

표면 탄성과 장치에 기반한 무선 간극 센서

Wireless Gap Sensor Based on Surface Acoustic Wave Device

김 재 근*. 박 경 수**. 박 노 철**. 박 영 필**. 이 택 주***.

임 수 철****. 엄 원 석†

Jaegeun Kim, Kyoung-Soo Park, No-Cheol Park, Young-Pil Park, Taek-Joo Lee,
Soo-Cheol Lim and Won-Suk Ohm

(2010년 7월 23일 접수 ; 2011년 1월 27일 심사완료)

Key Words : Surface Acoustic Wave(SAW ; 표면 탄성파), Capacitive Load(용량성 부하), Gap Sensor(간극 센서), Wireless(무선)

ABSTRACT

In this paper, we report a high-precision wireless gap sensor based on a surface acoustic wave (SAW) device. The sensing element is a parallel-plate capacitor whose dimensions are $3 \times 3 \text{ mm}^2$, and is attached to the SAW device as an external load. The SAW device, equipped with an RF antenna, serves simultaneously as a signal conditioner and an RF transponder. The center frequency of the SAW device is 450 MHz. The wireless gap sensor prototype exhibits a resolution of 100 nm and a sensing range of $50 \mu\text{m}$. The proposed sensor system can be used for remote, high-precision gap measurement in hard-to-reach environments.

1. 서 론

표면 탄성파 장치(surface acoustic wave device; SAW device)는 특정 주파수 대역에서 선택적으로 작동하여, 저잡음, 협대역의 유·무선 센서 또는 이를 위한 신호처리 장치로 널리 이용된다. 이 중, 신호 처리 장치로서의 응용은 다양한 임피던스 센서와의 결합을 통해 정밀 측정 시스템으로 활용 가능하며, 여러 산업 분야에서의 응용을 목적으로 두루 연구

되었다. 전기전자 분야에서는 지연선(delay line)에 자기 변형 층을 코팅하여 발생하는 중심주파수 이동 및 위상 변화를 통해 전류 측정 센서로 이용되었으며⁽¹⁻³⁾, 바이오/화학 분야에서는 지연선 자체 또는 특수 물질의 코팅을 통해 특정 성분의 선택적 정량 검출 센서로 사용되기도 한다⁽⁴⁾. 또한 표면 탄성파 상호 작용을 이용한 재료 내부의 전위(dislocation) 해석에도 적용되었으며⁽⁵⁾, 기계 분야에서는 반사계수의 위상차 분석을 통해 차륜의 무선 온도 측정 시스템을 비롯하여, 압력 측정 시스템, 위치 추적 시스템 등으로 다양하게 적용된 바 있다⁽⁶⁻⁸⁾.

이러한 기존 연구의 대부분은 반사계수를 이용한 방법으로, 지연선의 물성 변화 또는 외부 임피던스 차이에 따른 반사 신호의 비율과 위상차를 분석하여 수행되었다. 반사 신호를 이용하면, 무전원 또는 상대적으로, 적은 소비전력으로 센서의 동작이 가능하다는 특징이 있다. 그러나 신호 지연이 상대적으로 길어지게 되어, 진행형 신호를 이용한 방법에 비

† 교신저자; 정회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : ohm@yonsei.ac.kr

Tel : (02)2123-5819, Fax : (02)312-2159

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과

*** 아이티에프(주)

****삼성전기(주)

이 논문의 일부는 2010년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

해 응답이 늦어지게 된다⁽⁹⁾. 또한, 무선시스템에 적용 시에는, IDT(inter digital transducer)와 임피던스에 의한 신호 감쇄의 영향으로 송수신 단에서의 잡음의 영향이 상대적으로 커지게 되어 초정밀 측정에는 한계가 있다. 이 연구에서는 반사 신호를 이용하는 기존 측정 방법이 가지는 단점을 개선하기 위해 상대적으로 측정 효율이 높은 진행 신호를 이용한 센서를 제안하고, 이를 이용해 초정밀 무선 간극 측정 시스템을 구현한다.

진행형 신호를 이용한 간극 측정은 외부 간극 측정 부하를 연결하여, 임피던스 변화에 따른 진폭 변조 신호를 해석하는 방법으로, 다양한 종류의 측정 부하가 사용될 수 있다. 주로 사용되는 부하는 용량성(capacitive) 부하로, 비접촉 측정과 나노미터 수준의 분해능이 가능하여, 초정밀 이송 시스템에 이용되며, 표면 탄성과 장치를 이용해 20 nm 분해능을 가지는 센서로 구현된 바 있다⁽¹⁰⁾. 이 시스템에서는 13.8 MHz의 비교적 낮은 중심주파수를 사용하였기 때문에, 상대적으로 큰 표면 탄성과 장치가 사용되었고, 무선시스템으로 사용될 경우에는 소형화에 어려움이 있다. 따라서 소형화와 무선 신호 전송에 보다 유리한 450 MHz 중심주파수의 표면 탄성과 장치를 설계하고, 용량성 부하와의 결합을 통해 비접촉 무선 간극 센서를 제작하여 그 특성을 분석하고 성능을 검증하였다.

