

표면 탄성파를 이용한 온도센서의 제작 및 특성에 대한 연구

박재홍*, 김재환#

A study on the Fabrication and characterization of temperature Sensor using surface acoustic wave

Jae Hong Park*, Jae hwan Kim#

ABSTRACT

This paper presents the design and manufacturing of a sensor using SAW and delay line in order to measure temperature. SAW sensors having single and double electrodes are manufactured on the $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ substrate, and its process is addressed. Before manufacturing, the device is simulated using a commercial finite element program. The frequency responses of the saw sensor on the temperature change is measured. Since the center frequency on the temperature change from -30°C to 80°C is linearly changed, the saw sensor is applicable to measure the temperature change or strain variation.

Key Words : Surface Acoustic Wave (표면 탄성파), Delay Line (지연선), Piezoelectric Material (압전 재료), Finite Element Analysis (유한요소 해석)

1. 서론

최근 센서 및 센서 기술의 수요는 전반적인 산업 분야에 걸쳐서 높아지고 있으며, 반도체 기술 및 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술을 이용하여 보다 고성능이며 소형, 초경량인 센서를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.¹ 표면탄성파(Surface Acoustic Wave, SAW) 센서는 파동을 이용한 센서로서 구조가 간단하고, 움직이는 부분

이 없으므로 외부의 진동이나 충격에 대하여 잘 견디며 가지는 RF (Radio Frequency) 안테나에 의해 가능하므로 별도의 전원공급이 없이도 작동이 가능하고 대량생산이 용이하며 가격이 싸다는 장점이 있다. 가장 큰 장점으로 높은 주파수 대역에서 작동하기 때문에 일정 거리 내에서 무선 통신이 가능하다. 따라서 차상 또는 지상에서 철도차량의 차륜이상을 감시하는 시스템에 사용될 수 있다.^{2,3} 본

접수일: 2005년 10월 24일; 게재승인일: 2006년 2월 10일

* 인하대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 인하대학교 기계공학과

E-mail jaehwan@inha.ac.kr Tel. (032)860-7326

논문에서는 온도에 따른 주파수 특성의 변화가 큰 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 압전기판을 사용하였으며, IDT (Inter-digital Transducer)는 단일전극 구조와 이중전극 구조, 두 가지를 각각 제작하여 비교하였다. 온도에 따른 중심 주파수의 특성을 측정하기 위하여, 3dB 대역폭과 20dB 대역폭에서의 중심 주파수를 이용하였다. 이를 통해 철도차량의 차륜부에 쓰일 수 있는 무전원 원격감지 온도센서를 설계 및 제작하여 성능을 평가하였다.

2. 표면탄성파 센서

2.1 Inter-digital Transducer (IDT)

압전기판상에서 표면 탄성파를 가장 효율적으로 발생 또는 검출하는 방법으로는 IDT 구조를 이용하는 것이 보편적이다.⁴ IDT는 압전기판 표면에 임펄스 신호 모양과 동일하게 금속 전극을 평행하게 연속적으로 배열하는 형태이다. Fig. 1과 같이 한쪽 IDT에 교류 신호전압을 인가하면, 인접한 극성이 다른 전극 사이에 전계가 발생하여 기관의 역압전효과에 의해 기관표면에 변형이 생기면서 반대쪽 IDT 방향으로 표면탄성파가 전파된다. 반대쪽 IDT는 표면탄성파를 각 전극의 위치에서 검출하여 압전효과에 의해 전기적 신호로 변환하게 된다

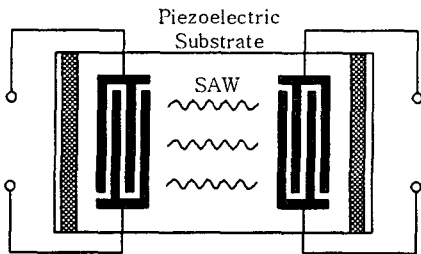


Fig. 1 Schematic Diagram of SAW Sensor

2.2 온도 감지의 개념

표면탄성파는 표면파로서 기관 위에 한 파장의 거리 내에서 표면에 구속되어 전달된다. 일반적으로 지연선(Delay Line)은 두 개의 IDT로 구성되며 이 사이에 표면파가 전달될 수 있는 공간이 존재한다. 이 중 한 쪽의 IDT (transmitter)에서는 인가된 전압에 의해 표면 탄성파를 발생시키며 이 때 발생된 표면 탄성파는 기관 표면의 자유공간 (Free

