

진행파의 코리올리 효과를 이용한 자가발진형 표면탄성과 초소형 자이로스코프

논 문
59-2-28

A Self-Oscillation Type SAW Microgyroscope Based on the Coriolis Effect of Progressive Waves

오 해 관* · 최 기 선** · 이 형 근** · 이 기 근*** · 양 상 식†
(Hae-Kwan Oh · Ki-Sun Choi · Hyung-Keun Lee · Kee-Keun Lee · Sang-Sik Yang)

Abstract - An 80MHz surface acoustic wave (SAW)-based gyroscope utilizing a progressive wave was developed on a piezoelectric substrate. The developed sensor consists of two SAW oscillators in which one is used for sensing element and has metallic dots in the cavity between input and output IDTs. The other is used for a reference element. Coupling of mode (COM) modeling was conducted to determine the optimal device parameters prior to fabrication. According to the simulation results, the device was fabricated and then measured on a rate table. When the device was subjected to an angular rotation, oscillation frequency differences between the two oscillators were observed because of the Coriolis force acting on the metallic dots. Depending on the angular rate, the difference of the oscillation frequency was modulated. The obtained sensitivity was approximately 52.35 Hz/deg·s within the angular rate range of 0~1000 deg/s. The performances of devices with three IDT structures for two kinds of piezoelectric substrates were characterized. Good thermal stability was also observed during the evaluation process.

Key Words : Coriolis force, Progressive wave, Surface acoustic wave (SAW), Self-oscillation, Micro gyroscope

1. 서 론

관성항법시스템(INS)의 중요한 부품중의 하나인 자이로스코프는 코리올리 힘을 이용하여 물체의 움직임을 측정하는 장치이다. 현재 디지털 카메라나 캠코더 등에서 손 떨림 보정장치, 차량 자세 제어 시스템, 무인항공기, 스마트미사일, 보행로봇의 방향감지 및 위치 보정장치, 우주선의 본체 자세 제어 시스템 등의 분야에 응용되고 있으며 그 응용 시장은 계속 성장하고 있다[1-2]. 그 중 MEMS 자이로스코프는 기존의 기계식 혹은 광학식 자이로스코프에 비하여 소형, 저가, 용도의 다양성 등의 장점이 있어 각광 받고 있다. 그러나 MEMS 자이로스코프는 코리올리 힘을 이용한 진동형 방식이기에, 떠 있는 구조체가 필수적으로 필요하며, 그로 인해 군수 및 우주 산업 분야에서 응용을 위해서는 극한 환경요소(강한 충격, 고온, 고압 등)를 극복할 고가의 패키징 기술을 동반하여야 한다는 문제점을 지니고 있다. 그 대안으로 최근 표면탄성과(SAW, surface acoustic wave) 자이로스코프에 대한 관심이 증대되고 있다.

표면탄성과 자이로스코프는 기존의 MEMS 자이로스코프와는 같이 코리올리 힘을 이용한 진동형 방식이지만, 떠 있

는 구조체가 아닌 압전물질 표면에 증착된 금속 진동체를 이용하여 코리올리 힘을 발생시킬수 있어, 강인한 내구성과 고내충격성, 초소형의 특징을 갖고 있다. 기존의 표면탄성과 자이로스코프는 정재탄성과와 금속진동체를 통하여 코리올리 힘을 만들고, 표면탄성과 지연선 구조를 이용하여 코리올리 힘을 감지하는 구조를 가지고 있다[3-4]. 최근에는 입자의 코리올리 효과를 이용하는 구조의 자이로스코프도 연구되었다[5]. 본 연구에서는 기존의 방식과 달리 진행 표면탄성과를 이용하고, 금속진동체에 의한 코리올리효과로 인해 생기는 자가발진주파수의 변화로 각속도를 측정하는 초소형 자이로스코프를 설계하고 제작하여 시험하였다.

2. 본 론

2.1 표면탄성과 자이로스코프 동작 원리

본 연구에서 제안하는 진행 탄성과 기반 표면탄성과 자이로스코프의 개략도는 그림 1과 같다. 80 MHz 중심주파수로 설계된 표면탄성과 자이로스코프는 2개의 표면탄성과 발진기와 흡수체로 구성되어 있다. 두 표면탄성과 발진기 중 감지 역할을 하는 하단의 발진기는 금속 진동체(metallic dots)가 증착되어, 외부 각속도 인가시 변화가 일어나게 된다. 반면, 기준점 역할을 하는 상단의 기준 발진기는 외부 각속도 인가시에도 변화가 없다. 또한 하단 감지발진기로 부터의 영향도 흡수체를 통하여 제거되어 있어, 변화가 일어나지 않는다. 감지발진기와 기준 발진기의 발진 주파수 차이로부터, 외부에서 인가된 각속도의 정보를 얻을 수 있다.

