

논문 2001-10-2-08

SPICE를 사용한 표면음파 필터의 시뮬레이션

유 상 대*

Simulation of Surface Acoustic Wave Filters Using SPICE

Sang Dae Yu*

요 약

인터디지털 표면음파 변환기의 교차장 모델에 기초한 전송선 등가회로를 사용하여 SPICE에 의한 SAW 필터의 효율적인 시뮬레이션 기법을 제안하였다. 표면음파의 전파를 전송선으로 모델하므로 인터디지털 변환기의 등가회로에서는 주파수 의존 회로소자가 필요하지 않게 된다. 그래서 주파수 의존 회로소자에 대한 등가회로를 근사적으로 구하지 않아도 되고, 필터의 등가회로에 작은 수의 회로소자를 사용하므로 시뮬레이션 시간도 많이 단축된다. 삽입손실, 입력 어드미턴스, 통과대역 리플, 그리고 고조파 주파수 응답과 같은 SAW 필터 특성에 대한 시뮬레이션을 통하여 제안된 기법의 유용성을 보였다.

Abstract

Using transmission-line equivalent circuit based on cross-field model for an interdigital acoustic wave transducer, an efficient simulation technique of SAW filters by SPICE is proposed. Propagation of surface acoustic wave is modeled as transmission line so that frequency-dependent circuit elements are not needed in the equivalent circuit of an interdigital transducer. Because the equivalent circuits for frequency-dependent circuit elements are not derived approximately, and a small number of circuit elements are used in the equivalent circuit for filters, simulation time is much reduced. The utility of the proposed technique is demonstrated through simulation for the characteristics of SAW filters such as insertion loss, input admittance, passband ripple, and harmonic frequency response.

1. 서 론

표면음파 필터는 텔레비전, 휴대폰, 그리고 케이블 TV 등의 가전 제품 및 통신 시스템에 널리 사용되거나 사용될 전망이며, 이러한 SAW 필터의 설계에는 임펄스 모델이나 델타함수 모델 등과 같은 간단한 인터디지털 변환기 (IDT) 모델을 사용한다. 이것은 필터의 임펄스 응답이 IDT

전극의 모양과 서로 대응한다는 모델의 원리를 사용하기 위한 것이다. 그러나 설계한 필터의 특성과 실제 특성은 다소 차이가 있는데, 이는 SAW 필터의 음파적인 현상과 입력과 출력회로의 전기적 정합을 고려하지 않는 것에 그 원인이 있다. 이러한 현상과 정합을 고려하여 해석하고 시뮬레이션하는 것이 보다 양호한 SAW 필터의 특성 평가와 시스템 개발에 필수적인 요인이라 할 수 있다.

SAW IDT의 등가회로는 부피음파 (BAW)가 수반된 압전 변환기의 등가회로에서 유도된 것이 일반적으로 사용된다. 부피음파 변환기의

* 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)
<접수일자 : 2000년 10월 24일>

등가회로는 Mason의 병행장 (in-line field) 모델과 교차장 (crossed field) 모델 [1], KLM 모델 [2], 그리고 전송선 모델 [3]과 [4] 등이 있다. 반면에 표면음파 변환기의 등가회로는 Mason 모델을 처음으로 적용한 모델 [5]와 [6], 병행장 모델과 교차장 모델을 결합한 혼합 회로 모델 [7]과 [8], 그리고 고조파의 특성을 잘 예측하는 모델 [9] 등이 있다. 최근에는 회로 시뮬레이터인 SPICE를 사용하여 부피음파 변환기 [10]과 표면음파 변환기 [11]을 시뮬레이션하기 위한 연구가 수행되었다. 특히 [11]의 연구는 표면음파 변환기를 처음으로 SPICE로 시뮬레이션하여 표면음파 필터의 전기 음향적인 현상과 그 성능을 보다 편리하게 평가할 수 있게 하였다. 그러나 이 연구에서는 주파수 의존형 회로 소자를 커패시터와 인덕터들을 사용한 등가회로로 대체하는 기법을 사용하므로, 필터에 따라 그 등가회로를 다시 구해야하고 표면음파 변환기의 한 전극당 19개의 회로 소자가 필요하다. 따라서 텔레비전 중간주파수 필터의 경우 전극수가 200개 이상이므로 필터 전체의 등가회로에는 3600개 정도의 회로 소자가 있어 시뮬레이션에 많은 시간이 소요된다.