2. 등가회로 모델

외부 임피던스와 연결된 표면 탄성과 장치의 구조와 전달함수는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전기 음향 등가회로 모델에 의해 이론적으로 예측 가능하며, 식 (1)과 같이 표현된다⁽¹¹⁾.

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

여기서,

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

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

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

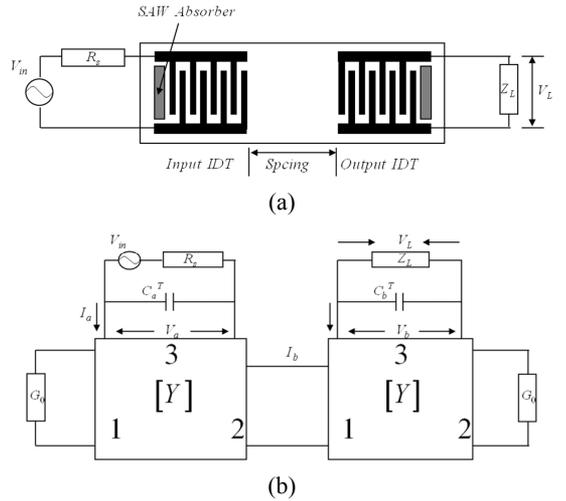


Fig. 1 (a) Overall structure of SAW device, (b) Electro-acoustic equivalent circuit model

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

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

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

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

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

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

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

$$C_a^S = C_0W_a : \text{Capacitance of one finger pair of Input IDT(F)},$$

$$C_b^S = C_0W_b : \text{Capacitance of one finger pair pair of Output IDT(F)}$$

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

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

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

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

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

$$K: \text{Electromechanical coupling coefficient},$$

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

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

로 표현된다. 입력 임피던스 R_S 는 신호 발생기의 임피던스이며, 출력 임피던스 Z_L 은 간극 측정에 이용

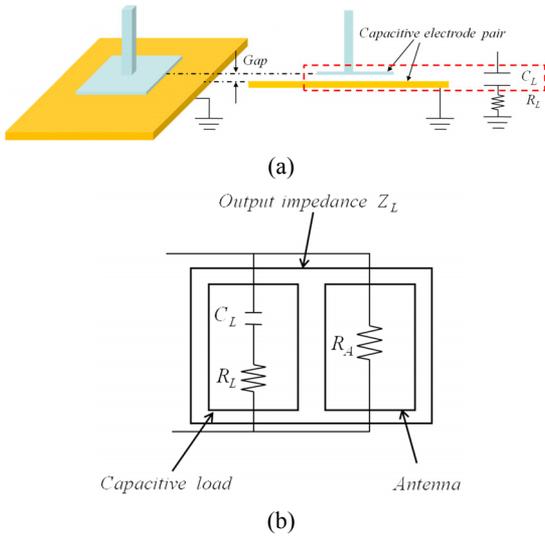


Fig. 2 (a) Structure of capacitive load C_L (b) Equivalent output impedance model

Table 1 Material properties of 128° YX LiNbO₃

Velocity(m/s)	K^2 (%)	C_0 (pF/cm)
3992	5.3	5.0

되는 용량성 부하 C_L , 회로 연결에 따르는 기생 저항 R_L 및 무선 전송을 위한 안테나 임피던스 R_A 로 구성된다. 간극 측정을 위한 용량성 부하 C_L 의 구조와 안테나의 임피던스가 고려된 등가 출력 임피던스 Z_L 의 모델은 Fig. 2와 같이 용량성 부하 C_L , 기생 저항 R_L 의 직렬 연결과 안테나 임피던스 R_A 의 병렬 연결로 구성된다. 간극의 측정에 사용되는 전극은 용량성 부하 C_L 과 기생 저항 R_L 로 모델링할 수 있으며, R_L 의 값은 실험적으로 측정된다. 전극으로부터 측정된 간극의 정보는 병렬로 연결된 안테나에 의해 계측기로 송신된다. 송신된 간극의 정보는 무선 거리에 따라 감쇄가 이루어지는데, 이 연구에서의 무선 거리는 일정하게 유지하였다.

