

Development of novel strain sensor using surface acoustic wave

오 해 관* · 황 우 진** · 은 경 태* · 좌 성 훈*** · 이 기 근§ · 양 상 식†
 (Hae-Kwan Oh · Kyung-Tae Eun · Sung-Hun Choa · Kee-Keun Lee · Sang-Sik Yang)

Abstract - A SAW strain sensor based on Shear Horizontal wave with an 92 MHz central frequency was developed. It consists of SAW sensor, PCB substrate and bonding material (Loctite 401). External force applied to PCB substrate bonded to a piezoelectric substrate induces strain at the substrate surface, which causes changes in the elastic constant and density of the substrate and hence the propagation velocity of the SAW. The change in the velocity of the SAW result in a frequency shift of the sensor and by measuring a frequency shift, we can extract the strain induced by the external force. The 41° YX LiNbO₃ was used because it has a Leaky shear horizontal(SH) wave propagation mode and a high electromechanical coupling coefficient ($K^2=17.2\%$). And to compare with Rayleigh wave mode, 128° YX LiNbO₃ was used. And to make a stable and low insert loss, Split IDT structure was used. The obtained sensitivity and linearity of the SAW strain sensor in the case of Split IDT were measured to be 17.2 kHz / % and 0.99, respectively.

Key Words : Strain sensor, Surface acoustic wave (SAW), Shear horizontal wave, Rayleigh wave

1. 서 론

외부 힘에 의한 변형의 정도는 축력, 휨모멘트, 토크, 압력, 가속 등의 엔지니어링 분야에서 중요한 요소이다.

특히 가장 많이 연구되고 있는 분야는 지능형 차량 제어 장치에서이다 [1-3]. 지금까지의 지능형 차량 제어장치들은 차량-도로 간의 정보들(도로 하중, 도로 상태 등)은 정확히 알지 못하여 간접적인 방법으로 추정된 값을 사용하고 있다. 이것은 휠에서 발생하는 하중과 도로 접지 마찰계수 같은 중요 변수는 측정이 불가능하기 때문이다. 특히 제어 로직 개발 시 많은 한계점이 발생되며, 점점 지능화되어 가는 차량 제어를 만족할 수 없다. 따라서 최근에 타이어/휠 관련 정보(타이어 힘, 노면 마찰계수, 슬립각)에 대한 실시간 감지 장치로서 지능형 타이어 모니터링 시스템이 새로운 기술로 부각되고 있다. 지능형 타이어 모니터링 시스템의 핵심기술 중의 하나는 타이어의 변형을 측정하는 기술이다. 타이어는 동작 시 최대 20%의 변형이 발생되는데 타이어 내부의 환경이 매우 극한 조건이기 때문에 이러한 조건에서 큰 변형을 측정할 수 있는 센서의 개발이 필수적이다.

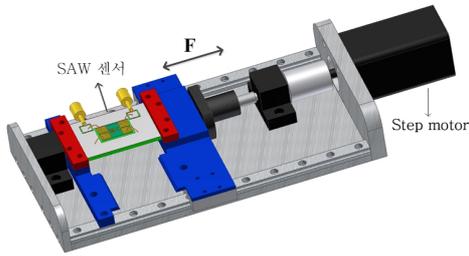
지능형 건물 시스템에서도 외벽의 손상 및 건물의 변형을 실시간으로 측정하기 위해 무선통신이 가능한 변형센서의 필요성이 부각되고 있다. 기존의 변형센서로서 스트레인 게이지 타입 센서 [4], 고무수지를 이용한 정전용량형 변형 센서 [5] 등이 제안된바 있지만 이러한 방식은 복잡하고, 부가적 측정 장비 요소를 요구하며, 무선통신의 한계가 단점으로 지적되고 있다. 이러한 이유로 극한 환경에서 작동이 가능하며, 무선 통신의 가능한 표면탄성파(SAW)를 이용한 변형률 측정센서가 활발히 연구 되고 있다. 영국의 Kalinin 연구팀은 reflective delay line 구조를 이용한 변형률 센서를 발표 하였지만 [6], 수식적 해석을 통한 가능성을 제시한 수준이다. 독일의 Pohl 연구팀은 실제 타이어에 표면탄성과 센서를 장착하여 측정하는 실험을 진행하였지만, 가능성을 보여주는 수준으로 의미 있는 결과를 얻지 못하였다 [7], 일본의 Nomura 연구팀은 reflective delay line 구조의 변형률 센서를 개발하였으며, cantilever plate를 이용하여 strain을 인가 하여 측정하였다 [8]. 하지만 측정 감도가 250 Hz / 10 $\mu\epsilon$ 으로 매우 낮은 수준이다. 최초로 표면탄성파를 이용하여 변형률을 측정한 결과이지만, 사용된 압전기판의 낮은 전기기계결합상수 (3.7%), 일반적인 IDT 구조를 사용할 경우 발생하는 edge 반사, TTS (triple transit signal) 등의 문제로 인하여 의미 있는 수준의 감도에는 도달하지 못하였다.

