

집중 소자를 이용한 표면 탄성파 장치 기반의 용량 성 센서 보정 및 이를 이용한 초정밀 간극 측정

Calibration of SAW Based Capacitive Sensor Using Lumped Component and High Precision Gap Measurement

김재근*, 고병한*, 박영필*, 박노철†

Jaegun Kim, Byung-Han Ko, Young-Pil Park and No-Cheol Park

(2012년 3월 20일 접수; 2012년 3월 23일 심사완료; 2012년 3월 23일 게재확정)

Abstract

SAW device is widely used as filters, sensors, actuators in various technologies. And capacitive sensor is tremendously used to measure pressure, gap, etc. The application of SAW device as signal conditioner of capacitive sensor reduces noise level and enables high precision measurement. The response increase of SAW based capacitive sensor is produced just before the two capacitive electrode contacts by the existence of parasitic resistance of capacitive electrode. In this paper, we analyze the effects of parasitic resistance and propose the calibrating method using lumped component and execute the high precision gap measurement using calibrated system. And xx nm resolution and yy μ m stroke was attained.

Key Words : Surface acoustic wave(표면 탄성파), Capacitive sensor(정전용량센서), Calibration(보정), Gap measurement(간극 측정)

1. 서론

표면 탄성파 장치(Surface acoustic wave device, SAW device)는 입출력 Inter digital transducer(IDT), 지연선 그리고 IDT에 연결된 외부 부하의 세 부분으로 구성되어 있으며, IDT, 연결된 외부 부하 또는 지연선에서의 특성을 이용하여 통신 분야의 고주파 필터, 압전 탄성 재료의 기계적 변형을 이용한 선형 구동기, 지연선 또는 부하에서의 임피던스 변화에 따른 센서로 다양한 산업 분야에서 두루 응용되어 왔다[1].

이 중 센서로서의 응용은 그 방법이 매우 다양하여, 외부의 물리적 환경 변화에 의한 지연선에

서의 속도 변화와 이에 따른 응답 변화를 이용한 온도, 압력 등의 물리적 센서로 적용 뿐만 아니라, 특정 물질의 지연선 코팅과 이에 따른 물질의 선택적 반응 유발로 인한 바이오/화학 센서에 이르기 까지 매우 다양한 적용 사례가 보도되고 있다 [2-4]. 또한 외부 부하와 결합되어 임피던스 센서로 적용된 사례도 많이 보도되고 있는데, 이 경우, 외부 부하 고유의 특성과 표면 탄성파 장치가 가지는 지연, 필터로서의 기본적인 특징을 그대로 이용할 수 있어, 저잡음, 고효율의 센서로 적용이 가능한 특징이 있다. 이 경우 표면 탄성파 장치는 지연선에서의 변화에 따른 변화로는 측정이 어려운 전류 또는 수중 물질 등의 측정 시스템으로 적용이 가능하며 [5-8], 부하 특성의 변화를 일으키는 모든 종류가 적용이 가능하기 때문에, 보다 더 다양한 형태의 저잡음, 고효율 측정 시스템으로 구현이 가능하다.