본 연구에서는 교차장 모델에 기반을 둔 전송선 모델을 사용하여 SAW 필터를 SPICE를 사용하여 편리하고 빠르게 시뮬레이션하는 기법을 제안한다. 표면음파의 전파를 원리적으로 근접한 전송선으로 모델하여 사용하기 때문에 전송선을 다시 임피던스를 사용한 T형 등가회로로 변환시 수반되는 주파수 의존 회로소자가 필요하지 않게 된다. 그래서 주파수 의존 회로소자에 대한 등가회로를 구하지 않아도 되며, 필터의 등가회로에 작은 수의 회로소자를 사용하므로 시뮬레이션 시간도 많이 단축된다. 제안된 기법을 사용하여 삽입손실, 입력 어드미턴스, 통과대역 리플, 그리고 고조파 여기특성 등의 SAW 필터 특성을 평가하여 이 기법의 효용성을 보인다.

II. SAW IDT의 등가회로 모델

표면음파의 발생과 검출을 위한 인터디지털 변환기의 등가회로는 Mason의 부피음파 변환기의 병행장 모델과 교차장 모델에서 유도된 등가회로가 사용된다. 병행장 모델은 표면음파의 전파방향과 평행한 전장성분에 의해 표면음파의 발

생과 검출을 표현하는 것이고, 교차장 모델은 표면음파의 전파방향에 수직인 전장성분으로 표면음파의 발생과 검출을 표현하는 것이다. 그림 1에서와 같이 표면음파 IDT에서 실제 전장의 분포와 두 모델의 전장분포는 크게 차이가 있으므로, 전극모양에 따른 변환기의 성능과 고조파에서 변환기의 동작을 잘 설명하지 못하는 단점이 있다. 이러한 모델을 기본으로 하여 여러 가지 모델들이 제안되었는데 그 중에서 병행장 모델과 교차장 모델을 결합한 혼합회로 모델 [7]이 그림 2에 나타나 있다. 이 모델에서는 전극모양에 따른 가중치 부과를 위한 파라미터 α 를 사용하는데 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 이고, $\alpha = 0$ 이면 교차장 모델이 되고 $\alpha = 1$ 이면 병행장 모델이 된다.

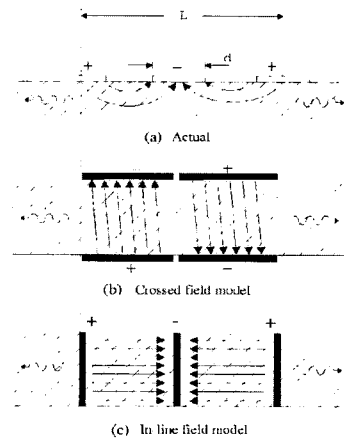


그림 1. 인터디지털 변환기의 단면도.

- (a) 실제의 장 패턴. (b) 교차장 근사.
- (c) 병행장 근사.

Fig. 1. Side view of the interdigital transducer. (a) Actual field pattern. (b) Crossed-field approximation. (c) In-line field approximation.

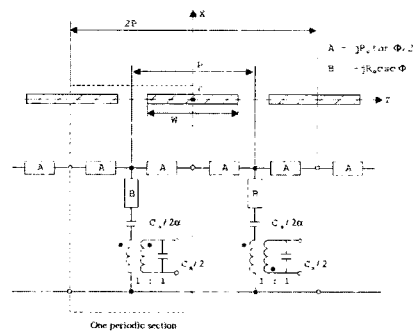


그림 2. 인터디지털 변환기의 혼합회로 모델.

