 응답 특성을 얻을 수 있으며, Apodization의 경우에는 Uniform IDT의 경우에 첨가하여 Kaiser-Bessel 창함수의 β 값을 변화시켰을 경우의 주파수 응답 특성에 대해서도 살펴보았다.

II. 본론

[1] 이론

SAW 필터는 그림. 1(a)에 나타낸 것처럼 piezoelectric 기판 위에 구성된 IDT로 불리는 두 개

의 SAW 변환기(표면 탄성파를 전기적인 신호로 상호 변환 할 수 있는)를 포함하고 있다. IDT에 고주파 신호 전압이 가해질 경우, 전극들 사이에 전기장이 형성되며, 이 신호는 IDT의 전극 finger에 수직하게 왼쪽에서 오른쪽으로 전달된다. 만약, SAW의 파장이 전극 finger들의 주기적인 거리와 같다면, 신호 파장은 SAW에서와 같은 위상으로 더해지게 된다. 따라서, 표면 탄성파는 최대한 여기된 상태가 되고, 동일한 주기의 전극 finger들로 이루어진 IDT에 의해 가장 민감하게 표면 탄성파로 수신하게 된다.

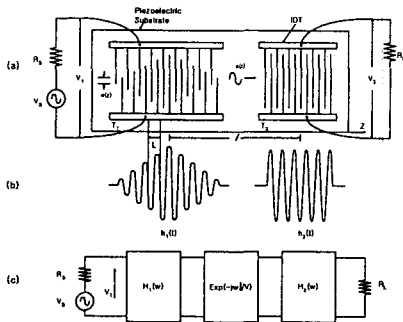


그림.1 Inter-Digital Transducer : (a) Schematic Diagram (b) Impulse Response (c) Equivalent Circuit

그림. 1(b)는 입력 전극 T_1 과 출력 전극 T_2 의 임펄스 응답을 나타내고 있다. 임펄스 응답 $h(t)$ 는 IDT의 구성에 의해 유일하게 결정되며, $h(t)$ 의 주기는 서로 다른 극성을 가지는 이웃한 전극 사이의 거리와 이웃한 전극과 접침의 길이 $w(z)$ 에 비례하는 진폭에 의해 결정된다. 그림. 1(c)에는 두 개의 주파수 선택 전달 함수 $H_1(w)$, $H_2(w)$ 에 의한 소자들과 광대역 시간 지연 $\exp(-jwL/V)$ 를 갖는 형태로 등가 회로를 표현하였다. 그림. 1(a)에서 나타낸 것과 같이 L 은 두 변환기의 중심에서 중심 사이의 거리이며, V 는 표면 탄성파의 전파 속도이다.

전달 함수는 시간 영역에서 다음 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서, w 는 각속도이며, V_1 과 V_2 는 입,

$$\frac{V_1}{V_2} = H_1(w) \cdot H_2(w) \cdot e^{-jwL/V} \quad (1)$$

출력단에 인가되는 전압이다. 그러므로, 원하는 주파수 특성은 $H_1(w) \cdot H_2(w)$ 를 정의함으로써 구할 수 있다. 식 (1)에 나타낸 것과 같이 piezoelectric 기판 위에 임펄스 응답과 상응하는 IDT를 구성하고, 주파수 응답의 역 Fourier 변환을 취함으로써 원하는 SAW 필터를 구현할 수 있다.

[2] Uniform IDT의 주파수 특성

Uniform IDT는 일정한 전극 finger의 접침을 나타내며 여기서 전극 finger의 접침의 길이는 일정하다. 따라서, 인터디지털 변환기의 전극 쌍에 의하여 생성되는 파를 sine 파로 가정하였을 때, N 쌍의 전극으로 구성된 변환기의 임펄스 응답은

$$h(t) = 4k f_0^{3/2} \sqrt{C_s} \sin w_0 t \quad 0 \leq t \leq N/f_0$$

$$= 0 \quad t < 0, N/f_0 < t \quad (2)$$

이며, 이에 대응하는 Fourier 변환은

$$H(w) = 2kN \sqrt{C_s} \frac{\sin X}{X} \exp(-jwN/2f_0) \quad (3)$$

으로 표현된다. 여기서, $X = N\pi(w - w_0)/w_0$ 이며, f_0 는 중심 주파수, C_s 는 전극 쌍의 capacitance, k 는 전기 기계 결합 계수를 나타낸다.