본 연구에서는 외부 임피던스 센서의 신호처리 장치로 적용하는 방법을 이용하여, 정전 용량 센

† 연세대학교 기계공학과
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-4677

* 연세대학교 기계공학과

서의 신호 처리 장치로 적용하였다. 또한 외부 임피던스 센서 자체가 가지는 기생 저항에 의해 하게 되는 전극 접촉 직전의 응답 증가 현상을 보정하였다. 표면 탄성파 장치를 정전 용량 센서를 비롯한 외부 임피던스의 신호 처리 장치로 적용한 경우는 매우 많지만, 기존의 연구는 외부 임피던스의 신호처리 장치 자체로서 주로 적용 되었으며, 정전 용량 센서를 적용한 경우 두 전극간의 간극이 일정 이상 떨어진 상태에서 미소 변형의 측정 에 집중 되었다. 그러나, 전극의 거리가 줄어들어 두 전극간에 접촉이 발생되기에 이르면, 접촉 직전에 응답이 오히려 증가하는 현상이 일어난다. 따라서, 간극이 매우 작아지는 경우에는 측정에 한계점을 지니게 된다. 본 연구는 이러한 현상의 발생 원인을 전극 소재에 따른 기생 저항 성분의 존재에서 접근을 시도하며, 이를 통해 접촉점 부근에서의 응답 특성을 전기 음향 등가 모델을 통해 검증한다. 또한, 이를 보정하기 위해 집중 소자를 사용하여, 접촉 부근에서의 응답 증가 현상을 보정하여, 완전 접촉 상태에서부터 최대 스트로크 영역까지 모두 사용이 가능한 정전 용량 측정 시스템으로 구현하며, 이를 이용해 초정밀 간극 측정에 적용한다. 그리고 실험과의 비교 분석을 통해 보정 방법의 타당성을 입증하고, 개선된 표면 탄성파 정전 용량 측정 시스템의 성능을 검증한다.

2. 설계 및 해석

외부 임피던스가 연결된 표면 탄성파 장치는 Fig. 1 과 같이 압전 탄성 재료의 기판의 양 쪽에 전기 신호의 입출력을 위한 IDT 가 형성되어 있으며, 입력 IDT 에는 전원의 신호가 입력되고, 출력 IDT 에는 외부 임피던스가 연결된 구조로 되어 있다.

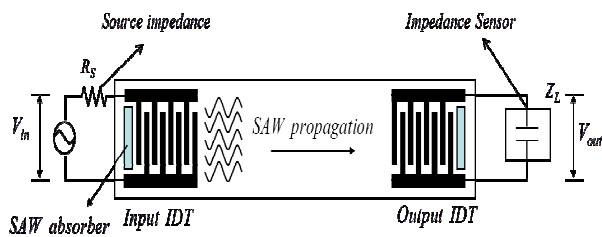


Fig. 1 Basic structure of SAW device

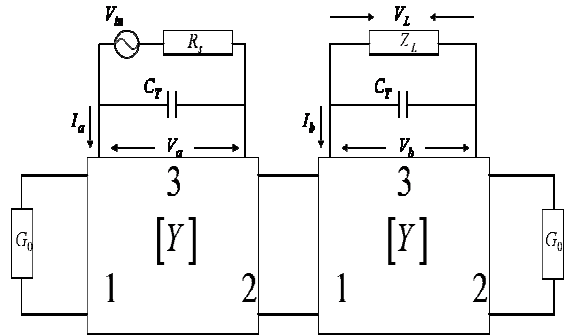


Fig. 2 Electro-acoustic equivalent circuit model

이 때, 기판의 양 끝에는 양방향으로 진행하는 표면 파 중 끝 쪽으로 진행하는 표면파를 흡수하여, 경계에서의 반사에 의한 파동 간섭에 따른 성능 저감을 줄이기 위한 부드러운 재료의 흡음재가 도포된다. 이와 같은 표면 탄성파 장치의 전달함수는 전원입력 신호의 크기 대비 외부 임피던스의 응답 크기로서 정의 되며, Fig. 2 로 표현되는 전기 음향 등가 모델을 통해 그 응답 특성을 예측할 수 있고, 식 (1) 과 같이 전원 및 외부 부하의 임피던스와 입출력 IDT 및 상호 어드미턴스를 통해 그 특성을 예측할 수 있다. [9]

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

이 때, y_{ij} 로 표현되는 어드미턴스는 i 포트에서의 입력에 따른 j 포트에서의 출력시의 어드미턴스를 나타내며, a 와 b 를 각각 입력과 출력 포트라 가정하면, 자세한 표현은 다음과 같다.

