레이리파 기반의 고감도 변형률 센서에 관한 연구

A Study on a Highly Sensitive Strain Sensor based on Rayleigh Wave

이 기 정* · 조 민 옥* · Fu Chen* · 은 경 태** · 오 해 관*** · 좌 성 훈** · 양 상 식†

(Ki Jung Lee · Minuk Jo · Chen Fu · Kyoungtae Eun · Haekwan Oh · Sung-Hoon Choa · Sang Sik Yang)

Abstract - Piezoresistive-type, capacitive-type, and optical-type sensors have mainly been used for measuring a strain. However, in building a sensor network for remote monitoring using these conventional sensors there are disadvantages such as the complexity of a measuring system including wireless communication circuitry and high cost. In this paper, we demonstrate a highly-sensitive surface acoustic wave (SAW) strain sensor which is advantageous to harsh environments and wireless network. We designed and fabricated the SAW strain sensor. The SAW strain sensor attached on a specimen was tested with a tensile tester. The strain on the sensor surface was measured with a commercial strain gauge and compared with that obtained from strain analysis. The central frequency shift of the SAW sensor was measured with a network analyzer. The sensitivity of the SAW strain sensor is 134 Hz/ $\mu\epsilon$ which is high compared to previous results.

Key Words : Surface acoustic wave, Strain sensor, YX-LiNbO₃, Finite element method

1. 서 론

각종 센서 및 기기 간의 네트워크가 가능해지고 광대역 통신망 구축과 통신 기술이 발전함에 따라 주변에서 쉽게 유비쿼터스 시스템을 접할 수 있다. 특히 센서 네트워크 시스템은 원격으로 기상 관측을 하거나 지구의 지각 활동 및 화산 활동 예측을 위한 실시간 마그마 관측 등의 극한 환경 모니터링에 적용하면 발생할 수 있는 자연 재해로부터 신속히 대응할 수 있다. 이러한 센서 네트워크 시스템은 다양한 분야에 응용될 수 있으며 지능화 사회로 발전하는 핵심기술이다. 물리 센서 기반의 시스템을 Structural Health Monitoring(SHM)에 적용하면 상하수도 및 에너지 관계 시설 등의 사회 기반 시설물의 균열이나 변형을 실시간 모니터링을 통해 이로 인해 발생할 수 있는 재난으로부터 대비가 가능하다. 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 지능형 타이어 센서는 실시간으로 타이어의 압력 및 변형, 하중에 대한 정보를 운전자나 차량의 트랙션 컨트롤 시스템(traction control system) 등에 제공해 효과적인 차량의 제시제어를 통해 사고 예방을 가능하게 한다[1-4]. 하지만 이러한 시스템은 접근성이 어렵거나 극한 조건을 모니터링하는 데 목적을 두고 있어 시스템의 개발에는 우선적으로 앞선 조건에서

도 동작이 가능한 센서 기술 개발이 선행되어야 한다.

물리량 측정을 위한 센서 중 변형률 센서는 압저항 방식이나 고무수지를 이용한 정전용량형 변형률 센서 등이 주로 사용되고 있다. 그러나 기존 센서들은 부가적인 측정 시스템을 필요로 하고 구동이 복잡하기 때문에 원격 모니터링을 위한 센서 네트워크를 구축하는데 한계가 있다. 또한 광학 기반의 변형률 센서는 시스템을 구축하는데 있어 비교적 간단하고 장거리 감지가 가능하며 복잡도가 낮지만 시스템을 구축하는데 있어 고비용이 발생한다[5-9]. 따라서 극한 환경에서도 동작이 가능하고, 무전원 방식의 무선 네트워크 구축이 가능하며 반도체 공정을 이용하여 저비용 대량생산이 가능한 표면탄성과 기반의 변형률 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Reflective delay line 구조를 적용한 표면탄성과 기반의 변형률 센서는 수식적 해석을 통해 가능성을 제시하였지만 실제 센서를 제작해 구현하는 데는 성공하지 못했고[10], 이를 기반으로 T. Nomura는 무전원 방식의 변형률 센서를 캔틸레버를 이용해 실험하였으나 25 Hz/ $\mu\epsilon$ 의 매우 낮은 감도를 얻는데 그쳤다[11]. 또한 A. Paul은 표면탄성과 기반의 변형률 센서를 이용해 지면과 타이어 간의 마찰력을 측정하려 했고 지능형 타이어용에 적용이 가능하다는 점에서 의의가 있다[12]. H. Oh는 고감도의 SH(Shear horizontal) 표면탄성과 기반 변형률 센서의 특성 시험을 위해 인쇄회로용 기판을 이용한 인장 시험 장치를 구현하였다[13]. 그러나 그 시험에서는 표면탄성과 기반의 변형률 대신 인쇄회로용 기판의 변형률에 대한 센서의 중심주파수 변화만을 묘사하는 한계를 보여주고 있다.