* 정 회 원 : 아주대 전자공학과 박사과정
** 준 회 원 : 아주대 전자공학과 석사과정
*** 정 회 원 : 아주대 전자공학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 아주대 전자공학과 교수
E-mail : ssyang@ajou.ac.kr
접수일자 : 2009년 12월 28일
최종완료 : 2010년 1월 13일

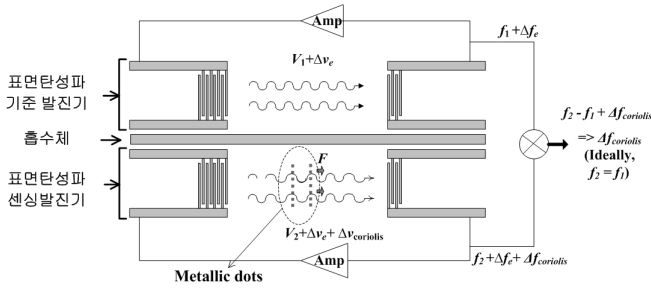


그림 1 진행 표면탄성파 기반 자이로스코프 구조 및 동작 원리

Fig. 1 Schematic views and working principle of the SAW gyroscope based on progressive wave

감지발진기는 입력력 IDT(Interdigital transducer)와 두 IDT사이에 증착된 금속 진동체로 구성되어 있다. 입력 IDT에 80MHz의 RF 전원이 인가되면, IDT는 출력 IDT쪽으로 진행 탄성파(Progressive wave)를 전파한다. 금속 진동체는 진행 탄성파의 파복(Anti-node)에 위치하며, 입력력 IDT의 중간 부분에 위치한다. 파복 부분에 위치하는 금속 진동체는 표면에 수직인 방향의 입자 속도, V 를 갖게 된다. 외부에서 각속도가 인가되면, 금속 진동체는 코리올리 효과에 의해, 코리올리 힘을 만들게 되며, 그 힘, $F_{coriolis}$ 은 식(1) 같다.

$$F_{coriolis} = 2m(V \times \Omega) \quad (1)$$

여기서 m 은 금속 진동체의 질량, V 은 금속 진동체에 인가된 입자 속도, Ω 는 외부에서 인가되는 각속도이다.

발생된 코리올리 힘의 방향은 진행탄성파와 같은 방향이며, 이 힘으로 인해 진행탄성파는 그림 2와 같이 속도와 진폭의 변화가 생긴다. 진행탄성파 속도의 변화 $\Delta v_{coriolis}$ 는 감지발진기의 발진주파수의 변화 $\Delta f_{coriolis}$ 를 야기한다. 감지발진기와 기준발진기 사이에는 측정회로를 통해 전기적으로 접지된 흡수체가 있어서 감지발진기로부터의 진동이 차단되고 기준발진기의 입력력 IDT사이에 금속진동체가 없으므로 입력 각속도가 인가되어도 기준발진기의 발진주파수 $f_{reference}$ 는 변화가 없다. 또 표면탄성파 소자의 특성상 온도, 습도 등의 주위 환경에 따른 주파수 변화 Δf_e 가 발생하나, 기준발진기와 감지발진기에서 동일한 이 변화가 생긴다는 가정 하에 쉽게 해결된다. 기준발진기와 감지발진기가 각각 고유 발진주파수 f_1 과 f_2 를 가질 때, 각속도가 인가되어 생기는 두 발진주파수의 차이 f_{output} 로부터 $\Delta f_{coriolis}$ 를 계산할 수 있다.

$$f_{reference} = f_1 + \Delta f_e \quad (2)$$

$$f_{sensing} = f_2 + \Delta f_e + \Delta f_{coriolis} \quad (3)$$

$$f_{output} = f_{sensing} - f_{reference} = f_2 - f_1 + \Delta f_{coriolis} \quad (4)$$

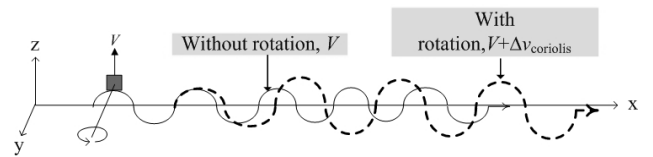


그림 2 코리올리 힘에 의한 진행 탄성파의 변형
Fig. 2 Perturbed progressive wave due to Coriolis force

두 표면탄성파 발진기의 구성은 그림 3과 같이 자가 발진(Self oscillation) 방식으로 동작되며, 두 발진기 모두 같은 발진 주파수로 설계하였다. 자가 발진을 구현하기 위해, 낮은 이득을 갖는 피드백 증폭기, 위상천이기를 사용하였다.

