

# 압전재료를 이용한 SAW 온도센서의 제작 및 특성에 대한 연구

## A study on the Fabrication and Characteristics of SAW Temperature Sensor using piezoelectric material

박재홍\* · 김재환\*\*

Jaehong Park, Jaehwan Kim

Key Words : Piezoelectric material, SAW, Delay line, Wireless communication, IDT(Interdigital Transducer)

### ABSTRACT

In this paper, a remote temperature sensor based on surface acoustic wave is introduced and the issues on design, manufacturing, and test of the sensor are addressed. SAW sensors having single and double electrode are prepared on the  $128^\circ$  YX-LiNbO<sub>3</sub> Substrate. The frequency responses of SAW sensors on the temperature change are compared. To measure the change of center frequency, two center frequencies on the 3dB and 20dB are measured and compared. Since the center frequency on the temperature change from  $-30^\circ\text{C}$  to  $80^\circ\text{C}$  is linearly changed, the SAW sensor is applicable to the temperature sensor.

### 1. 서론

최근 센서 및 센서 기술의 수요는 전반적인 산업 분야에 걸쳐서 높아지고 있으며, 반도체 기술 및 MEMS 기술을 이용하여 보다 고성능이며 소형, 초경량인 센서를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>(1)</sup>. SAW 센서는 파동을 이용한 센서로서 구조가 간단하고, 움직이는 부분이 없으므로 외부의 진동이나 충격에 대하여 튼튼하며 가진은 RF 안테나에 의해 가능하므로 별도의 전원 공급이 없이도 작동이 가능하고 대량생산이 용이하며 가격이 싼 장점이 있다. 가장 큰 장점으로 높은 주파수 대역에서 작동하기 때문에 일정 거리 내에서 무선 통신이 가능하다. 따라서 차상 또는 지상에서 철도차량의 차륜이상을 모니터링하는 시스템에 사용될 수 있다<sup>(2,3)</sup>. 본 논문에서는 온도에 따른 주파수 특성의 변화가 큰  $128^\circ$  YX-LiNbO<sub>3</sub> 압전기판을 사용하였으며, IDT는 Single electrode 구조와 Double electrode 구조 두 가지를 각각 제작하여 비교하였다. 온도에 따른 중심 주파수의 특성을 측정하기 위하여, 3dB 대역폭과 20dB 대역폭에서의 중심 주파수를 이용하

였다. 이를 통해 철도차량의 차륜부에 쓰일 수 있는 무전원 원격감지 온도센서를 설계 및 제작하여 성능을 평가하였다.

### 2. SAW Sensor

#### 2.1 Interdigital Transducer(IDT)

압전 기판상에서 표면 탄성파를 가장 효율적으로 발생 또는 검출하는 방법으로는 IDT 구조를 이용하는 것이 보편적이다<sup>(4)</sup>. IDT는 압전기판 표면에 Time impulse 모양과 동일하게 금속 전극을 평행하게 연속적으로 배열하는 형태이다. 그림 1과 같이 한쪽 IDT에 교류 신호전압을 인가하면, 인접한 극성이 다른 전극 사이에 전계가 발생하여 기판의 압전효과에 의해 기판표면에 변형이 생기면서 반대쪽 IDT 방향으로 SAW가 전파된다. 반대쪽 IDT는 SAW를 각 전극의 위치에서 검출하여 역압전효과에 의해 전기적 신호로 검출하게 된다.

