한국군사과학기술학회지 제12권 제1호, pp. 106∼113, 2009년 2월

학술논문 센서 · 신호처리 부문

표면탄성파를 이용한 자이로스코프 개발

Development of a SAW based Gyroscope

오 해 관* 윤 성 진** 이 기 근* 왕 웬* 양 상 식*
Hae-Kwan Oh Sung-Jin Yun Kee-Keun Lee Wen Wang Sang-Sik Yang

Abstract

This paper presents a surface acoustic wave(SAW) micro-electro-mechanical-systems(MEMS) interdigital transducer (IDT) gyroscope with 80MHz central frequency on a 128° YX $LiNbO_3$, which is consisted of a two-port SAW resonator, metallic dots and dual delay lines for the sensor and reference oscillators. Reason for using two delay line oscillators is to extract the gyroscope effect by comparing the resonant frequencies between two oscillators and to compensate the temperature effect. Based on the coupling of modes(COM) simulation, an 80MHz two ports SAW resonator and dual delay line were fabricated and characterized by the network analyzer. Obtained sensitivity was 109Hz/deg · s^{-1} in the angular rate range of 0∼1000deg/s. Good Linearity and superior directivity were observed.

Keywords : Coriolis Force(코리올리 힘), Surface Acoustic Wave(표면 탄성파), Self-Oscillation(자가 발진), SAW Oscillator(표면탄성파 발진기), SAW Resonator(표면탄성파 공진기)

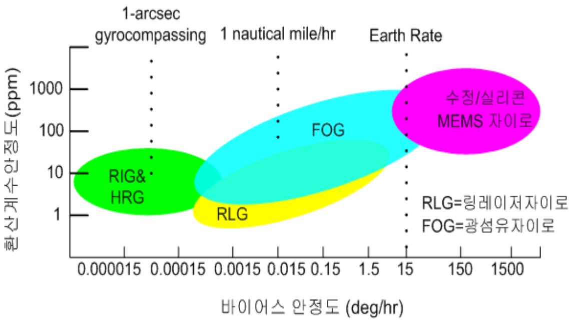
1. 서 론

자이로스코프는 관성공간에서 회전율 혹은 회전각을 측정하는 센서이다. 지난 수십 년 동안 기계식, 광학식 자이로스코프에 대한 광범위한 연구 개발이 이루어졌던 반면 최근에는 미소기전시스템(MEMS)기술을 기반으로 한 저가의 초소형 자이로스코프 개발에 관심이 모아지고 있다(그림 1)[1∼5]. 마이크로 자이로스코프 개발의 주 목적은 단순히 유도, 조종, GPS 보정 항법을 위한 기존 자이로의 대체뿐만 아니라, 지능탄, 초소형 무인기, 마이크로 로봇 등과 같이 MEMS 기술이 아니면 불가능한 혁신적인 무기체계를 실현하기 위해서이다. 특히 포발사 유도포탄이나 전차 지능탄과 같은 정밀타격 무기체계의 핵심부품인 자이로스코프 센서는 적용 체계의 특성상 초소형(50㎣), 고내충격성(20,000∼50,000g), 고기동성(10000deg/sec) 등의 극한 조건을 만족시켜야 하기 때문에 기존의 크기가 크고, 고가인 기계식이나 광학식 자이로스코프 기술로는 구현이 불가능하다[6,7].

이로 인해 최근에 표면 탄성파(SAW : Surface Acoustic Wave) 기반의 자이로스코프의 필요성이 증가하고 있다[8,9]. SAW 자이로스프의 경우 움직이는 구조체가 없고, 단지 압전 물질 표면에 따라 진행하는 탄

† 2008년 12월 17일 접수∼2009년 1월 22일 게재승인
* 아주대학교(Ajou University)
** 국방과학연구소(ADD)
책임저자 : 오해관(keekeun@ajou.ac.kr)

성파를 이용하기 때문에 강인한 내구성과 고내충격성, 초소형의 특성을 갖고 있으며, 2차원의 평면 가공 기술만으로 쉽게 제작할 수 있다. 몇 몇 연구 그룹들의 SAW 기반 자이로스크프의 시도가 있었지만 아직 성공적인 결과를 얻지는 못하였다. 본 연구에서는 SAW 기반에 저속의 각속도에서도 측정이 가능하며, 고내충격성과 고기동성을 갖는 초소형 자이로스코프를 개발하고자 한다.