space)을 따라 적절한 주파수로 팽창과 압축을 반복 하면서 두 번째 IDT (receiver)에 전달되어 압전효과에 의해 전기적 신호로 변환된다. 이렇게 발생된 전압은 압전효과에 의해 기관을 팽창 수축시키게 되며 여기서 발생된 표면탄성파의 파장이 전극 λ 와 일치하는 경우 최대의 연성(Coupling)을 가져 IDT에 검출된다. Uniform IDT에서의 주파수 특성은 식 (1)과 같다.⁵

$$H(f) = \frac{\sin(N\pi X)}{N\pi X} \quad X = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (1)$$

여기서, N 은 전극쌍의 갯수이며 λ 는 파장길이, f_0 는 중심 주파수이고 v 는 표면탄성파의 속도이다. 많은 다른 형태의 센서는 측정할 물성치에 따라서 다른박막을 코팅하지만 온도 센서의 경우는 기관 자체가 온도에 연동되어 있기 때문에 그대로 사용이 가능하다. 즉 기관 자체의 온도에 따른 표면탄성파의 특성변화를 이용하여 측정을 한다. 온도의 변화는 지연선 내에서 속도의 변화 또는 작동 주파수의 변화를 일으키기 때문에 온도를 쉽게 감지할 수 있다.

2.3 IDT 시뮬레이션

IDT의 구조에 따른 압전기판에 의해 생성되는 표면탄성파의 전파에 대해서 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 예측하였다.⁶ 일반적으로 표면탄성파를 이용한 필터의 해석 시에 ANSYS가 많이 사용되며 본 연구에서 제작된 온도 센서 또한 필터와 같은 작동원리이기 때문에 이와 같은 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 압전재료는 구조와 전기장이 연성되어 있으므로 복합장 해석기능을 사용하면 해석이 가능하다. 유한요소 모델링은 압전기판에 대해서 SOLID5를 이용하여 수행하였다.

시뮬레이션을 하기 위해 두 개의 Uniform IDT와 지연선으로 구성된 모델을 선정하였다. $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 기관의 Z축을 표면탄성파의 전파 방향으로 설정하였고 Y축을 표면에 수직한 방향으로 선정하였다.^{7,8} IDT에 전기적 신호가 인가되었을 때 기관의 방향성에 따라서 역압전효과로 생성된 표면파는 전극에 수직한 방향으로 생성된다. 보다 간단한 해석을 하기 위해서 전극의 두께는 영향이 없다고 가정을 하였고 또한 전극의 질량에 의해 생성되는 기계적 하중을 무시하였다. 128°YX-

LiNbO₃ 기판은 3m Symmetry 결정구조를 갖는다. ANSYS 내에서 압전해석을 하기 위해서 Table 1과 같은 물리적 성질을 이용하였다.⁹

Table 1(a) Elastic coefficient matrix(or Compliance coefficients)

$$C_{pq}^E = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & (C_{11} - C_{12})/2 \end{pmatrix}$$

Table 1(b) Piezoelectric matrix

$$e_{ip} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & -e_{22} \\ -e_{22} & e_{22} & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Table 1(c) Permittivity

$$\epsilon_{ij}^S = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix}$$

이러한 128°YX-LiNbO₃ 기판의 재료 상수는 Table 1과 같은 행렬형태로 주어지며 각각 Table 2와 같은 값을 갖는다.¹⁰

Table 2 128°YX-LiNbO₃ Material Property

Elastic Stiffness	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₃₃	C ₄₄	C ₆₆
Constants(10 ⁹ N·m ⁻²)	20.3	5.3	7.5	9	24.5	6	7.5
Dielectric Constants (CV ⁻¹ m ⁻¹)	ε ₁₁	ε ₁₂	ε ₁₃				
	38.9	38.9	25.7				
Density(kg/m ³)	4700						
Piezoelectric Stress Constants(C/m ²)	e ₁₅	e ₂₂	e ₃₁	e ₃₃			
	3.7	2.5	0.2	1.3			

해석은 150MHz 주파수를 가진 전기적 신호에 대한 응답을 확인하기 위해서 조화 해석을 하였다. 경계조건은 표면과 전극에 대해서 Stress-Free B.C

를 가정하였고 입력전극에 대해서 전기적 신호를 인가하였다. 또한 센서의 일부는 고정하여 전기장에 영향이 없는 상태로 가정하였다.

