

MEMS 자이로를 이용한 자동차 ESP 적용방안 연구

김 병 우*

1. 서 론

차세대 차량에 장착되는 제어기는 센서 네트워크를 통하여 많은 정보를 받아들이고 이를 활용하여 자동차 시스템의 기능을 향상시키고 있다. 이러한 변화의 필요성은 반도체 및 SoC의 발전으로 연산을 수행하는 Micro-Processor의 성능이 향상됨에 따라 그 가능성이 입증되었으나 독립적인 기존의 제어기 구성 방식으로는 자동차의 정보 공유를 통한 시스템 성능 향상에 한계성으로 작용하고 있었다.[1]-[4]

자동차 복잡한 제어 시스템의 기능향상과 신뢰성 확보를 위해서는 네트워크 기반의 분산 제어 시스템 개발이 요구되고 있다. 이러한 제어 시스템은 여러 정보의 공유와 유연성을 확보할 수 있으며, 배선에서도 경량화를 이룰 수 있는 장점이 있어 선진국을 중심으로 현재 개발이 활발하게 진행되고 있다.

이의 대표적인 시스템을 들자면, 통합차량자세 제어(ESP)를 들 수 있다. 국내 자동차 산업의 위상과 국내 IT 기술의 수준이 세계적인을 감안할

때, 자동차 ESP용 시스템 및 이를 위한 복합 센서 모듈 개발은 기술적인 측면과 경제적인 측면에서 매우 중요한 기술이라 할 수 있다.

ESP는 차간거리제어(ACC : Adaptive Cruise Control) 시스템을 탑재한 차종으로 확대되고 있으며 차간 거리 정보에서 충돌 가능성을 감지하여 브레이크 압력을 자동으로 제어하는 기능이 부가되기 시작했다. 또한 전복 가능성 감지부터 브레이크 압력이나 스톱을 컨트롤 뿐만 아니라 서스펜션과 연계를 통해 전복방지 기능 개선도 진행되고 있다.

코너링 시 차량 거동 제어 측면에서는 전동 파워스티어링과 연동하려고 하고 있다. 차량 동특성과 관련된 전자제어화를 기본으로 센싱 기술에 대한 액티브 제어화와 각 부품과의 연동기술을 개발하고 있다. 각 부품의 협조제어로 ECU의 통합 제어화나 개별 시스템마다 탑재되어 있는 각종 센서의 정보의 공유와 같은 하드웨어 레벨의 통합화가 진행되고 있다.

ESP와 다른 시스템이 연계되기 위해서는 다른 ECU와의 통신이 필요하며 현재 제어 자체는 각각의 ECU가 담당하고 필요한 정보만을 통신으로 주고 받는 형태가 일반적이다. 따라서, 차량네트워크화를 통하여 관련 ECU와 센서간의 정보를 공유하고 분산시킬 수 있는 제어 방안 마련이 필

※ 교신저자(Corresponding Author): 김병우, 주소: 울산광역시 남구 무거동(680-749), 전화: 052)259-1287, FAX: 052)259-1686, E-mail: bywokim@ulsan.ac.kr

* 울산대학교 전기전자정보시스템공학부

※ 본 연구는 지식경제부의 전자부품기반기술 개발사업과 부품소재기술 개발사업의 연구결과로 수행되었음.

요하다.

따라서, 본 논문에서는 자동차 통합제어에 필요한 적용 센서 모듈과 특성을 해석하고 관련 정보를 공유할 수 있는 방법을 모색하였다.

2. 자이로 센서 제작공정

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.

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 형성되어 있는 정렬 패턴을 이용하여 정렬한다. 전계 접합(anodic bonding)은 총 3차의 접합단계로 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. 이 때, 실리콘과 유리 기판의 열팽창 차이를 고려