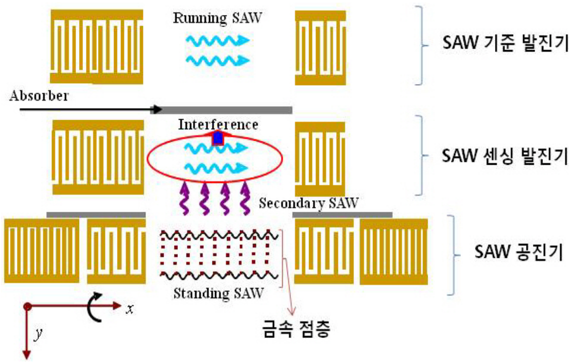


[그림 1] 자이로스코프의 세계시장 현황

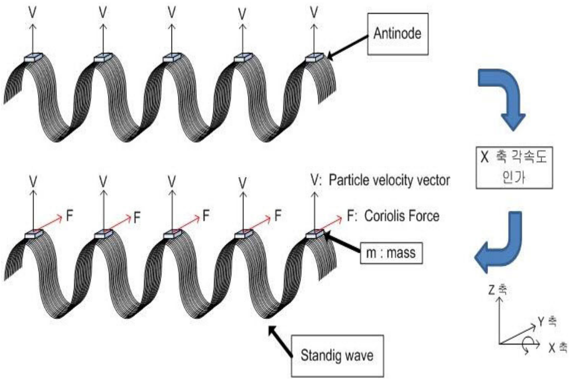
2. SAW 기반 자이로스코프의 동작원리

본 연구에서 제안하는 표면탄성파(SAW) 기반 자이로스코프의 개략도는 그림 2(a)와 같다. 자이로스코프는 한 개의 표면탄성파 공진기(SAW Resonator)와 동일 구조로 설계된 두 개의 표면탄성파 지연선 구조(Delay Line)의 발진기(SAW Oscillator)로 구성 되어 있다. 우선 맨 하단의 SAW 공진기는 cavity 내에 증착된 금속 점 층(Metallic Dot Layer)의 상하진동운동(± z축)에 의해, 진동방향의 직각방향(± y축)으로 코리올리힘(Coriolis Force)을 발산시키며, 이 코리올리힘에 의해 제2의 새로운 표면탄성파(Secondary SAW)가 생성되어 센서 delay line으로 흐르게 된다. 가운데 SAW 발진기는 발생된 Secondary SAW에 의해 간섭을 받아 발진 주파수의 변화가 생기며(SAW 센싱 발진기), 상단의 발진기는 간섭을 받지 않아 발진 주파수가 변하지 않는다(SAW 기준 발진기). 이 차이를 측정 회로를 통하여 검출하여, 회전 각속도를 측정할 수 있게 된다.

SAW 공진기는 2-port 방식이며, 입력 IDT(Interdigital Transducer)와 출력 IDT 사이의 cavity에는 금속 점 층(Metallic Dot Array)이 있다. 금속 점의 위치는 정상파(Standing Wave)의 파복(Antinode)에 있도록 설계되었다. 기판으로 사용된 128° YX $LiNbO_3$는 레일리 파(Rayleigh Wave)를 발생시키며, 발생된 레일리 파는 진행방향을 포함한 연직면 내에 타원 진동의 형태인데 파복 부분에서는 표면에 수직 방향의 입자 속도(V : Z축 방향) 성분을 갖는다. 외부로부터 X축 방향의 각속도(Ω)가 인가되면, 질량이 m인 금속 점층은 Y축 방향의 코리올리 힘($F = 2mV \times \Omega$)을 발생한다(그림 2(b)).



(a) SAW 기반 자이로스코프 구조 및 동작 원리



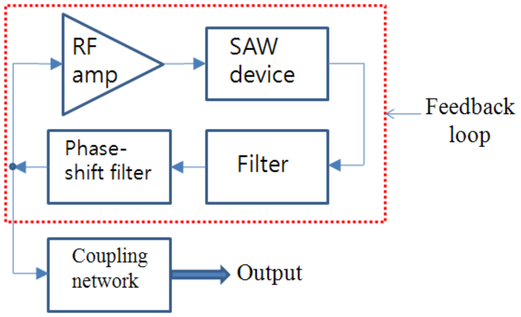
(b) 금속점층을 이용한 코리올리 힘 발생

[그림 2] SAW 기반 자이로스코프 개략도

기존의 센서들이 코리올리 힘을 만들기 위해 다층의 구조체로 설계되어 충격에 약한 반면, 본 센서는 금속 점층만으로 코리올리 힘을 생성할 수 있어 구조체가 필요 없고, 충격에 강한 특성을 가진다.