본 논문에서는 표면탄성과 변형률 센서를 설계하고 이 센서가 부착되는 인장시험용 시편에 인장력이 인가될 때 발생하는 표면탄성과 변형률 센서 표면의 변형률을 유한요소해석법으로 계산한다. 또 표면탄성과 변형률 센서를 제작하여 인장시험용 시편에 부착하고 시편에 인장력을 가하면서 센

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.

** Nano-IT Fusion Program, Seoul National University of Science & Technology, Korea

*** Convergence Sensor Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.

E-mail : ssyang@ajou.ac.kr

Received : January 21, 2014; Accepted : March 19, 2014

그림 1 표면탄성과 변형률 센서의 제작 공정도
Fig. 1 Fabrication process of the SAW strain sensor

서의 중심주파수를 측정한다. 인장력에 의해 실제 표면탄성과 센서 표면에 발생하는 변형률을 스트레인 게이지로 측정하고 이 측정값을 계산 결과와 비교한다. 특히 이전 논문에서는 시편의 연신률에 따른 센서의 특성을 보여주었으나 본 논문에서는 실제 표면탄성과 센서 표면의 변형률에 따른 센서의 특성을 나타낸다.

2. 표면탄성과 변형률 센서의 설계

압전 기판 또는 압전 박막에 빗살 모양의 Interdigital Transducer (IDT)를 형성하여 이에 전기적인 신호를 인가하면 표면탄성과가 생성되고, 표면탄성과는 전파 방향과 생성 위치에 따라 레일리파, SH(Shear-Horizontal)파, STW(surface transverse wave), Leaky파 등으로 나눌 수 있다. 본 연구에서 사용한 128° YX-LiNbO₃ 기판은 다른 재료에 비하여 비교적 큰 기계결합상수 ($K^2 = 5.56\%$)와 높은 전파속도(3992 m/s)의 특성을 갖고 레일리파를 생성한다. 기계결합상수가 크면 주파수 응답의 손실이 작고, 전파속도가 크면 IDT의 과장을 크게 할 수 있기 때문에 IDT 제작 공정이 수월한 장점이 있다. IDT는 양방향성(bidirectional) 형태로 정하고 임피던스 매칭과 높은 이득 구현, TTE(triple transit echo) 등을 고려하여 COM(couple of modes) 모델링 방법으로 최적화하였다[13]. 센서의 중심주파수를 250 MHz로 설정하고 입출력 IDT의 핑거 피치(λ)는 $16\ \mu\text{m}$ 로 설계하였으며, 핑거수는 50 쌍으로 하였다.

일반적으로, 표면탄성과 공진기의 중심주파수 f_c 는 다음과 같이 정의된다[14].

$$f_c = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

여기서 v , λ 는 각각 압전 기판의 표면탄성과 속도와 핑거 피치이며, 각각을 변형률 ϵ 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$\lambda(\epsilon) = (1 + \epsilon)\lambda_0 \quad (2)$$

$$v(\epsilon) = \sqrt{\frac{c(\epsilon)}{\rho(\epsilon)}} \quad (3)$$

여기서, c 와 ρ 는 각각 압전기판의 강성계수와 밀도이다.