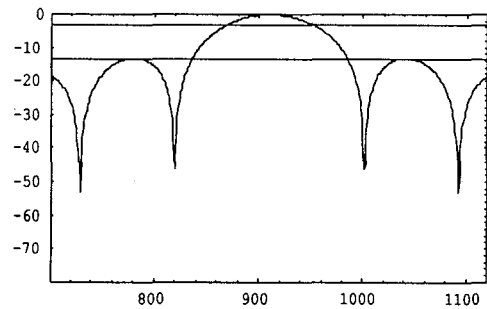


그림.2 $f_0=910[\text{MHz}]$ 일 때의 LiNbO_3 의 주파수 응답

그림. 2는 중심 주파수가 910[Mhz] 일 때의 128° -rotated LiNbO_3 의 주파수 응답을 나타내고 있다. Uniform IDT를 사용하였으며, 전극 쌍은 10쌍이고, 정적 capacitance $C_0 = NC_s = 5.0[\text{pF/cm}]$ 이며, 전기 기계 결합 계수 $k^2 = 5.6[\%]$ 이다. 그림에서 가로축의 단위는 Mhz이며, 세로축의 단위는 dB 이다. 이와 같은 방법으로 주파수만 70[Mhz]에서 910[Mhz]까지 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과를 표. 1에 나타내었는데 주파수

표.1 주파수 변화에 따른 특성 변화(Uniform IDT)

	3-dB bandwidth	Rejection level
70 MHz	6 MHz	13.2 dB
210 MHz	19 MHz	13.2 dB
350 MHz	31 MHz	13.2 dB
490 MHz	43 MHz	13.2 dB
630 MHz	55 MHz	13.2 dB
770 MHz	67 MHz	13.2 dB
910 MHz	79 MHz	13.2 dB

가 높아질수록 3-dB 대역폭은 넓어지지만 첫 번째 side-lobe 레벨은 변화하지 않음을 알 수 있었다.

이 번에는 위와 똑같은 substrate에 중심 주파수를 1.9[GHz]에 고정시키고, 전극 쌍의 개수를 50쌍에서 350쌍까지 변화시켰을 때의 특성 변화를 표. 2에 나타내었고, 그림. 3은 그 중의 하나인 50쌍 일 때의 주파수 응답을 도시하였다. 표. 2에서 보여지듯이 전극 쌍이 많아질수록 3-dB 대역폭은 좁아지나 첫 번째 side-lobe 레벨은 역시 변화하지 않음을 알 수 있다.

표.2 전극 쌍의 변화에 따른 특성 변화(Uniform IDT)

	3-dB bandwidth	Rejection level
50쌍	33.9 MHz	13.3 dB
100쌍	16.9 MHz	13.3 dB
150쌍	11.4 MHz	13.3 dB
200쌍	8.4 MHz	13.3 dB
250쌍	6.7 MHz	13.3 dB
300쌍	5.6 MHz	13.3 dB
350쌍	5 MHz	13.3 dB

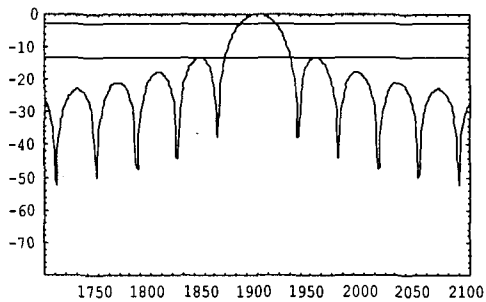


그림.3 50쌍 일 때의 $LiNbO_3$ 의 주파수 응답

[3] Apodization IDT의 주파수 특성

Apodization IDT는 식 (2)의 임펄스 응답에 창함수를 적용한 것으로써 다음 식과 같은 Kaiser-Bessel 창함수를 사용하였다. 식 (4)에서 $\alpha=M/2$ 이고, $I_0(x)$ 는

$$w(t) = \begin{cases} I_0[\beta[1 - ((t - \alpha)/\alpha)^2]^{0.5}] / I_0(\beta) & 0 \leq t \leq M \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

0차 제 1종 Bessel 함수이다. 이 창함수는 임펄스의 길이 M과 형상 매개 변수 β 를 각각 조절함으로써 창함수의 길이와 통과 대역폭, 저지대역 레벨을 최적화시킬 수 있다는 장점이 있다.