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

E-mail : matel1@korea.com

Tel : (032) 874-7325, Fax : (032) 872-7925

\*\* 인하대학교 기계공학과

### 3. 설계 및 제작

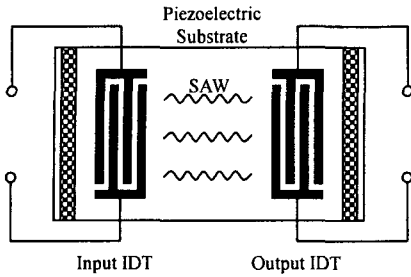


Fig.1 Schematic Diagram of SAW sensor

#### 2.2 작동 원리

SAW는 표면파로써 기판 위에 한 파장의 거리 내에서 표면에 구속되어 전달된다. 일반적으로 Delay Line은 두 개의 IDT로 구성되며 이 사이에 표면파가 전달될 수 있는 공간이 존재한다. 이 중 한 개의 IDT에서 인가된 전압에 의해 표면탄성파를 발생시키는데 이것을 transmitter라 하며 이 때 발생된 표면탄성파는 기판 표면의 자유 공간을 따라 적절한 주파수로 팽창과 압축으로 두 번째 IDT에 전달되어 역압전효과에 의해 전기적 신호로 변환된다. 이 두 번째 IDT를 Receiver라고 한다. 이렇게 발생된 전압은 압전효과에 의해 기판을 팽창, 수축시키게 되며 여기서 서로 다른 극성을 갖는 Impulse 쌍은 IDT의 전극 쌍과 일치하므로 각 Impulse에서 발생된 SAW의 파장이 전극 Pitch  $\lambda$ 와 일치하는 경우 최대의 Coupling을 가져 SAW 에너지가 최대가 된다. Uniform IDT에서의 주파수 특성은 식 (1)과 같다<sup>(6)</sup>.

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

여기서,  $N$ 은 전극쌍의 개수이며  $\lambda$ 는 파장의 길이,  $f_0$ 는 중심 주파수이고  $v$ 는 SAW의 속도이다.

많은 다른 형태의 센서는 측정할 물성치에 따라서 다른 박막을 코팅하지만 온도 센서의 경우는 기판 자체가 온도에 연성되어 있기 때문에 그대로 사용이 가능하다. 즉 기판 자체의 온도에 따른 SAW의 특성변화를 이용하여 측정을 한다. 외부 조건의 변화는 Delay Line 내에서 속도의 변화 또는 작동 주파수의 이동을 일으키기 때문에 쉽게 감지할 수 있다.

#### 3.1 파라미터 선정

SAW 센서와 관련하여 많은 IDT 구조가 연구되었다. 일반적으로 센서용으로 가장 많이 쓰이는 Single IDT 구조와 Double IDT 구조를 표 1과 같이 설계하여 비교하였다<sup>(6)</sup>.

온도 센서의 설계 목적에 부합하기 위하여 LiNbO<sub>3</sub> 기판을 선정하였다. 일반적인 압전기판에 요구되는 조건은 온도계수가 작고 결합계수가 커야 하지만 LiNbO<sub>3</sub>의 경우 온도계수가 다른 압전 재료에 비해 크기 때문에 온도 센서로서 가장 적합하며 단결정이기 때문에 균일성 및 내구성이 우수하다.

Table 1. Detail Design Parameter

Parameter	Single IDT	Double IDT
Finger width/space	6.6 $\mu\text{m}$ /6.6 $\mu\text{m}$	3.3 $\mu\text{m}$ /3.3 $\mu\text{m}$
Number of finger pair	20 EA	20 EA
SAW wavelength	26.6 $\mu\text{m}$	26.6 $\mu\text{m}$
SAW aperture	640 $\mu\text{m}$	640 $\mu\text{m}$
Propagation length	534 $\mu\text{m}$	534 $\mu\text{m}$

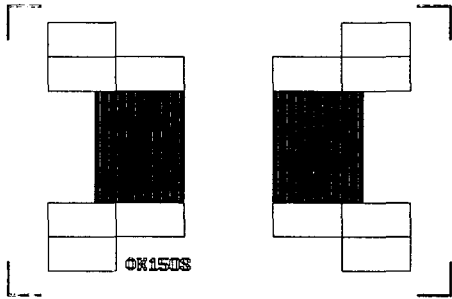
128° YX-LiNbO<sub>3</sub> 기판의 시간 지연 온도계수(TCD : Temperature Coefficient of Delay)는 94ppm/°C이며, 전기계 결합계수( $K^2$ )는 5.6%이다. IDT의 간격을 결정하기 위해서 식 (2)를 기준으로 최적값을 선정하였다. 즉 발생된 음향파의 속도는 주파수와 파장의 곱으로 표현될 수 있기 때문에 IDT의 간격을 결정할 수 있다. 따라서 식 (2)에 의해서 중심 주파수가 150MHz일 때 파장은 26.6  $\mu\text{m}$ 이다. Single IDT의 경우 한 IDT의 폭은  $\lambda/4$ 이므로 6.66  $\mu\text{m}$ 이며 Double IDT의 경우는 3.33  $\mu\text{m}$ 이다.

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

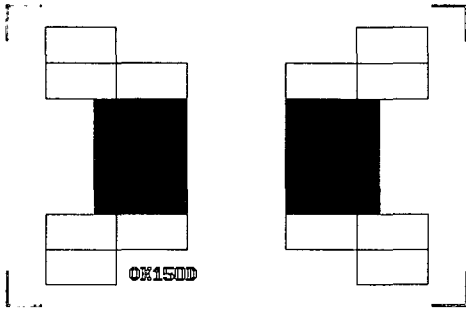
여기서,  $f_0$ 는 중심 주파수이며  $v$ 는 SAW의 속도이고  $d$ 는 IDT사이의 거리이다.