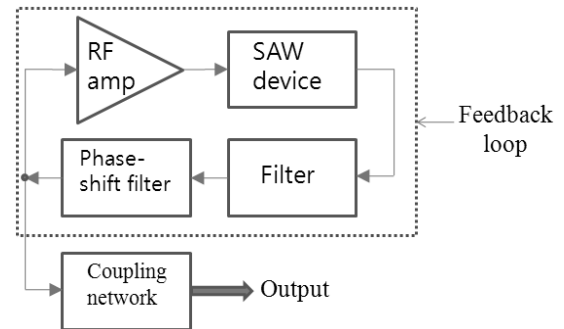


그림 3 자가 발진 회로의 블록다이어그램
Fig. 3 Block diagram of self-oscillation circuit

2.2 설계 요소 및 시뮬레이션

표면탄성파 자이로스코프의 설계 중 고려 요소는 압전기판, 표면탄성파 발진기 구조, 금속 진동체 등이 있다. 다양한 표면탄성파 중 자이로스코프에 적용하기 위해서는 레일리파를 발생시켜야 하며, 압전 기판 중 128° YX LiNbO₃와 ST-quartz가 이에 해당한다. 128° YX LiNbO₃는 비교적 큰 기계결합상수($K^2=5.56\%$)를 가졌지만, 높은 온도지연상수(TCD, ~72 ppm/°C)를 가지고 있다. 반면, ST-quartz는 온도 안정성은 우수하지만(TCD: 0 ppm/°C), 낮은 기계결합상수($K^2=0.16\%$)를 가지고 있다. 상반된 특징을 갖는 두 압전기판을 사용하여, 두 요소 중 어느 요소가 자이로스코프의 특성에 주된 영향을 주는지를 관찰 하고자 한다[6].

자이로스코프 성능에 있어 발진기는 중요한 구성 요소 중 하나이며, 표면탄성파 발진기에 있어 IDT는 가장 중요 요소이다. IDT구조에 의한 발진기의 성능을 확인하기 위하여, 그림 4와 같이 3가지 다른 구조의 IDT를 설계하였다. 양방향성구조(bidirectional)는 가장 일반적인 IDT 구조로서 SAW의 한 파장, λ 안에 $\lambda/4$ 폭의 핑거(finger)를 $\lambda/4$ 의 간격을 두고 배열하였다. Single phase unidirectional transducers (SPUDT)은 $\lambda/8$ 폭의 핑거 사이에 $\lambda/4$ 폭의 리플렉터를 두어, 의도한 방향에 더 큰 진행파를 생성시켜, 양방향 전파로 인한 손실을 최소화 하며, 삽입손실을 줄일 수 있다. 또한 입력에 빗살 구조를 두어 단일 모드의 주파수를 생성시켜, 원치 않는 주파수 성분으로 인한 출력 신호의 불안정성을 최소화할 수 있다. Split 구조는 양방향성구조와

유사하나, 핑거의 폭을 $\lambda/8$ 로 하고 간격을 $\lambda/8$ 로 하여 핑거를 쌍으로 배열하였다. 이 구조는 대역폭을 확대할 수 있다는 장점이 있다[7].

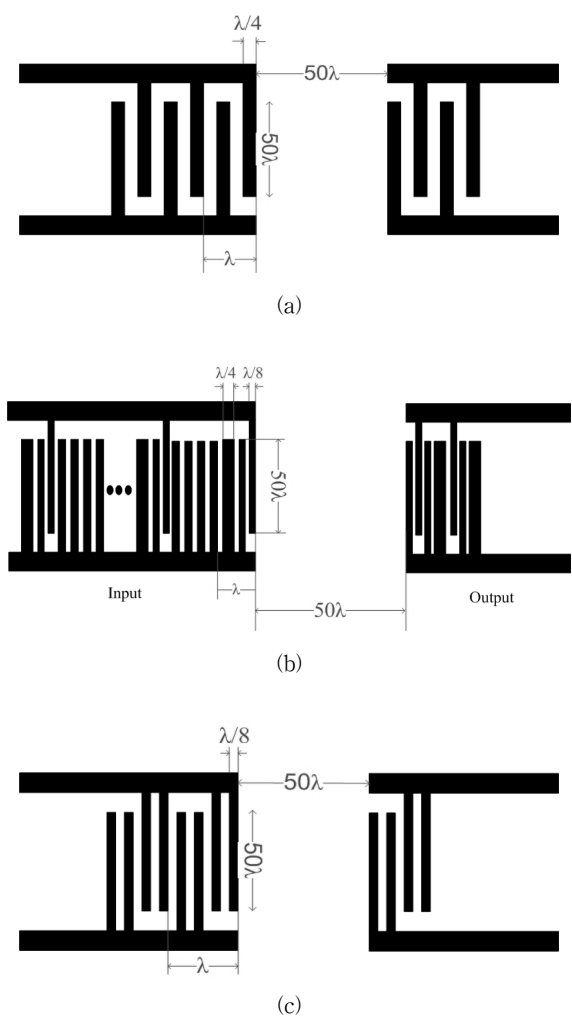


그림 4 설계된 세 가지 다른 IDT의 구조도 (a) Bidirectional structure, (b) Single phase unidirectional transducers, and (c) Split IDT
Fig. 4 Schematic of three different IDT structures (a) Bidirectional structure, (b) Single phase unidirectional transducers, and (c) Split IDT

