

표면 탄성과 장치를 응용한 용량 성 변위센서의 설계 및 초정밀 간극 측정

Design of Capacitive Displacement Sensor and Gap Measurement with High Precision Using Surface Acoustic Wave Device

김 재 근*·이 택 주**·임 수 철***·박 노 철****·박 영 필****·박 경 수†
Jaegun Kim, Taek-Joo Lee, Soo-Cheol Lim, No-Cheol Park, Young-Pil Park
and Kyoung-Su Park

(2009년 11월 10일 접수 ; 2010년 2월 3일 심사완료)

Key Words : Surface Acoustic Wave(SAW; 표면 탄성과), Capacitive Load(정전용량성부하), Gap Measurement
(간극 측정), Sensor(센서)

ABSTRACT

SAW device is widely used as band pass filters, chemical or physical sensors, and actuators. In this paper, we propose the capacitive gap measurement system with high precision using SAW device. The research process is mainly composed of theoretical and experimental part. In the theoretical part, equivalent circuit model was used to predict the SAW response by the change of load impedance. In the experimental part, commercialized capacitor was used to see the SAW response by the change of load capacitance to check the feasibility as a sensor unit. After that, experimental setup to measure and adjust the gap was made and the SAW response by the change of gap which caused the capacitance change was measured. Finally, resolution and stroke was decided compared with the signal change and basic measurement noise level.

1. 서 론

표면 탄성과 장치(surface acoustic wave device, SAW device)는 inter digital transducer(IDT)의 구조에 의한 고주파 대역통과 필터로서의 특성 외에도, IDT와 연결된 부하 또는 외부 환경의 물리적/화학적 변화에 따른 응답의 변화를 이용한 다양한 센서로 활용 가능하며, 표면 탄성과의 전파에 의한

표면의 기계적인 움직임에 따른 구동 특성 또한 가지고 있어, 통신용 필터를 비롯하여 센서와 구동기로써 다양한 연구가 수행되고 있는 장치이다. 이 중 센서로의 적용은 그 응용을 목적으로 특히 많은 연구가 수행되고 있으며, 적용 분야는 온도, 압력 등의 물리적 상태량 측정을 위한 센서에서부터, 특정 화학물질 또는 바이오 물질의 양적 검출을 위한 센서에 이르기까지 매우 광범위하게 분포하고 있다⁽¹⁻⁷⁾.

이러한 표면 탄성과 센서를 구현하는 방법으로는 크게 지연 특성을 그대로 이용하는 방법과 IDT에 연결된 전기적 부하의 변화에 따른 응답의 변화를 이용하는 임피던스 센서를 이용한 방법이 있다^(1,8). 현재 대부분의 센서에서 이용되고 있는 방법은 직접 또는 간접적인 방법에 의해 표면 탄성과 장치

† 교신저자 ; 정회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-4677, Fax : (02)365-8460

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 아이티에프(주)

*** 삼성전기(주)

**** 정회원, 연세대학교 기계공학과

기판의 탄성에 영향을 주어 이에 따른 지연 응답에 의한 중심 주파수의 이동을 살피는 방법으로, 온도, 압력 등의 물리적 상태량 측정 센서로 적용할 때에는 기판을 그대로 이용하지만, 바이오/화학 물질의 검출을 위한 센서에서는 측정하려는 물질의 검출에 유리한 매체를 기판 위에 코팅함으로써 이에 따른 지연 응답특성을 이용하는 방법으로 주로 검출하려는 물질에 선택적으로 반응하는 특수한 필름이 이용된다^(3,4). 임피던스 센서를 이용한 방법은 기판에 형성된 IDT에 정전용량 방식, 전자기 방식, 압전 방식 등의 다양한 외부 센서를 연결하여 측정 임피던스의 변화에 따른 위상 또는 진폭의 변화를 관찰하는 방법으로⁽⁸⁾, 이때 사용되는 표면 탄성과 장치는 주로 신호 처리의 성격을 가지게 되며, 외부 조건이 기판에 주는 영향을 최소화하기 위해 외부와 차폐된다⁽⁷⁾. 이러한 외부 임피던스를 이용한 표면 탄성과 센서는 지연 특성을 그대로 이용하는 센서로는 적용이 어려운 진류 또는 수중 물질 등의 측정을 위한 센서로 적용이 가능하며⁽⁷⁾, 이러한 방법을 이용할 경우, 임피던스의 변화만 가능하면, 표면 탄성과 응답에 영향을 주기 때문에, 다양한 방법으로 적절한 센서를 직접 구성하여 적용할 수 있다.