표면 탄성과 장치를 위한 압전 재료는 128° YX LiNbO₃이 사용되었고 그 물성치는 Table 1과 같다. 여기서,

K^2 : Electromechanical coupling coefficient,

C_0 : Capacitance / Finger pair / Unit length

와 같다.

IDT의 선간의 간격은 표면 탄성과 파장의 1/4에

해당하는 크기로 정해지는데, 이때, 파장의 길이는 표면 탄성과 속도 v 와 주파수 f 의 함수로서 식 (2)에 의하여 산출된다.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2)$$

따라서, 450 MHz의 중심주파수가 사용된 경우 IDT의 선간의 간격은 $2.2 \mu\text{m}$ 이며, IDT finger의 길이 및 IDT 개수는 몸체 탄성과(bulk acoustic wave; BAW)에 의한 영향을 최소화하기 위해 각각 파장의 120배와 50쌍으로 선정하였다⁽¹²⁾.

3. 제작 및 실험구성

등가회로 모델을 거쳐 설계된 표면 탄성과 장치는 사진 식각 공정(photolithography)을 통해 제작되며⁽¹³⁾, 그 완성된 형태는 Fig. 3과 같다. 제작된 표면 탄성과 장치는 몸체 탄성과에 의한 영향을 더욱 줄이기 위해 도전성 에폭시를 통해 고정되었으며⁽¹²⁾, 주위 환경이 표면 탄성과 특성에 영향을 주지 않도록 차폐된 후 전기적으로 연결되었다. 간극의 측정을 위한 용량성 전극은 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 의 크기로 설계되었으며, 측정은 2 nm 분해능의 레이저 센서를 이용하였다. 이를 바탕으로 구성된 전체 실험 장치는 Fig. 4와 같다. 신호 발생기와 송수신 안테나의 특성 임피던스는 50 Ω이며, 간극 신호 송수신을 위한 안테나는 420~470 MHz 대역의 50 Ω 단일 이득 안테나를 사용하였다. 이때, 표면 탄성과 장치로 인가된 입력 신호의 크기는 2.5 V이다. 간극의 조정은 1 nm의 분해능과 100 μm의 스트로크를 가지는 상용 스테이지를 이용하였으며, 무선신호의 계측을 위한 오실로스코프의 측정 임피던스는 DC 1 MΩ으로 설정되었다.

나노미터급의 측정을 위해서는 먼지와 같은 초소형 입자의 영향 또한 중요한 변수로 작용하기 때문에 모든 실험은 class 10의 청정부스 내에서 수행되었다. 또한 무선 측정은 잡음의 영향을 크게 받기 때문에 실제 실험 시에는 측정을 위한 전극 이외의 모든 부분은 특수 쉴드 테이프와 동축선로를 이용해, 전기적으로 외부와 완전 차폐를 하여 전기적 잡음의 영향을 최소화한 후, 이를 바탕으로 실험을 진행하였다. 무선 측정 거리는 20 cm로 고정하였으며,

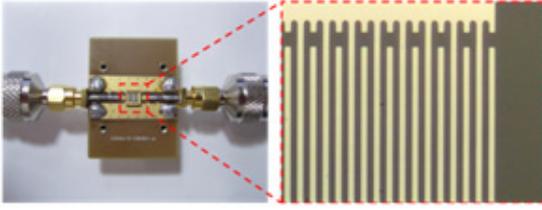


Fig. 3 SAW device with a center frequency of 450 MHz

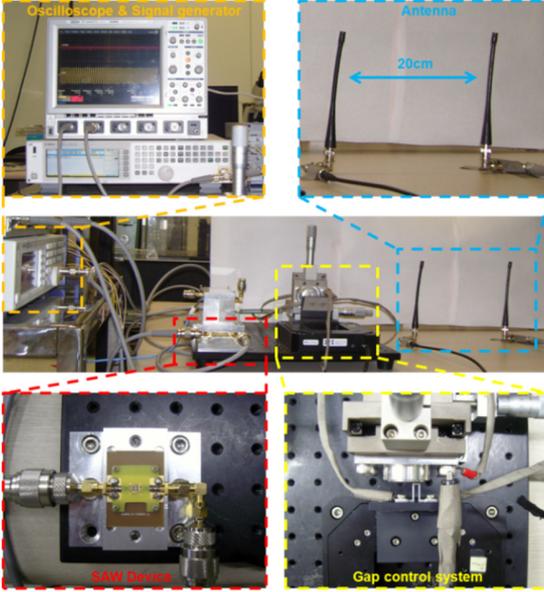


Fig. 4 Experimental setup

이때 신호의 크기는 유선 신호대비 약 70%로 측정되었다.

