

A Study on Characteristics of Angular Rate Sensor using Real Vehicle

金炳禹[†]
(Byeong-Woo Kim)

Abstract - A surface micro machined angular rate sensor utilizing a vibrating MEMS structure on a silicon has been developed. These tuning fork angular rate sensor,s are extremely rugged, inherently balanced, and easy to fabricate. The device is fabricated using a temperature compensation method based on automatic gain control technique. A linearity of approximately 0.6%, limited by the on-chip electronics has been obtained with this new sensor. Tests of the sensor demonstrate that its performance is equivalent to that required for implementation of a yaw control system. Vehicle handling and safety are substantially improved using the sensor to implement yaw control.

Key Words : electronic stability program, angular rate sensor, gyro, MEMS, vacuum packaging

1. 서 론

자동차 안전에 대한 사회적 관심이 증가하면서 자동차 업체에서는 자동차 안전도 향상에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이의 대표적인 예가 ABS, TCS 장치를 들 수 있다. 최근, 자동차 안전도를 획기적으로 향상시키기 위하여 개발하고 있는 것이 전자식주행안전장치이다[1]. 자동차 안전장치에 대한 관심이 증가하면서 자이로 센서에 대한 수요가 급증하고 있다. 자동차 자이로센서는 차량항법장치에 적용되기 시작하였는데, 최근에는 전자식주행안전장치로의 적용이 증가하고 있다. 자이로 센서는 이동체 각속도를 검지하는 센서로서 세라믹 방식, 링 방식, 광학 방식, MEMS 방식 등이 있다.

선진국의 경우, MEMS 기반의 자이로 센서는 1991년 Draper Lab.에서 처음으로 제안되어 1993년 Draper Lab.에서 60Hz, 1.5°/sec의 정밀도, 1999년 Murata에서 10Hz에서 0.07°/sec를 가지는 자이로를 개발하였다. 2002년도에는 Analog Device Inc.가 0.05°/sec/Hz^{1/2}의 노이즈를 갖는 단축 자이로 센서를 개발하였다[2]-[6]. 국내의 경우, MEMS 기반의 자이로센서 개발은 가전용을 중심으로 다양한 연구를 진행하였다. 그러나, 자동차에 적용 가능한 자이로센서 연구개발은 극히 미비한 상황이다. 왜냐하면, 자동차에 적용 가능한 자이로센서는 온도, 진동, 전자파 등의 내환경 조건을 만족하여야 할뿐만 아니라 내구 성능을 만족하여야 하기 때문에 연구개발에 많은 어려움을 내포하고 있다.

본 연구에서는 각속도 검지부를 진공 패키징시키는 MEMS 기술을 이용하여 센서 성능을 향상시킬 수 있는 방

안을 모색하였다. 또한, 진공 패키징 기술을 적용한 자이로센서를 실제 자동차에 장착하여 조향장치 평가모드에 준하는 평가를 실시하여 실차 적용 가능성을 검증하였다.

2. 센서 제작 공정

MEMS 기반 자이로센서의 핵심은 반도체 공정을 이용하는 검지부 설계, 제작이다. 그림 1은 자이로센서 제작을 위한 반도체 공정을 나타내고 있다. SOI 웨이퍼에 대한 MEMS 공정은 크게 네 가지 단계로 구분할 수 있다. 즉, 세정공정 → 사진공정 → 식각공정 → 이온 에칭 → 릴리즈 단계이다.

사진 식각공정은 감광제도포(Photo resist-AZ 7220), soft bake, 노광, 현상, 검사, hard bake로 구성된다. 첫 단계로 PR과 실리콘 표면의 접착력을 높이기 위해 HMDS를 기상 도포하였다. 이 표면에 PR을 2800rpm으로 스핀 코팅하여 두께 2 um PR을 형성시켰다. 두께를 2 um 두께로 형성시킨 것은 에칭 단계에서 오버 에칭이 발생하는 것을 고려한 것이다. 마이크로 자이로센서의 검지부에 일정한 진공을 유지시키면 높은 Q값 확보가 가능하기 때문에 높은 S/N 비율 확보가 가능하다. 이 같은 결과를 얻기 위해서는 실리콘 웨이퍼와 유리 기판이 완전하게 결합할 수 있는 실장 기술이 요구되기 때문에 본 연구에서는 실리콘과 유리의 전계 접합을 통한 진공 실장이 가능하도록 유리 기판 구조물을 제작하였다.