그림 2 인쇄회로용 기판에 부착된 표면탄성과 센서
Fig. 2 The SAW strain sensor attached to the PCB

밀도는 변형률의 함수로 식(4)와 같다.

$$\rho(\epsilon) = \frac{\rho(0)}{(1 + \epsilon)(1 - \nu\epsilon)^2} \quad (4)$$

여기서, ν 는 압전기판의 포아송비이다. 압전기판은 비등방성 물질이기 때문에, 방향에 따라 다른 포아송비를 갖지만 해석을 단순화하기 위해 등방성이라 가정하였다. 또 압전기판의 변형률이 작은 탄성영역에서는 $c(\epsilon) = c_0$ 로 가정할 수 있다[15]. 이 때, 식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$f_c(\epsilon) = \sqrt{\frac{c}{\rho(\epsilon)}} \times \frac{1}{\lambda(\epsilon)} \quad (5)$$

따라서, 중심주파수는 변형률의 함수가 되고, 식 (5)의 중심주파수를 변형률에 대해 미분하여 정리하고, 감도 S 를 변형률에 대한 중심주파수의 변화로 정의하면 식 (6)과 같다.

$$S = \frac{\Delta f_c}{\epsilon} = \frac{df_c(0)}{d\epsilon} = -\frac{f_{c0}}{2}(1 + 2\nu) \quad (6)$$

따라서 표면탄성과 공진기의 중심주파수를 측정하면 변형률을 알 수 있다.

3. 표면탄성과 센서와 시편의 제작

그림 1은 표면탄성과 센서의 제작 공정도이며, 표면탄성과 센서는 한 번의 사진식각 공정과 열증착법을 이용하여, 제작하였다. 인장시험용 시편은 인장시험기로 인가하는 하중이 센서에 균일하게 전달되는 전형적인 시편 형태로 인쇄회로용 기판을 제작하였다. 제작된 인쇄회로용 기판과 표면탄성과 변형률 센서는 박리를 최소화할 수 있도록 접착성이 강한 Loctite 401을 이용해 접착하여 그림 2와 같은 인장시험용 시편을 완성하였다. 제작된 센서의 크기는 $7 \times 6\ \text{mm}^2$ 이며, 센서가 부착된 인장시험용 시편은 $70 \times 20\ \text{mm}^2$ 로 기판 위에 센서의 전기적 특성을 측정할 수 있도록 금을 증착하였다. 제작된 센서를 네트워크분석기(Agilent 8753ES)와 연결하여 측정하기 위해 RF 커넥터를 시편에 부착하였다. 제작된 표면탄성과 센서의 S_{21} 특성을 측정한 결과 약 248 MHz의 중심주파수에서 약 13.8 dB의 낮은 삽입손실이 발생하는 것을 확인하였다.

그림 3 인장시험용 시편 (a) 시편의 단면 (b) 표면탄성과 센서 표면의 변형

Fig. 3 The specimen for a tensile test (a) the cross section of a specimen (b) the scheme of the surface deformation of a SAW sensor

4. 변형률 센서의 변형 해석

그림 3은 본 논문에서 사용된 표면탄성과 변형률 센서 인장 시험용 시편과 그 변형률을 보여준다. 인장 시험기로 인장 시험용 시편에 인장 하중을 가하면, 그림 3과 같이 시편이 늘어나고 시편에 접촉체로 부착되어 있는 표면탄성과 센서가 변형된다. 실험에 앞서, 유한요소해석 프로그램인 COMSOL을 이용하여 시편과 센서 표면의 변형을 모사하였다. 유한요소해석을 위한 3차원 모델은 그림 4와 같이 인쇄회로용 기판과 변형률 센서인 압전 기관으로 구성되어 있으며, 각각의 탄성계수는 표 1과 같다. 시뮬레이션에서 인장 시험의 조건과 동일하도록 시편인 인쇄회로용 기판의 양쪽 단은 회전이 불가능하도록 경계조건을 주고, 한쪽 단은 고정하고 다른 쪽 단에는 변위를 인가하여 변형률 센서인 압전 기관의 표면에 발생하는 변형률을 계산하였다. 그림 4(b)는 시편의 연신율을 0.21 % 인장하였을 때, 압전 기관 표면의 변형을 보여주고 있다. 시편이 인장되면 압전기관의 표면은 압축되는 것을 알 수 있다. 이는 본 논문의 시편과 같이 탄성 계수의 차이가 큰 두 탄성체로 구성된 구조물에서 시편