본 논문에서는 기존의 센서의 문제점을 극복하기 위해, 높은 전기기계결합상수 (17.2 %)와 strain에 민감한 SH (shear horizontal)파를 전파하는 압전기판을 사용하였으며, 신호의 안정성과 삽입손실의 최소화를 위해 split IDT 구조를 적용하였다.

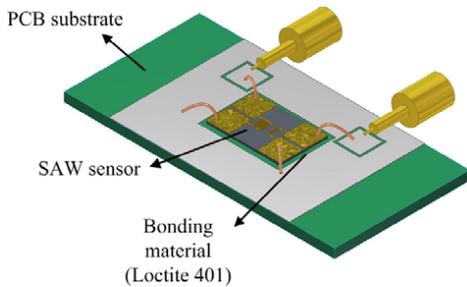
* 정 회 원 : 아주대 전자공학과 박사과정
 ** 준 회 원 : 서울과학기술대 석사과정
 *** 준 회 원 : 서울과학기술대 교수
 § 정 회 원 : 아주대 전자공학과 교수
 † 교신저자, 정회원 : 아주대 전자공학과 교수
 E-mail : sssyang@ajou.ac.kr
 접수일자 : 2011년 1월 8일
 최종완료 : 2011년 2월 1일

2. 본 론

2.1 표면탄성과 변형률 센서의 동작 원리



(a) 표면탄성과 변형률 센서 측정 시스템



(b) 표면탄성과 변형률 센서

그림 1 표면탄성과 변형률 센서 시스템의 개략도

Fig. 1 Schematic views of the strain sensor system based on SAW

그림 1은 표면탄성과를 이용한 변형 측정 시스템의 개략도이다. 변형력에 의해 중심주파수가 변하는 표면탄성과 센서, 변형률을 만들어 내는 스트레인 게이지, 센서와 스트레인 게이지를 연결시키는 PCB, PCB 와 센서를 결합시켜주는 접착제로 구성되어 있다. 측정 스트레인 게이지는 자체 제작 하였으며 그림 1(a)와 같다. 표면탄성과 센서를 이용하여 PCB 의 인장을 측정하기 위해, 박리(delamination)를 최소로 하고 접착성이 강한 loctite 401 접착제를 이용하여 표면탄성과 센서를 PCB 에 접착 시킨다[그림 1(b)].

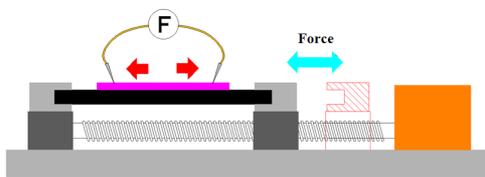


그림 2 변형력에 의한 표면탄성과 센서의 변형

Fig. 2 The deformation of SAW sensor due to strain

스트레인 게이지에 의해 PCB 에 변형력이 인가되면, 그림 2와 같이 PCB 는 늘어나게 되고 PCB 의 변형은 접착제로 결속되어 있는 표면탄성과 센서의 변형을 야기한다. 변형력에 의한 표면탄성과의 변화는 다음과 같은 원인으로 발생한다.