이 연구에서는 이러한 임피던스 센서를 이용한 방법 중 정전용량 방식을 이용하여, 주변의 물리적인 조건의 변화에도 표면 탄성과 장치 기판의 물성에 영향을 주지 않아 안정적으로 측정이 가능한 20 나노미터의 분해능을 가지는 간극 측정 센서로 적용한다. 정전용량 방법은 비 접촉 식 초정밀 간극 측정에 주로 이용되는 방법으로, 상용화된 제품의 경우 이미 수십 나노미터 수준의 분해능을 가지는 센서가 개발되어 광학, 정밀제어 등에 이미 적용이 되고 있으며, 다양한 전극의 형태에 따른 이론적, 실험적 연구가 계속적으로 수행되고 있다^(9,13). 이중 가장 많이 이용되는 방법은 평행 판 구조를 이용한 방법이다. 이 방법은 구성이 간단하여 쉽게 적용이 가능하지만, 선형성의 증가를 위해 기계적으로 복잡한 전극 구조(flexure)의 설계를 필요로 한다는 점과⁽¹⁰⁻¹²⁾, 외부 잡음에 의한 영향을 받기 쉬운 특수한 신호처리 과정을 반드시 거쳐야 한다는 단점이 있으며, 이를 개선하기 위해서 기존에는 대부분 집중 소자 또는 특수 소자를 이용한 회로 설계 및 이를 이용한 신호처리 위주의 연구가 진행되었다⁽¹³⁾.

그러나 이 연구에서는 표면 탄성과 장치를 이용하여, 정전 용량 센서의 신호처리에 적용한다. 이 경우 신호처리를 위한 회로를 표면 탄성과 장치로 대체하므로, 회로의 설계 과정을 단순화 할 수 있으며, 표면 탄성과 장치 본래의 특징인 대역 통과 필터의 특징 또한 동시에 가지게 되므로, 비교적 단순한 구조로 저 잡음, 고 정밀도의 정전 용량 성 센서로 구현이 가능하다. 따라서, 이를 이용하여, 20나노미터의 분해능을 가지는 센서로 구현하며, 실제 간극 측정에 적용한다.

연구 내용은 표면 탄성과 장치의 기판 및 가진 중심 주파수의 설정과 이에 따른 IDT의 설계를 통한 시뮬레이션, 그리고 실제 제작을 통한 성능 비교를 하는 방법으로 구성 되며, 이를 통해 표면 탄성과 장치를 이용한 초정밀 정전 용량 성 센서로 구현하여, 적용의 타당성을 검증한다.

2. 설계 및 해석

이 연구에서는 전기 기계 결합상수가 크고, 전파 속도가 빨라 표면 탄성과 장치로 가장 많이 이용되는 128° YX LiNbO₃를 장치의 기판으로 사용하였으며, 이를 이용하여, 전기 음향 등가 모델링 및 해석을 통한 시뮬레이션을 진행 후 상용 캐패시터(필름 콘덴서)를 이용하여 타당성을 검증 하였다. 이 때 사용된 기판은 128° YX LiNbO₃이며, 그 물성치는 Table 1과 같으며, 그 값은 각각 기판에서의 표면 탄성과 전파속도, 전기기계 결합 상수, IDT의 길이에 따른 정전 용량을 나타낸다.

