

표면탄성파를 이용한 무전원/무선 압력센서 및 Touch-down 특성에 관한 연구

박진일\*, 오재근, 이재운, 최범규  
서강대학교 기계공학과

A study on the characteristics of touch-down and passive/wireless pressure sensors using surface acoustic wave

Jun-il Park\*, Jae-geun Oh, Jae-yun Lee, Bumkyoo Choi  
Department of Mechanical Engineering, Sogang University

**Abstract** - 본 논문은 TPMS(Tire Pressure Monitoring System) 개발을 목적으로 압력센서를 무전원/무선 표면탄성파 센서를 이용하여 측정할 수 있는 방법을 연구한 것이다. Touch mode 방식의 압력센서의 경우 Touch-down 되었을 때 정전용량은 큰 변화를 가지며 이후 압력의 증가에 대해 선형적으로 증가한다는 것을 이론적인 계산을 통해서 확인하였다. 또한 이와 같은 특성은 표면탄성파 센서의 응답 주파수의 변화를 통해 측정이 가능하다는 이론적인 모델링을 제시하였다.

인해 보았다.

2. 본 론

2.1 SAW 무전원/무선 Transponder

표면 탄성파를 이용한 소자는 무선 송수신 장치의 대역통과 필터, 공진기, Delay-line 등 많은 부분에서 상용화되어 있다. 일반적으로 표면 탄성파는 압전 기관(LiNbO<sub>3</sub> 등)에 AC 전압이 인가되면 인가전압의 주파수 특성에 따라 Rayleigh wave가 형성되어 표면에서의 기계적 진동을 일으키게 된다. 표면 탄성파를 형성시키기 위해서는 압전 기관의 압전 및 역압전 특성과 더불어 특정 주파수 대역에서 Rayleigh wave를 형성시킬 수 있도록 Comb 형태의 전극(Inter Digital Transducer: IDT)을 구성하여야 한다.

표면탄성파 센서는 압전기관 위에 무선 송수신 Transponder IDT와 반사판 IDT로 이루어져 있다. 외부에서 무선 입력 펄스를 인가하였을 때 무선 Transponder IDT에 도달한 전파는 표면 탄성파를 발생시키고, 이때 발생한 표면 탄성파는 압전 기관 위에서 형성되게 된다. 외부 입력 펄스에 의해 형성된 표면파는 반사판 IDT쪽으로 전파가 되고 각각의 반사판 IDT에서는 IDT의 입력 임피던스에 따라 부분적으로 반사가 일어나게 되며(식(1)), 이 반사파의 진폭, 주파수, 상의 변화, 지연 시간 등을 측정해 여러 가지 정보를 얻을 수 있게 된다.

1. 서 론

지능형 센서 시스템의 구성에 있어 무선화 경향은 유선 센서가 갖고 있는 장착 위치의 제한성과 더불어 센서 네트워크를 추구하고자 하는 기술 조류에 맞추어 현재는 이에 대한 급속한 성장이 이루어지고 있다. 특히, MEMS 분야에서 이에 대한 연구는 Michigan 대학의 연구진에 의해 전자기 유도결합에 의한 무선 센서[1]의 연구와 더불어 인체 및 환경 모니터링 센서 개발을 위한 연구가 진행 중이다. 그러나, 센서의 무선화와 더불어 소형 경량화를 가로막는 주요한 원인이 되고 있는 전원 공급의 문제는 지능형 센서 발달에 장애가 되고 있다. 즉, 센서의 전원을 공급하기 위해 사용하는 전지와 같은 장치는 수명이 유한하므로 지속적인 감지를 해야 하는 분야에서는 사용이 제한적일 수밖에 없다. 또한, 기존 MEMS 기술을 이용하여 제작된 전자기 유도 결합형 센서의 경우, 무전원 및 무선이라는 기술적 성과를 보이고 있음에도 불구하고 감지 거리는 불과 2cm 이내로 보고 되고 있다.[2] 따라서, 무전원/무선 센서 시스템을 실제 적용하기 위해서는 감지 거리의 확장(10 m 이상)과 더불어 주변 환경에 의해 측정된 센서 값이 영향을 받지 않아야 한다. 이러한, 두 가지 전제 조건을 만족시킬 수 있는 무전원/무선 센서 감지 방식은 표면탄성파를 이용하는 것이다. 표면탄성파(Surface Acoustic Wave: SAW)를 이용한 sensor는 세계 각국에서 여러 가지 응용을 목적으로 개발되어 적용되고 있으며 그 성능이 검증이 되었다. 독일에서는 기차시스템에 활용되어 각 차량의 이동현황을 중앙에서 관찰할 수 있도록 하였으며[3], 기차의 브레이크나 자동차의 타이어 등 뜨겁고 위험한 곳에 주로 장착되어 사용되고 있다.[4] 본 연구에서는 주행 중인 tire의 압력을 측정하는 수단으로 표면 탄성파 센서를 이용하고자 한다. 기존 정전용량형 압력센서의 경우 정전용량의 변화는 두 기관사이의 거리에 따라 반비례하는 비선형의 함수를 가지게 된다. Sensor가 일정한 performance를 가지기 위해서 선형성은 중요한 인자이므로 이를 보완하고자 touch mode를 제안하게 되었다. 그 이유는 두 박막의 touch 이후에 정전용량은 주어지는 압력에 선형적으로 변화한다는 이론에 기초한 것이다. 본 논문에서는 TPMS(Tire Pressure Monitoring System) 개발단계로서 touch mode의 이론적 계산을 통해 정전용량과 압력과의 관계를 확