전극 쌍의 개수는 둘 다 동일하게 20 쌍이며, 표면탄성파의 지연 경로인 입출력 IDT의 간격은  $20\lambda$ , 그리고 전극의 겹침 정도는 입출력 IDT 균일하게  $25\lambda$ 가 되도록 하였다<sup>(7)</sup>. 설계된 파라미터는 Cadence 프로그램을 이용하여 그림 2와 같

이 나타내었다. 설계된 데이터는 E-beam 장비로 보내져서 마스크를 제작하였다.



(a) Single electrode IDT



(a) Double electrode IDT

Fig.2 Mask design of Single electrode IDT and Double electrode IDT using Cadence program

### 3.2 Sensor의 제작

본 연구에 사용된 SAW 센서는  $128^\circ$  YX-LiNbO<sub>3</sub> 기판 위에 IDT 구조를 구성하여 제작하였으며, IDT 구조는 Single electrode 와 Double electrode 의 두 가지 형태로서 중심 주파수가 150MHz 로 되도록 설계하였다. 센서의 특성을 평가하기 위해서 그림 3 과 같은 절차로 제작을 하였다. IDT 제작을 위한 전극 증착 전에, 기판 표면에 존재할 수 있는 유기물의 오염을 제거하기 위해 표준세척공정을 이용하여 아세톤과 알코올로  $128^\circ$  YX-LiNbO<sub>3</sub> 압전기판을 세척한 후, RF magnetron sputter 를 이용하여 Al 전극을 2500 A 두께로 증착하였다. 회전 도포기를 이용하여 기판 위에 증착된 Al 전극에 photoresist (PR)를 균일하게 도포시킨 후, 노광 공정과 현상을 통해서 E-beam 에 의해 제작된 마스크의 패턴을 PR 에 형성시켰다. 여기서 사용된 PR 은 AZ6812(휴

스트 사)의 positive PR 이다. 전극의 식각을 위해 사용할 수 있는 방법으로는 화학적 식각 방법과 건식 식각 방법, 리프트오프 방법 등이 있으나 본 연구에서는 비교적 제작 방법이 간단한 화학적 습식 식각 기술을 통해서 기판 위에 AL 전극으로 된 IDT 를 구성하였다<sup>(6)</sup>. 이 공정에서 노출, 현상, 에칭 등은 중심 주파수, 삽입손실, 임피던스 등 전기적 특성에 중요한 영향을 미치기 때문에 이러한 조건을 배제하기 위하여 Clean-Room 에서 작업을 하였다. 완성된 입출력 IDT 쌍을 dicing 공정을 통해 각각 분리시킨 후, SMD 패키징을 하였다. 패키징 공정에서는 IDT 와 패키지의 입출력 부를 연결시키기 위해 와이어 본딩을 해 주었으며, 중심 주파수에서의 리플을 제거하기 위하여 흡음재를 IDT 의 양 끝 쪽에 도포하였다. 또한 온도 이외의 변수 즉, 압력, 습도 등에 의한 영향을 제거하기 위해서 패키지 공정 시에 SAW 센서를 밀폐시켰다(그림 4). SMD 패키징 된 SAW 소자는 측정을 위해 PCB 기판으로 구성된 지그에 부착하여 N/A(HP 8510C)로 주파수 특성을 측정하였다.