시뮬레이션에 사용 된 회로 모델은, Fig. 1에서 보는 바와 같이 입출력 임피던스가 모두 고려된, Crossed-field 모델이며, 부하 (Z_L)는 Fig. 2와 같이 저항과 캐패시터로 모델링 하였다.

그리고 이 등가회로 모델의 전달함수는 식 (1)과 같이 표현된다⁽⁸⁾.

Table 1 128° YX LiNbO₃ materialproperty

Velocity (m/s)	K^2 (%)	Capacitance/ finger pair/ unit length C_0 (pF/cm)
3992	5.3	5.0

$$H(f) = \frac{V_L}{V_{in}} = \frac{y_{ab}Z_L}{(1+y_{aa}R_S)(1+y_{bb}Z_L)-y_{ab}^2R_SZ_L} \quad (1)$$

여기서,

$$Y_{aa} = G_a(f) + j2\pi fC_a^T$$

$$y_{bb} = G_b(f) + j2\pi fC_b^T$$

$$Y_{ab} = 8NMG_0 \text{sinc}(NX) \text{sinc}(MX) e^{j[\pi(1-(N+M)X)-\phi]}$$

$$G_a(f) = 8N^2G_0 |\text{sinc}(NX)|^2,$$

$$G_b(f) = 8M^2G_0 |\text{sinc}(MX)|^2$$

$$\text{sinc}(NX) = \frac{\sin(N\pi X)}{(N\pi X)}, \quad \text{sinc}(MX) = \frac{\sin(M\pi X)}{(M\pi X)}$$

$$X = \frac{f-f_0}{f_0}, \quad f_0: \text{IDT center frequency}$$

$$G_0 = K^2 C_s f_0 = \text{Characteristic admittance (mho)}$$

$$C_a^T = NC_a^S : \text{Total Input IDT capacitance (F)}$$

$$C_b^T = MC_b^S : \text{Total Output IDT capacitance (F)}$$

$$C_a^S = C_0 W_a : \text{Capacitance of one finger pair of Input IDT (F)}$$

$$C_b^S = C_0 W_b : \text{Capacitance of one finger pair of Output IDT (F)}$$

$$W_a : \text{Acoustic aperture of input IDT (cm)}$$

$$W_b : \text{Acoustic aperture of output IDT (cm)}$$

$$\theta = 2\pi(f/f_0) = \text{Electrical transit angle (rad)}$$

$$R_S : \text{Signal input impedance}$$

$$Z_L : \text{Output impedance}$$

$$\phi : \text{Phase factor}$$

$$N : \text{Number of input IDT finger pair}$$

$$M : \text{Number of output IDT finger pair}$$

로 표현된다. 이때 사용된 표면 탄성과 장치의 중심 주파수는 13.56 MHz이며, 입출력 IDT의 pair 수는 30(N=M=30), 입출력 IDT의 acoustic aperture는 모두 9 mm(W_a=W_b=9 mm)를 가지도록 설계하였다.

3. 제작 및 전달함수의 측정

이와 같이 설계된 표면 탄성과 장치를 실제 제작하여, 부하의 변화에 따른 응답 특성을 살펴보았다. 128° YX LiNbO₃의 표면 탄성과 전파 속도가 3992 m/s이고, 중심주파수를 13.56 MHz로 선정하였기 때문에 파장의 길이는 식 (2)의 관계에 의하여 294.4 μm로 결정되므로 IDT의 두께는 1/4에 해당하는 73.6 μm가 된다. 표면 탄성과 장치는 Fig. 3과 같이 photolithography공정을 통해 제작되며, 이를 통해 제작된 표면 탄성과 장치는 Fig. 4와 같다.