첫째, 두 IDT 사이의 delay line의 실제 길이가 증가하게 된다. 한 쪽을 고정시킨 채, 다른 쪽에서 변형력을 가하게 되면, 표면탄성과 센서의 길이가 증가하게 되며, 특히 delay

line의 증가는 입력 IDT에서 만들어진 표면탄성과가 출력 IDT에 도달하는 시간을 변화시키게 된다. 둘째, 표면탄성과를 입자들의 타원운동으로 볼 때, 입자들 간의 전기장이 감소하게 된다. 전기장의 감소는 전위차의 감소를 야기하며, 다음 수식에 의해 결국 표면탄성과 속도(v_0)가 감소하게 된다[9].

$$Z_0 = \frac{\phi P}{2P},$$

$$C = \frac{1}{Z_0 v_0},$$

$$v_0 = \frac{k^2 y_0}{2\pi C}$$

여기서 ϕ 는 전위차, P는 파워, k^2 는 전기기계결합상수, Z_0 는 임피던스, y_0 는 어드미턴스, C는 정전용량이다.

셋째, 압전기판에 변형력이 인가되면 기판의 밀도가 변화하게 되어 다음 관계식에 의해 표면탄성과의 전파속도가 변화하게 된다.

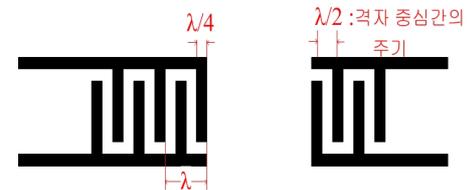
$$v_0 = \sqrt{\frac{c}{\rho}}$$

여기서 c는 압전기판의 stiffness 상수이며, ρ 는 밀도이다.

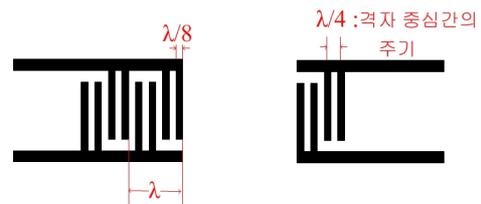
그 외에도, IDT 자체의 물리적 변형, 입자간의 전기장의 감소로 인한 압전기판의 strain 상수의 감소 등에 의해서 표면탄성과의 전파속도는 영향을 받게 된다. [10]. 결과적으로 변형력은 표면탄성과의 진행거리와 전파속도를 변화시켜 중심주파수를 변화 시키게 된다. 중심주파수의 변화 정도를 통하여 변형의 정도를 파악할 수 있게 된다.

2.2 표면탄성과 변형률 센서의 설계

표면탄성과 센서의 설계에 있어 압전기판의 선택은 중요한 요소이다. 압전기판에 따라 전파하는 표면탄성과의 종류, 전기기계결합상수, 온도지연상수 등이 다르다. 일반적으로 변형에 민감한 표면탄성과는 SH파로 알려져 있다[8]. 그 이유는 일반적인 레일리파는 횡파와 종파 성분을 모두 지닌 채 전파하지만, SH 파는 대부분 횡파 성분을 지닌 채로 전파하기 때문에 변형에 민감하다. 전기기계결합상수가 클수록 더 큰 에너지를 지닌 표면탄성과를 만들 수 있지만, TTS에 의한 신호교란 현상이 발생하기 쉽다는 단점이 있다.



(a) 일반적인 IDT



(b) Split IDT

그림 3 설계된 두 가지 다른 IDT 구조도

Fig. 3 Schematic of two different IDT structures

레이리파와 SH파의 특성 비교를 위하여, 128° YX LiNbO₃ (레이리파)와 41° YX LiNbO₃ (SH파)를 사용하였다. 표면탄성과 센서는 two-port 공진기 구조를 적용하였으며, 단일 모드의 표면탄성과를 전파시키기 위해 입력IDT의 길이는 출력 IDT의 3배가 되도록 설계하였다. TTS 에 의한 효과를 최소화 하기위하여 일반적인 IDT 구조와 더불어 split IDT 구조를 사용하였다(그림 3) [11]. 일반적인 IDT 구조는 그림 3(a)와 같이 $\lambda/4$ (파장 $\lambda=V_s/f_0$, V_s : 압전기판의 속도, f_0 : 중심주파수) 간격의 격자구조로 이루어져 있다. 반면 split IDT는 그림 3(b)와 같이 $\lambda/8$ 간격의 격자구조로 이루어져 있다. 같은 주파수를 구현하는데 있어, 일반적인 IDT 구조가 2배 큰 격자를 가지기 때문에, 구현이 용이하다는 장점이 있다. 하지만 일반적인 IDT 구조는 split IDT 구조에 비하여, 삽입손실과 주파수 안정도가 떨어진다는 단점이 있다. 이는 격자구조의 브래그 반사(bragg reflection) 때문이다. 브래그 반사는 입사되는 표면탄성과에 반대방향으로 작용하기 때문에 삽입손실 증가의 주요한 원인이다. 표면탄성과에서 브래그 반사가 일어나는 브래그 각주파수(Bragg frequency)는 다음과 같다[12].