SAW 발진기는 그림 3과 같이 자가 발진(Self Oscillation) 방식으로 동작되며, 두 발진기 모두 같은 발진 주파수로 설계하였다. 자가 발진 회로를 구성하

기 위해 피드백증폭기(RF Amp)와 phase shifter를 사용하였다[10].



[그림 3] 자가 발진 회로의 개략도

공진기 금속 점층의 코리올리 효과에 의해 생성된 Secondary SAW는 간섭 효과에 의해 센싱 발진기의 진행파 속도를 변화시키게 되고, 변화된 속도에 의해 발진 주파수가 변화게 된다. 반면 기준 발진기는 Secondary SAW의 영향을 받지 않기 때문에 변화가 없다. 이 두 발진주파수의 차이를 통해, 각속도 정보를 얻을 수 있다. 발진 주파수의 변화는 다음과 같이 예상할 수 있다.

$$F_r = f_{02} + \Delta f_e \tag{1}$$

$$F_s = f_{01} + \Delta f_e + \Delta f_c \tag{2}$$

F_r : 기준 발진기의 출력 주파수,
f_{02} : 기준 발진기의 발진 주파수,
Δf_e : 환경변수(온도, 습도 등)에 의한 주파수 변화
F_s : 센싱 발진기의 출력 주파수,
f_{01} : 센싱 발진기의 발진 주파수,
Δf_e : 환경변수(온도, 습도 등)에 의한 주파수 변화,
Δf_c : 코리올리 힘에의한 주파수 변화

$$\Delta F = F_s - F_r = f_{01} - f_{02} + \Delta f_c \tag{3}$$
$$\fallingdotseq \Delta f_c \ (\because f_{01} - f_{02} \fallingdotseq 0)$$

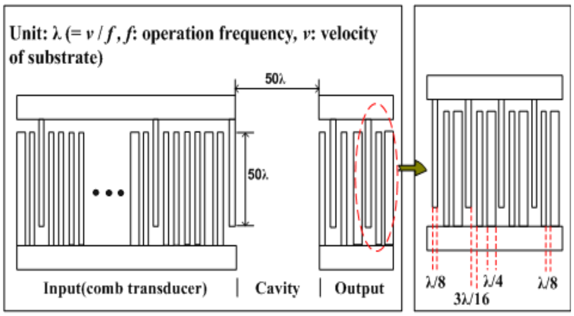
ΔF : 자이로스코프의 출력 주파수

두 SAW 발진기는 같은 구조이며, 단일 기판에서 제작되었기 때문에, $f_{01} - f_{02} = 0$으로 보았을 때, 자이로스코프 출력 주파수(ΔF)에는 외부 환경 요소에 의한 영향이 배제된 코리올리 힘에 의한 주파수 변화만을 얻을 수 있다. 따라서, 128° YX $LiNbO_3$ 기판의 문제점으로 지적된 온도에 의한 주파수 변화 요소를 배제할 수 있다. 또한, 기존 연구 그룹의 경우,[9] IDT의 출력 전압을 직접 측정하였지만, 낮은 측정값(~μV)으로 인해 높은 각속도에서만 측정되는 문제가 있었다. 하지만, 본 연구에서는 주파수의 변화를 측정하는 방식을 사용하여 낮은 각속도에서도 측정이 가능하다.

3. SAW 자이로스코프 및 측정 회로 설계

가. SAW 공진기와 발진기 설계

SAW 공진기와 발진기 모두 주변 측정 회로와의 정합을 고려하여 중심 주파수는 80MHz로 설계하였다. 사용된 압전기판은 128° YX $LiNbO_3$이며, 레일리파(Rayleigh Wave)를 발생시키고 높은 기계결합력(K^2 = 5.56%)을 가지고 있다. 자가 발진으로 구동될 SAW 발진기는 무엇보다 주파수 안정도가 중요하기에 SPUDT (Single Phase Unidirectional Transducer)와 Comb 구조로 설계하였다(그림 4). 일반적인 IDT가 양방향성인 반면 SPUDT는 의도한 진행 방향으로 좀 더 높은 진행파를 생성 시켜, 삽입 손실을 줄여 준다. 입력전달기의 Comb 구조는 단일 모드(Single Mode)의 주파수를 생성시켜, 원치 않는 주파수 성분으로 인한 출력 신호의 불안정성을 최소화 한다.