$$v = \lambda f \quad (2)$$

이와 같이 제작된 표면 탄성과 장치는 네트워크 분석기를 통하여 주파수 응답 특성과 중심 주파수를 구하게 되며, 이때 구해진 중심 주파수를 표면 탄성과 장치에 인가하며, 부하 임피던스에 따른 특성을 관찰하게 된다. 표면 탄성과 장치의 경우 입출력 단자가 각각 1개이므로 2-port 네트워크의 특성을 지니며, 이 연구에서 제안된 표면 탄성과 장치는 입출력 IDT모두 같은 특징을 가지고 있으므로, 전달함수는 S₂₁ 또는 S₁₂의 측정을 통해 예측이 가능하다. 이때 하첨자 중 앞의 숫자는 출력포트를, 뒤의 숫자는 입력 포트를 각각 나타낸다. 따라서, 네

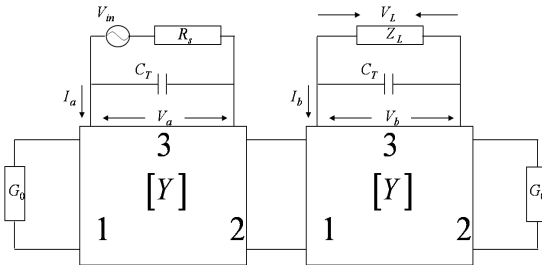


Fig. 1 Crossed-field model

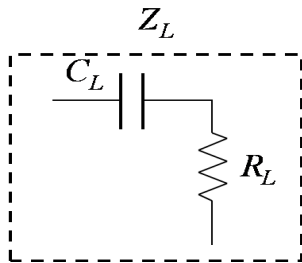


Fig. 2 Load impedance model

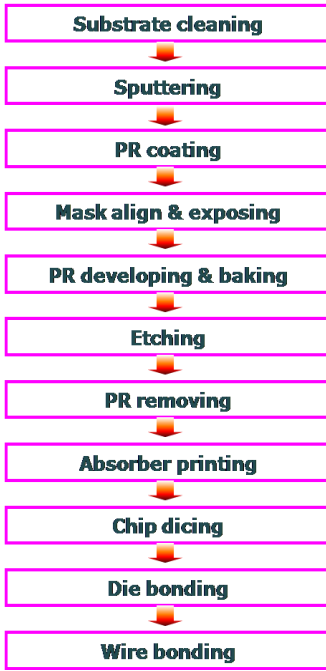


Fig. 3 Fabrication process

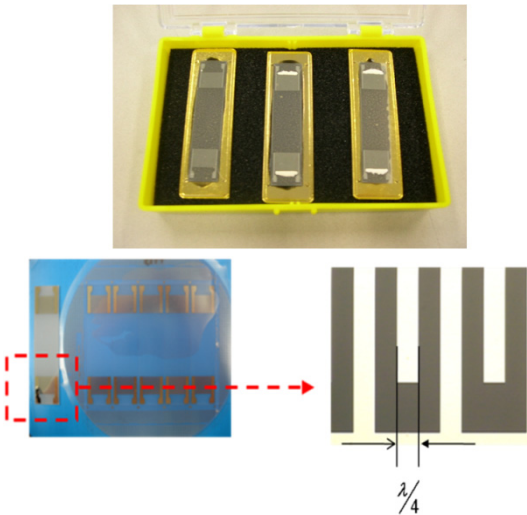


Fig. 4 Fabricated SAW device

트위크 분석기의 응답 특성은 장비가 가지는 입출력 임피던스를 알면 식 (1)의 관계에 의하여 그에 상응하는 S_{21} 을 알 수 있다. 이 연구에서 사용된 네트워크 분석기의 입출력 임피던스는 모두 50Ω 이며, 이를 이용하여 측정된 표면 탄성과 장치의 중심주파수는 13.76 MHz 였다. 따라서, 중심주파수를 13.76 MHz 로

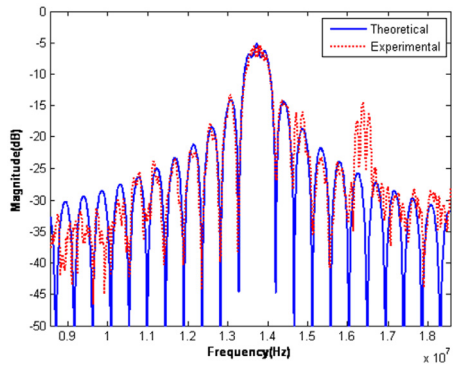


Fig. 5 Transfer function of SAW device

변경하여 이론적인 주파수 응답 특성을 구하고 이를 측정된 응답(S_{21})과 비교하면 Fig. 5와 같다. 이때, 중심주파수에서의 응답의 크기의 오차는 이론치 기준으로 0.3% 로 약 5 dB 의 크기를 가지는 것으로 측정되었다.