$$y_{aa} = G_a(f) + j2\pi f C_a^T$$

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

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

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

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

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

$$X = \frac{f-f_0}{f_0}$$

$$G_0 = K^2 C_s f_0,$$

$$C_a^T = NC_a^S, \quad C_b^T = MC_b^S$$

$$C_a^S = C_0 W_a, \quad C_b^S = C_0 W_b$$

이 때, $f_0, G_0, C_a^T, C_b^T, C_a^S, C_b^S, W_a, W_b, R_S, Z_L, N, M$ 은 각각 표면 탄성파 장치의 중심 주파수, 특성 어드미턴스, 입력 IDT의 정전 용량, 출력 IDT의 정전 용량, 입력 IDT의 1쌍의 정전 용량, 출력 IDT의 1쌍의 정전 용량, 입력 IDT의 길이, 출력 IDT의 길이, 입력 전원 임피던스, 부하 임피던스, 입력 IDT의 수, 출력 IDT의 수를 나타내며, C_S 는 입력과 출력 IDT에서 각각 C_a^S 와 C_b^S 를 의미한다. 부하 임피던스는 출력 IDT에 연결되는 실제 센서에 해당하며, 본 연구에서는 정전 용량 센서에 해당한다.

이상적인 정전 용량 센서는 기생 성분 없이, 순수한 정전 용량의 변화만을 감지하게 된다. 그러나 실제 시스템에서는 센서의 전극을 구성하는 재료, 회로 연결에 사용되는 전선과 같이 여러 재료들이 사용되며, 이러한 모든 재료들은 저항 성분을 가지게 되며, 이는 시스템 전체의 기생 성분으로 작용을 하게 된다. 이러한 기생 성분은 외부 부하와 표면 탄성파 장치의 연결과정과 측정을 위한 부하 자체에 의해서 커지기도 한다. 기생성분의 저항은 선로의 길이에 따라 증가하는 특징을 가지기 때문에 Fig. 3과 같이 외부 부하와 저항의 직렬 연결로 모형화가 가능하다. 따라서 외부 부하가 정전 용량 센서로 사용된 경우 부하 임피던스 Z_L 은 식 (2)와 같이 수학적으로 표현이 가능하며, 압전 기판 재료에 따른 표면 탄성파 물성을 통해 식 (1)에 대입하여 기생성분의 특성에 따른 시스템 전체의 응답 특성에 대한 해석이 가능하다.

$$Z_L = R_L - \frac{j}{2\pi f C_L} \quad (2)$$

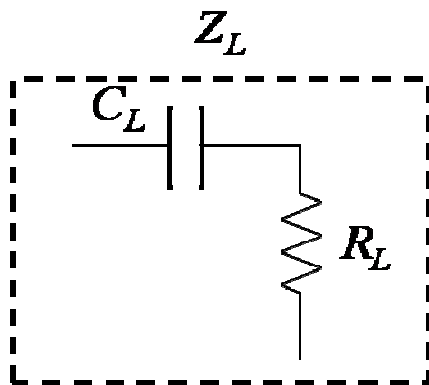


Fig. 3 Serial model of capacitive sensor considering parasitic resistance

Table 1 SAW properties of 128° YX LiNbO₃

K ² (%)	C ₀ (pF/cm)
5.3	5.0

본 연구에서 사용된 압전 기판은 온도 계수와 압전 상수가 커서, 표면 탄성파 장치에 두루 적용되는 128° YX LiNbO₃를 이용하였고, 그 물성을 표 1에 요약하였다. 그리고 중심 주파수는 13.74 MHz로 선정하였으며, 음장의 길이와 입출력 IDT의 개수는 각각 9 mm 30 쌍으로 정하였다. 그리고 입력된 전원의 크기는 1 V로 하였다.