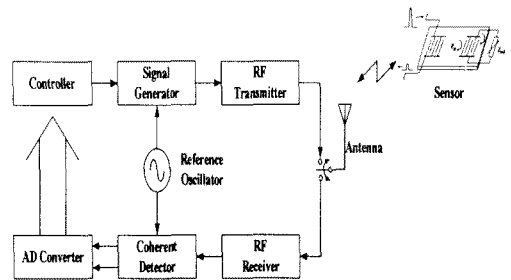


그림 1 Interrogation 시스템

그림 1에서는 외부에서 측정할 수 있는 무전원/무선 센서 시스템의 개념도를 나타내고 있다.

$$P_{11}(Z_{load}) = P_{11}^{SC} + \frac{P_{23}^2}{P_{33} + \frac{1}{Z_{load}}} \quad (1)$$

위 식에서  $P_{11}(Z_{load})$ 는 반사판 IDT의 임피던스에 따른 반사파 특성을 나타낸다. 식(1)에서 외부 임피던스에 따라 반사파의 특성은 변함을 알 수 있다.  $P_{11} \propto Z_{load}$ 이

므로 만약,  $Z_{load}$ 가 Capacitive 특성을 지닌다면  $P_{11}$ 은  $1/j\omega C$ 에 비례하게 된다. 따라서, 정전용량 값이 커지면 커질수록 반사파는 작아지게 됨을 알 수 있다. 결국, 반사판 IDT의 입력 정전용량의 변화에 따라 외부에서 측정 한 값이 변하게 되는데 이를 이용한 무전원/무선 센서의 구현이 가능하다.

## 2.2 Design of IDT

보통 IDT는 진동을 일으키거나 표면탄성파를 검출해내는데 사용이 된다. 복수개의 가늘고 긴 조각으로 이루어져있으며 각각의 IDT는 주기적으로 연결이 되어있다. 단전극타입과 복수전극 타입이 있는데 단전극타입은 구조의 단순함으로 많이 사용되고 있지만 본 연구에서는 복수전극 타입으로써 finger의 기하도형적 배열 및 finger-pairs의 개수 등의 조절로 인해 보다 넓은 영역에서의 사용이 가능하다.

그림 2는 0.3 $\mu$ m sputtering 된 알루미늄을 wet etch를 통해 제작한 comb 형태의 IDT 형상이다.

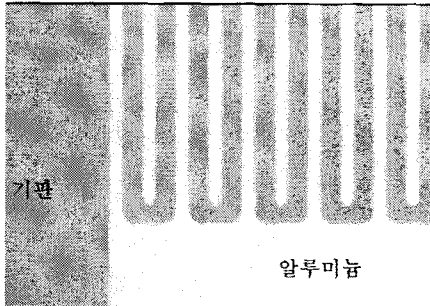


그림 2 무전원/무선 압력센서를 위한 SAW IDT 형상

SAW 기판을 Y-cut, Z-propagation LiNbO<sub>3</sub>로 설정할 경우 Propagation velocity  $v_p = 3488\text{m/s}$  이며 적용 주파수의 중심주파수는 315MHz로 한다.

그림 3은 IDT의 단면을 SEM으로 찍은 사진이다.