따라서, 표면 탄성과 장치는 중심주파수의 가진을 통해 센서로 적용 가능하며, 그 특징을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 제작된 표면 탄성과 장치의 이와 같은 특성을 바탕으로, 입출력 IDT에 실제로 입력 임피던스(R_s) 50Ω 의 함수 발생기와 상용 필름 캐패시터를 연결하여, 중심주파수 가진을 통한 응답을 측정하였다. 이때 부하 임피던스(Z_L) 중 저항(R_L) 값은 집중 소자 또는 선로에 의해 가지게 되는 기생성분의 저항 값을 나타내는 것으로, 용량 성 부하의 양 전극을 쇼트 시켰을 때의 값을, 직접적인 측정을 통해 구하였으며, 그 값은 2Ω 이다. 이 값들과 $128^\circ\text{ YX LiNbO}_3$ 의 물성치를 바탕으로 부하 임피던스의 변화에 따른 이론적인 값과 실제 측정된 전달함수를 비교하였다. 이때 입력 신호의 크기는 1 V 이며, 결과의 비교는 부하 임피던스(Z_L)에서 측정된 신호를 삼각 회귀 분석하여 구해진 응답의 크기를 이론치와의 상대오차 분석을 통해 진행되었으며, 이 때 회귀분석에 사용된 관계식은 식 (3)과 같다⁽¹⁴⁾.

$$y = A_0 + A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (3)$$

여기서

$$A_0 = \frac{\sum y}{N_1}, A_1 = \frac{2}{N_1} \sum y \cos \omega t,$$

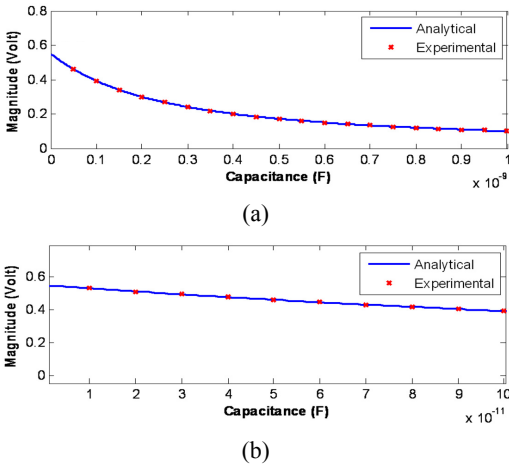


Fig. 6 Amplitude of SAW response

$$B_1 = \frac{2}{N_1} \sum y \sin \omega t$$

y : Measured data

N_1 : Numbers of total data

로 표현된다. 그리고 측정된 결과와 이론 치는 Fig. 6과 같다. 이때 Fig. 6(a)는 0~9 nF의 측정 결과를 나타내며, Fig. 6(b)는 이 중 100 pF이내의 범위를 보다 정밀하게 측정한 결과를 나타낸다. 실험 결과 이론 치와 실험치의 최대 상대 오차는 이론 치 기준으로 최대 3%로 확인되어 용량 성 부하의 신호 처리 및 이를 이용한 센서로 적용이 가능함을 확인하였다.