Fig. 2. Mixed circuit model of the interdigital transducer.

인터디지털 변환기의 각 전극의 겹친 폭이 다를 경우에는 이것을 변압기 비에 반영하여 해석할 수도 있으며, 또 인터디지털 변환기를 전극의 구경이 일정한 다수의 채널로 분할하여 해석할 수도 있다. 전극의 겹친 폭을 변압기 비에 반영하여 해석하기 위해서는 모조전극을 사용하여 표면음파의 파두면을 평면으로 되게 해야한다.

음향특성 임피던스는 전극의 겹친 폭의 가장치가 전기음향 결합율에 반영되므로 일반적으로 단위크기로 규격화할 수 있다. 이것은 전극의 겹친 폭의 변화가 표면음파의 반사를 유발하지 않으므로 표면음파의 임피던스에도 변화를 유발하지 않는다고 볼 수 있다. 그러나 전극이 있는 부분과 없는 부분에서 표면음파의 전파속도 차이에 기인한 전극 가장자리에서 표면음파의 반사현상이 있으므로, 이를 고려하기 위해 전극이 있는 부분의 음향 특성 임피던스를 Z_m 으로 하고, 전극이 없는 부분의 음향 특성 임피던스를 Z_o 로 다음과 같이 서로 다른 값을 갖도록 하였다.

$$\frac{Z_o}{Z_m} = \frac{v_o}{v_m} \approx 1 + k^2/2$$

여기서 k 는 압전물질의 전기기계 결합계수이다.

본 연구에서 제안하는 표면음파 변환기의 모델은 교차장 모델을 기본으로 하여 Mason의 T 회로망을 전송선으로 대치하여 그림 3과 같이 구성한 모델이다. 전송선의 한쪽 선로는 전기음향 변압기에 연결되며, 다른 선로들의 양단은 음향 포트가 된다. 각 인터디지털 변환기의 음향포트는 직렬로 접속하고 전기포트는 전장방향 즉, 전압극성을 고려하여 병렬로 접속하여 표면음파 변환기의 등가회로를 구성한다.

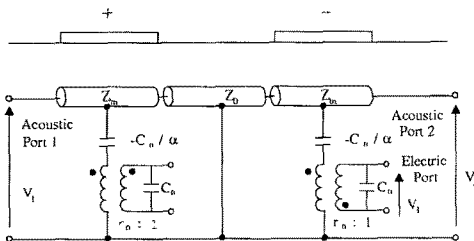


그림 3. 인터디지털 변환기의 전송선 모델.
Fig. 3. Transmission line model of the interdigital transducer.

이 기법을 사용하면 크기가 주파수에 의존하는 임피던스를 커패시터와 인덕터의 등가회로로 대치한 기법 [11]보다 쉽게 표면음파 필터의 등가

회로를 얻을 수 있으며, 표면음파 필터의 전체 등가회로의 크기도 매우 작아진다. [11]에서 해석한 표면음파 필터에 대해 이 기법과 [11]의 기법을 각각 적용한 결과, 시뮬레이션 시간에 약 170배 정도의 개선효과가 있었다.