$$w = \frac{n\pi V_s}{p}$$

여기서 ω 는 브래그 각주파수($\omega=2\pi f_b$, f_b : 브래그 주파수)이며, n 은 파상수(wave number), V_s 는 압전기판의 속도, p 는 격자 중심 간의 주기이다. 파상수는 기본파를 사용하기 때문에 1이며, 일반적인 IDT 구조의 p 는 $\lambda/2$ 이다. 브래그 주파수는 다음과 같다.

$$2\pi f_b = \frac{\pi V_s}{\lambda/2}$$

$$f_b = \frac{V_s}{\lambda}$$

$$f_b = f_0$$

즉, 브래그 반사가 일어나는 브래그 주파수와 센서의 중심주파수가 일치하게 되어, 브래그 반사에 의해 중심주파수 영역에서 높은 삽입손실이 나타나게 된다.

반면에 split IDT의 경우 격자 중심 간의 주기 $p=\lambda/4$ 이다. 따라서 브래그 주파수는 다음과 같다.

$$2\pi f_b = \frac{\pi V_s}{\lambda/4}$$

$$f_b = \frac{2V_s}{\lambda}$$

$$f_b = 2f_0$$

일반적인 IDT와 달리, 브래그 반사가 중심주파수의 두 배인 영역에서 일어나기 때문에, 센서의 중심주파수에서 삽입손실이 적게 나타나게 된다. 더불어 입출력 IDT 간의 반사로 인해 일어나는 TTS 또한 브래그 반사의 일종이기 때문에, 같은 브래그 주파수를 가진다. 따라서 split IDT 구조에서는 TTS를 최소화 할 수 있다. 이 밖에 IDT의 정전용량이 split IDT 구조가 약 1.4배 일반적인 IDT 구조보다 높은 것으로 보고되었다.[13]

변형률 센서로서 사용이 가능하려면 재료가 파괴되는 시점의 변형률이 필수적이다. 그러나 현재 압전기판의 경우 기계적 특성 자료가 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는

PCB 기판 위에 접착된 압전기판이 파괴되는 시점의 PCB의 변형률을 실험을 통하여 알아보았다.

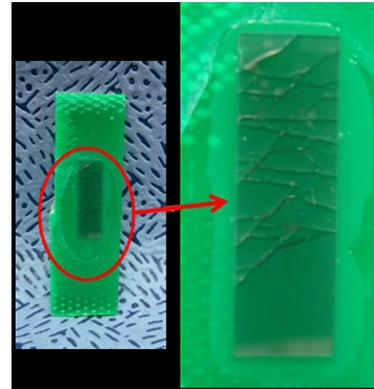
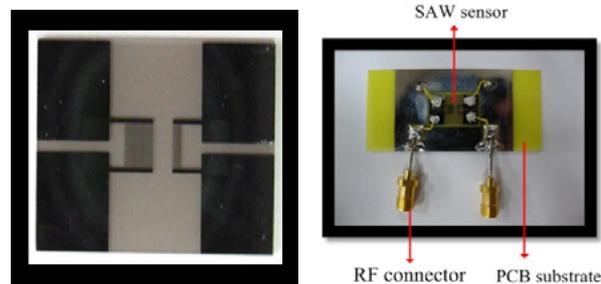


그림 4 변형력에 의한 표면탄성과 센서의 파괴 실험
Fig. 4 Occurred crack at SAW sensor on the PCB due to strain

그림 4는 PCB 를 인장하였을 때 PCB 위에 접착된 압전기판이 파괴된 결과를 나타낸다. PCB의 변형률이 약 3% 일 때 압전기판의 파괴가 발생하였다. 접착제로 사용한 Loctite 401의 완충작용을 고려하여 볼 때, 압전기판의 파괴 변형률은 3%보다 작은 값이라고 판단된다. 본 연구에서는 PCB 기판의 3% 이내의 변형률을 바탕으로 표면탄성과 센서를 설계하였다.