금속 진동체는 정확히 진행탄성파의 파복에 위치하며, 질량이 클수록 큰 코리올리 힘을 만들 수 있다. 입출력 IDT 전면에 증착할 경우, 표면탄성파의 감쇠를 야기할 수 있으므로, 그림 5와 같이 입력 IDT로부터 $15\lambda_x$ 거리에 위치하며, 크기는 $\lambda_x/4$ 와 $\lambda_y/4$ 로 설계하였다(λ_x : x축 파장, λ_y : y축 파장). 식 (1)로부터 큰 질량은 큰 코리올리 힘을 만든다는 것을 예상할 수 있지만, 일정 질량 이상으로 높아지게 되면, 표면탄성파의 진행에 방해가 될 수 있다. 선행 연구를 통하여 검증된, Cr/Au(50/200 nm)를 금속 진동체의 재료로 사용하였다[8].

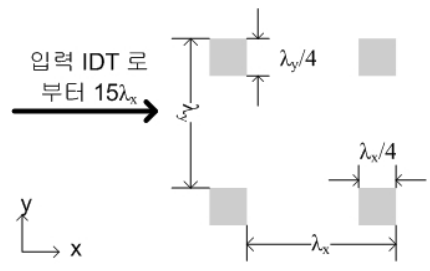


그림 5 금속 진동체의 설계
Fig. 5 Design of metallic dots

제작에 앞서, 최적의 설계 요소를 도출하기 위하여, Coupling of modes (COM)모델링을 수행하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다[9-11]. 압전기판의 변수는 128° YX LiNbO₃와 ST-quartz로 하였으며, IDT는 3가지 다른 구조를 변수로 사용하였다. 128° YX LiNbO₃의 경우 ST-quartz보다 약 20 dB 이상 손실이 적게 나왔으며, SPUDT구조가 두 압전기판 모두에서 가장 좋은 특성을 보였다.

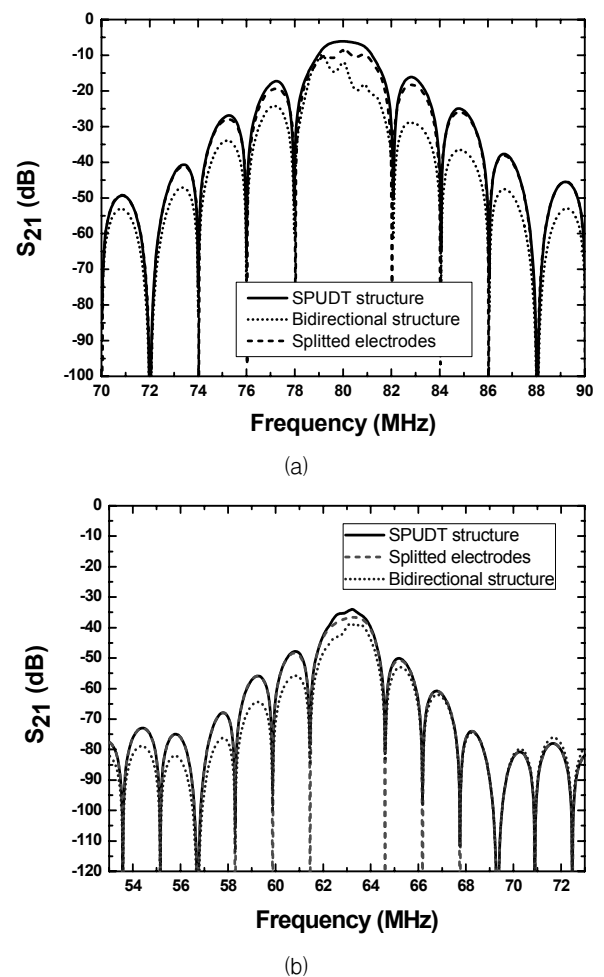


그림 6 예상되는 다른 IDT구조와 압전기판에 따른 주파수 응답(S_{21}) (a) 128° YX LiNbO₃ (b) ST-quartz
Fig. 6 Simulated frequency response(S_{21}) depending on the different IDT structures (a) 128° YX LiNbO₃ (b) ST-quartz

2.3 측정 회로 설계 및 소자 제작

측정 회로의 개략도는 그림 7과 같다. 측정 회로는 표면탄성과 발진기용 자가 발진 회로를 위한 2개의 증폭기, 위상 천이기, 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 입출력 단 앞에는 LC 와 RLC 필터 등을 두어 신호의 안정성을 높였다. 멀티플라이어를 통해 계산된 출력 신호는 LPF 를 지나 외부의 주파수카운터를 통해 직접 관찰할 수 있다. 멀티플라이어를 통한 출력 관찰 방식은 압전기판의 열팽창으로 인한 신호의 불안정성 해결 및 간단한 외부 관찰 장비(주파수카운터)의 사용을 가능하게 한다는 장점이 있다. 외부 신호 입력은 ±5V(증폭기, 멀티플라이어의 전원)와 GND로 최소화하였고, 입,출력단은 하나의 플렉스 핀으로 연결하였다.