Fig. 2(a)는 모델링 후에 경계조건 및 가진 조건을 주었을 때의 센서를 나타낸 것이며 Fig. 2(b)는 시뮬레이션 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 150MHz의 주파수로 가진을 했을 때 표면탄성파가 표면을 따라 발생함을 알 수 있으며 또한 이 표면 탄성파가 양 방향으로 전달됨을 확인할 수 있었다. 이러한 신호는 다시 출력 IDT에 의해 전기적 신호로 검출됨을 확인하였다.

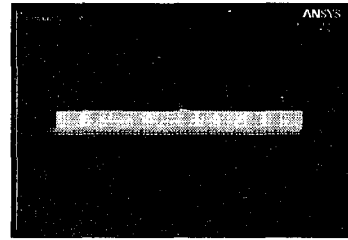


Fig. 2(a) 3-D Model for SAW generation in LN substrate

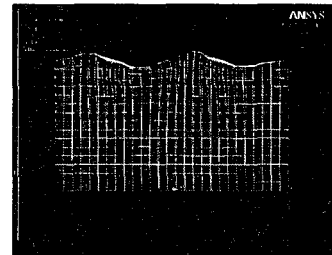


Fig. 2(b) Surface acoustic wave propagation simulation results

3. 표면탄성파 센서의 설계 및 제작

3.1 설계 파라미터의 선정

본 연구에서는 일반적으로 센서용으로 가장 많이 쓰이는 단일 IDT 구조와 이중 IDT 구조를 Table 3과 같이 설계하여 비교하였다.

온도 변화를 감지해야하는 관제로 본 논문에서는 온도계수가 큰 128°YX-LiNbO₃ 기판을 이용하였다.

Table 3 Detail Design Parameter

Parameter	Single IDT	Double IDT
Finger Width/Space	6.6 μm /6.6 μm	3.3 μm /3.3 μm
Number of Finger Pair	20 EA	20 EA
SAW Wavelength	26.6 μm	26.6 μm
SAW Aperture	640 μm	640 μm
Propagation Length	534 μm	534 μm

128°YX-LiNbO₃ 기판의 시간 지연 온도계수 (TCD : Temperature Coefficient of Delay)는 94x10⁻⁶ /°C이며, 전기-기계 결합계수(K₂)는 5.6 %이다. IDT의 간격을 결정하기 위해서 식 (2)를 기준으로 최적값을 선정하였다. 즉 발생된 음향파의 속도는 주파수와 파장의 곱으로 표현될 수 있기 때문에 IDT의 간격을 결정할 수 있다. 따라서 식 (2)에 의해서 중심 주파수가 150MHz일 때 파장은 26.6 μm 이다. Single IDT의 경우 한 IDT의 폭은 $\lambda/4$ 이므로 6.66 μm 이며 Double IDT의 경우는 3.33 μm 이다.

$$f_0 = \frac{v}{d} \quad (2)$$

여기서, f_0 는 중심주파수이며, v 는 표면탄성파의 속도 (3990 m/s) 이고 d 는 IDT사이의 거리이다. 전극 쌍의 개수는 둘 다 동일하게 20쌍이며, 표면 탄성파의 지연 경로인 입출력 IDT의 간격은 20 λ , 그리고 전극의 점침 정도(Aperture)는 입출력 IDT와 균일하게 25 λ 가 되도록 하였다. 설계된 파라미터는 Cadence 프로그램을 이용하여 Fig. 3과 같이 나타내었다. 설계된 데이터는 E-Beam 장비로 보내져서 마스크를 제작하였다.