표 1 압전 기관과 인쇄회로용 기판의 탄성계수

Table 1 Elastic constants of the piezoelectric substrate and the PCB

물질	탄성계수 (GPa)
압전기관 (128° YX-LiNbO ₃)	$\begin{bmatrix} 203 & 70 & 58 & 13 & 0.0 & 0.0 \\ 70 & 194 & 91 & 9 & 0.0 & 0.0 \\ 58 & 75 & 245 & 8.6 & 0.0 & 0.0 \\ 13 & -9 & 8.6 & 75.8 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 56.9 & -5 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -5 & 78.1 \end{bmatrix}$
인쇄회로용 기판 (FR-4)	24

그림 4 유한요소해석 (a) 모델의 기하구조 (b) 시편의 0.21% 인장시 압전기관 표면의 변형률

Fig. 4 FEM analysis (a) the model geometry (b) the surface strain of piezoelectric substrate at 0.21% elongation of the specimen

에 인장력을 인가하면 압전 기관이 부착된 부분에서 압전 기관이 인쇄회로용 기판의 인장을 방해하면서 부분적인 굽힘 변형이 발생하고 이에 따라 접합면의 반대쪽에 있는 압전 기관 표면은 수축하게 되는 것으로 해석된다. 반대로 시편에 압축 하중을 인가하면 압전 기관 표면에 인장 변형이 발생할 것을 예상할 수 있다. 그림 5는 시편의 연신율을 0%에서 0.21%까지 0.03% 씩 증가시키면서 인가하였을 때 계산된 압전기관 표면의 변형률이다. 시편이 0.21% 만큼 늘어나면, 변형률 센서 표면에 742 $\mu\epsilon$ 의 압축변형률이 발생하며, 시편이 0.01%만큼 인장되면, 센서 표면에는 35 $\mu\epsilon$ 의 압축변형률 발생하는 것을 알 수 있다.

5. 변형률 센서 특성 실험

그림 6은 변형률 센서의 특성 분석을 위한 실험 장치도이며, 실험은 다음과 같이 두 가지 형태로 진행하였다. 첫째로, 압전 기관 표면과 인쇄회로용 기판 표면에 각각 상용화된 스트레인 게이지를 부착해 인장 하중을 가하여 측정을 하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 둘째로, 인장 하중을 가하며 센서에 연결된 네트워크분석기로 S_{21} 의 주파수 응답

그림 5 시편의 연신률에 따른 압전 기관의 표면 변형률 해석 결과

Fig. 5 Simulation results of the surface strain of the piezoelectric substrate versus the elongation of the specimen

그림 6 표면탄성과 기반 변형률 센서의 특성 실험 장치

Fig. 6 The test setup for the characterization of the SAW strain sensor

그림 7 (a) 표면탄성과 변형률 센서가 부착된 인장 시험용 시편 (b) A-A' 단면도

Fig. 7 (a) The specimen with the SAW strain sensor (b) the cross sectional view of A-A'

특성을 측정하였다. 압축 하중을 인가하는 경우, 실험 시편에 방향성이 불규칙한 좌굴(buckling)이 발생하여 인장 하중을 이용해 실험을 진행하였다.

5.1 스트레인 게이지를 이용한 실험

스트레인 게이지(N11-FA-1-350-11, Showa)와 스트레인 앰프 (AM310, Cozy)를 이용하여 인장 시험기로 인장 하중을 인가하였을 때, 시편의 변형을 관찰하였다. 스트레인 앰프를 이용하여 1 V의 브리지 정전압을 인가하였고, 1000 배의 증폭률이 되도록 설정하여 2 mV/ $\mu\epsilon$ 의 감도를 갖도록 하였으며, 그림 7과 같이 두 개의 스트레인 게이지를 각각 센서의 표면과 인쇄회로용 기판의 표면에 부착하여 각각의 변형률을 측정하였다. 그림 8은 시편의 연신률을 0 %에서 0.21 %까지 0.03 % 씩 증가시키면서 인가하였을 때, 두 개의 스트레인 게이지로 측정된 센서의 상부 표면과 인쇄회로용 기판의 하부 표면에서의 변형률이다. 시편에 인장력을 인가하였을 때, 해석 결과와 마찬가지로 인쇄회로용 기판은 인장 변형이 발생하고 표면탄성과 변형률 센서의 표면에서는 압축 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 인쇄회로용 기판의 연신률이 0.21 %일 때, 변형률 센서 표면과 인쇄회로용 기판 표면의 변형률은 각각 -713 $\mu\epsilon$ 과 2304 $\mu\epsilon$ 으로 측정되었다. 시편의 연신률에 따른 변형률 센서 표면과 인쇄회로용 기판 표면의 변형률은 선형적인 관계를 보이며 그