기생 성분이 고려된 정전 용량 센서의 구조는 면적 A 의 크기와 간극이 d 로 유지되는 평행판 구조인 경우, 식 (2)의 Z_L 은 식 (3)과 같이 부하 기생 저항과 면적 A , 간극 d 의 함수로 표현이 가능하다. 이 때, ϵ 는 두 전극 사이에 채워진 재료의 유전율에 해당한다. 본 연구에서는 도체간의 미소 간극 측정에 적용을 하였기 때문에, 공기의 유전율을 적용하였고, 그 값은 8.854 pF/m에 해당한다. 그리고 면적의 크기는 10×10 mm²로 고정되었다. 간극은 접촉 상태에서부터 응답이 일정 수준으로 포화 될 때까지 증가되었다.

$$Z_L = R_L - \frac{jd}{2\pi f \epsilon A} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (1)에 대입 후 기생 저항 R_L 의 존재에 따른 응답을 측정하였고, 그 값이 20 Ω일 때의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 해석 결과에 따르면, 기생 저항이 존재하는 경우, 접촉 상태에서 초기 일부 구간에서 간극 변화에 따라 응답의 크기가 감소하는 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

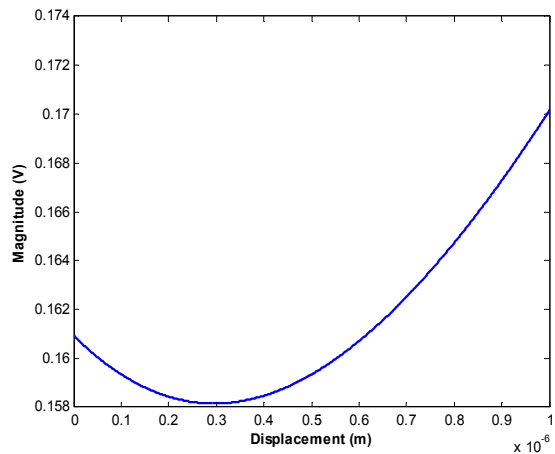


Fig. 4 SAW response by the change of parasitic resistance

Table 2 Capacitance values corresponding to several kinds of parasitic resistance

	$R_L(\Omega)$		
	10	20	30
Magnitude (mV)	90	160	220
Capacitance(nF)	4.79	1.44	0.74

따라서, 이러한 오차를 보정하는 과정이 필수적이며, 이를 위한 방법은 접촉 상태에서와 같은 응답의 크기를 가지는 간극의 크기를 먼저 구하고 그 간극에 해당되는 크기의 집중소자를 사용하여, 회로적으로 직렬 연결 구조의 커패시터를 구현함으로써 가능하다. 표 2 는 몇 가지 경우의 기생 저항 값에 대한 보정 커패시턴스의 크기를 나타내었다.

3. 제작 및 네트워크 해석

앞선 과정을 통해 설계 해석된 표면 탄성파 장치는 사진 식각 공정[10]을 통해 제작되며, 이를 통해 제작된 기판의 모습은 Fig. 5 에 나타내었다.

이 때, IDT 의 두께는 식 (4) 와 같이 기판에서의 표면 탄성파 전파 속도와 파장의 관계에 의해 결정이 되는데, IDT 의 구조가 주기적으로 반복되기 때문에 그 크기는 파장의 1/4 로 정해지게 된다. 본 연구에서 사용한 압전 기판인 128° YX LiNbO₃ 에서 전파 속도는 4000 m/s 이므로, IDT 의 두께는 74 μm 가 된다.