4. 보정 및 분해능의 결정

상용 캐패시터를 이용하여 용량 성 부하를 이용한 센서로 적용이 가능함을 판단 후 실제 미소 간극 측정을 위한 보정을 실시하였다. 미소 간극 측정은 평행 판 형태의 캐패시터를 기계적으로 구현하여, 이를 간극 측정에 이용한 것으로, 크기가 동일한 두 평행 판 간극의 조정을 통해 그에 따른 load impedance의 변화와 이로 인한 표면 탄성과의 응답 변화를 관찰하는 방법으로 진행되었다. 측정을 위한 실험 장치는 Fig. 7과 같이, 입력 임피던스 50Ω의 함수 발생기와, 중심주파수 13.56 MHz의 표면 탄성

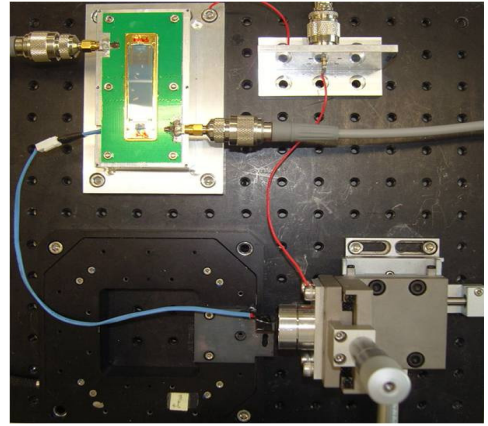


Fig. 7 Experimental setup

파 장치 그리고 용량 성 부하를 형성하기 위한 평행 판으로 구성되었다. 또한 모든 실험은 class 100의 클린 부스 내에서 진행 되었으며, 평행 판 사이 간극의 조정은 0.1 nm의 분해능과 최대 스트로크 100 μm을 가지는 상용 나노 스테이지를 이용하였고, 간극의 측정은 2 nm 분해능의 레이저 변위센서를 이용하였다. 이때 표면 탄성과 장치는 기계적, 전기적으로 외부의 영향을 받지 않도록 하기 위해, 접지된 알루미늄 지그를 이용하여 주위와 차폐되었다.

표면 탄성과 장치의 응답은 부하 임피던스의 변화에 따라 바뀌게 되는데, 용량 성 부하가 적용될 경우 측정 면적과 거리에 따라 그 감도가 바뀌게 된다. 이 연구에서는 측정 면적이 일정할 때, 간극의 변화에 따른 부하 임피던스의 변화와 이에 따른 표면 탄성과 응답의 변화를 이용한 측정 방법을 연구하였기 때문에 간극의 변화를 제외한 모든 설계 변수는 일정하게 설정하였다. 따라서 간극의 변화에 따른 표면 탄성과 응답의 변화(식 (1))는 식 (4), (5)와 같이 다시 정리 된다.

$$H(f) = \frac{akA - jad}{(bk + ck)A - jbd} \quad (4)$$

$$\frac{dH(f)}{d(d)} = \frac{-jackA}{(bk + ck)^2 A^2 - j2(bk + ck)Abd - b^2 d^2} \quad (5)$$

여기서

A : Capacitor's area

d : Distance between parallel plate capacitor

$$k = 2\pi f A \epsilon_0 \epsilon_r R_L$$

$$a = y_{ab}$$

$$b = 1 + y_{aa} y_{bb} - y_{ab}^2$$

$$c = 1 + y_{aa} R_S$$

ϵ_0 : Permittivity of vacuum

ϵ_r : Relative Permittivity of dielectric material

로 표현된다. 따라서, 전극의 크기가 작을수록 간극의 변화에 따른 정전용량 및 표면 탄성과 응답의 감도는 커지게 되므로, 보다 정밀한 분해능을 가지는