III. 시뮬레이션 결과

표면음파 필터의 각종 특성을 시뮬레이션하기 위해 입력과 출력 인터디지털 변환기의 전극쌍을 각각 16개로 하고 두 변환기 사이의 지연선은 20λ로 하였다. 그리고 중심 주파수는 43.5 MHz이고 전극의 겹친 폭이 균일한 인터디지털 변환기를 사용하였으며, 압전기판은 LiNbO₃를 사용하였다. 단일전극 표면음파 필터의 시뮬레이션을 위한 SPICE 입력파일의 일부분은 다음과 같으며, 전송선 등가모델의 이상적인 결합 변압기는 종속 전류원과 전압원을 사용하여 구현하였다.

```
Simulation of SAW Filters Using SPICE
.ac lin 246 23MEG 64MEG
.print ac vdb(4)
R1 1 0 1.0230e+00
R2 2 0 1.0230e+00
Vi 3 0 ac 1V dc 0V
R4 4 0 50

* Input IDT
xm100 1 101 0 3 0 IDT
xo101 101 102 0 SAW

...

xo131 131 132 0 SAW
xm132 132 133 0 3 0 IDT

* Delay line
Td 133 0 1000 0 ZO=1.0230e+00 F=4.3500e+07 NL=20

* Output IDT
xm1000 1000 1001 0 4 0 IDT
xo1001 1001 1002 0 SAW

...

xo1031 1031 1032 0 SAW
xm1032 1032 2 0 4 0 IDT

* IDT models
.subckt SAW 1 2 3
Tsaw 1 3 2 3 ZO=1.02300e+00 F=4.3500e+07 NL=0.25
.ends SAW
```

```
.subckt IDT 1 2 3 4 5
Tidt 1 7 2 7 ZO=1.00000e+00 F=4.3500e+07 NL=0.25
Vm 7 6 0V
Ev 6 3 4 5 1.4911e-03V
Fi 5 4 Vm 1.4911e-03A
Co 4 5 5.5558e-01pF
.ends IDT
.end
```

그림 4는 이상적인 입력 신호원과 50 Ω 저항을 출력 인터디지털 변환기의 부하로 사용했을 때, 단일전극을 사용한 표면음파 필터의 진폭특성이다. 표면음파의 전기음향 재생성 현상과 전극반사 현상으로 삼중 통과 반향 (TTE)이 수반되어 필터의 통과대역에 리플이 형성되고 있다.

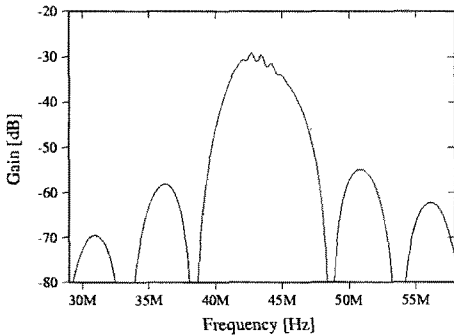


그림 4. 단일전극을 사용한 표면음파 필터의 주파수 특성.

Fig. 4. Frequency characteristics of the SAW filter using single electrodes.

이 리플의 크기는 대부분의 대역통과 필터에서는 ± 0.5 dB이하가 요구되고, 주파수 영역에서 리플의 주기는 지연시간의 2배의 역수가 된다. 이러한 특성은 단일전극 변환기의 단점이며 이중전극 변환기를 사용하면 전극반사 현상을 줄일 수 있다.

그림 5는 이상적인 입력 신호원과 50 Ω 저항을 출력 인터디지털 변환기의 부하로 사용했을 때, 이중전극을 사용한 표면음파 필터의 진폭특성이다. 단일전극 필터와 달리 TTE가 현저하게 낮고, 삽입손실이 증가함을 알 수 있다. 이것은 전극 가장자리에서 반사된 표면음파가 서로 상쇄하여 통과대역 리플을 줄이게 되며, 전극 폭이 좁아 정밀한 포토리소그라피가 요구되는 것과 표면음파 여기효율이 낮은 것은 중심 주파수가 세 배 높고 효율이 좋은 제 3 고조파를 이용하면 보완될 수 있다.

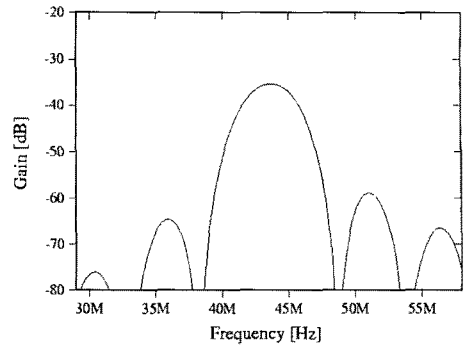


그림 5. 이중전극을 사용한 표면음파 필터의 주파수 특성.