그림 8 시편의 연신률에 따른 센서의 표면과 인쇄회로용 기판 표면의 변형률 (---: 시뮬레이션 결과)

Fig. 8 Experimental results of measured surface strain of the sensor and the PCB versus the elongation of the specimen (dash: simulation results)

기울기는 각각 -3400 $\mu\epsilon/\%$ 과 11066 $\mu\epsilon/\%$ 이다. 측정 결과와 해석 결과를 비교하면, 측정된 변형률은 모두 시편의 인장 연신률에 비례하며, 측정 결과와 해석 결과의 차이는 센서 표면의 경우 4%이며, 인쇄회로용 기판 표면의 경우 7%이다. 유한요소해석 모델의 경우에는 스트레인 게이지가 포함되지 않았으며, 인쇄회로용 기판과 압전 기판 사이의 접착제 층, 그리고 압전 기판과 인쇄회로용 기판에 스트레인 게이지를 부착하기 위한 접착제 층도 고려되지 않았기 때문에 차이가 발생한 것으로 보인다. 또, 그림 4(b)에 나타나 있는 결과에서 볼 수 있듯이, 센서 표면의 변형률의 크기가 센서 내의 위치에 따라 다르고, 인쇄회로용 기판의 변형률도 위치에 따라 다름을 해석 결과에서 확인하였다. 즉, 측정값은 스트레인 게이지 표면에 분포된 변형률의 평균값이며, 해석에서 얻은 변형률은 평균값이 아닌 최대값이기 때문에 차이가 발생할 수 밖에 없다. 또한, 인장 시험기를 이용한 실험 중, 시편과 인장기에 연결된 지그 사이에서 발생한 슬립(slip) 현상으로 인해 변형률 측정값이 미세하게 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다. 시편의 연신률이 커질수록 슬립 현상이 증가하기 때문에 연신률이 증가할수록 측정 결과와 해석 결과의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다.

5.2 표면탄성과 센서의 특성 분석

5.1절의 실험에서 센서 표면의 변형률이 작은 영역에서는 탄성변형이 발생함을 확인하였으며, 이를 통해 식 (6)과 같이 중심주파수를 변형률의 함수로 표현할 수 있는 것을 알 수 있다. 인장 시험기로 시편에 인장 하중을 가하면서 표면탄성과 변형률 센서의 특성을 분석하였다. 센서에 따라 다소 차이는 있으나 시편의 연신률이 0.21 % 보다 높게 인가 되면 변형률 센서가 파괴되었다. 특성 분석을 위하여 시편의 연신률을 0 %에서 0.21 %까지 0.03 % 씩 증가시키면서 인장력을 인가하였고, 네트워크분석기로 S_{21} 의 주파수 응답 특성을 측정하였다.

그림 9는 시편의 연신률에 따른 변형률 센서의 S_{21} 주파수 응답 특성을 보여주고 있다. 연신률이 증가하면 변형률

그림 9 시편의 연신률에 따른 센서의 S₂₁ 주파수 응답

Fig. 9 S₂₁ frequency responses of the sensor for various elongations of the specimen