표. 3은 38° - rotated Quartz ($C_0=0.5$ [pF/cm], $k^2=0.11$ [%])를 기판으로 사용하였고, 전극 쌍의

표.3 β 값의 변화에 따른 특성 변화

	3-dB bandwidth	Rejection level
$\beta=1$	8.4 MHz	14.7 dB
$\beta=2$	9 MHz	18.6 dB
$\beta=3$	9.6 MHz	23.7 dB
$\beta=4$	10.5 MHz	30 dB
$\beta=5$	11.6 MHz	36.7 dB
$\beta=6$	12.3 MHz	43.9 dB
$\beta=7$	13.6 MHz	51.3 dB
$\beta=8$	14 MHz	58.8 dB
$\beta=9$	14.9 MHz	66.7 dB

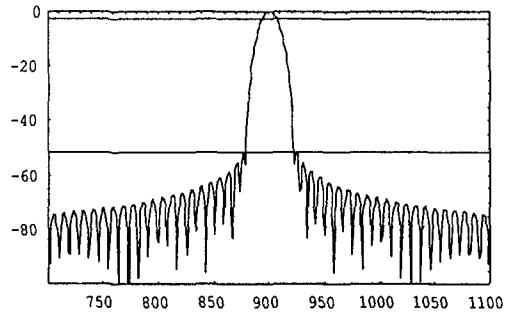


그림.4 $\beta=7$ 일 때의 Quartz의 주파수 응답

개수는 100쌍, 중심 주파수는 900[MHz] 로 고정시켰을 경우에 형상 매개 변수 β 를 1부터 9까지 변화시켰을 경우의 주파수 특성 변화를 보여주고 있으며, 그림. 4는 β 가 7인 경우의 주파수 응답을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. β 값이 커짐에 따라서 3-dB 대역폭이 넓어지며, 저지대역 레벨은 낮아짐을 알 수 있다.

Uniform IDT와 마찬가지로 주파수 변화에 따른 특성 변화를 살펴보기 위하여, Quartz 기판에 전극 쌍은 50쌍, 그리고 β 값을 6으로 고정시켰을 경우의 주파수 변화에 따른 특성 변화가 표. 4에 나타내어졌다. 그리고, 그 중의 한 경우인 중심 주파수가 1.89[GHz]일

표.4 주파수 변화에 따른 특성 변화($\beta=6$)

	3-dB bandwidth	Rejection level
1.05 GHz	29 MHz	43.9 dB
1.19 GHz	33 MHz	43.9 dB
1.33 GHz	37 MHz	43.9 dB
1.47 GHz	41 MHz	43.9 dB
1.61 GHz	45 MHz	43.9 dB
1.75 GHz	48 MHz	43.9 dB
1.89 GHz	52 MHz	43.9 dB

때의 주파수 응답이 그림. 5에 주어졌다. 주파수가 높아짐에 따라 3-dB 대역폭은 넓어지지만 β 값이 6으로

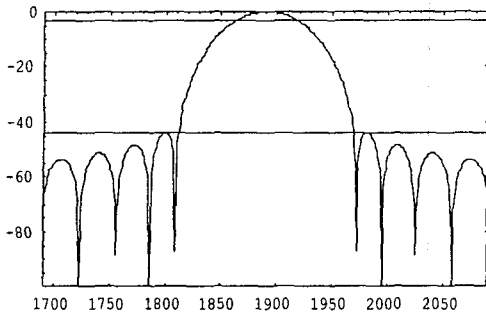


그림.5 $f_0=1.89[\text{GHz}]$ 일 때의 Quartz의 주파수 응답

고정되어 있으므로 저지대역 레벨은 변하지 않는다.