SAW 발진기 구조 SPUDT

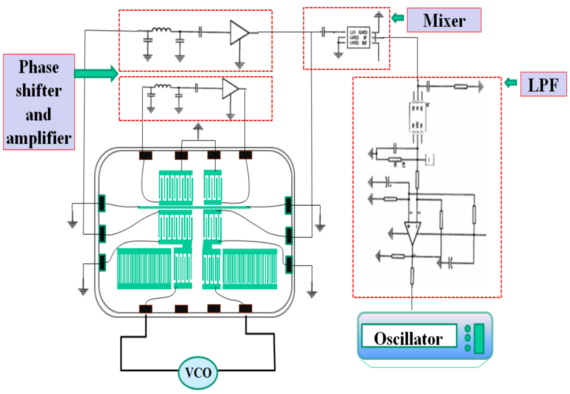
[그림 4] SAW 발진기의 구조 및 SPUDT

기준 발진기의 Secondary SAW에 의한 영향을 완벽히 차단하기 위해 센싱 발진기와의 사이에 흡수체(Absorber)를 두었다. SAW 공진기 cavity에 있는 금속 점 층의 위치는 정상파의 파복 부분에 오도록 설계하

였으며, 면적과 질량은 정상파의 질량 적재 효과(Mass Loading Effect)를 고려하여 결정하였다. 그 밖의 중요 SAW 소자의 매개 변수는 COM(Coupling Of Mode) modeling[11]을 통해 최적의 성능을 낼 수 있도록 설계하였다.

나. 측정 회로 설계

측정 회로의 개략도는 그림 5와 같다. 측정 회로는 SAW 발진기용 자가 발진 회로를 위한 2개의 증폭기, 공진기 구동을 위한 VCO(Voltage-Controlled Oscillator), Phase shifter, 한 개의 멀티플라이어, LC 필터, RLC 필터, LPF(Low Pass Filter)로 구성되어 있다. 증폭기는 넓은 주파수 대역과 높은 이득을 가진 AD8009(Analog Device, Ltd.)칩을 사용하였다. 두 발진기의 발진 주파수 차이를 계산하는 멀티플라이어는 AD835(Analog Device, Ltd.)칩을 사용하였다. 각 소자의 입,출력 단 앞에는 LC와 RLC 필터 등을 두어 신호의 안정성을 높였다. SAW 공진기의 구동을 위해서는 80MHz의 RF 에너지가 필요하다. 외부의 네트워크 분석기를 통해서 측정 회로로 에너지를 인가하는 방식은 RF 신호의 특성상 많은 손실이 발생되기에, 회로에 상용 VCO(KSV-5M075A, K.S.E Ltd.)칩을 두어 공진기 구동 에너지를 공급하였다. VCO칩은 입력 단에 구성된 전압 분배기의 조절을 통하여(Tuning Voltage : 0~5V), 63~88 MHz의 공진 주파수를 공급할 수 있다. 멀티플라이어를 통해 계산된 출력 신호는 LPF를 지나 외부의 오실로스코프를 통해 직접 관찰할 수 있다. 외부 신호 입력은 ±5V(증폭기, 멀티플라이어의 전원, VCO의 전원)와 GND로 최소화 하였고, 입,출력단은 하나의 몰렉스 핀으로 연결하였다.