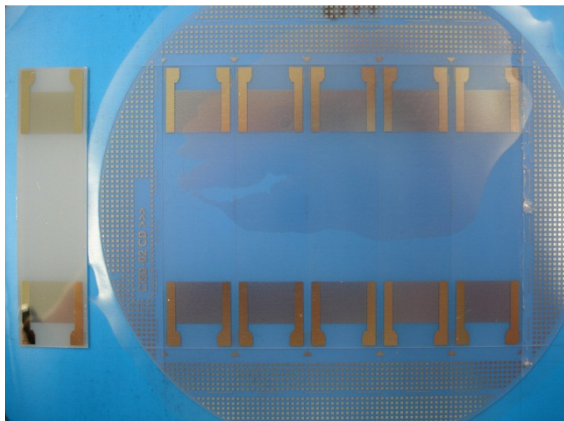


Fig. 5 Fabricated SAW device

$$v = \lambda f \tag{4}$$

이와 같은 과정을 통해 제작된, 표면 탄성파 장치는 전기적/기계적 외부 요인을 최소화하기 위한 후처리 과정을 거치게 된다. 먼저, IDT 에서 기판으로 인가된 전기 신호는 기판에 표면 탄성파 뿐만 아니라, 몸체 탄성파 (Bulk acoustic wave) 또한 발생시키게 된다. 이러한 몸체 탄성파는 기판 내부로 진행하여, 경계면에서 반사를 일으켜, 진행하는 표면 탄성파를 교란하여 시스템의 성능 저하를 일으키게 된다. 이를 최소화하기 위해 기판의 바닥 면은 부드러운 도전성 에폭시를 이용해 바닥 고정된 후 전기적으로 접지된다. 또한 128° YX LiNbO₃ 의 큰 온도 계수로 인해 발생할 수 있는 주변 온도와 압력의 영향을 최소화하기 위해 실험 환경은 25°C 로 일정하게 유지 되었다. 그리고, 지연선의 미세 먼지에 의해 발생하게 되는 표면파 교란 현상을 방지하기 위해 모든 실험은 청정부스 내에서 진행 되었다.

먼저 제작된 표면 탄성파 장치의 중심 주파수 확인을 위해 네트워크 분석기를 이용한 S-parameter 의 측정이 이루어졌다. S-parameter 는 입출력 포트간의 신호 비율을 나타낸 것으로, 수학적으로 식 (5) 와 같이 나타나며 [11], 하첨자는 순서대로 입력 포트와 출력 포트를 나타낸다. 이 때, 입출력 포트에서의 임피던스는 모두 같게 유지되며, 50 Ω 으로 고정되었다.

$$S_{11} = \frac{(Y_0 - y_{aa})(Y_0 + y_{aa}) + y_{ab}^2}{(Y_0 + y_{aa})^2 - y_{ab}^2}, \tag{5}$$

$$S_{21} = \frac{-2y_{ab}Y_0}{(Y_0 + y_{aa})^2 - y_{ab}^2}, Y_0 = \frac{1}{R_S}$$

네트워크 분석기를 이용한 S-parameter 의 측정 결과와 이론적 계산을 Fig. 6 (a) 와 (b) 에 비교하였다. 측정결과 중심 주파수는 13.74 MHz 로 측정되었고, S_{21} 과 S_{11} 의 크기는 각각 5.2 dB 와 16.2 dB 로 측정 되었다. 이 때 이론적 계산치는 각각 5.0 dB 와 16.3 dB 로 실험 치와 5% 이내의 오차 범위를 가짐을 확인하였고, 이상 없이 제작되었음을 알 수 있다. 따라서, 이를 이용해 입력 전극에 중심 주파수인 13.74 MHz 의 신호를 인가하여 간극의 변화에 따른 응답의 크기를 측정하였다. 이 때 입력 신호의 임피던스 R_S 는 50 Ω 이다.