Fig. 5. Frequency characteristics of the SAW filter using double electrodes.

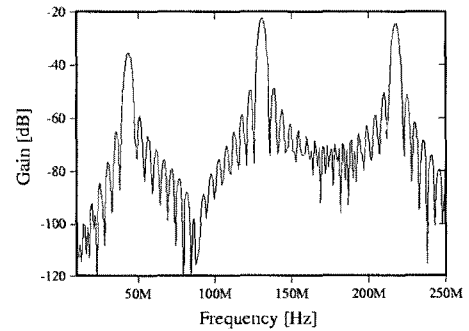


그림 6. 이중전극을 사용한 표면음파 필터의 고조파 특성.

Fig. 6. Harmonic-frequency characteristics of the SAW filter using double electrodes.

그림 6은 이중전극 표면음파 필터의 고조파 특성을 시뮬레이션한 것인데, 제 3 고조파 응답이 기본대역 응답에 비해 여기효율이 양호함을 보여 주고 있다. 이것은 이중전극에 대한 실험 데이터 [9]와 잘 일치하고 있다.

그림 7은 이중전극 표면음파 필터에서 입력 인터디지털 변환기의 방사 컨덕턴스와 서셉턴스에 대한 시뮬레이션 결과이다. 서셉턴스 특성에는 전극 커패시턴스가 포함되어 있으며, 기울기로부터 전극 커패시턴스 C_T 를 구할 수 있다.

$$C_T \approx \frac{B(f)}{2\pi f} \Big|_{f=55\text{MHz}} = \frac{6.6 \text{ m}\Omega}{2\pi 55 \text{ MHz}} = 19.1 \text{ pF}$$

이 전극 커패시턴스의 영향을 필터의 중심 주파수에서 동조하여 상쇄하기 위해 $L_T = 1/(2\pi f_0)^2 C_T$ 의 크기를 갖는 인덕터 L_T 를 병렬로 연결하면, 삽입손실을 줄일 수 있다.

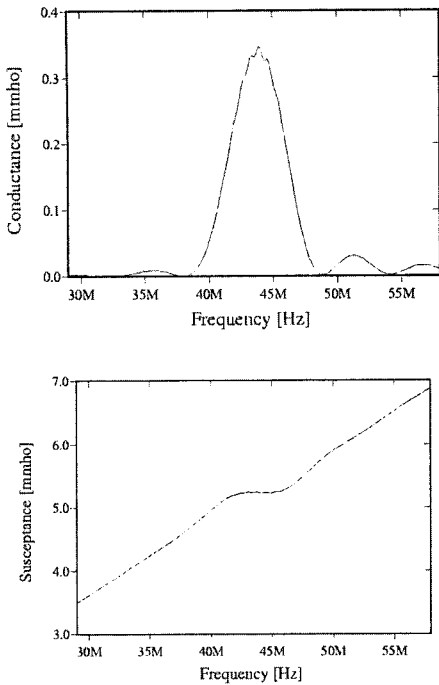


그림 7. 이중전극을 사용한 표면음파 필터의 어드미턴스 특성.
 Fig. 7. Admittance characteristics of the SAW filter using double electrodes.

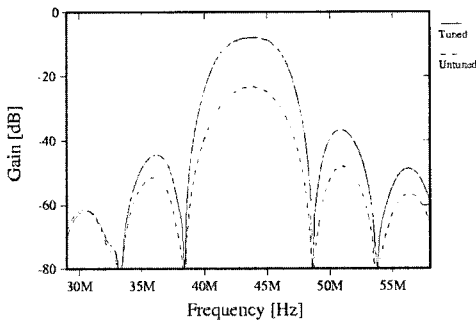


그림 8. 동조된 표면음파 필터의 삽입손실.
 Fig. 8. Insertion loss of the tuned SAW filter.