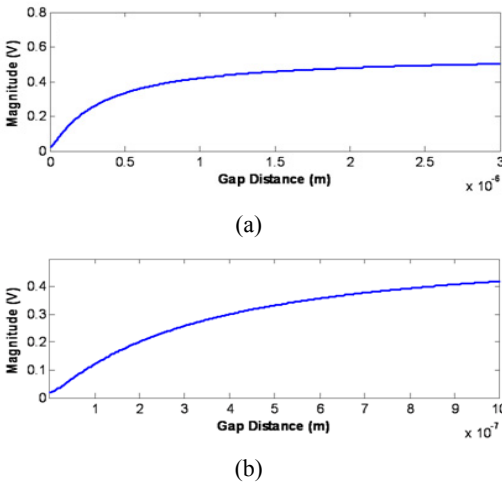


Fig. 8 Magnitude of SAW response by the gap distance

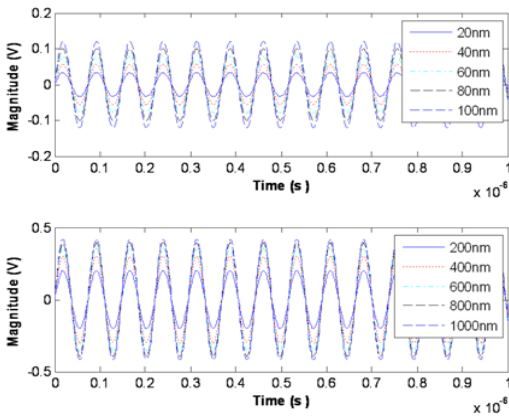


Fig. 9 Time response of SAW by the gap distance

센서로 구현하기 위해서는 그 면적이 작아져야 한다. 이 연구에서는 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 이며, 이에 따른 표면 탄성과의 응답의 크기는 Fig. 8과 같다. 이때, Fig. 8(a)는 $3 \mu\text{m}$ 까지의 응답을 나타내며, Fig. 8(b)는 이 중 $1 \mu\text{m}$ 이내의 간극에서의 응답을 나타낸다. 또한 Fig. 9는 간극의 변화에 따른 실시간 응답을 나타낸다.

Crossed-field model에 따른 표면 탄성과 응답은 0.55 V 에서 포화가 일어나며, 측정 시 가지는 기본 잡음의 수준을 알면 측정가능 영역과 분해능을 결정할 수 있다. 응답의 측정에 사용된 측정기기는 오실로스코프이며, 측정 당시 기본 잡음의 수준은 최대 최대 0.4 mV 로 측정 되었다. 따라서, 최소 분해능을 달성하기 위해서는 간극간의 신호 차이가 기본 잡음 수준의 최소 2배가 되어야 하며, 이를 수식으로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$\text{Maximum measurement noise} < \frac{1}{2} \Delta H(f) \quad (6)$$

식 (6)과 식 (5)에 의하면, 측정에 사용될 평행 판의 면적 또는 분해능이 정해지면, 그에 따른 신호 변화의 수준과 측정 가능한 최소 분해능 또는 측정 면적이 정해지게 된다. 이 연구에서는 평행 판의 크기를 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 로 하였기 때문에 측정 잡음을 고려한 최소 분해능의 크기는 5 nm 이다. 따라서 5 nm 이상의 분해능이 달성 가능하며, 이 연구에서는 20 nm 의 분해능을 측정 하였다. 잡음 수준에 의해 가질 수 있는 최대 측정 범위는 $1 \mu\text{m}$ 로 그 때의 이론적인 응답의 크기는 0.42 V 이다. 이를 바탕으로 이론 치와 실험 치를 비교하면 Fig. 10과 같다.