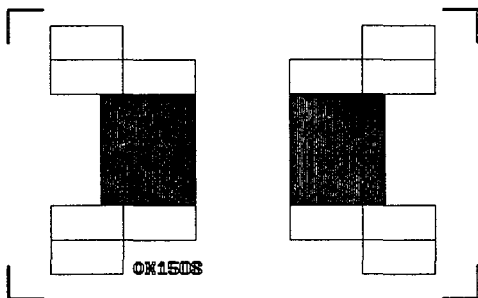


Fig. 3(a) Mask Layout (Single electrode IDT)

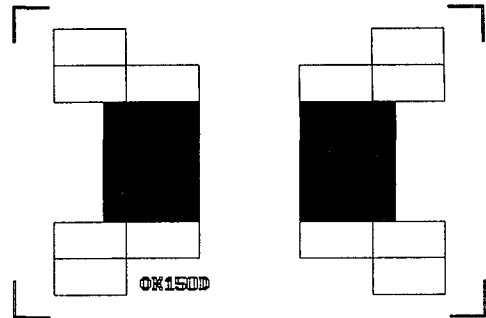


Fig. 3(b) Mask Layout (Double electrode IDT)

3.2 센서의 제작

본 연구에서 제작된 표면탄성파(Surface Acoustic Wave) 센서는 128°YX-LiNbO₃ 기판 위에 IDT 구조를 구성하여 제작하였으며, IDT 구조는 Single electrode 와 Double electrode의 두 가지 형태로서 중심 주파수가 150MHz가 되도록 설계하였다. 센서의 특성을 평가하기 위해서 Fig. 4와 같은 절차로 제작을 하였다. IDT 제작을 위한 전극 증착 (metalization) 전에, 기판 표면에 존재할 수 있는 유기물의 오염을 제거하기 위해 표준세척공정을 이용하여 아세톤과 알코올로 128°YX-LiNbO₃ 압전기판을 세척한 후, 스퍼터링(RF magnetron sputter) 장비를 이용하여 알루미늄 전극을 2500Å 두께로 증착하였다. 회전 도포기를 이용하여 기판 위에 증착된 알루미늄 전극에 PR (Photorisist)를 균일하게 도포시킨 후, 노광 공정과 현상 (Developing)을 통해서 E-Beam에 의해 제작된 마스크의 패턴을 PR에 형성시켰다. 여기서 사용된 PR은 AZ6812(훤스트 사)의 Positive PR이다.

전극의 식각을 위해 사용할 수 있는 방법으로는 화학적 식각 방법과 건식 식각 방법 (Dry etching), 리프트오프 방법 (Lift-off) 등이 있으나 본 연구에서는 비교적 제작 방법이 간단한 화학적 습식 식각 기술 (Wet etching)을 통해서 기판 위에 알루미늄 전극으로 된 IDT를 구성하였다.¹¹ 이 공정에서 노출 (Exposure), 현상 (Developing), 에칭 (Etching) 등은 중심 주파수 (Center frequency), 삽입손실(Insertion Loss), 임피던스 (Impedance) 등 전기적 특성에 중요한 영향을 미치기 때문에 이러한 조건을 배제하기 위하여 청정실에서 작업을 하였다. 완성된 입출력 IDT 쌍을 다이싱 (Dicing) 공정을 통해 각각 분리시

킨 후 SMD 패키징을 하였다. 패키징 공정에서는 IDT와 패키지의 입출력 부를 연결시키기 위해 와이어 본딩을 해 주었으며, 중심 주파수에서의 리플(Ripple)을 제거하기 위하여 흡음재를 IDT의 양 끝에 도포하였다. 또한 온도 이외의 변수 즉, 압력, 습도 등에 의한 영향을 제거하기 위해서 패키징 공정 시에 표면탄성과 센서를 밀폐시켰다(Fig. 5). SMD 패키징 된 표면탄성과 소자는 측정을 위해 PCB 기판으로 구성된 지그에 부착하여 Network Analyzer (HP 8510C)로 주파수 특성을 측정하였다.