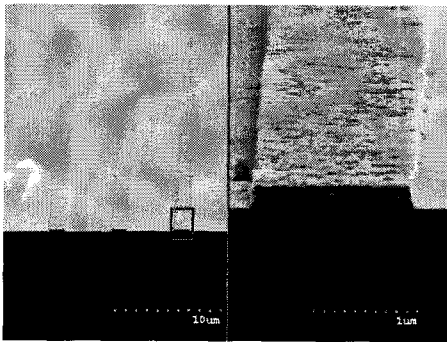


그림 3 SAW IDT의 단면형상

## 2.2 TPMS Sensor

자동차의 안전성과 안락함을 유지하는 데는 tire 내의 적절한 공기압이 중요하며 TPMS(Tire Pressure Monitoring System)사용이 효과적이다. 센서가 타이어 내부에 위치해야 하므로 무선이어야 하며 높은 토크가 걸리는 환경에 견딜 수 있어야만 한다. 기존 TPMS sensor의 목적으로 사용된 radio telemetry의 경우 배터리와 같은 전기적인 power source가 필요하며 -40~140°C의 환경에 견딜 수 있는 배터리는 고가이고 정기적으로 교환을 해주어야한다는 단점이 있었다.[5] 따라서 저가이며 무전원으로 주위 환경에 영향을 받지 않는 효과적인 센서가 필요하다.

## 2.3 Touch mode 센서

### 2.3.1 Plate의 해석

일반적으로 정전용량형 압력센서에서는 plate의 형상함수로 plate에서는 소변형이 일어난다는 가정하에 Timoshenko의 plate theory를 이용하였다.[6] 하지만 touch mode의 경우에는 touch down을 이루는 부분에서 대변형이 일어나기 때문에 대변형과 소변형의 경우 모두를 고려하여 형상 함수를 구하였는데, 소변형에 대한 전체의 형상 함수는 식 (2)과 같다.

$$w = w_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (2)$$

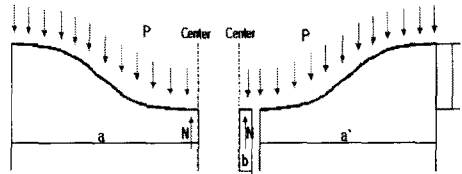
$w_0$  : 압력 q에서의 최대 변위  $w$  : displacement  
a : Plate의 반지름

그리고 touch down이 일어나는 부분에서는 대변형이 일어나므로 최대 변위에 해당하는 부분에 대해서는 식(3)에서와 같은 대변형의 이론을 적용하였다.[7]

$$w_0 = \frac{qa^4}{64D} \frac{1}{1 + 0.488 \frac{w_0^2}{h^2}} \quad (3)$$

D : Flexibility rigidity of the plate  
E : Young's modulus  $\nu$  : Poisson's ratio  
q : uniformly loaded pressure h : Plate의 두께

하지만 touch mode 해석을 위해서는 touch down 되는 부분에 대한 고려가 필요하다.



a : 반지름 a' : 새로운 반지름 N : 반발력  
b : 터치된 부분의 반지름 P : 압력

그림 4 plate의 형상과 반발력

그림 4에서처럼 압력에 따라 고정된 두개의 plate 사이의 거리(d)를 최대 변위로 갖는 반지름(a')을 식(3)을 이용하여 구하고, 원래의 반지름(a)에서 새로운 반지름(a')을 뺀 부분이 touch down이 일어나는 면적의 반지름(b)이 되는데 그 이유는 touch down 된 부분에서는 반발력(N)이 발생되어 plate를 받쳐주는 역할을 하기 때문에 다른 변형이 일어나지 않는다. 그래서 새로운 반지름(a')을 구하는 식은

$$a' = \left( \frac{dap64D}{q} \left(1 + 0.488 \frac{dap^2}{h^2}\right) \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

$$b = a - a'$$

이 된다.[6]

### 2.3.2 Capacitance의 계산

두 전극 사이에는 cavity가 존재하고 하부 전극은 열증착된 Cr/Au 위에 질화막을 PECVD 증착하여 형성한 후 상부 전극 사이의 정전용량을 구하였다. 그림 4에서 Touch

된 영역과 Touch되지 않은 영역에서 생성되는 두 개의 Capacitor가 병렬로 존재한다고 볼 수 있다. 즉,  $C_{tot} = C_1 + C_2$ 이다. 만약, 그림 4에서 Lower plate 위로 Si3Nx 박막이 유전체로 증착되어 있다면, Relative dielectric constant는 7.5이다. 결국, 접촉 부분(그림 4의 b 영역) 및 비접촉 부분(그림 4의 a' 영역)에서는 식 (4)에 대한 변형식이 성립된다. 접촉이 일어나지 않는 영역에서의 Capacitance의 differential 형태는 식 (5)와 같다.

$$dC_1(r) = \epsilon_0 \frac{2\pi dr}{w(r)} \quad (5)$$

( $w(r)$ :반지름이 r일경우의 변위값)

접촉이 일어나는 영역에서는 식 (6)과 같다.

$$dC_2(r) = \epsilon_0 \frac{2\pi dr}{d_2} \quad (6)$$

( $A_2 = \pi b^2, d_2 : Si_3N_4$ 의 두께)

따라서, Total capacitance는

$$C_{tot} = \int_{r=b}^{r=a} dC_1(r) + \int_{r=0}^{r=b} dC_2(r)$$

을 이용하여 구하게 된다.