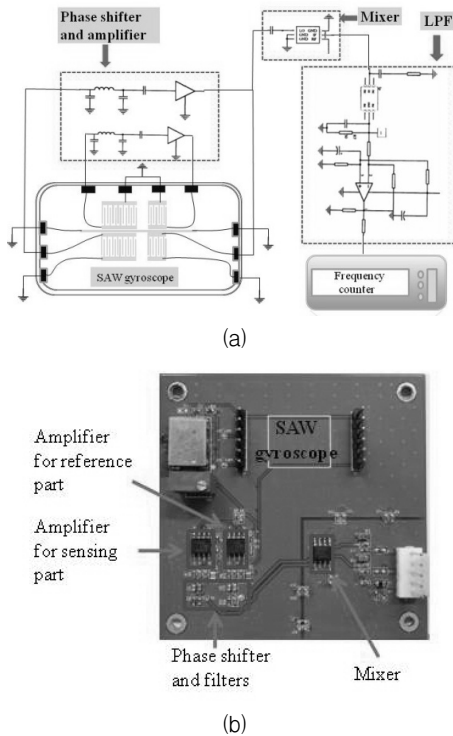


그림 7 측정 회로 기판 (a) 측정 회로 설계도 (b) 제작된 PCB
 Fig. 7 The discrete testing electronics on a printed circuit board (a) Schematic view of electric circuitry for testing and (b) Completed PCB

그림 8은 표면탄성과 자이로스코프의 제작 공정도이다. 128° YX LiNbO₃와 ST-quartz위에 알루미늄을 질량적재효과를 고려하여 200 nm 증착하였다. 사진식각기법을 이용하여 발진기를 제작한 후, 금속 진동체는 밀도가 높은 Cr/Au를 lift-off 공정으로 50/200 nm 두께로 증착하였다. 그림 9는 제작된 표면탄성과 자이로스코프의 광학 사진이다. 3가

지 다른 종류의 IDT 구조체와 금속 진동체가 증착되었음을 확인할 수 있으며, 소자의 크기는 1.4X0.6 cm² 이다.

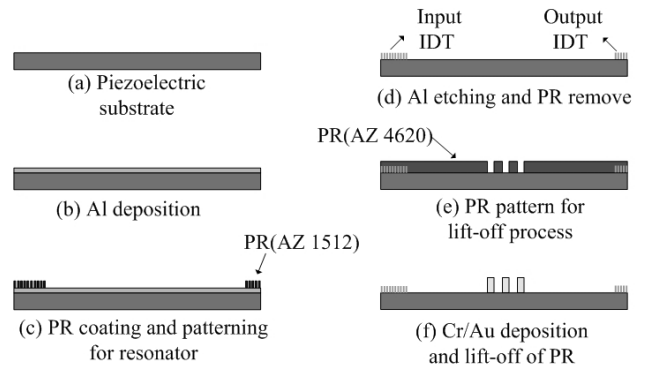


그림 8 표면탄성과 자이로스코프의 제작 공정도
 Fig. 8 The fabrication procedure of SAW gyroscope

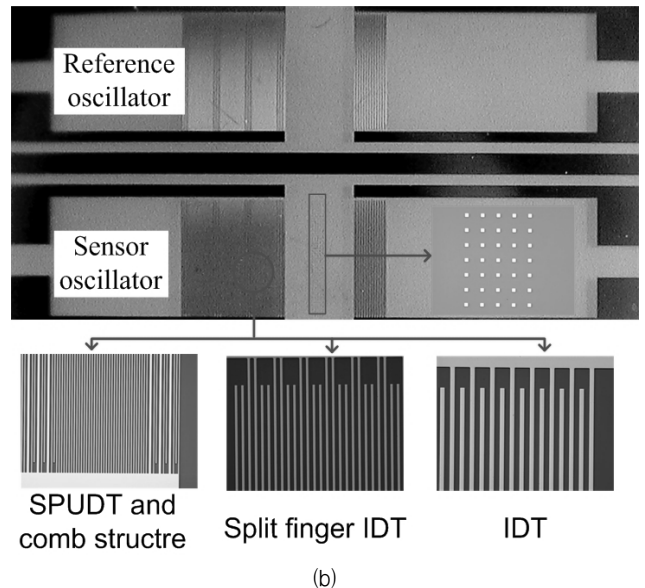


그림 9 제작된 자이로스코프 광학 사진
 Fig. 9 The optical microscope views of the fabricated SAW gyroscope