센서의 중심주파수도 증가한다. 이는 시편에 인장 하중이 인가되면 압전 기관의 표면에 압축 변형이 발생하고, 이로 인해 센서의 IDT 핑거 피치가 감소하고 밀도가 변화하므로, 식 (5)와 (6)으로 중심주파수 증가가 설명된다. 그림 10은 실험을 통해 얻은 시편의 연신률과 압전 기관 표면의 변형률 관계를 이용하여 센서의 변형률에 따른 센서의 중심주파수 변화량을 나타낸 것으로 5회 반복하여 시험한 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이, 센서 표면의 압축 변형률이 713 $\mu\epsilon$ 일 때, 105 kHz의 중심주파수 증가가 관찰되었으며, -134 Hz/ $\mu\epsilon$ 의 우수한 감도와 R^2 이 약 0.96으로 좋은 선형성을 보여준다. 주파수 응답 특성 실험시, 네트워크분석기의 안정성의 한계로 중심주파수 변동량이 수 kHz 정도인 것을 관찰하였다. 센서의 감도로 환산하면, 이 중심 주파수 변동은 수십 $\mu\epsilon$ 의 변형률에 해당한다. 안정도가 높은 네트워크 분석기를 사용하고 반복정밀도가 높은 인장시험기를 사용하면 더 높은 선형성을 갖는 측정 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 표 2는 이미 보고된 표면탄성과 변형률 센서와 본 논문의 변형률 센서의 특성을 비교한 것이다. 일반적으로 표면탄성을 사용하는 센서의 경우, 센서의 감도는 중심주파수에 비례하게 되며, 단일 방향의 입자 움직임을 갖는 SH 파가 레일리파보다 변형력에 민감하다[13]. 표 2에서 볼 수 있듯이, 본 논문에서 사용된 변형률 센서는 레일리파를 사용함에도 불구하고 T. Nomura가 보고한 변형률 센서보다 높은 감도를 보여주고 있는데 이는 중심주파수가 높기 때문이다. 또, Leaky 표면탄성과에 비하여 레일리파는 표면에 에너지가 집중되어 전파되기 때문에 센서의 감도가 주로 표

표 1 변형률 센서의 특성 비교

Table 1 Comparison between the developed SAW strain sensor and other SAW strain sensors

저자	구조	압전기관	표면탄성과 종류	중심주파수	감도
T. Nomura <i>et al.</i> [11]	Reflective delay line	36° YX LiTaO ₃	SH SAW	30 MHz	25 Hz/ $\mu\epsilon$
V.V Varadan <i>et al.</i> [16]	Reflective delay line	YZ LiNbO ₃	Leaky SAW	915 MHz	1.1×10^{-3} deg/ $\mu\epsilon$
This paper	Delay line	128° YX LiNbO ₃	Rayleigh SAW	250 MHz	134 Hz/ $\mu\epsilon$

그림 10 압전기관 표면의 변형률에 따른 센서의 중심주파수 변화

Fig. 10 Frequency shifts of the sensor depending on the surface strain of the piezoelectric substrate

면의 변형률에 의해 결정되는 장점이 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 레일리파 기반의 공진기 구조의 표면탄성과 소자를 사용하여 고감도 변형 센서를 개발하였다. 유한 요소 해석을 이용해 제작된 센서의 동작 특성을 예상 및 계산하였으며, 상용화된 스트레인 게이지를 사용한 실험을 통해 검증하였다. 실험결과 시편에 인장 하중을 인가하면 압전 기관의 표면에 압축 변형이 발생하여 IDT 핑거 피치와 밀도의 변화로 중심주파수가 증가하는 것이 확인되었다. 제작된 변형 센서는 134 Hz/ $\mu\epsilon$ 의 고감도와 높은 선형성을 보여주었다. 표면탄성과 기반의 변형 센서는 중심주파수에 따라 변형에 대한 감도가 달라지기 때문에 더 높은 중심주파수를 사용하게 되면 더 좋은 감도의 센서를 구현할 수 있을 것이라 예상되며, 실험 장비를 개선하여 인장 변형 외에 압축 변형에 대한 실험을 진행할 예정이다. 또한 본 연구를 바탕으로 One-port 지연선 공진기 구조를 이용해 무선 통신용 고감도 변형 센서를 연구하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2009-0081200).