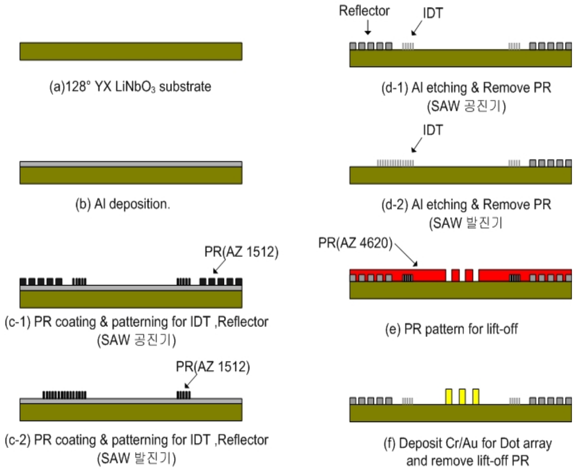


[그림 5] 측정 회로의 설계도

4. 제작 및 측정

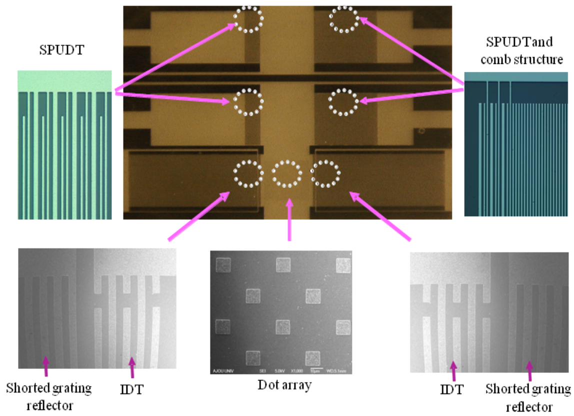
가. 센서 및 측정 보드 제작

SAW 자이로스코프의 제작 공정은 그림 6과 같다. 128° YX $LiNbO_3$위에 알루미늄(Al)을 질량적재효과(Mass Loading Effect)를 고려하여 3000Å 증착하였다. 사진식각(Photolithography)기법을 이용하여 공진기와 발진기를 제작한 후, 금속 점층은 밀도가 높은 Cr/Au를 lift-off 공정을 통해 500/2000Å 높이로 증착하였다.



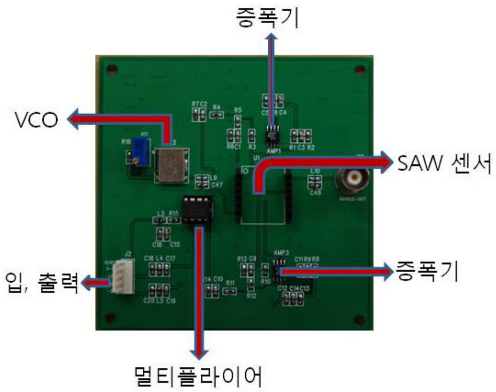
[그림 6] 센서의 제작 공정

그림 7은 제작된 SAW 자이로스코프의 광학 사진이다. 주파수 안정을 위해 설계한 SPUDT, Comb 구조, 금속 점층들이 의도한 형태와 위치에 증착되었음을 확인할 수 있다.



[그림 7] 제작된 SAW 자이로스코프의 광학 사진

측정 회로는 각속도 측정에 사용될 Rate table 규격을 고려하여 그림 8과 같이 기판위에 제작 되었다.



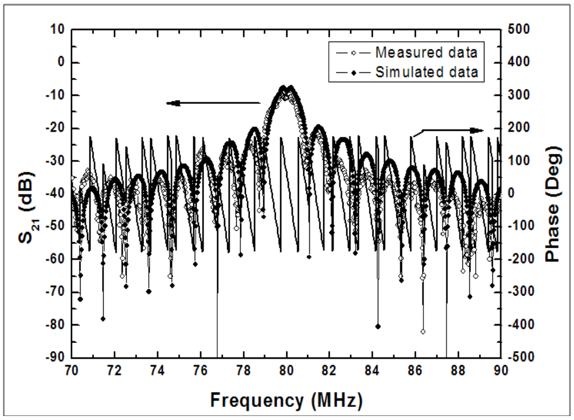
[그림 8] 제작된 측정 회로 기판

나. SAW 자이로스코프의 전기적 특성 측정

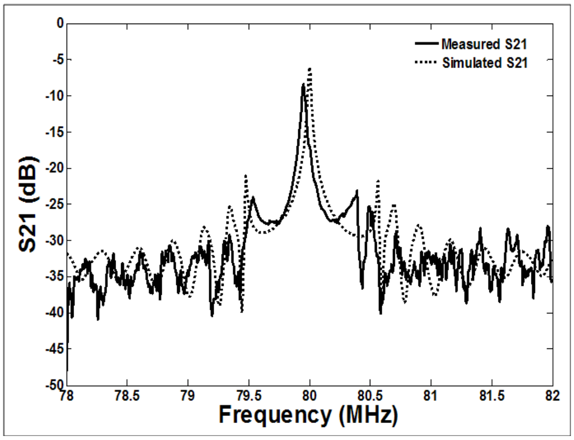
각속도 측정 실험에 앞서 HP 8753D 네트워크 분석기를 통하여 제작된 SAW 자이로스코프의 전기적 특성(진폭, 주파수 응답 S_{21})을 측정하였다. SAW 발진기(그림 9(a))는 삽입손실이 약 10dB이며 중심주파수(80㎒) 부근의 통과 대역에서는 선형적인 주파수 응답 특성을 가진 반면, 그 외 영역에서는 선형적이지 않음을 확인할 수 있으며, 이는 comb 구조의 입력 전달기의 특성인 단일 모드 주파수 성분 때문이다. SAW 공진기의 경우(그림 9(b)) 약 7dB의 삽입손실을 보인다. 측정 결과가 COM modeling을 통한 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 측정된 결과를 바탕으로 회로에 LC, RLC 필터의 사양을 결정하였다. 필터는 주파수 변화를 측정하는 본 자이로스코프 측정 시스템에서 중요 변수 중의 하나이다. 측정 회로 기판과 SAW 자이로스코프 센서의 임피던스 정합(Impedance Matching) 또한 중요 변수로써, SAW 자이로스코프의 전기적 특성 측정을 통하여 얻었다.