자이로 검지부가 진공상태에서 운동하기 위해서는 유리 기판에 일정한 공간이 확보되어야 하는데, 이를 공극(cavity)이라 칭한다. 그림 2는 유리 기판 가공에 대한 전체 공정도이다. 공극 제작은 1번에 4번까지의 공정 순서를 거치게 된다. 마이크로 자이로의 양산 가능성을 결정짓는 중요한 기술이 바로 진공 실장 기술이다. 구조물이 완성된 SOI 웨이퍼와 유리 기판을 aligner에서 각각의 웨이퍼에 형

[†] 교신저자, 正會員 : 蔚山大學 電氣電子情報시스템工學部 助教授 · 工博

E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr

接受日字 : 2007年 3月 9日

最終完了 : 2007年 5月 7日

성되어 있는 정렬 패턴을 이용하여 정렬한다. 전계 접합(anodic bonding)은 총 3차의 집합단계로 진행된다. 첫째, 웨이퍼간의 정렬을 고정시켜주는 free bonding은 웨이퍼의 중심 부분에 한 개의 핀 전극으로 전압을 가하여 접합시킨다. 둘째, 구조물이 움직이는 공극 내부의 진공에서 접합되는 단계에서는 웨이퍼 전면에 전압을 가하여 접합시킨다. 이때, 실리콘과 유리 기판의 열팽창 차이를 고려하여 상부와 하부의 온도를 동일하게 유지시켜준다. 마지막으로 확실한 접합을 위해 고전압을 전극에 인가하여 유리 기판 내부의 규소를 제거시켜 집합을 마무리한다.