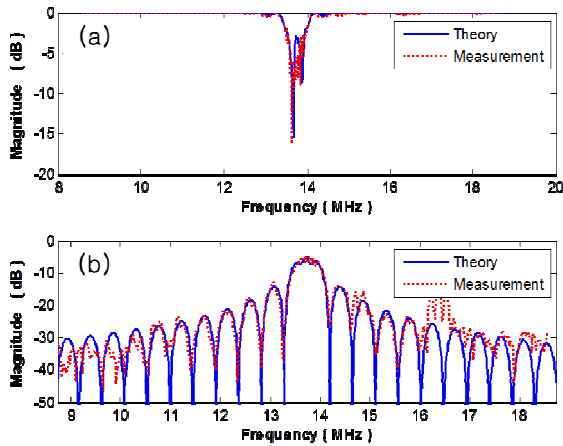


Fig. 6 Scattering parameter measurement
(a) S_{11} (b) S_{21}

4. 보정 및 측정

앞서 언급된 과정을 통해 설계 제작 및 중심 주파수 측정이 이루어진 샘플을 이용하여, 평행판 커패시터 구조의 정전용량 센서와 연결 후 간극 측정에 따른 응답을 측정하였다. 이를 위한 실험 구성을 Fig. 7 에 나타내었다. 이 때, 간극의 조절을 위해 분해능 1 nm 의 초정밀 상용 스테이지를 사용하였고, 13.74 MHz 의 조화 입력을 위한 함수 발생기를 입력 IDT 에 연결하였고, 오실로스코프를 이용하여, 전극 양 단에서의 응답을 측정하였다.

이 때 측정은 중심 주파수 인가에 따른 응답으로 시간응답의 결과를 식 (6) 의 삼각 회귀 분석을 통하여 그 응답의 크기를 구하였다. [12]

$$y = A_0 + A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (6)$$

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

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

y : Measured data, N_1 : Numbers of total data

먼저 두 전극을 접촉시켜, 정전 용량이 없는 상태에서의 측정을 통해 기생 저항 값을 구하였다. 기생 저항 값은 두 전극의 재질이 따라 달라지게 되며, 본 연구에서 사용된 전극은 알루미늄과 하드디스크 드라이브(Hard disk drive; HDD) 의 기록

미디어로 주로 사용되는 알루미늄 코팅 재질의 디스크를 사용하였고, 이를 접지 처리하였다. 두 전극을 접촉시킨 상태에서 응답의 크기를 측정한 결과 0.17 V 의 응답을 나타내었고, 이는 기생성분의 저항이 22 Ω 일 때의 결과와 일치한다. 본 연구에서 사용한 10×10 mm² 의 평행판 구조 정전용량 센서는 22 Ω 의 기생 저항을 가질 때, 약 70 nm 에서 응답이 접촉 상태와 일치하게 되고, 그 이후에는 간극의 증가에 따라, 전체 응답의 크기 또한 증가하게 된다. 따라서, 접촉 상태에서의 응답이 70 nm 가 되도록 하는 집중 소자를 이용하면, 접촉 상태에서부터 이후의 모든 구간을 측정할 수 있게 된다. 본 연구에서 사용한 부하가 정전 용량 센서이기 때문에, 70 nm 에 해당하는 커패시턴스인 1.2 nF 의 커패시터를 직렬로 연결하게 되면, 응답의 감소 없이 접촉 상태에서부터 측정이 가능하다.

따라서, 1.2 nF 의 커패시터를 구성 후 전극에 직렬하여 간극에 따른 측정을 수행 하였고, 이를 Fig. 8 에 나타내었다.

식 (1) 을 이용하여 계산한 결과와 5% 이내의 오차를 보임을 확인하였고, 집중 소자를 이용한 보정 방법의 타당성과 제안된 방법을 통해 정밀 간극 측정 시스템으로 적용이 가능함을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 표면 탄성과 정전용량 센서가 가지는 초기 응답 감소 현상을 보정하기 위해 집중 소자인 상용 캐패시터를 이용하여 기생 저항 성분