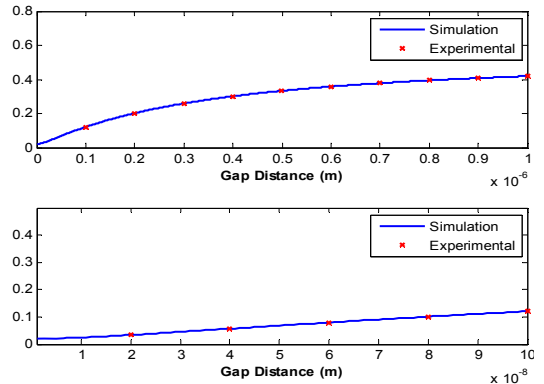


Fig. 10 Gap measurement data

측정은 모두 10번의 반복을 통하여 진행 되었고, 같은 변위에서 모두 측정 잡음 수준인 0.4 mV이내의 오차를 가지는 것으로 확인 되어 20 nm의 분해능을 가지는 센서로 적합함을 알 수 있다. 따라서, 측정 기본 잡음의 범위 내에서 정해진 분해능을 가진 센서로 구현이 가능하며, 이를 통한 초정밀 측정이 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 표면 탄성과 장치를 이용하여 용량성 부하의 신호처리 및 이를 이용한 초정밀 간극 측정에 적용하여 20 nm의 분해능을 구현하였으며, 이때 최대 측정 거리는 1 μ m이다. 사용된 전극의 크기는 3 \times 3 mm²이며, 식 (5)에 의해 면적이 작을수록 더욱 민감한 센서로 적용이 가능함을 알 수 있다.

따라서, 표면 탄성과 장치를 이용하면, 신호처리 회로의 단순화와 저 잡음의 장점이 있으며, 임피던스 센서와의 결합을 통해, 단순한 구조의 초정밀 저 잡음의 센서로 구현이 가능함을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 일반 연구자 지원사업의 기본 연구사업(과제번호 2009-0076065)의 지원을 받아 실시되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Bulst, W.-E., Fischerauer, G. and Leonhard, M. R., 2001, "State of the Art in Wireless Sensing with Surface Acoustic Waves," IEEE Transactions on Electronics, Vol. 48, No. 2, pp. 265~270.

(2) Tang, I.-T., Chen, H.-J., Houg, M.-P. and Wang, Y.-H., 2003, "A Novel Integrable Surface Acoustic Wave Notch Filter," Solid-state Electronics, Vol. 47, pp. 2063~2066.

(3) Kondoh, J., Tabushi, S., Matsui, Y. and Shiokawa, S., 2008, "Development of Methanol Sensor Using a Shear Horizontal Surface Acoustic Wave Device for a Direct Methanol Fuel Cell,"

Sensors and Actuators B, Vol. 129, pp. 575~580.

(4) Atashbar, M. Z., Bazuin, B. J., Simpeh, M. and Krishnamurthy, S., 2004, "3-D Finite-element Simulation Model of SAW Palladium Thin Film Hydrogen Sensor," IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, pp. 549~553.

(5) Osakabe, N., Kurosawa, M., Higuchi, T. and Shinoura, O., 1998, "Surface Acoustic Wave Motor Using Silicon Slider," Micro Electro Mechanical Systems, pp. 390~395.

(6) Länge, K., Rapp, B. E. and Rapp, M., 2008, "Surface Acoustic Wave Biosensors," Anal Bioanal Chem., pp. 1509~1519.

(7) Reindl, L. M., Alfred, P., Gerd, S. and Robert, W., 2001, "SAW-based Radio Sensors Systems," IEEE Sensor Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 69~78.

(8) Campbell, C. K., 1998, "Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications," Academic Press, San Diego.

(9) PI, Piezo Nano Positioning 2009.

(10) Que, L., Li, M. H., Chu, L. L. and Gianchandani, Y. B., 1999, "A Micromachined Strain Sensor with Differential Capacitive Readout," Micro Electro Mechanical Systems, 1999, MEMS '99. Twelfth IEEE International Conference on, pp. 552~557.

(11) Horenstein, M. N., Perreault, J. A. and Bifano, T. G., 2000, "Differential Capacitive Position Sensor for Planar MEMS Structures with Vertical Motion," Sensors and Actuators A, Vol. 80, pp. 53~61.

(12) Hongshen, M., James, W., Joseph, P. and Alexander, S., 2003, "Sub-nanometer Displacement Sensing for the Nanogate - A Tunable Nanometer Gap", Sensors, Proceedings of IEEE, 46~51.

(13) Baxter, L. K., 1996, "Capacitive Sensors," IEEE Press, New-York.

(14) Chapra, S. C. and Canale, R. P., 2003, "Numerical Methods for Engineers," McGraw Hill, New-York.