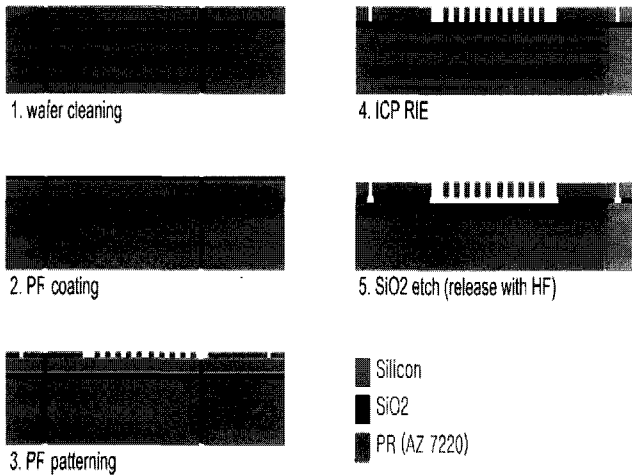


그림 1 SOI 웨이퍼를 이용한 공정도
Fig. 1 Processing flow using SOI wafer

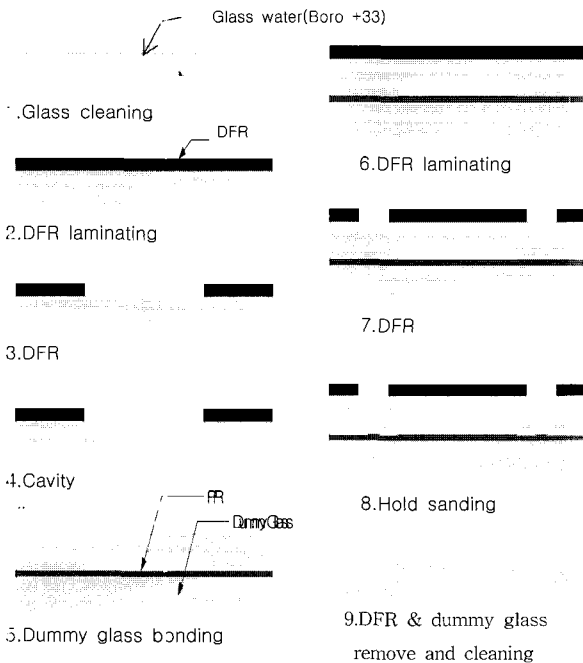


그림 2 글라스 웨이퍼의 공정도
Fig. 2 Processing flow of glass wafer

3. 온도특성 향상 방안

자동차용 자이로센서는 일반 자이로센서에 비하여 온도범위가 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 에 달하는 광범위한 영역을 검지하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 온도변화에 따라서 MEMS 검지부에서 발생하는 신호 왜곡을 최소화하기 위하여 그림 3과 같은 자동이득제어 방안을 도입하였다. 자동이득제어를 도입하기 전에 범용 회로를 적용한 자이로 센서의 선형성은 표 1과 같았다. 상온 25°C 를 기점으로 저온과 고온으로 올라 갈수록 선형성이 급격히 악화되고 있음을 알 수 있는데, 이 같은 현상은 본 연구에서 적용한 진공방식의 MEMS 검지부에 기인하는 현상이라 판단된다. 일반적인 가전용 자이로는 동작온도가 $-20^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 이기 때문에 일반 회로를 적용하여도 큰 문제가 발생되지 않는다. 반면에 자동차에 적용할 수 있는 온도 범위에서는 큰 온도 차이로 인하여 상대적으로 큰 댐핑 비율 변화를 초래하기 때문에 실제 자이로 신호의 왜곡을 초래하게 된다. 본 연구에서 제작된 센서의 온도변화에 의한 선형성 변화는 최대 ± 2.43 으로 자이로 성능 악화에 큰 영향을 끼친다. 자이로의 발전 변위는 주위의 압력에 반비례하는 특성을 지니고 있기 때문에 진공 상태 검지부의 온도가 상대적으로 상승하면 작용 압력과 저항이 증가되어 자이로 변위가 감소하게 된다.

따라서, 이 자이로 변위를 검지하는 출력단의 출력이 감소되기 때문에 감소된 출력과 진공, 온도의 상관관계를 이용하여 온도보상을 실시하고자 하였다. 따라서, 본 연구에서는 그림 3과 같이 온도 변화에 의하여 발생하는 전기적 출력 값 변화를 되먹임제어용 기준 신호로 활용하는 자동이득제어(automatic gain control)를 이용하였다.