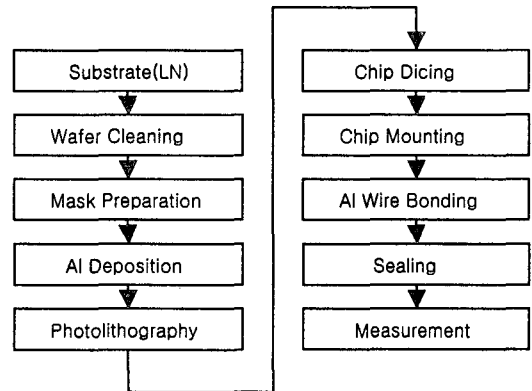


Fig.3 Schematic diagram of SAW temperature sensor

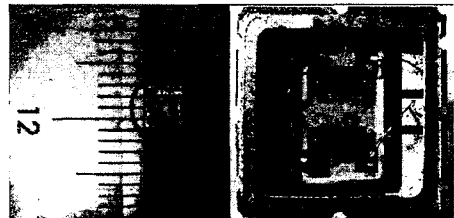


Fig.4 Prototype of SAW temperature sensor

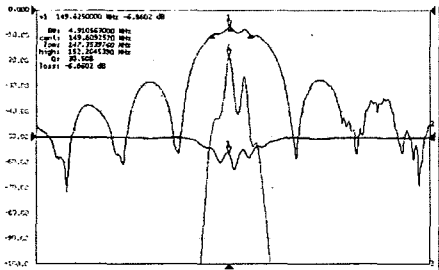
## 4. 측정 결과

### 4.1 측정 방법

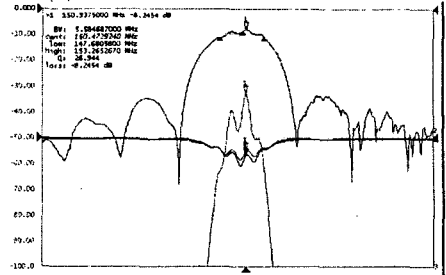
온도 변화에 대한 SAW 센서의 주파수 특성을 측정하기 위해 thermal chamber 를 사용하여 분위기 온도를  $-30^{\circ}\text{C}$  에서  $80^{\circ}\text{C}$  까지 변화시켰다.  $10^{\circ}\text{C}$  의 간격으로 온도 변화를 주고 5 분을 유지한 상태로 N/A (HP 8510C)를 이용하여 측정하였다. 정확한 측정을 위해서  $50\Omega$  Calibration Kit 를 이용하여 측정 시 존재할 수 있는 오차를 최소로 하였다. 스패(Span)은  $100\text{MHz}$  이고 포인트의 수는 801 개로 설정하였다. Single electrode IDT 와 Double electrode IDT 형태의 SAW 센서를 각각 5 개의 sample 로 반복 측정하였으며, 온도 변화에 따른 주파수 특성으로 중심 주파수와 3dB 의 중심 주파수, 20dB 의 중심 주파수를 각각 측정하였다.

### 4.2 측정 결과

그림 5 는 상온에서 Single electrode 와 Double electrode IDT 구조의 주파수 특성을 S 파라미터를 이용하여 측정한 결과이다. S 파라미터는 입력 전압 대 출력전압의 비로서 주파수에 대한 신호 에너지 분포를 dB 값으로 나타낸 것이다. 최소삽입손실(Insertion Loss)은 각각 6.9dB 와 8.2dB 로 Single electrode 가 1.3dB 정도 낮으며, 저지 대역은 각각 27dB, 30dB 로 Double electrode 에서 낮은 수치가 나타났다. 이것은 Single IDT 구조의 삽입손실이 Double IDT 의 구조에 비해 작은 어드미턴스를 갖는 특성 때문이다. IDT 자체의 손실이 없다고 가정할 경우, 전체의 삽입손실은 일반적으로 6dB 정도이고, 나머지 값의 대부분은 입력 측 IDT 와 출력 측 IDT 의 임피던스 부정합에 의해 발생하는 손실일 것으로 여겨진다.



(a) S parameter of Single electrode IDT



(b) S parameter of Double electrode IDT

Fig.5 S Parameter of SAW sensor using N/A

그림 6 는 Single electrode IDT 구조를 갖는 SAW 센서를  $-30^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$  범위에서 온도변화에 따른 3dB 중심 주파수와 20dB 중심 주파수 변화를 측정한 것이다. 온도에 대한 3dB 중심 주파수 변화보다 20dB 중심 주파수 변화에 대한 추세선의 기울기는 각각  $-10\text{kHz}/^{\circ}\text{C}$  와  $-11\text{kHz}/^{\circ}\text{C}$  로 변화율 역시 20dB 중심 주파수의 경우가 우세하다.

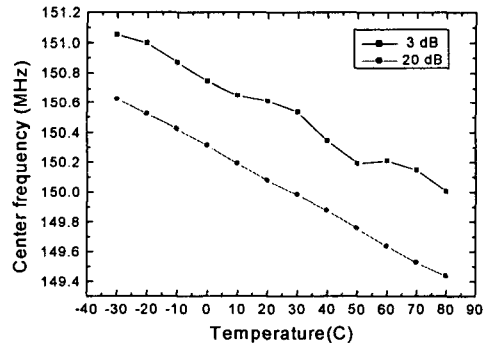


Fig. 6 Variation of the center frequency according to the temperature change on the Single IDT