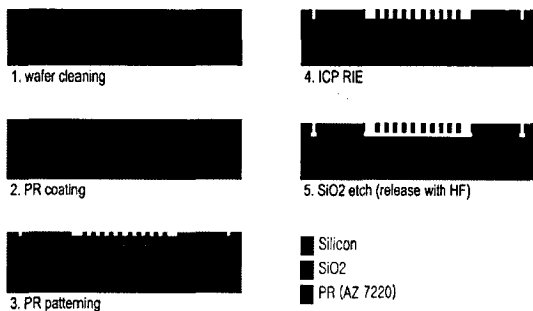


그림 1. SOI 웨이퍼를 이용한 공정도

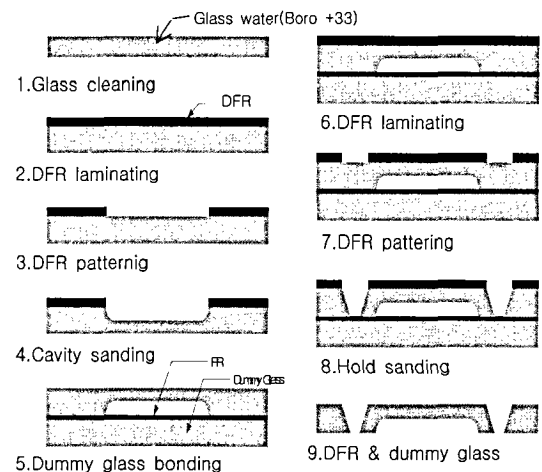


그림 2. 글라스 웨이퍼의 공정도
remove and cleaning

하여 상부와 하부의 온도를 동일하게 유지시켜준다. 마지막으로 확실한 접합을 위해 고전압을 전극에 인가하여 유리 기판 내부의 규소를 제거시켜 접합을 마무리하였다.

3. 센서 신호처리 및 성능 평가

앞서 언급한 자이로 센서 검지부를 중심으로 ESP(Electronic Stability Program)에서의 적용하기 위한 핵심 센서 모듈은 가속도 센서와 각속도 센서를 기반으로 CAN 네트워크화 하여 동작할 수 있도록 센서 모듈을 설계하였다.

네트워크 복합센서 모듈의 구성은 크게 차량의 요레이트 감지를 위한 각속도 센서와 횡방향 및 종방향 가속도 센서의 다이내믹 신호를 가지고 마이크로 컨트롤러에서 신호 처리 후 High Speed CAN 트랜시버로 인터페이스하여 네트워크에 연결하여 ESP와 통신할 수 있도록 구성하였다.

자이로센서는 차량의 자세제어의 핵심 센서로서 가속도 값을 검지한다. MEMS 기술로 제작한 초소형 자이로 센서와 이를 동작시키는데 필요한 주변 회로를 PCB에 장착하여 다른 회로에 손쉽게 연결할 수 있도록 제작한 소형 자이로 센서이다. 추가 부품 없이 바로 전원만 인가하면 동작하도록 제작되어 있으며, BGA(Ball grid array) 방식의 핀을 일반 100mil(2.54mm)간격의 보드에 손쉽게 연결할 수 있도록 확장시켰다. 외형은 20핀

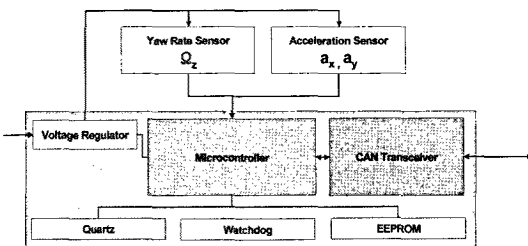


그림 3. ESP 센서 모듈 구성도

TTL 로직 디바이스와 똑같이 만들어 기존에 사용하던 IC 소켓과도 호환되도록 하였다.

응답 특성을 결정짓는 각각의 커패시터 소자 값들은 ADXRS401의 설계 가이드 라인에 기초하여 제작하였다. 아날로그 접지(AGND)와 디지털 접지(PGND)는 분리되어 있다. AVCC와 PDD도 역시 분리되어 있다. 장착되어 있는 필터의 대역폭은 20Hz(@47nF)이며, 커패시터를 추가로 장착하여 대역폭을 더 줄이고, 노이즈에 강한 시스템으로 설계하였다.

정지해 있을 때에는 2.5V 신호가 출력되며, 회전하면 회전 속도에 따라서 2.5V에서 전압이 상승한다. 자이로 센서 패키지는 표면의 수직방향 축을 기준으로 각속도를 검지하도록 되어있으며 외부 저항으로 스케일 팩터를 조정할 수 있다. 또한 외부 캐퍼시터로 대역폭을 셋팅할 수 있다.

레퍼런스 전압과 온도 출력을 통해 보상회로에 사용할 수 있으며 두개의 디지털 자가진단 입력 포트를 통하여 센서와 시그널 컨디셔닝 회로부 두개를 모두 테스트할 수 있다.

출력 신호는 계인과 모듈레이션 스테이지를 거쳐 각속도 신호를 발생시킨다. 내부의 두개의 센서 구조는 G와 진동 노이즈 성분을 줄이기 위한 디자인이다. 자동차와 같은 노이즈 환경에서 신호의 정확성을 확보하기 위하여 시그널 컨디셔닝이 가능한 센서공정을 사용한 것이다.