다. VCO 출력 측정 및 Rate table

SAW 자이로스코프의 전기적 특성 측정을 통하여, SAW 발진기의 정확한 발진 주파수를 얻었다. 실제 측정 회로에서는 네트워크 분석기가 아닌 VCO칩을 통하여 에너지가 공급되기 때문에, VCO가 네트워크 분석기를 통해 찾아낸 정확한 발진 주파수를 공급할 수 있도록 VCO에 연결된 전압 분배기를 조절하였다.



(a) SAW 발진기의 전기적 특성

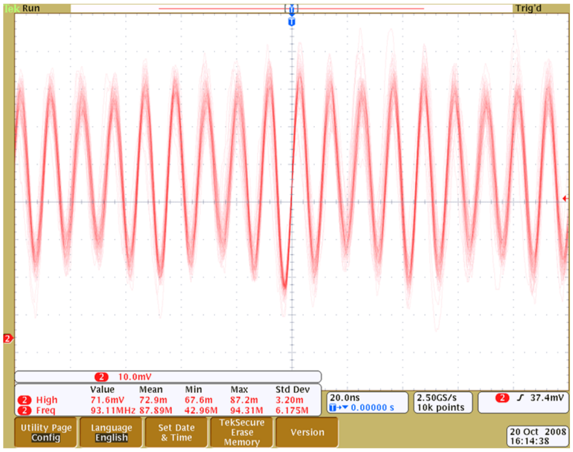


(b) SAW 공진기의 전기적 특성

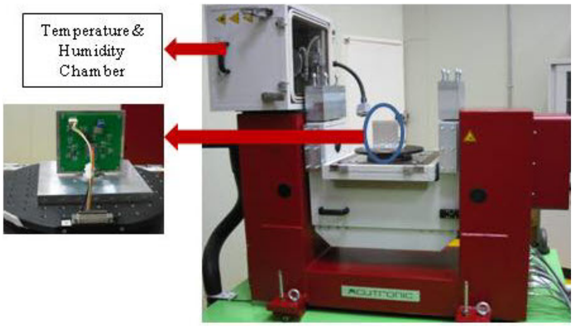
[그림 9] SAW 자이로스코프 전기적 특성 측정

회전을 인가(300deg/sec)하여 측정해 본 출력신호는 그림 10과 같다. VCO 출력 신호가 이상적인 정현파로 구현되지 못하고 다소 불안정한 진폭을 보이는데. 이는 VCO 소자의 온도의존성과 회로 노이즈에 의한 것으로 예상된다. 하지만 의도한 주파수로 에너지를 공급하므로, 진폭의 불안정성은 무시 가능하다. 사용된 Rate table은 Acutronics 社의 Acee37-TCN 모델로서 항온 · 항습의 챔버(chamber)가 있어, 외부 환경 요소 조절이 가능하다(그림 11).