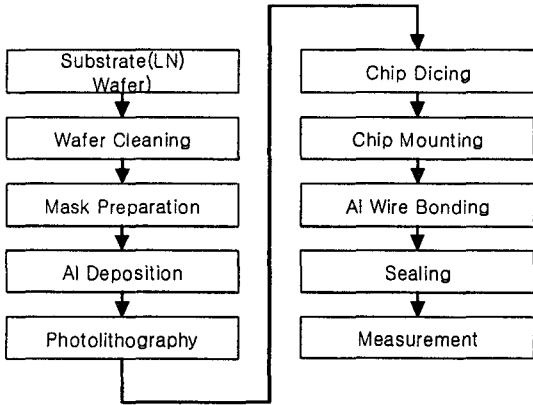


Fig. 4 Manufacturing Schematic diagram of sensor

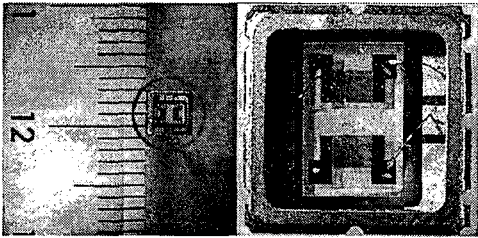


Fig. 5 Prototype of SAW Temperature Sensor

4. 실험 및 결과고찰

4.1 측정 방법

온도 변화에 대한 표면탄성과 센서의 주파수 특성을 측정하기 위해 온도 챔버 (Thermal Chamber)를 사용하여 분위기 온도를 -30℃에서 80℃까지 변화시켰다. 10℃의 간격으로 온도 변화를 주고 5분

을 유지한 상태로 Network Analyzer를 이용하여 측정하였다. 정확한 측정을 위해서 50Ω 교정 키트 (Calibration Kit)를 이용하여 측정 시 존재할 수 있는 오차를 최소화하였다. Single IDT와 Double IDT 형태의 표면탄성과 센서를 각각 5개의 샘플로 반복 측정하였으며, 온도변화에 따른 주파수 특성을 중심 주파수와 3dB의 중심 주파수, 20dB의 중심 주파수를 각각 측정하였다.

4.2 측정 결과

Fig. 6은 상온에서 단일전극과 이중전극 구조의 주파수 특성을 S 파라미터를 이용하여 측정한 결과이다. S 파라미터는 입력 전압 대 출력 전압의 비로서 주파수에 대한 신호 에너지의 분포를 dB값으로 나타낸 것이다. 최소삽입손실은 각각 6.9dB와 8.2dB로 단일전극이 1.3dB 정도 낮으며, 저지 대역은 각각 27dB, 30dB로 단일전극에서 약간 높게 나타났다.

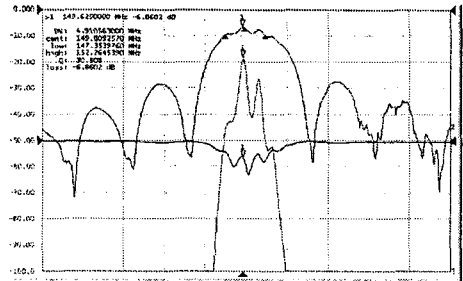


Fig. 6(a) S parameter of Single electrode IDT

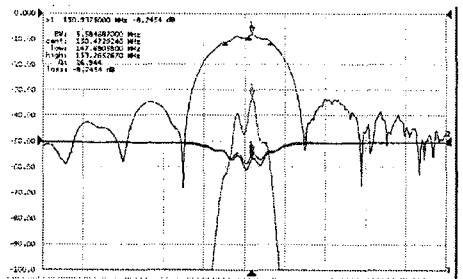


Fig. 6(b) S parameter of Double electrode IDT

이것은 단일 IDT 구조의 삽입손실이 이중 IDT의 구조에 비해 작은 어드미턴스를 갖는 특성 때문이다. IDT 자체의 손실이 없다고 가정할 경우, 전체

의 삽입손실은 일반적으로 6dB정도이고, 나머지 값의 대부분은 입력 측 IDT와 출력 측 IDT의 임피던스 부정합에 의해 발생하는 손실일 것으로 여겨진다.

Fig. 7은 단일 IDT 구조를 갖는 표면탄성과 센서를 -30°C에서 80°C범위에서 온도변화에 따른 3dB 중심 주파수와 20dB 중심 주파수 변화를 측정하였다. 온도에 대한 3dB 중심 주파수 변화와 20dB 중심 주파수 변화에 대한 추세선의 기울기는 각각 -10kHz/°C와 -11kHz/°C로 20dB의 경우가 우세했으며 변동폭 역시 20dB 중심 주파수의 경우가 적었다.