표 1 MEMS 자이로 센서의 선형성
Table 1 Main specification of MEMS gyro sensor

온도($^\circ\text{C}$)	-40	-10	25	75	125
직선성(%)	± 1.98	± 1.04	0	± 1.45	± 2.43

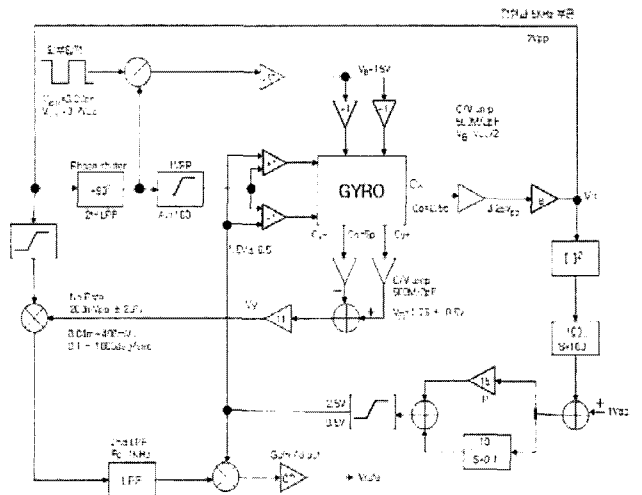
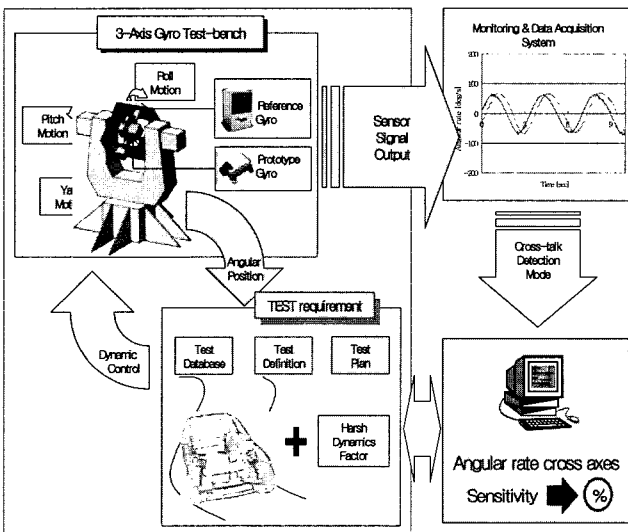
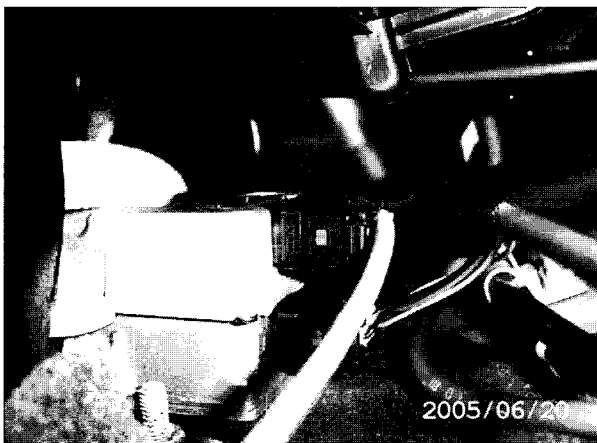


그림 3 신호처리 및 온도보상 회로의 블럭도
Fig. 3 Block diagram of signal processing and temperature compensation circuit

자이로 센서의 회로부는 구조물의 진동을 유발하는 self oscillation부, 코리올리 운동을 검지하는 Y 검지부, 감지된 신호와 진동신호를 비교하여 변조된 신호에서 각속도 신호를 추출하는 복조부, 온도변화에 따른 감도 변화를 보상하는 온도보상부로 구성하였다. 상기 절차에 의하여 개발된 자이로 센서의 실차 적용 및 평가를 위하여 전용 평가용 테스트 벤치를 제작하였다. 자동차에서 발생하는 동특성은 yaw, roll, pitch의 각속도 성분이 복잡적으로 동시에 발생되고 극한 동작 상황을 모사하여야 한다. 이를 위하여, 그림 4와 같이 자이로 테스트 벤치를 구성하여 시제품 평가를 수행하였다. 테스트벤치의 3 축의 각속도는 최대 150°/sec이며, payload는 약 10kg, 크기는 8,600×4,000×1,000[mm]이다. 또한, MEMS 공정을 통하여 구현된 자이로 센서의 실차 적용성 평가를 위하여 2,000cc 급의 H사 T 모델에 기존 독일 S사의 제품을 대체하여 장착하였다. 자이로센서의 정확한 평가를 위하여 자이로 센서를 적용 차량의 무게중심에 위치시키도록 하여 기존 양산 제품과의 성능을 비교. 평가하였다.