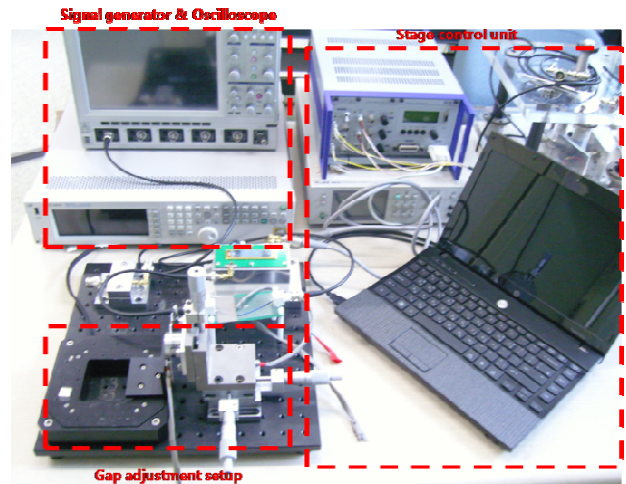


Fig. 7 Experimental setup

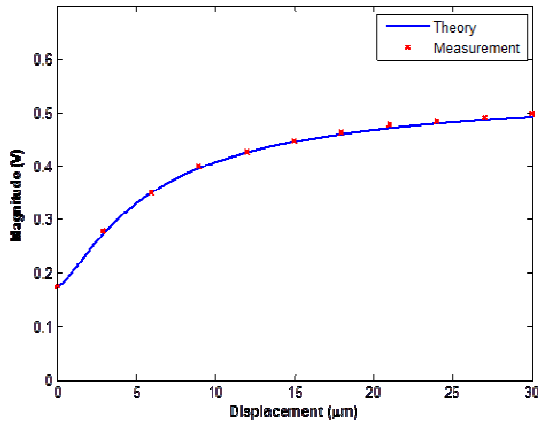


Fig. 8 Gap measurement results after calibration using 1.2 nF capacitor

의 존재에 따른 보정을 수행하였고, 이를 이용하여 간극 측정을 수행하였다. 측정 결과, 이론적인 결과와 5% 이내로 매우 잘 일치함을 확인하였다. 또한 보정에 따라 접촉 이후 모든 간극 구간에서 측정이 가능한 시스템으로 구현하였으며, 간극의 정밀 조절을 통해 보다 고 분해능의 시스템으로 적용이 가능함을 알 수 있다.

후 기

이 연구는 한국 연구재단 일반 연구자 지원사업의 기본 연구사업(과제번호 2009-0076065)의 지원을 받아 실시되었습니다.

참고문헌

[1] I.-T. Tang, H. -J. Chen , M.-P. Houg and Y.-H. Wang, 2003, "A novel integrable surface acoustic wave notch filter", *Solid-State Electronics*, Vol. 47, pp. 2063~2066

[2] K. Länge, B. E. Rapp and M. Rapp, 2008, "Surface acoustic wave biosensors", *Anal Bioanal Chem.*, pp. 1509~1519

[3] J. Kondoh, S. Tabushi, Y. Matsui and S. Shiokawa, 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] M. Z. Atashbar, B. J. Bazuin, M. Simpeh and S. Krishnamurthy, 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] W. Robbins and A. Hietala, 1988, "A simple phenomenological model of tunable SAW devices using magnetostrictive thin films," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 35, pp. 718~722

[6] L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, H. Scherr, U. Wolff, and F. Schmidt, 1998, "Theory and application of passive SAW radio transponders as sensors," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 45, pp. 1281~1292.

[7] R. Steindl, C. Hausleitner, A. Pohl, H. Hauser, and J. Nicolics, 1999, "Giant magneto-impedance magnetic field sensor with surface acoustic wave technology," in *Proc. Eurosensors*, Delft, The Netherlands.

[8] J. Kim, T.-J. Lee, S.-C. Lim, N.-C. Park, Y.-P. Park and K.-S. Park, 2010, "Design of Capacitive Displacement Sensor and Gap Measurement with High Precision Using Surface Acoustic Wave Device," *KSNVE*, Vol. 20, No. 5, pp. 437~443.

[9] Colin K. Campbell, 1998, "Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications," Academic Press, San Diego.

[10] S.W. Jones, 2000, "Photolithography", IC Knowledge LLC

[11] D.M. Pozar, 2005, "Microwave Engineering," Wiley, New Jersey.

[12] S. C. Chapra and R. P. Canale, 2003, "Numerical Methods for Engineers", McGraw Hill, New-York.