2.3 제작 공정 및 실험

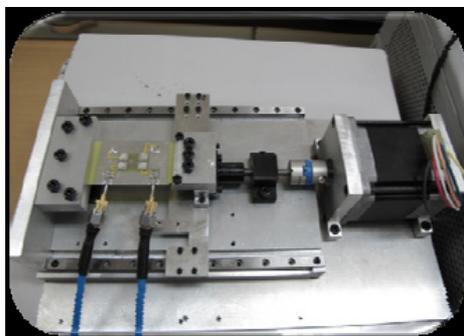


(a) 제작된 표면탄성과 센서 (b) PCB에 장착된 표면탄성과 변형률 센서

그림 5 제작된 표면탄성과 변형률 센서의 광학 사진
Fig. 5 Optical images of the fabricated SAW strain sensor

표면탄성과 센서는 한 번의 사진식각 공정을 이용하여, 간단하게 제작할 수 있다. 그림 5(a)는 제작된 표면탄성과 센서의 광학 사진이다. 그림 5(b)는 변형센서로 활용하기 위한 표면탄성과 센서 패키지의 모습이다. 표면탄성과 센서는 인장이 용이한 FR-4 재질의 PCB를 기판으로 사용하였다. PCB는 60 x 30 mm의 크기로 알루미늄을 이용하여 표면탄성과 센서의 전기적 특성을 측정할 수 있도록 증착하였다. 표면탄성과 센서를 이용하여 PCB의 인장을 측정하기 위해, 박리(delamination)를 최소로 하고 접착성이 강한 loctite 401 접착제를 이용하여 표면탄성과 센서를 PCB에

접착 시켰다. SAW 센서의 전기적 신호 입력은 two-port 방식을 이용하였고, 신호 입력 장비는 Agilent 8753ES network analyzer 를 사용하였다. 표면탄성과 센서에 신호를 입력하기 위하여 RF connector 를 PCB 에 부착 하였고, PCB 와 표면탄성과 센서는 silver paste 와 wire 를 이용하여 연결 하여 실험을 진행 하였다. 표면탄성과 센서 패키지를 자체 제작한 tensile machine에 고정 후 표면탄성과 센서를 인장하면서 네트워크 분석기로 표면탄성과 센서의 주파수를 측정하였다[그림 6]. 표면탄성과 센서에 정밀한 strain 을 인가하기 위해 tensile machine 을 자체 설계 및 제작하였다. 설계는 3D tool 인 Autodesk 사의 inventor 로 진행하였으며, 장비의 크기는 180 x 300 x 60 mm 로 설계 하였다. 이송 거리 및 속도 제어는 자체 제작한 컴퓨터 프로그램에 의해 제어되었다. Actuator 는 1 μm 이하의 정밀한 이송 및 위치 제어를 하기 위하여 3200 pulse / revolution 의 사양의 stepping motor 를 사용하였다. 또한 볼스크류는 1 mm/revolution 의 lead 를 갖는다. 즉, 60 mm 인 PCB 를 stepping motor 로 1 step 이송하면, PCB 는 최소 약 0.3 μm 인장되고, 약 5×10^{-7} %strain이 인장된다. 자체 제작된 tensile machine은 표면탄성과 센서 패키지를 양 지그(jig)에 부착한 후 한 쪽 지그는 고정되고 다른 한 쪽 지그는 stepping motor 에 의해 이동되면서 표면탄성과 센서 패키지가 인장되는 메커니즘을 갖는다. 측정시 이송 속도에 의해 표면탄성과 센서가 외부 환경으로부터 받는 영향을 최소화하기 위하여 0.02 mm/s 로 최소 이송 속도로 실험을 진행하였다. Strain 은 0.2 % 단위로 2.5 % 까지 인가하였다.