(a) Test bench of gyro sensor



(b) Sensor attachment on real vehicle

그림 4 자이로 센서 평가용 테스트 벤치 및 차량
Fig. 4 Test bench and real vehicle for gyro sensor test

4. 결과 및 고찰

MEMS 기술을 이용한 자동차용 자이로센서를 제작하여 이에 대한 일반 성능을 평가하였다. 먼저, 자동차 자이로센서의 기본 성능이라 할 수 있는 감도, 선형성, 온도 특성을 중심으로 분석하였다. 표 2는 상기에서 기술한 MEMS 공정을 통하여 제작된 자이로 센서의 주요 특성 자료이다. 한편, 본 연구에서 구현한 MEMS 자이로센서의 실차 적용성 평가를 위하여 독일 S사 자이로센서에 대한 비교. 평가를 실시하였는데, 독일 S사 자이로센서는 표 2의 검지영역, 내전압, 감도와 같은 일반 성능은 동일하나 선형성 ±0.7%, 동작온도 -25~120℃, 영점변화 1.0°/sec, 크기(용량) 3.0cc로서 본 연구에서 개발한 센서대비 특성이 약간 열악하다.

그림 5는 2Hz, 10deg/sec 조건에서 측정한 MEMS 자이로센서의 scale factor로서 25mV/deg/s이고 그림 6은 Agilent 35670A dynamic signal analyzer를 이용하여 측정된 자이로 검지부의 공진 특성을 나타내고 있다. 검지부의 가진 및 검지단의 공진 주파수는 5.298kHz를 나타냈다. 자동차 차체에서 발생하는 주파수 대역은 수십 Hz이기 때문에 공진으로 인한 센서 이상 및 파손은 발생하지 않을 것이다. 그림 7은 자이로 센서를 정지시켜 놓았을 때, 발생하는

표 2 MEMS 자이로센서의 주요 사양
Table 2 Main specification of MEMS gyro sensor

Specifications	Value
Detection range	-90 ~ 90°/sec
Scale factor	25mV/°/sec
Linearity	Within ± 0.6%
Zero drift	Within ± 0.37°/sec
Temperature range	-40 ~ 125℃
Electric protection	8.0 ~ 16.0V
Size(volume)	2.8cc