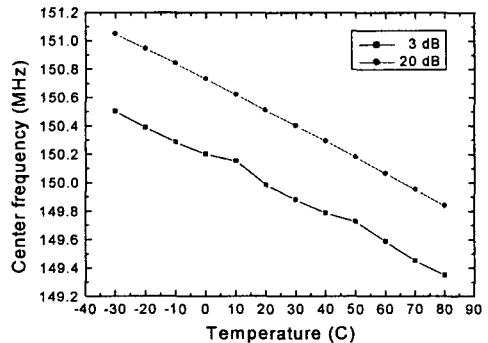


Fig.7 Variation of the center frequency according to the temperature change on the Double IDT

그림 7 은 Double electrode IDT 구조를 갖는 SAW 센서를  $-30^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$  범위에서 온도변화에 따른 3dB 중심 주파수와 20dB 중심 주파수 변화를 측정한 것이다. Double electrode 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  $-9.8\text{kHz}/^{\circ}\text{C}$ 와  $-11\text{kHz}/^{\circ}\text{C}$ 로 변화율 역시 20dB 중심 주파수의 경우가 우수함을 알 수 있다. 또한 Double IDT의 경우가 Single IDT의 결과보다 선형성이 더 우수함을 알 수 있다.

## 5. 무선 송수신의 응용

### 5.1 Remote Wireless System

차상 또는 지상에서 철도차량의 차륜이상을 원격으로 감지할 수 있는 원격 감지 시스템을 MicroStrain 사의 SG-Link Wireless System을 이용하였다. 원격 감지 시스템의 구현 가능성을 확인하기 위해서 5 cm X 25 cm Cantilever Beam을 이용하여 스트레인을 무선 시스템을 이용하여 측정하였다. 그림 8 과 같이 구성된 시스템을 이용하여 Cantilever beam의 스트레인을 무선으로 감지하였다. 컴퓨터에 RF 송수신 장치를 포함하는 베이스 스테이션을 연결한 후 Cantilever beam에 부착된 스트레인 게이지를 송수신 용 SG-Link 무선 노드에 장착하였으며 일반적인 Full bridge를 이용하여 스트레인을 측정하였다 (그림 8).

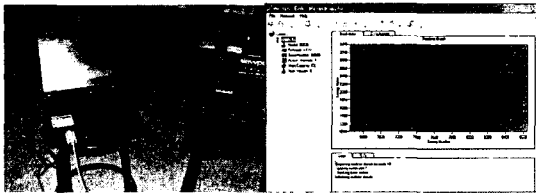


Fig.8 Measurement of strain at the cantilever beam using SG-Link Wireless System

150MHz 대역에 맞는 안테나를 설계하여 제작한다면 본 연구에서 제작된 온도센서를 이용하여 무선으로 데이터 송수신이 가능하다. 또한 송수신 장치의 크기를 작게 설계한다면 다양한 분야에 적용할 수 있다.

## 6. 결론

$128^{\circ}\text{YX-LiNbO}_3$  압전기판 위에 Single electrode IDT와 Double electrode 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 SAW 센서의 주파수 특성이 온도에 따라 선형적으로 변하는 것을 확인하였다. 또한 SG-Link Wireless System을 이용하여 무선으로 대상물의 변형을 원격을 측정하였으며 이를 통해 차량이나 차륜의 이상을 원격으로 측정할 수 있음을 증명하였다.

## 참고 문헌

- (1) A. Stelzer, G. Schimetta, L. Reindl, A. Springer and R. Weigel, 1994, "Wireless SAW sensors for surface and Subsurface Sensing Applications", SPIE Vol.4491 pp.358~366.
- (2) B. De Geeter, O. Nys, M. Chevroulet and J. P. Bardy, 1996, "A Wireless Tyre Pressure and Temperature Monitoring System", Proceedings Sensor Expo Conference, pp.61~63.
- (3) A. Pohl, G. Ostermayer, L. Rein and F. Seifert, 1997, "Monitoring the tire pressure at cars using passive SAW sensors", IEEE Ultrason. Symp., Toronto, Ont., Canada.
- (4) J. W. Gardner, V. K. Varadan, O. O. Awadelkarim, 2001, Microsensors, MEMS and Smart Devices, John Wiley & Sons, Inc., England.
- (5) D. S. Ballantine, R. M. White, 1997, Acoustic Wave Sensors, Academic Press, Inc., New York.
- (6) A. Stelzer, M. Pichler, S. Schuster, S. Scheibelhofer and R. Hauser, 2003, "High Resolution Evaluation Algorithms for SAW-Identification Tags", Proceedings of SPIE-the international society for optical engineering, no.5049, pp.547~554.