2.4 측정

자가발진된 표면탄성과 공진기의 출력은 그림 10과 같다. 출력 신호가 이상적인 정현파로 구현되지 못하고 다소 불안정한 진폭을 보이는데, 이는 증폭기의 온도의존성과 회로 잡음에 의한 것으로 예상된다. 또한 기준발진기와 감지발진기의 발진주파수는 제작상의 오차와 감지발진기의 금속진동체로 인해 296 kHz의 오프셋 주파수, $f_2 - f_1$ 이 존재함을 확인하였다. 각속도가 있을 때 코리올리효과로 인한 주파수변화, $\Delta f_{coriolis}$ 는 식(5)로 계산된다.

$$\Delta f_{coriolis} = f_{output} - (f_2 - f_1) \quad (5)$$

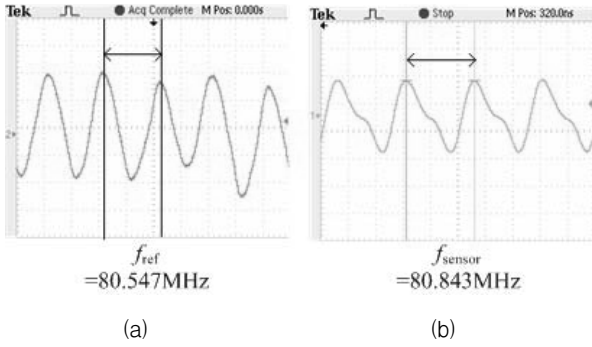


그림 10 자가 발진에 의해 구동된 표면탄성파 발진기의 출력 신호 (a) 기준발진기 (b) 감지발진기

Fig. 10 Output signals of SAW oscillator operated by self-excited oscillation (a) reference oscillator (b) sensing oscillator

각속도 실험에 사용된 측정시스템은 그림 11과 같고, Rate table은 Acutronics 社의 Acee37-TCN 모델로서 항온·항습의 챔버가 있어서 온도 조건을 조절할 수 있다. 제작된 측정회로기판의 중앙에 PCB 패키징된 표면탄성파 자이로스코프를 장착하여 회로 기판을 Rate table에 위치한다. Rate table은 외부 컴퓨터에 의해 조절되며, 출력값은 외부 주파수 카운터로 수치화 되어 나오게 된다.