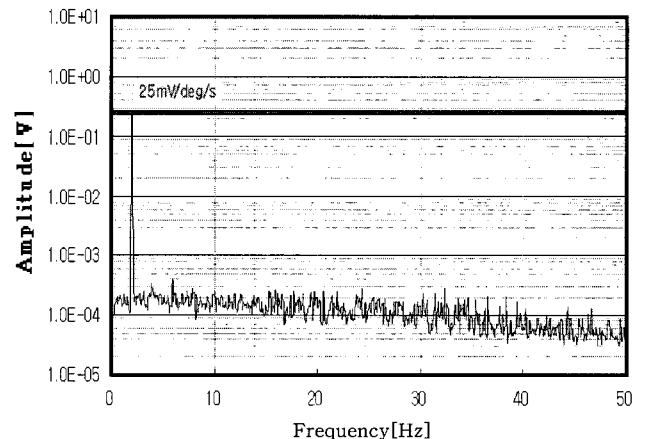


그림 5 자이로센서의 스케일 인자
Fig. 5 Scale factor of gyro sensor

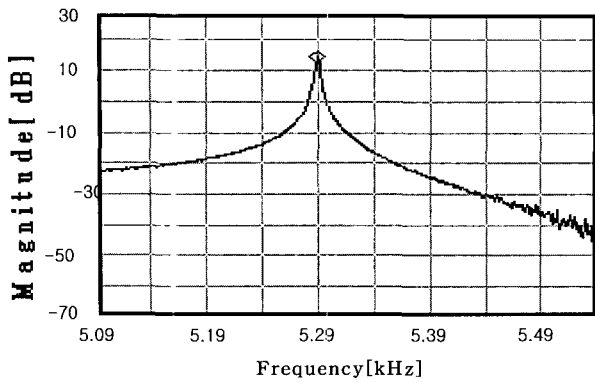


그림 6 자이로센서의 공진 주파수
Fig. 6 Resonance frequency of gyro sensor

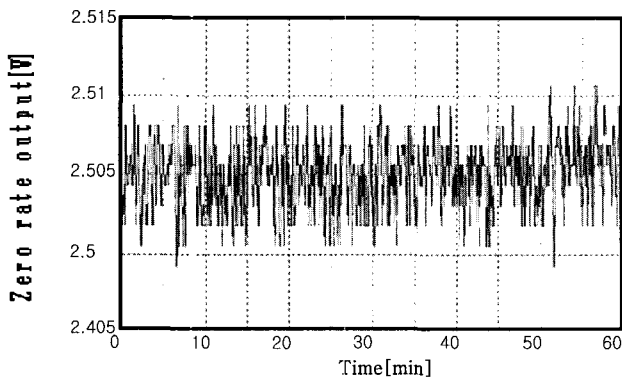


그림 7 자이로센서의 영점 변화
Fig. 7 Zero drift of gyro sensor

영점 변화량을 나타냈다. 본 연구에서 제작된 자이로 센서의 영점 변화는 0.01V 내외로서 각속도 값으로 변환하면 0.37°/sec이다. 이 영점 변화량은 현재 양산 중에 있는 독일 S사 1°/sec에 비하여 양호한 특성을 확인할 수 있었다. 이 같은 현상은 MEMS 자이로의 가진부와 검지부를 진공으로 제작한 것에 기인한다고 사료된다. 왜냐하면, MEMS 자이로 검지부가 공기 중에 노출되면 공기에 의한 저항 및 마찰이 증대되어 감도가 떨어지고 노이즈가 증대되게 된다. 본 연구에서 적용한 진공 방식의 MEMS 자이로센서는 일정한 진공 상태가 계속 유지되기 때문에 일정한 감도와 노이즈를 유지하게 된다. 자이로 센서 구조물의 검지부의 운동을 댐퍼와 스프링이 달린 질량의 회전운동으로 단순화시킨 조건에서 특성인자(quality factor)는 식 (1)과 같다.

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{\omega_0 I}{b} \quad (1)$$

여기서, ζ : 감쇠비, ω_0 : 구조물 고유진동수,
b : 점성감쇠계수, I : 회전관성모멘트이다.

식 (1)에서 알 수 있듯이, 높은 특성인자(Q)를 갖기 위해서는 구조물의 점성감쇠계수를 낮추고 구조물의 고유진동수와 회전관성모멘트를 증가시켜야 함을 알 수 있다.

그림 8은 자이로 전용 평가 장치를 이용하여 상온에서 자이로센서의 선형성 변화를 나타낸 것이다. 전체 온도 범위에서 자이로센서의 선형성은 ±0.6%를 나타냈다. 이는 기존에 상용화되어 있는 독일 S사의 ±0.7%에 비하여 선형성이 우수함을 알 수 있었는데, 이는 센서 검지부에 위치한 공극의 온도와 압력 변화를 상쇄시킬 수 있는 자동이득제어기술에 기인한다고 사료된다. 그림 9는 자이로 전용 테스트벤치를 이용하여 자동차 환경과 유사하게 급격한 각속도 인가에 따른 표준 자이로와 개발 자이로의 출력 변화를 나타낸 것이다. 여기에서도 알 수 있듯이, 실차 조건에 근접된 평가 조건에서도 기존 양산 자이로와 대등한 특성을 나타내고 있다.