(a) 스트레인 게이지



(b) 네트워크 분석기를 이용한 측정 시스템

그림 6 변형률 센서의 측정을 위한 측정 시스템
Fig. 6 Experimental testing setup for the developed sensor

2.4 표면탄성과 변형률 센서 측정 결과

제작된 표면탄성과 센서의 S_{21} 특성을 네트워크 분석기를 통해 측정된 결과 SH파의 경우 (41° YX LiNbO_3) 중심주파수(92.11 MHz)에서 약 -13.8 dB 의 손실이 측정되었으며, 레일리파의 경우 (128° YX LiNbO_3) 중심주파수 (92.02 MHz)에서 약 -15.3 dB 의 손실이 측정되었다. 두 압전기판의 전기기계결합상수의 차이로 인해 삽입손실의 차이가 발생하였지만, 두 압전기판 모두 충분히 낮은 삽입손실이 측정되었다.

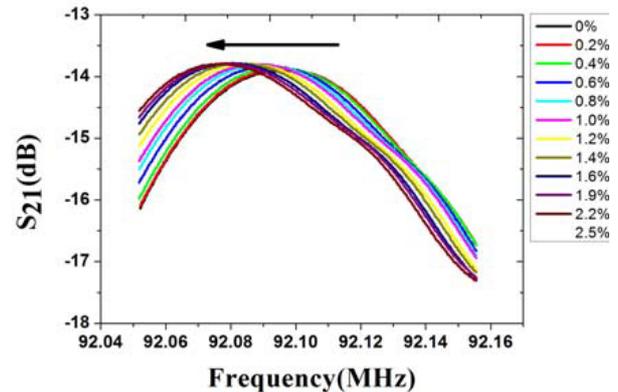


그림 7 SH파에서 인가된 변형력에 따른 중심주파수의 변화
Fig. 7 Measured output frequency shift under various strain in the case of SH wave

제작된 센서를 스트레인 게이지에 장착하여 변형력을 인가하면, 그림 7과 같이 중심주파수의 변화가 관찰된다. 이는 변형력에 의해 표면탄성과의 전파거리가 증가하고, 전파속도가 감소하여 나타난 결과이다. 변형력은 3%의 파괴한계를 고려하여 2.5% 까지 측정하였다.

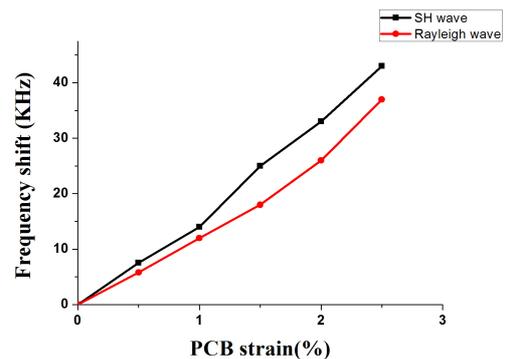


그림 8 표면탄성과 종류에 따른 변형률 센서의 주파수 변화
Fig. 8 Measured output frequency shift depending on different types of SAW

레일리파와 SH파의 변형력에 대한 민감도를 측정하기 위해, 서로 다른 두 압전기판을 사용하여 동일한 실험을 진행하였으며, 그 결과는 그림 8과 같다. SH 파의 경우가 약 15% 높은 감도가 측정되었다. 이는 입자들이 횡파와 종파 두 가지 성분을 지닌 채 전파하는 레일리파에 비해, SH 파는 횡파 성분만이 주로 전파하기 때문이다. 즉 단일 방향의

입자 움직임을 갖는 SH 파가 변형력에 민감하게 반응하게 된다.

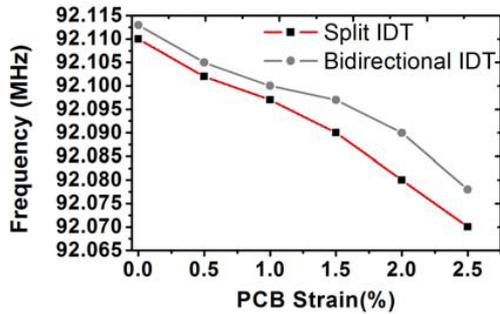


그림 9 IDT 구조에 따른 변형 센서의 주파수 변화
 Fig. 9 Measured output frequency shift depending on different IDT structures in the case of SH wave

변형력에 민감한 SH 파를 이용하여, 다른 IDT 구조를 적용하여 실험하였으며 그 결과는 그림 9와 같다. 일반적인 IDT 구조의 경우 13.6 KHz/% 의 감도가 측정되었으며, split IDT 구조의 경우 17.2 KHz/% 의 감도가 측정되었다. 측정결과를 통해 일반적인 IDT에 비해 Split IDT 구조가 좋은 선형성을 지님을 확인할 수 있다. 이는 일반적인 IDT 구조는 브랙 반사에 의해 삽입손실이 높고, TTS 에 의해 신호가 불안정해지기 때문이다.