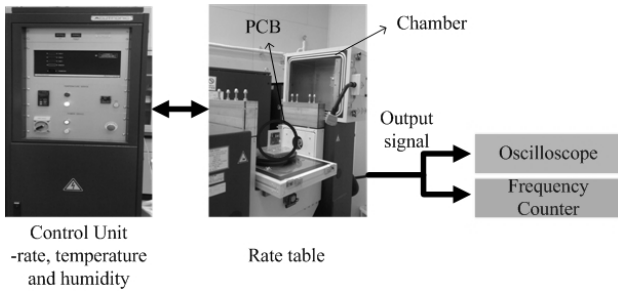


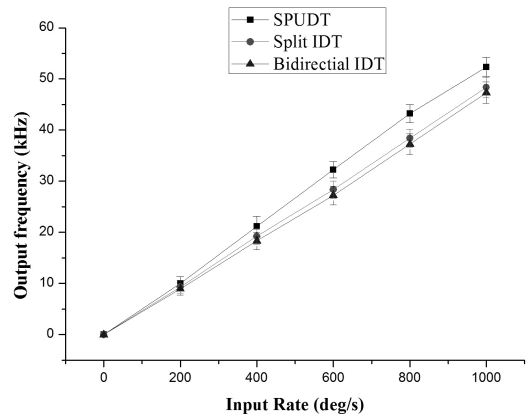
그림 11 각속도 실험을 위한 측정 시스템

Fig. 11 Experimental testing setup for the developed gyroscope system

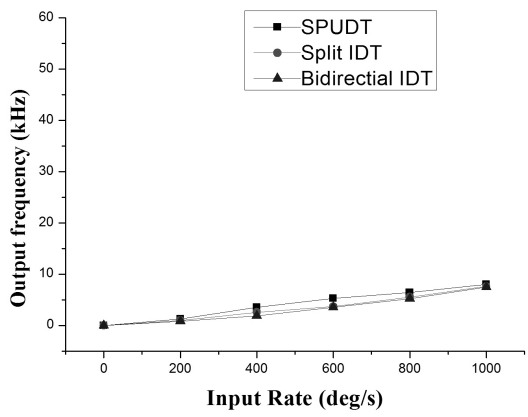
외부에서 각속도가 인가됨에 따라, 자가발진을 통하여 발진하던 감지발진기의 금속 진동체는 코리올리 힘을 만든다. 생성된 코리올리 힘은 진행되는 진행표면탄성파와 같은 방향이며, 탄성파의 진폭과 속도에 영향을 미친다. 반면 기준발진기는 같은 상황에서 코리올리 힘으로부터 격리되어 있어, 아무런 변화가 일어나지 않는다. 두 발진 주파수의 차이는 측정회로의 믹서를 통하여, 외부 주파수카운터로 나타나게 된다. 실험은 20 °C 에서 0 ~ 1000 deg/s 까지 200 deg/s 마다 측정하였다. 그림 12는 측정된 자이로스코프의 감도이다. 우선 압전기판의 경우, 128° YX LiNbO₃가 ST-quartz에 비해 약 6배 이상의 감도를 보였다(128° YX LiNbO₃ 감도: 52.35 Hz·deg⁻¹·s⁻¹, ST-quartz 감도: 8.74 Hz·deg⁻¹·s⁻¹). 이러한 결과의 가장 큰 이유는 기계결합상수의 차이 때문이다. 표면탄성파 소자에 있어, 기계결합상수(K²)는 인가된 전기적 에너지가 얼마나 기계적인 에너지로

변환 되는 가를 의미한다. 따라서 기계결합상수(K²)가 월등히 큰 128° YX LiNbO₃(K²=5.56%)는 ST-quartz(K²=0.16%)에 비해 더 큰 진폭의 진행탄성파를 생성시키며, 이로 인해 더 큰 코리올리힘이 금속 진동체에서 만들어진다. 이 결과는 시뮬레이션을 통해 예측한 결과와 일치한다.

3가지 다른 IDT구조의 경우, SPUDT 구조가 다른 구조에 비해 두 기판 모두에서 약 8 % 높은 감도를 보였다. 일반적인 양방향성 IDT 구조는 전파되는 표면탄성파 역시 양방향성을 가진다. 따라서 실제 사용되는 표면탄성파는 생성되는 에너지의 50 % 밖에 되지 않는다. 반면 SPUDT는 IDT 사이에 리플렉터를 두어서, 약 80 % 의 에너지를 의도한 한 방향으로 전파시키므로, 더 강한 표면탄성파를 생성시킬 수 있다. 이러한 이유로, 다른 구조에 비해 높은 감도를 얻을 수 있다. 가장 높은 감도는 128° YX LiNbO₃ 기판 SPUDT 구조의 IDT를 사용한 소자에서 52.35 Hz·deg⁻¹·s⁻¹이며, 선형성은 약 0.95 이다.



(a)



(b)

그림 12 IDT 구조에 따른 표면탄성파 자이로스코프 출력 주파수 측정 (a) 128° YX LiNbO₃ (b) ST-quartz (측정 온도: 20 °C)

Fig. 12 Measured output frequencies depending on IDT structure at 20 °C (a) 128° YX LiNbO₃ (b) ST-quartz

128° YX LiNbO₃의 특성 중 높은 온도지연상수는 자이로스코프의 온도안정성 측면에서 큰 문제이다. 이 문제를 해결하기 위해, 소자를 기준과 감지로 나누어 두 차이를 구함으로써, 환경변수에 의한 변화분을 제거하는 방법을 사용하였다. 그림 13은 20 °C에서 80 °C 사이에서 제작된 자이로스코프의 감도 변화를 비교한 결과이다. 사용된 기판은 128° YX LiNbO₃이며, IDT는 SPUDT 구조이다. 전 영역에서 5 % 미만의 변화가 감지되었다. 이를 통해, 환경변수에 의한 소자 특성 변화가 최소화되었음을 확인 할 수 있다.

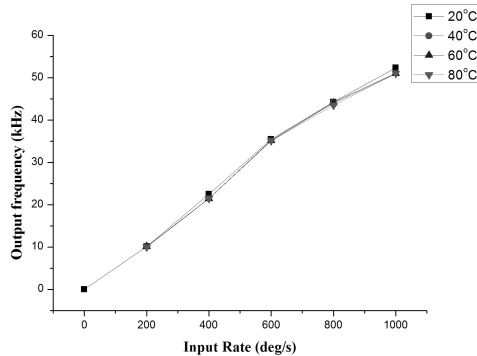


그림 13 온도에 따른 표면탄성파 자이로스코프 출력 주파수 측정 (128° YX LiNbO₃, SPUDT structure)

Fig. 13 Measured output frequencies under various temperatures(128° YX LiNbO₃, SPUDT structure)