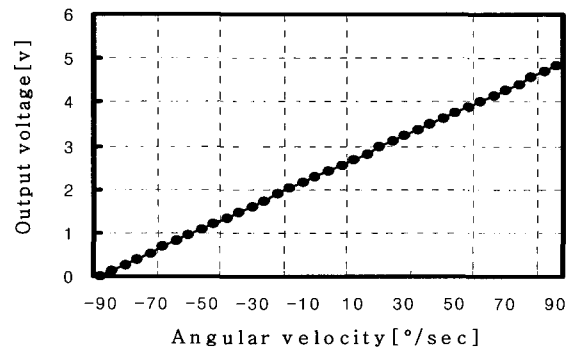


그림 8 온도변화에 의한 선형성 변화
Fig. 8 Variation of linearity due to temperature variation

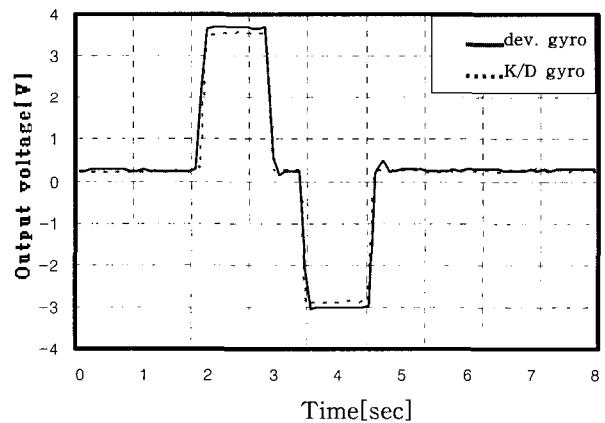


그림 9 불규칙한 각속도 변화에 의한 출력
Fig. 9 Output voltage due to variation of random angular velocity

그림 10, 11은 테스트벤치를 통하여 평가, 검증된 자이로 센서를 실제 자동차에 적용하여 비교, 평가한 결과이다. 자동차용 자이로 센서를 평가하기 위해서는 조향장치 성능 평가에 적용되는 평가 모드를 활용하고 있다. 본 연구에서도 자동차 조향장치 평가 모드로 가장 많이 활용되고 있는 두 가지 평가모드를 적용하였다. 먼저, 그림 10은 자동차 속도를 50km/h 속도로 유지하며 급격한 차선변경(lane change)을 반복적으로 실시할 때, 발생하는 자이로 특성이다. 그림 11은 주행속도 80km/h에서 규칙적이고 급격한 각속도 변화를 유발시킬 때, 발생하는 자이로 특성을 나타낸 결과이다.

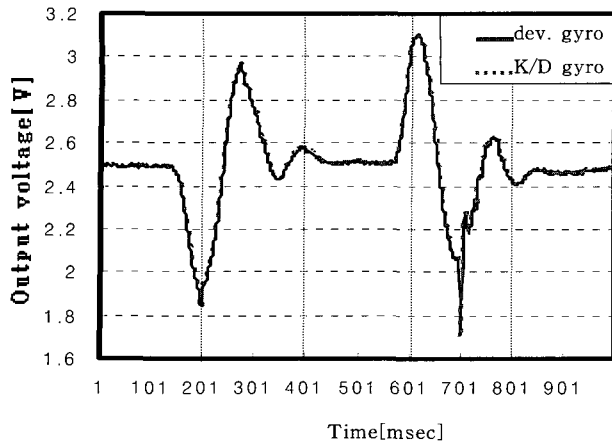


그림 10 단일 차선 변화에 의한 각속도 변화
 Fig. 10 Variation of angular velocity due to single lane change