4. 측정 및 분해능의 결정

이 연구의 표면 탄성과 센서는 용량성 부하 임피던스의 변화에 따른 진폭 변조 형태로 응답이 나타나게 된다. 용량성 임피던스는 사용된 전극의 크기와 전극간 거리에 따라 그 크기와 감도가 변하게 된다. 이 연구에서는 인가 신호 주파수(450 MHz)와 전극의 면적을 고정하였고, 전극간의 간극만을 변수로 설정을 하였다. 따라서, 거리에 따른 표면 탄성과 응답의 크기[식 (1)]는 다음 식 (3)과 같이 간극만의 함수로 다시 정리된다. 이때 간극의 변화에 따른 감도는 식 (4)와 같이 식 (3)의 미분 형태로 정의할 수 있다.

$$H(d) = \frac{y_{ab}\epsilon A}{(1+y_{aa}R_S)(d+y_{bb}\epsilon A)-y_{ab}^2R_S\epsilon A} \quad (3)$$

$$\frac{dH(d)}{d(d)} = \frac{-jackA}{(bk+ck)^2 A^2 - j2(bk+ck)Abd - b^2 d^2} \quad (4)$$

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. 식 (4)에 의하면 전극의 면적이 일정한 경우 응답의 크기는 간극에 따라 감도가 변하게 되며, 이 경우 면적이 클수록 감도의 크기가 줄어들게 됨을 알 수 있다. 또한 식 (3)에 의하여 응답이 가지는 최대 크기는 일정함을 알 수 있다. 따라서, 전극의 크기가 작을수록 간극의 변화에 따른 용량 임피던스와 표면 탄성과 응답의 감도가 커지게 되어, 보다 우수한 분해능을 가지는 센서로 구현될 수 있지만, 측정 거리는 감소하게 됨을 알 수 있다. 이 연구에서는 고정된 면적(3×3 mm²)을 사용하여 실험을 진행하였고, 진폭 변조된 신호를 통해 간극을 측정하였다. 변조된 진폭의 크기는 식 (5)와 같이 삼각 회귀 분석을 통해 구할 수 있다⁽¹⁴⁾.

$$y = A_0 + A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (5)$$

여기서,

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} y_i}{N_1} , \quad A_1 = \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} y_i \cos \omega t ,$$

$$B_1 = \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} y_i \sin \omega t ,$$

y_i : Measured data ,

N_1 : Number of total data

이다.

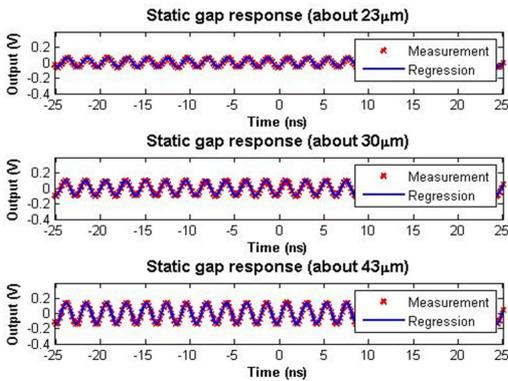


Fig. 5 Time response and regression result

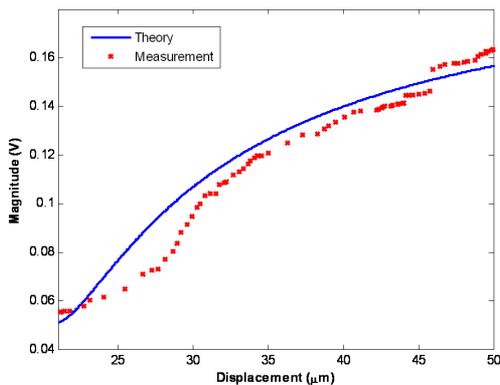


Fig. 6 Amplitude modulated result

일정 간극에서의 시간응답 결과와 식(5)에 따른 회귀 분석 결과가 Fig. 5에 도시되어 있으며, 이를 이용하여 간극의 변화에 따른 진폭의 크기를 식 (1)과 비교 도시하면 Fig. 6과 같다.

식(1)에 의하면, 표면 탄성과 응답의 크기는 부하 임피던스의 크기에 따라 일정한 값으로 수렴하며 변하게 된다. 이 연구에서 설계된 표면 탄성과 장치의 경우, 용량성 부하의 크기에 따라 그 크기가 변하게 되며, 그 값은 두 전극이 접촉되어 있을 때 최소이며, 간극이 커질수록 응답의 크기는 증가하여 그 크기는 0.2 V로 수렴하게 된다. 식(3)에 의하면 0.2 V를 가지게 되는 최소 거리는 약 200 µm이다. 따라서 이론적으로 측정 가능한 최대 영역은 200 µm이며, 측정 잡음의 수준에 따라 분해능 및 실제 측정 가능 영역이 결정된다.