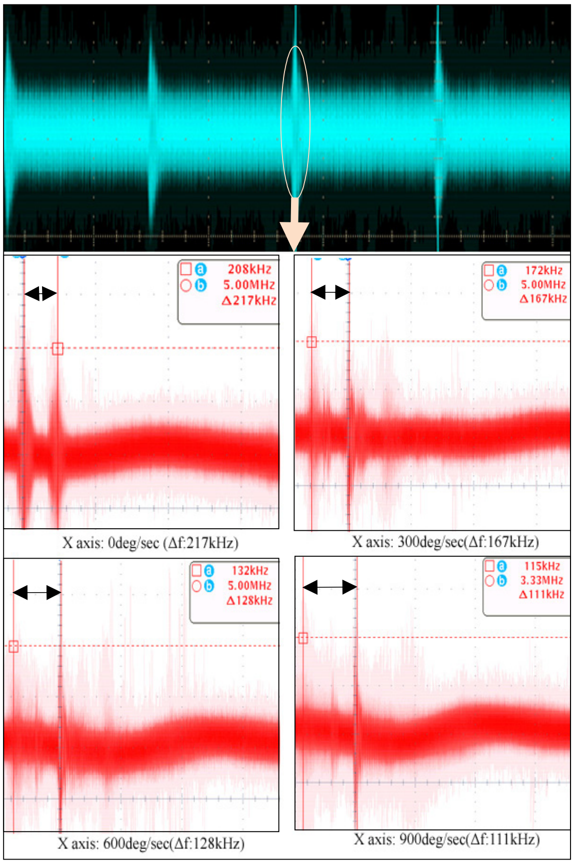
제작된 측정 회로 기판의 가운데에 PCB 패키징 된 SAW 자이로스코프를 집적화 한 후, 회로 기판을 Rate table에 위치한다. Rate table은 외부 컴퓨터에 의해 조절되며, 출력값은 외부 디지털 오실로스코프(GDS-2102, GOODWILL Ltd.)로 나오게 된다.



[그림 10] VCO 출력 신호



[그림 11] 각속도 실험을 위한 측정 시스템



[그림 12] 인가된 각속도에 의한 발진주파수의 변화 (X-축)

라. 각속도 측정 결과

그림 12와 같이 Rate table에 회전이 주어지지 않은 상태(0deg/sec)에서는 코리올리 힘이 생성되지 않기 때문에 센싱 발진기의 발진 주파수 변화없이 그대로 디지털 오실로스코프에 관찰된다.

두 발진기의 발진 주파수는 이론적으로 같게 설계되었지만, 제작 공정상의 환경 요소와 측정회로의 노이즈로 인해 약 217KHz의 차이가 발생하였다. Rate table에 회전이 주어짐에 따라(각속도 인가 ⇒ 코리올리 힘 발생 ⇒ 센싱 발진기의 발진 주파수 변화), 두 기준 피크 사이의 간격이 벌어짐을 확인할 수 있다.

축에 대한 자이로스코프의 감도 계산에 있어 식 (3)의 f_{01} - f_{02} = 0 조건이 만족하지 않으므로, 다음과 같은 수정된 식으로 계산하였다.

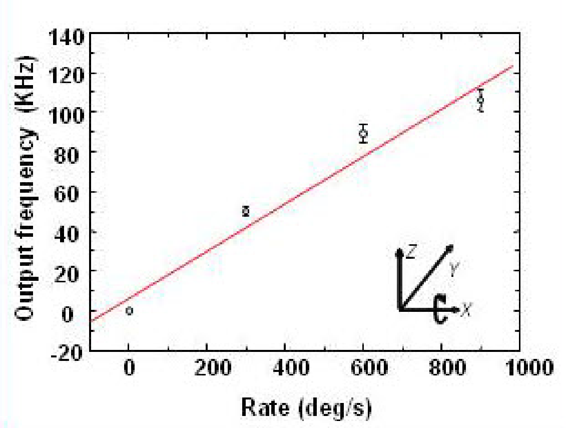
$$\Delta F_{angular\ rate} = F_s - F_r = f_{01} - f_{02} + \Delta f_{c\,angular\ rate.}$$
$$= 217\mathrm{kHz} + \Delta f_{c.angular\ rate} \qquad (4)$$

그림 12의 결과를 이용하여 자이로스코프의 감도를 계산하면 다음과 같다.

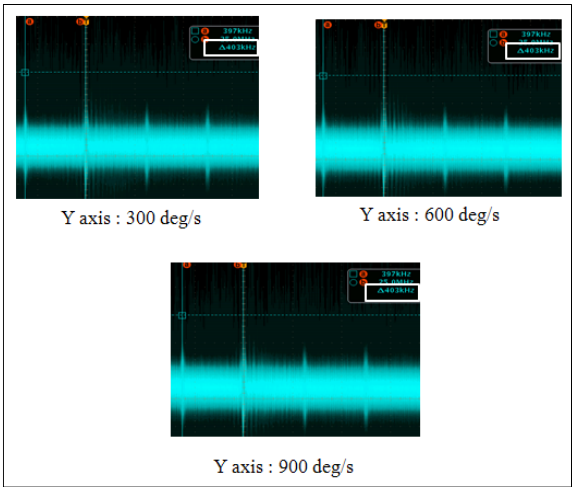
$$\text{Sensitivity of 300deg/sec} = |\Delta F_{300} - \Delta F_0|$$
$$= |(167-217)|\ \mathrm{kHz}$$
$$= 50\mathrm{kHz}$$

위와 같은 방법으로 계산한 결과 측정된 감도는 109Hz/deg · s^{-1} 이다(그림 13).