그림 8은 내부저항이 50 Ω인 신호원과 출력 변환기에 2 kΩ의 부하를 연결했을 때, 입력과 출력 인터디지털 변환기를 동조된 경우와 그렇지 않을 경우의 삽입손실의 변화를 나타낸다. 동조된 경우 15 dB이상의 삽입손실을 개선할 수 있다. 이 삽입손실을 적게 하면 TTE가 증가하여 통과대역 리플을 증가하므로 삽입손실은 보통 10에서 20 dB가 되도록 한다.

IV. 결론

인터디지털 표면음파 변환기의 교차장 모델에 기초한 전송선 등가회로를 이용하여 SAW 필터를 SPICE를 사용하여 편리하고 빠르게 시뮬레이션하는 기법을 적용한 표면음파 필터의 해석 도구를 개발하였다. 제안된 등가모델은 표면음파의 진파를 전송선으로 모델하므로 주파수 의존 회로소자가 필요하지 않게 된다. 그래서 주파수 의존 회로소자에 대한 등가회로를 근사적으로 구하지 않아도 되고, 필터의 등가회로에 작은 수의 회로소자를 사용하므로 시뮬레이션 시간도 약 170배 정도로 단축된다. 제안된 기법을 사용하여 삽입손실, 입력 어드미턴스, 통과대역 리플, 그리고 고주파 여기특성 등의 SAW 필터 특성을 평가하여 이 기법의 효용성을 보였다.

본 연구는 한국과학재단 94년 특정연구사업 (KOSEF 94-0300-05-04-3)과 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

- [1] W. P. Mason, *Electromechanical Transducers and Wave Filters*, 2nd ed., Van Nostrand, New York, pp. 201-209, 1948.
- [2] R. Krimholtz, D. A. Leedom, and G. L. Matthaei, "New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers," *Electron. Lett.*, vol. 6, pp. 398-399, June 1970.
- [3] M. Redwood, "Transient performance of a piezoelectric transducer," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 33, no. 4, pp. 527-536, Apr. 1961.
- [4] S. A. Morris and C. G. Hutchens, "Implementation of Mason's model on circuit analysis programs", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 33, no. 3, pp. 295-298, May 1986.
- [5] W. R. Smith, H. M. Gerard, J. H. Collins, T. M. Reeder, and H. J. Shaw, "Analysis of

- interdigital surface wave transducers by use of an equivalent circuit model," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 17, no. 11, pp. 856-864, Nov. 1969.
- [6] W. R. Smith, H. M. Gerard, and W. R. Jones, "Analysis and design of dispersive interdigital surface-wave transducers," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 20, no. 7, pp. 458-471, July 1972.
- [7] R. F. Milsom and M. Redwood, "Interdigital piezoelectric Rayleigh wave transducer: an improved equivalent circuit," *Electron. Lett.*, vol. 7, pp. 217-218, May 1971.
- [8] T. Aoki and K. A. Ingebrigtsen, "Equivalent circuit parameters of interdigital transducers derived from dispersion relations for surface acoustic waves in periodic metal gratings," *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, vol. 24, no. 3, pp. 167-178, May 1977.
- [9] W. R. Smith and W. F. Pedler, "Fundamental- and harmonic-frequency circuit-model analysis of interdigital transducers with arbitrary metalization ratios and polarity sequences," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 23, no. 11, pp. 853-864, Nov. 1975.
- [10] W. M. Leach, "Controlled-source analogous circuits and SPICE models for piezoelectric transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 41, no. 1, pp. 60-66, Jan. 1994.
- [11] A. B. Bhattacharyya, S. Tuli, and S. Majumdar, "SPICE simulation of surface acoustic wave interdigital transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 42, no. 4, pp. 784-786, July 1995.

 著 者 紹 介


유 상 대 (Sang-Dae Yu)

1958년 2월 12일생.

1980년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사).

1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업 (공학석사).

1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업 (공학박사).

1982년 ~ 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수.

주관심분야 : 회로설계, 집적시스템, VLSI CAD, 표면음파 필터.