또한, 똑같은 조건하에서 중심 주파수를 1.9[GHz], β 값을 7로 고정시켰을 경우의 전극 쌍의 변화에 따른 주파수 특성 변화를 표. 5에 나타내었으며, 그림. 6은 전극 쌍의 개수가 150인 경우의 주파수 응답 결과이다. Uniform IDT의 경우와 같이 전극 쌍이 많아질수록 대역폭이 좁아지나 역시 β 값이 7로 고정되어 있으므로 저지대역 레벨은 변하지 않는다.

표.5 전극 쌍의 변화에 따른 특성 변화($\beta=7$)

	3-dB bandwidth	Rejection level
50쌍	56 MHz	51.3 dB
100쌍	27.8 MHz	51.3 dB
150쌍	19 MHz	51.3 dB
200쌍	14 MHz	51.3 dB
250쌍	11.5 MHz	51.3 dB
300쌍	9.4 MHz	51.3 dB
350쌍	8.2 MHz	51.3 dB

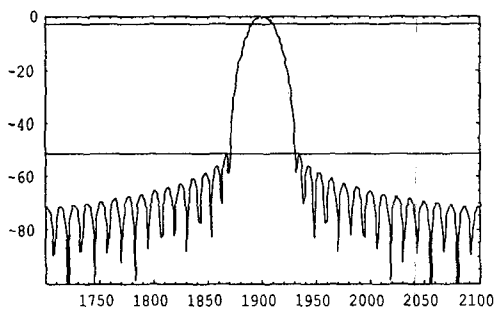


그림.6 150쌍 일 때의 Quartz의 주파수 응답

III. 결론

본 연구에서는 임펄스 모델을 기초로 한 SAW Transversal Filters의 다양한 주파수 응답 특성들을 시뮬레이션으로 알아보았다. Uniform IDT와 창함수가

적용된 Apodization IDT 모두 다 주파수가 높아짐에 따라서 대역폭이 넓어짐을 알 수 있었으며, 저지대역 레벨에는 변화가 없었다. 또한, 전극 쌍의 개수가 많아짐에 따라서 저지대역 레벨은 역시 변화가 없지만 대역폭이 좁아진다는 것도 알 수 있었다. 하지만, 창함수의 β 값이 커짐에 따라서 대역폭이 넓어지고 저지대역 레벨이 낮아지므로 우리가 설계하기를 원하는 필터에 따라서 β 값을 달리 해야 하겠다. 종합적인 주파수 응답은 입, 출력 transducer 주파수 응답들의 곱이므로 어느 곳에 Uniform, Apodization, Withdrawal IDT를 사용할 것인지는 본론의 결과들을 바탕으로 개발한 시뮬레이터를 가지고 손쉽게 예측할 수 있다.

IV. 참고 문헌

- [1] Clinton S. Hartmann, Delamer T. Bell, Jr., and Ronald C. Rosenfeld, "Impulse Model Design of Acoustic Surface-Wave Filters", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-21, No. 4, pp. 162-175, 1973.
- [2] George L. Matthaei, "Acoustic Surface-Wave Transversal Filters", IEEE Trans. Circuit and Theory, Vol. CT-20, No. 5, pp. 459-470, 1973.
- [3] Roger H. Tancrell, "Analytic Design of Surface Wave Bandpass Filters", IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-21, No. 1, pp. 12-22, 1974.
- [4] Carmine F. Vasile, "A Numerical Fourier Transform Technique and Its Application to Acoustic-Surface-Wave Bandpass Filter Synthesis and Design", IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-21, No. 1, pp. 7-11, 1974.
- [5] Donald C. Malocha, and Carlton D. Bishop, "The Classical Truncated Cosine Series Functions with Applications to SAW Filters", IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. UFFC-34, No. 1, pp. 75-85, 1987.
- [6] Samuel M. Richie, Benjamin P. Abbott, and Donald C. Malocha, "Description and Development of a SAW Filter CAD System", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 36, No. 2, pp. 456-466, 1988.
- [7] Cnthem R. Reddy, "Design of SAW Bandpass Filters Using New Window Functions", IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 35, No. 1, pp. 75-85, 1988.