주파수의 변화를 야기하는 요소가 코리올리 힘인지의 여부와 타 축에 대한 감도를 확인하기 위해 자이로스코프에 Y-축 각속도를 인가하였다. 그림 14와 같이 변화가 관찰되지 않았다. 이는 동작원리에서 논하였던 코리올리 힘의 발생 조건에 부합하는 결과로써, X-축 실험에서 주파수를 변화시킨 요소가 코리올리 힘이었다는 걸 확인할 수 있다.



[그림 13] 계산된 자이로스코프의 X축 감도



[그림 14] 인가된 각속도에 의한 발진주파수의 변화 (Y-축)

5. 결 론

기존의 관성 센서의 한계로 지적된 충격성, 기동성, 소형화 문제를 극복하고자 새로운 SAW 기반 자이로스코프를 설계 제작하였다. SAW 기반 자이로스코프는 움직이는 구조체가 필요 없고 2차원 평면 가공 기술만으로 제작이 가능하기에, 소형화, 고내충격성, 고기동성, 대량생산 등이 가능하다. SAW 발진기와 공진기의 결합 구조로 제작한 자이로스코프는 X-축에 109 Hz/deg · s^{-1}의 감도를 갖는다. Y-축 실험을 통하여 타 축에서는 발진 주파수의 변화가 나타나지 않음을 보였다. 출력 주파수에 노이즈(Noise) 성분이 보이는 것은 회로상의 LC, RLC 필터 설계의 오차와 SAW의 공기와의 마찰로 인한 것으로 예상된다. 향후 진공 패키징 기술 도입과 회로 설계의 고도화(PLL 회로 설계, LC · RLC 필터의 재설계)를 통하여 노이즈성분을 제거하고, 동시에 2축 이상을 감지할 수 있는 SAW 기반 자이로스코프를 제작하고자한다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00206).

Reference

[1] M. Hashimoto, C. Cabuz, K. Minami and M. Esahi, “Silicon Resonant Angular Rate Sensor using Electromagnetic Excitation and Capacitive Detection”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 5, pp. 219～225, 1995.

[2] J. Soderkvist, “Micromachined Gyroscopes”, Sensors and Actuators A, Vol. 43, pp. 65～71, 1994.

[3] N. Yazdi, F. Ayazi and K. Najafi, “Michromachined Inertial Sensors”, Proc. IEEE, Vol. 86, pp. 1640～1659, 1998.

[4] W. Geiger, B. Folkmer, J. Merz, H. Sandmaier and W. Tang, “A New Sillcon Rate Gyroscope Systems”, The IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical System, pp. 615～620, 1998.

[5] K. Maenaka and T. Shzawa, “A Study of Silicom Angular Rate Sensors using Anisotropic Etching Technology”, Sensors and Actuators A, Vol. 43, pp. 72～77, 1994.

[6] S. A. Sarapuloff, G. A. Skipkovskii and J. W. Rhim, “Inertial Effects in Surface and Bulk Elastic Waves and Possibility of Their Use in High-G Solid-State Micro Gyro”, The Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, pp. 355～361, 2005.

[7] J. W. Rhim, C. B. Jeon, H. K. Moon, J. S. Lee and S. W. Lee, “High-G Micro Rate Sensor for Smart

Munitions", Korea Institute of Science and Technology, Report No. A114, Nov. 2003.

[8] M. Kurosawa, Y. Fukula and M. Takasaki, "A Surface Acoustic Wave Gyro Sensor", Sensors and Actuators A, Vol. 66, pp. 33～39, 1998.

[9] V. K. Varadan, W. D. Suh and P. B. Xavier, "Design and Development of a MEMS-IDT Gyroscope", Smart Materials and Structures, Vol. 9, pp. 898～905, 2000.

[10] T. E. Parker and G. K. Montress, "Precision Surface -Acoustic-Wave(SAW) Oscillator", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 35(3), pp. 342～364, 1988.

[11] P. V. Write, "Analysis and Design of Low Loss SAW Devices with Internal Reflections using Coupling-of-Mode Theory", IEEE Ultrasonics Symp., pp. 141～152, 1989.