3. 결 론

기존의 연구에서 많이 적용된 reflective delay line 구조는 입출력 IDT 가 동일한 one-port 구조로써, IDT 에서 전파된 표면탄성파가 리플렉터에서 반사되어 다시 돌아오는 시간의 차이를 검출하는 방식이다. 기존의 방식은 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째 낮은 전기기계결합상수(3.7%)를 지닌 압전기판을 사용한 점이다. 이는 높은 전기기계결합상수를 지닌 압전기판이 가지는 단점인 TTS 에 의한 불안정한 신호 문제 때문에 사용한 것으로 생각된다. 하지만 strain은 압전기판의 전파 경로를 물리적으로 확장시키기 때문에, 표면탄성파의 전파능력을 결정하는 전기기계결합력이 높은 압전기판(17.2 %)을 사용하여야 한다. 둘째 측정 신호의 에너지 레벨이 매우 낮다. 일반적으로 reflective delay line 구조는 two-port 방식에 비해 표면탄성파가 2배 길이의 전파경로를 가지기 때문에, 측정신호의 에너지 레벨이 약 30 ~ 40 dB 수준으로 매우 낮다.

본 연구에서는 기존의 센서의 문제점을 극복한 Two-port 공진기 구조의 고감도 표면탄성파 기반 변형률 센서를 개발하였다. 외부에서 작용하는 변형력은 압전기판의 밀도를 변화 시켜 전파속도를 감소시키며, 표면탄성파의 전파거리를 확장시킨다. 그 결과 출력 IDT 에서 측정되는 중심주파수가 감소하게 된다. 레일리파와 SH 파 두 종류의 표면탄성파를 이용하여 제작 및 측정된 결과, 단일 성분으로 전파하는 SH 파가 두 성분으로 전파하는 레일리파보다 더 변형률 센서에 적합함을 확인할 수 있었다. 더불어 전기기계결합상수가 높은 압전기판에서 발생하는 TTS에 의한 신호 교란은 split

IDT 구조를 사용하여, 최소화 할 수 있음을 확인하였다. 삽입손실이 낮고, 신호의 안정성이 뛰어난 표면탄성파 소자와 자체 제작한 정밀 스트레인 게이지를 사용하여 측정된 감도는 기존의 보고된 표면탄성파 기반 변형률 센서보다 약 5배 이상의 높은 감도를 보였다 [8]. 일반적으로 표면탄성파 소자의 감도는 중심주파수에 비례한다. 그 이유는 단일파가 가지는 에너지 레벨이 파장이 짧아질수록, 즉 주파수가 높아질수록 높기 때문이다(파장 $\lambda = V_s/f_0$). 기존의 연구가 200 MHz 대역에서 이루어진 반면, 본 연구는 90 MHz 대역에서 이루어진 점을 볼 때 괄목할 만한 결과이다. 본 연구를 바탕으로 향후 무선 통신이 가능한 변형률 센서를 개발하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2010-0000857)과 지식경제부, 산업 원천 기술 개발 산업의 일환인 “인텔리전트 타이어 시스템 개발”의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] Schedin E and Melander A. “The evaluation of large strains from industrial sheet metal stampings with a square grid”, J. Appl. Met. Working, 4, 143 - 56, 1986.
- [2] Claus R O, Gunther M F, Wang A and Murphy K A, “Extrinsic Fabry - Perot sensor for strain and crack opening displacement measurements from - 200 to 900 °C”. Smart Mater. Struct., 1, 237 - 42, 1992.
- [3] Liu T and Fernando G F, “A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry - Perot sensor system for strain and displacement measurements”, Rev. Sci. Instrum., 71, 1275 - 8, 2000.
- [4] R, Matsuzaki, A, Todoroki, “Wireless flexible capacitive sensor based on ultra-flexible epoxy resin for strain measurement of automobile tires,” Sensors and Actuators, A 140, 32-42, 2007.
- [5] R, Matsuzaki, A, Todoroki, “Wireless strain monitoring of tires using electrical capacitance changes with an oscillating circuit,” Sensors and Actuators, A 119, 323-331, 2005.
- [6] V.A. Kalinin, “Passive wireless strain and temperature sensors based on SAW devices”, Proc. of IEEE Radio & Wireless Conference, 187-190, 2004
- [7] A, Pohl, “The “Intelligent Tire” Utilizing Passive SAW Sensors—Measurement of Tire Friction,” IEEE Instrumentation and Measurement, 48, 1041-1046, 1999.
- [8] T.Nomura, T. Kosaka, A. Saitoh, S. Furukawa. “Passive Strain Sensor using SH-SAW Refelctive Delay line”, Ferroelectrics, 333, 121-129, 2006.
- [9] W. Buff, F. Plath, O. Schmeckeber, M. Rusko, T. Vandahl, H. Luck, F. Moller and D. C. Malocha,