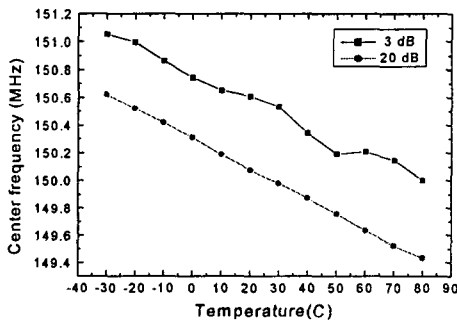


Fig. 7 Variation of the Center Frequency according to the Temperature Change on the Single IDT

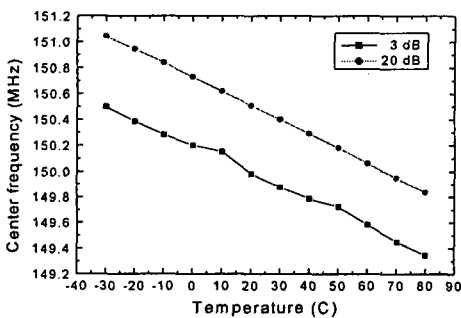


Fig. 8 Variation of the Center Frequency according to the Temperature Change on the Double IDT

Fig. 8은 이중 IDT 구조에 대해서 단일 IDT 구조와 같은 조건으로 측정된 결과이다. 이중 IDT의 경우에서도 20dB 중심 주파수의 변화가 3dB 중심 주파수의 변화보다 좋은 선형성을 갖는 것을 알 수

있다. 3dB 중심 주파수의 변화와 20dB 중심 주파수 변화에 대한 추세선의 기울기는 각각 -9.8 kHz/°C와 -11 kHz/°C로 변화율 역시 20dB 중심 주파수의 경우가 우세함을 알 수 있다.

5. 결론

128°YX-LiNbO₃ 압전기판 위에 단일 IDT와 이중 IDT 구조를 갖는 두 가지 온도 센서를 제작하였다. 온도 변화에 대한 주파수 특성의 변화를 확인하기 위하여 3dB 중심 주파수와 20dB 중심 주파수를 측정하였으며 통과대역에서 리플이 적은 20dB 중심 주파수가 더욱 우수한 선형성을 보여서 상대적으로 정확성이 높음을 알 수 있었다. 또한 상온에서 150MHz의 중심 주파수를 갖도록 설계된 두 가지 표면탄성과 센서의 주파수 특성이 온도에 따라 선형적으로 변하는 것을 확인하였다. 단일 IDT와 이중IDT의 성능차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 한국과학재단 창의연구진흥사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Stelzer, A., Schimetta, G., Reindl, L., Springer, R. and Weigel, A., "Wireless SAW sensors for surface and Subsurface Sensing Applications," SPIE, Vol. 4491, pp. 358~366, 1994.
2. De Geeter, B., Nys, O., Chevroulet, J.P. and Bardy, M., "A Wireless Tyre Pressure and Temperature Monitoring System," Proceedings Sensor Expo Conference, pp. 61~63, 1996.
3. Pohl, A., Ostermayer, G., Rein, F. and Seifert, L., "Monitoring the tire pressure at cars using passive SAW sensors," IEEE Ultrason. Symp., Toronto, Ontario, Canada, 1997.
4. Gardner, J.W., Varadan, V.K. and Awadelkarim, O.O., Microsensors, MEMS and Smart Devices, John Willey & Sons, Inc., England, 2001.
5. Ballantine, D. S. and White, R. M., "Acoustic Wave Sensors," Academic Press, Inc., New York,

1997.

6. Swanson Analysis Systems, ANSYS User's manual for Revision 5.0 Vol. I : Procedures', ANSYS.
7. Xu, G. "Direct finite-element analysis of the frequency response of a Y-Z lithium niobate SAW filter," Smart Mater. Struct., Vol. 9, pp. 973-980, 2000.
8. Reynolds, A.P., Hayward, G., Monkhouse, R. and Cawley, P., "Piezoelectric Materials for Application in low profile interdigital transducer Design," IEEE Ultra. Symp., pp. 1025-1028, 1997.
9. Erwin, M. and Russer, P., "Elastic Properties of Proton Exchanged Lithium Niobate," IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 39, No. 3, 1992.
10. John, G., Gualtieri, J. and Kosinski, A., "Piezoelectric Materials for Acoustic Wave Applications," IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 41, No. 1, 1994.
11. Stelzer, A., Pichler, M., Schuster, S., Scheiblhofer, S. and Hauser, R., "High Resolution Evaluation Algorithms for SAW-Identification Tags," Proceedings of SPIE's Symposium on Smart Structures and Materials, Vol. 5049, pp. 547-554, 2003.