접촉된 두 전극을 일정한 간격으로 증가시킬 때 구현 가능한 측정 분해능은 최대 잡음 크기의 2배

이상이 되어야 한다⁽¹⁰⁾. 이 연구에서 측정 시 최대 잡음의 크기는 1 mV로 측정되었다. 따라서, 일정 간격으로 전극간 거리를 변화 시킬 때 달성 가능한 분해능과 이에 따른 측정 영역은 각각 100 nm, 50 µm로 결정되었으며, 잡음수준의 개선을 통해 더 작은 분해능과 넓은 측정영역이 가능함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 표면 탄성과 장치와 용량성 센서의 결합을 통해 나노미터급의 분해능을 가지는 초정밀 무선센서를 구현하였다. 무선센서로 구현하기 위해 기존의 유선 표면 탄성과 장치보다 높은 중심주파수를 가지는 시스템을 제작하였고, 이에 높은 중심주파수의 사용에 따른 소형화를 동시에 달성하였다. 또한 무선 측정은 잡음의 수준에 따라 매우 큰 영향을 받기 때문에 표면 탄성과 장치와 전극을 연결 후 전극 이외의 부분은 모두 전기적으로 외부와 차폐하여 외부 잡음의 영향을 최소화 하였다. 이를 바탕으로 100 nm의 분해능으로 최대 50 µm의 측정 범위를 가지는 무선 간극 센서를 구현하였다. 또한 잡음수준을 줄일 경우 보다 개선된 센서로 적용 가능함과 더불어, 이를 이용한 고주파 무선 센서의 구현 및 이를 이용한 원거리 초소형/초정밀 측정이 가능함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 일반 연구자 지원사업의 기본연구사업(과제번호 2010-0015965)의 지원을 받아 실시되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Robbins, W. and Hietala, A., 1988, A Simple Phenomenological Model of Tunable SAW Devices Using Magnetostrictive Thin Films, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 35, No. 6, pp. 718-722.
- (2) Reindl, L., Scholl, G., Ostertag, T., Scherr, H.,

Wolff, U. and Schmidt, F., 1998, Theory and Application of Passive SAW Radio Transponders as Sensors, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 45, No. 5, pp. 1281~1292.

(3) Steindl, R., Hausleitner, C., Pohl, A., Hauser, H. and Nicolics, J., 1999, Giant Magneto-impedance Magnetic Field Sensor with Surface Acoustic Wave Technology, in Proc. Eurosensors, Delft, The Netherlands.

(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 Int'l Ultrason., Ferroelect., Freq. Joint 50th Anniversary Conference, pp. 549~553.

(5) Maurel, A., Pagneux, V., Barra, F. and Lund, F., 2010, Surface Acoustic Waves in Interaction with a Dislocation, Ultrason., Vol. 50, No. 2, pp. 161~166.

(6) Bao, X. Q., Burghard, W., Varadan, V. V. and Varadan, K. V., 1987, SAW Temperature Sensor and Remote Reading System, Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 583~585.

(7) Schimetta, G., Dollinger, F. and Weigel, R., 2000, A Wireless Pressure-measurement System Using a Saw Hybrid Sensor, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. Vol. 48, No. 12, pp. 2730~2735.

(8) Pohl, A., Seifert, F., Reindl, L., Scholl, G., Ostertag, T. and Pietsch, W., 1994, Radio Signals for

ID Tags and Sensors in Strong Electromagnetic Interference, Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 195~198.

(9) Oh, J.-G., Choi, B. and Lee, S.-Y., 2008, SAW Based Passive Sensor with Passive Signal Conditioning Using MEMS A/D Converter, Sens. Actuators A, Vol. 141, No. 2, pp. 631~639.

(10) Kim, J., Lee, T.-J., Lim, S.-C., Park, N.-C., Park, Y.-P. and Park, K.-S., 2010, Design of Capacitive Displacement Sensor and Gap Measurement with High Precision Using Surface Acoustic Wave Device, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 437~443.

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

(12) Subramanian, H., Varadan, V. K., Varadan, V. V. and Vellekoop, M. J., 1997, Design and Fabrication of Wireless Remotely Readable MEMS Based Microaccelerometers, Smart Mater. Struct. Vol. 6, No. 6, pp. 730~738.

(13) Jones, S. W., 2000, Photolithography, IC Knowledge LLC.

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