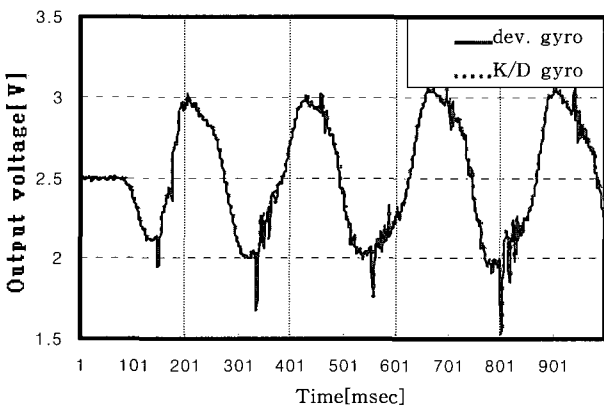


그림 11 스라럼 변화에 의한 각속도 변화
 Fig. 11 Variation of angular velocity by slalom change

현재, 양산 중인 독일 S사와 개발 자이로센서의 신호 차이가 평균 약 2.81mV로 나타는데, 이는 특정 센서 자체의 군집에서 감도 허용 오차가 5%(약 1.33mV)인 점을 감안하면, 이종 자이로센서 사이의 신호 차이는 극히 미소한 값이라 할 수 있다. 이 같은 현상은 비교 대상 센서의 장착 위치 차이, 각 센서의 허용오차 등에 기인하는 현상이라 사료된다. 앞서 언급한 바와 같이, MEMS 기술을 이용한 자동차 자이로 센서는 국의 양산 제품과 비교해 볼 때, 일반 성능과 차량 적용 측면에서 대등 또는 우수한 특성을 나타냈다. 따라서, 향후에는 본 연구결과를 기초로 하여 내구신뢰성 측면의 성능지표를 정량화하여 상용화 가능성을 극대화시키도록 하여야 할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 자동차용에 적합한 자이로센서 국산화를 위하여 검지부를 진공 패키징한 MEMS 자이로센서를 설계, 제작하여 실제 자동차에 장착하였다. 자동차용 자이로센서 적용 온도인 $-40 \sim +125^{\circ}\text{C}$ 에 걸친 센서 성능 안정성 유지를 위하여 자동제어기술을 이용하였다. 이를 통하여, 검지부 크기를 2.8cc로 소형화하면서 자이로 센서의 일반 성능인 scale factor $25\text{mV}/^{\circ}\text{sec}$, 선형성 $\pm 0.6\%$, 영점변화 $\pm 0.37^{\circ}/\text{sec}$ 인 자동차용 자이로센서를 제작할 수 있었다. 본 논문에서는 기존 자이로 센서 제작공정과 달리 검지부를 진공 패키징 형태로 제작하여 출력과 노이즈 감소효과를 검증할 수 있었다. 또한, 설계, 제작된 자이로센서를 실제 자동차에 적용한 결과, 동일 조건에서 선진 표준 자이로와 출력 차이가 약 2.81mV로서 감도 허용 오차 2% 이하임을 확인하였다. 이는 자동차에서 발생하는 진동과 온도변화를 상쇄시킬 수 있는 자동제어에 기인하는 현상이라 사료된다. 따라서, 향후의 연구에서는 본 연구에서 얻어진 자이로 센서의 성능이 지속적으로 유지될 수 있는 내구 측면의 평가 및 보완에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 울산대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

참 고 문 헌

- [1] R. Willig and M. Morbe, "New Generation of Sensor Cluster for ESP and Future Vehicle Stabilizing Systems in Automotive Applications", SAE 2003-01-0199, 2003.
- [2] Y. Cho, B. M. Kawk, A. P. Pisano, R. Howe, "Slide film damping in laterally driven microstructures", Sensor and Actuator A, 40, 1994.
- [3] J. D. Johnson, S. Z. Zarabadi, D. R. Sparks, "Surface Micromachined Angular Rate Sensor", SAE Technical Paper Series, 950538.
- [4] J. Berinstein S Cho, A. T. King, A. Kourepenis, P. Maciel, M. Weinberg, "A Micromachined Comd-Drive Tuning Fork Rate Gyroscope", 0-7803-0957-2/93, 1993 IEEE.
- [5] K. Funk, A. Schilip, M. Offenbergl, "Surface-micromaching of Resonant Silicon Structure", Transducer 95, 519-News, pp50.
- [6] A. Reppich, R. Willing, "Yaw Rate Sensor for Vehicle Dynamics Control Systems", SAE Technical Paper 950537, 1995

저 자 소 개



김 병 우 (金 炳 禹)

1965년 4월 15일생. 1987년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1990년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(석사). 2002년 한양대학교 정밀기계공학과(박사). 1989년 일본 KOSAKA연구소 초빙연구원. 1994~2006년 자동차부품연구원 전장기술연구센터장. 2006년 ~ 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 조교수
주관심분야 : 지능형자동차, 테레매틱스, 임베디드 시스템, 자동차 네트워크