- "Remote sensor system using passive SAW sensors", 1994 IEEE Ultrason. Symp., pp. 585-588, 1994.
- [10] J. Beckley, V. Kalinin, M. Lee, K. Voliansky, "Noncontact torque sensors based on SAW resonators", 2002 IEEE International Frequency Control Symp., pp. 202-213, May 2002.
- [11] P.V. Wright, "Analysis and design of low-loss SAW devices with internal reflections using coupling-of-modes theory", IEEE Ultrasonics Symposium, 141-152, 1998.
- [12] Ken-ya Hashimoto, "Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications", Springer, pp. 27-30, 2000
- [13] Supriyo Datta, "Surface Acoustic Wave Devices ", Prentice-Hall Publishing , pp. 98-110, 1986

저 자 소 개



오 해 관 (吳海寬)

2007년 아주대학교 전자공학부 졸업.
 2007년 ~ 2009년 동 대학원 석사.
 2009년 ~ 동 대학원 박사 과정.
 주관심분야 : SAW sensor
 Tel : 031-219-2488
 Fax : 031-212-9531
 E-mail : nasahu@ajou.ac.kr



황 우 진 (黃禹珍)

2009년 2월 서울과학기술대 기계설계 자동화 공학부 졸업
 2009년 3월 ~ 동 대학원 석사과정.
 주관심분야 : MEMS, SAW sensor, Flexible display, thin film material
 Tel : 02-972-1102
 E-mail : hwj3237@naver.com



은 경 태 (殷景泰)

2010년 2월 서울과학기술대 기계설계 자동화 공학부 졸업
 2010년 3월 ~ 동 대학원 석사과정.
 주관심분야 : MEMS, SAW sensor, Flexible display, thin film material
 Tel : 02-972-1102
 E-mail : kteun@seoultech.ac.kr



좌 성 훈 (左聖薰)

1983년 한양대 기계공학부 졸업.
 1985년 서울대학교 기계공학과 석사 졸업
 1993년 University of Michigan at Ann Arbor 기계공학과 박사 졸업
 현재 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원 주임교수.

주관심분야 : MEMS, 구조해석, 나노 공정 및 생산 시스템, MEMS 및 반도체 패키징, 센서, 신뢰성 및 고장 분석
 Tel : 02-970-6593
 E-mail : shchoa@seoultech.ac.kr



이 기 근 (李基根)

1988년 광운대학교 전자 학사 졸업
 1993년 University of Florida 재료 석사 졸업.
 2001년 Arizona State University 전자 박사 졸업.
 현재 아주대학교 전자공학부 부교수.

주관심분야 : SAW 센서, Solar cell, Energy harvester
 Tel : 031-219-1848
 Fax : 031-212-9531
 E-mail : keekeun@ajou.ac.kr



양 상 식 (梁翔植)

1980년 서울대학교 기계공학과 학사 졸업.
 1983년 서울대학교 기계공학과 석사 졸업.
 1988년 University of California at Berkeley 기계공학과 박사 졸업.
 현재 아주대학교 전자공학부 교수.

주관심분야 : 마이크로 소자의 Mechanism 과 Actuation, Motion Control
 Tel : 031-219-2481
 Fax : 031-212-9531
 E-mail : ssyang@ajou.ac.kr