3. 결 론

기존의 관성 센서의 한계로 지적된 충격성, 기동성, 소형화 문제를 극복하고자 새로운 진행 표면탄성파 기반 자이로스코프를 설계 제작하였다. 표면탄성파 기반 자이로스코프는 움직이는 구조체가 필요 없고 이차원 평면 가공 기술만으로 제작이 가능하기에, 소형화, 고내충격성, 고기동성, 대량생산 등이 가능하다. COM 모델링을 통해 최적의 매개 변수를 구하였으며, 환경 변수(온도, 습도 등)를 제거하기 위해 두 개의 표면탄성파 발진기의 구조를 사용하였다. 압전기판과 IDT 구조에 의한 자이로스코프의 영향을 확인하여 보았으며, 128° YX LiNbO₃ 압전기판, SPUDT 구조에서 가장 좋은 감도를 나타냈으며, 그 수치는 52.35 Hz/deg · s(y 축 회전), 선형성은 0.95이다. 출력 주파수에 노이즈(Noise) 성분이 보이는 것은 회로상의 LC, RLC 필터 설계의 오차와 표면탄성파의 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 표면탄성파 기반 자이로스코프를 제작하고자한다.

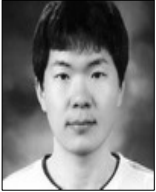
감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0081200)

참 고 문 헌

- [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] M. Kurosawa, Y. Fukuda and M. Takasaki, "A surface acoustic wave gyro sensor", *Sensors and Actuators A*, Vol. 66, pp. 33-39, 1998.
- [4] V. K. Varadan, W. D. Suh and P. B. Xavier, "Design and development of a MEMS-IDT gyroscope", *SmartMaterials and Structures*, Vol. 9, pp. 898-905, 2000.
- [5] S. Lee, J. Rhim, S. Park, S. Yang, "A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscope effect", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, pp. 2272-2279, 2007.
- [6] Gardner J, Varadan V, Awadelkarim O, "Microsensors MEMS and Smart Devices", New York: Wiley, 2001.
- [7] H. Oh, W. Wang, K. Lee, and S. Yang, "Development of new wireless SAW sensor for simultaneous measurement of pressure-temperature and ID tag", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 48, 066505, 2009.
- [8] W. Wang, H. Oh, K. Lee, S. Yoon, and S. Yang, "Enhanced Sensitivity of Novel Surface Acoustic Wave Microelectromechanical System-Interdigital Transducer Gyroscope", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 48, 06FK09, 2009.
- [9] R.C. Woods, H. Kalami, B. Johnson, "Evaluation of a novel surface acoustic wave gyroscope", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol, 49, pp. 136-141, 2002.
- [10] P.V. Wright, "Analysis and design of low-loss SAW devices with internal reflections using coupling-of-modes theory", *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 141-152, 1998.
- [11] W. Wang, S. He, S. Li, "Enhanced sensitivity of SAW gas sensor coated molecularly imprinted polymer incorporating high frequency stability oscillator", *Sensors and Actuators B*, Vol. 125, pp. 422-427, 2007.

저 자 소 개



오 해 관 (吳 海 寬)

2007년 아주대학교 전자공학부 졸업.
2007년 ~ 2009년 동 대학원 석사.
2009년 ~ 동 대학원 박사 과정.
주관심분야 : SAW sensor
Tel : 031-219-2488
Fax : 031-212-9531
E-mail : nasahu@ajou.ac.kr



최 기 선 (崔 基 先)

2003년 2월 아주대 전자공학부 졸업.
2009년 ~ 동 대학원 석사과정.
주관심분야 - SAWsensor, BIO MEMS
Tel : 031 - 219 - 2488
Fax : 031-212-9531
E-mail : fuguel@ajou.ac.kr



이 형 근 (李 亨 根)

2009년 2월 아주대 전자공학부 졸업.
2010년 현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.
주관심 분야 : SAW sensor
Tel : 031 - 219 - 2488
Fax : 031-212-9531
E-mail : nicelhk77@ajou.ac.kr



이 기 근 (李 基 根)

1988년 광운대학교 전자 학사 졸업
1993년 University of Florida 재료 석사 졸업.
2001년 Arizona State University 전자 박사 졸업.
현재 아주대학교 전자공학부 부교수.
주관심분야 : SAW 센서, Solar cell, Energy harvester
Tel : 031-219-1848
Fax : 031-212-9531
E-mail : keekeun@ajou.ac.kr



양 상 식 (梁 翔 植)

1980년 서울대학교 기계공학과 학사 졸업.
1983년 서울대학교 기계공학과 석사 졸업.
1988년 University of California at Berkeley 기계공학과 박사 졸업.
현재 아주대학교 전자공학부 교수.
주관심분야 : 마이크로 소자의 Mechanism 과 Actuation, Motion Control
Tel : 031-219-2481
Fax : 031-212-9531
E-mail : ssyang@ajou.ac.kr