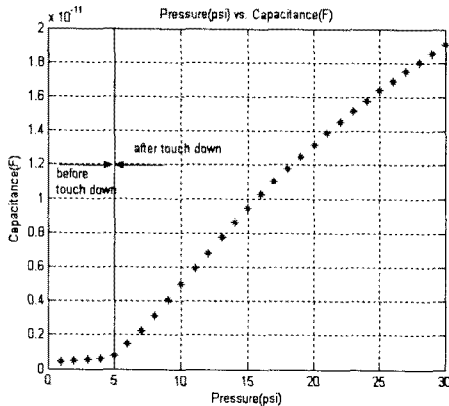


그림 6. 압력에 따른 Capacitance 변화

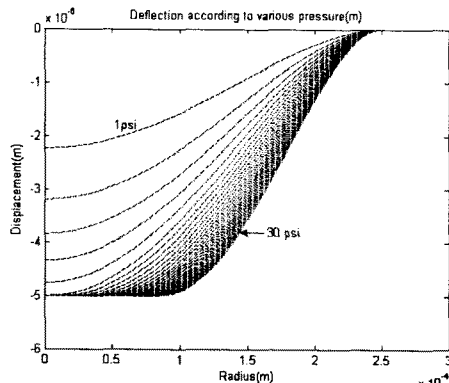


그림 7. 압력에 따른 Upper electrode의 거동 양상

그림 6은 인가 압력에 따른 Capacitance 변화를 나타낸 그래프이며 그림 7은 인가 압력(1~30 psi)에 따른 Upper electrode의 변형 양상을 나타낸 것이다. 그림 7에서 볼 때 touch down이 일어나기 전까지는 압력에 따라

plate의 변화가 많이 일어나지만 touch down 되는 부분이 많아지면서 점점 압력의 변화에 plate의 형상 변화율은 줄어드는 것을 알 수 있다. 그래서 본 연구에서는 압력 센서의 범위를 전체 plate의 1/3정도가 되는 압력까지만 센서의 범위로 한정 지을 것이다. 그리고 그 때의 압력센서의 한계값은 대략 30psi 미만이 되는 것으로 계산된다.

### 3. 결론

본 논문에서 touch mode 압력센서에 대한 해석적 기법을 바탕으로 SAW transponder와의 적용 가능성 및 유용성에 대해서 연구하였다. Touch mode의 해석 결과 Touch down 이후 Normal mode capacitive sensor의 비선형 특성이 크게 개선이 되었으며 그림 6에서 Touch down 이후(약 5psi) 정전용량의 변화가 매우 크게 나타나고 있으므로 Touch mode를 사용하지 않는 일반적인 capacitive pressure sensor에 비해 민감도가 크게 향상될 것을 알 수 있다. 결국 Touch mode는 SAW transponder에 적합한 구조임을 반증해주고 있다.

향후 표면탄성과 센서의 제작을 통해 정전용량의 변화에 따른 응답 주파수를 분석할 것이며 Touch mode에 대해 상용유한요소 package를 이용하여 실제 거동을 예측할 것이다. 이를 통해 무전원/무선 TPMS를 개발하고자 한다.

### 4. 참고문헌

- [1] Orhan Akar, Khalil Najafi et al, "A wireless batch sealed absolute capacitive pressure sensor" the 14th European Conference on Solid-State Transducers, Aug.27-30, 2000, Copenhagen, Denmark, 585-588
- [2] Orhan Akar et al, "A wireless batch sealed absolute capacitive pressure sensor", Sensor and Actuators A 95, pp.29-38, 2001
- [3] L.Reindl, T.Ostertag, W.Ruile, C.C.W. Ruppel, A.Lauper, R.Bachtiger, H.Ernst, "Hybrid SAW-Device for a European Train control system", proc.IEEE Ultrasonics Symp., pp.175-179,1994
- [4] A.Pohl, G. Ostermayer, L.Reindl, and F.Seifert, "Spread spectrum techniques for wirelessly interrogable passive SAW sensors", in proc.1996 IEEE Symp. Spread Spectrum Techniques and Applications, pp.730-734, 1996
- [5] M Hill and J D Turner "Automotive Tyre Pressure Sensing"
- [6] Q.Wang, Modeling of touch mode capacitive sensors and diaphragms, Sensors and Actuators 75(1999)230-241
- [7] Timochenko, 'Theory of plates and shells', Mc GrawHill, 2nd Ed. 1981