References

- [1] A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer and J. White, "Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits," ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 253-259, 1992.
- [2] F.N. Najm, "A Survey of Power Estimation Techniques in VLSI Circuits," IEEE Trans. on VLSI Systems, pp. 446-455, Dec. 1994.
- [3] J. Monteiro, S. Devadas, and B. Lin, "A Methodology for Efficient Estimation of Switching Activity in Sequential Logic Circuits," ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 12-17, 1994.
- [4] R. Burch, F. N. Najm, P. Yang, and T. N. Trick, "A Monte Carlo Approach for Power Estimation," IEEE Trans. on VLSI systems, vol. 1, No. 1, pp.63-71, March 1993.
- [5] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.
- [6] E. Schedin and A. Melander, "The evaluation of large strains from industrial sheet metal stampings with a square grid", J. Appl. Met. Working, 4, 143 (1986).
- [7] R.O. Claus, M.F. Gunther, A. Wang, and K.A. Murphy, "Extrinsic Fabry - Perot sensor for strain and crack opening displacement measurements from - 200 to 900 °C". Smart Mater. Struct., 1, 237 (1992).
- [8] T. Liu and G.F. Fernando, "A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry - Perot sensor system for strain and displacement measurements", Rev. Sci. Instrum., 71, 1275 (2000).
- [9] J. Lee, J.-O. Kim, and S.-J. Heo, "Development of Tire Vertical Force Estimation Algorithm in Real-time using Tire Inner Surface Deformation", Trans. KSAE, 21, 3, 142 (2013).
- [10] A. Garcia-alonso, J. Garcia, E. Castano, I. Obieta, and F. Glacia, "Strain sensitivity and temperature influence on sputtered thin films for piezoresistive sensors." Sens. Actuators A 37, 784 (1993).
- [11] R. Matsuzaki, A. Todoroki, "Wireless strain monitoring of tires using electrical capacitance changes with an oscillating circuit," Sens. Actuators, A 119, 323 (2005).
- [12] J. Villatoro, V. Minkovich, and D. Monzon-Hernandez, "Temperature-independent strain sensor made from tapered holey optical fiber", Opt. Lett. 31, 305 (2006).
- [13] R. Matsuzaki, A. Todoroki, "Wireless flexible capacitive sensor based on ultra-flexible epoxy resin for strain measurement of automobile tires," Sens. Actuators, A 140, 32 (2007).
- [14] B. Han and J. Ou, "Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor", Sens. Actuators A 138, 24 (2007).
- [15] V.A. Kalinin, "Passive wireless strain and temperature sensors based on SAW devices", Proc. of IEEE RWS, 187 (2004).
- [16] T. Nomura, T. Kosaka, A. Saitoh, S. Furukawa. "Passive Strain Sensor using SH-SAW Refelctive Delay line", Ferroelectrics, 333, 121 (2006).
- [17] A. Pohl, "The "Intelligent Tire" Utilizing Passive SAW Sensors-Measurement of Tire Friction," IEEE Trans. Instrum. Meas. 48, 1041 (1999).
- [18] H. Oh, K. Lee, K. Eun, S. H. Choa, S. S. Yang, "Development of a high-sensitivity strain measurement system based on a SH SAW sensor", J. Micromech. Microeng. 22, 025002 (2012).
- [19] S. Datta, 1986, Surface Acoustic Wave Devices (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall).
- [20] C.R.I. Clayton, "Stiffness at small strain: research and practice", Géotechnique, 61, 5 (2011).
- [21] V.V. Varadan, V.K. Varadan, X. Bao, S. Ramanathan, and D. Piscotty, "Wireless passive IDT strain microsensor", Smart Mater. Struct. 6, 745 (1997).

저 자 소 개

이 기 정 (李 基 禎)

2007년 아주대학교 전자공학부 졸업.
2009년 동 대학원 전자공학과 석사 졸업.
현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.

조 민 옥 (趙 珉 旭)

2012년 아주대학교 전자공학부 졸업.
2014년 동 대학원 전자공학과 석사 졸업.

Fu Chen (付 琛)

2005년 China University of Geosciences Geophysics과 졸업. 2011년 Institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences 석박사 졸업. 현재 아주대학교 전자공학과 Post doc.

은 경 태 (殷 景 泰)

2010년 서울과학기술대학교 기계설계자
동화공학부 졸업. 2012년 동 대학교 NID
융합기술대학원 나노 IT 융합 프로그램
학과 석사 졸업. 현재 동 대학원 나노 IT
융합 프로그램 학과 박사과정.

오 해 관 (吳 海 寬)

2007년 아주대학교 전자공학부 졸업.
2009년 동 대학원 전자공학과 석사 졸업.
2013년 동 대학원 전자공학과 박사 졸업.
현재 전자부품연구원 차세대융합센서연
구센터 재직.

좌 성 훈 (左 聖 薰)

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

양 상 식 (梁 翔 植)

1980년 서울대학교 공대 기계공학과 졸
업. 1983년 동 대학원 기계공학과 석사
졸업. 1988년 U. C. Berkeley 기계공학과
박사 졸업. New Jersey Institute of
Technology 연구 조교수. 현재 아주대학
교 전자공학부 교수.