정전기력 공진을 위해서는 14V에서 16V의 동

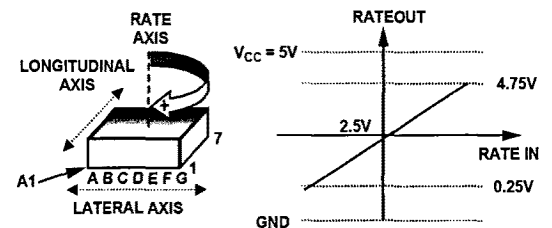


그림 4. 자이로 센서 구성 및 출력 특성

작 전압이 필요하나 공급하는 전원은 5V 응용파 트가 대부분이므로 칩 내부에 Charge Pump 블록을 포함시켜 동작전압까지 승압시켜 동작시킨다. 또한 9k Ω 내부 저항과 외부 커패시터를 이용하여 로우패스 필터를 구성한다. 커패시터 100nF의 경우 400Hz 로우 패스로 동작하며 $\pm 35\%$ 특성을 보인다.

파워 공급은 아날로그 회로와 연관되어 있으나 고주파수 노이즈와 과도 특성은 디지털 회로와 연관되어 있으므로 디바이스 동작을 위해서는 모두 고려해야 한다. 파워공급 관련하여 두포트는 디커플링 커패시터로 분리되어 있다. 시스템 아날로그 공급을 위해서 라우팅하기 전에 관련 핀을 연결시킨다. 결과적으로 Charge Pump에 의한 노이즈를 최소화할 수 있다. Charge Pump 커패시터는 14kHz의 진동 주파수로 스위칭하여 온 칩 고전압 공급 전원을 발생할 수 있도록 한다.

대역폭 셋팅을 위해서는 커패시터와 온칩 저항을 사용하여 대역폭을 제한할 수 있는 저대역 필터를 사용한다. -3dB 주파수 셋팅은 저항과 커패시터에 의해 결정될 수 있다.

$$f_{out} = \frac{1}{2\pi R_{out} C_{out}}$$

주파수는 저항 R_{out} ($180\Omega \pm 1\%$)에 의해 조절되며 외부저항과 연계하여 사용될 수 있다.

$$R_{out} = \frac{180k\Omega \times R_{ext}}{180k\Omega + R_{ext}}$$

고주파수 디모듈레이션을 제한하기 위한 가장 큰 목적은 최종 앰플리파이어 스테이지를 포화하기 위함이다. 그러므로 400Hz@0.1 μ F은 의미없다. 낮은 주파수는 좋은 컨트롤을 위해서 통상 10회 이상 필요하다. -3dB 필터 주파수는 전반적인 시스템 노이즈 뿐만아니라 고주파수의 진폭을 줄일 수 있다.

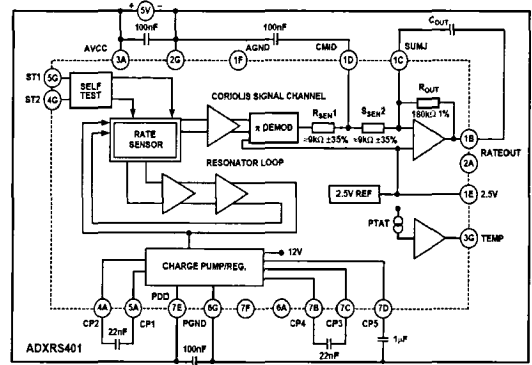


그림 5. 자이로 센서 응용 회로

전체 스케일 측정 레인지를 증가시키기 위해서 330k Ω 저항을 사용하여 10mV/°sec 감도에서 약 50% 증가시킬 수 있다. 병렬로 45k Ω 저항을 사용할 경우 전체 스케일 레인지를 4배까지 증대시킬 수 있다. 외부 감도를 줄이기 때문에 선형적인 전체 스케일 레인지가 증대되는 것을 막는다.

전체적인 정확도 향상을 위한 온도 보상은 온도에 따라 비례하는 출력 전압에 따라 보상 방법 적용한다. 온도에 따른 전압 값은 2.5V @ 27°C가 기준값이고 8.4mV/°C 특성을 가진다. 온도 출력 회로는 소스 전류를 50 μ A 이내로 제한한다. 각 보상점에서 측정 정확도를 향상 시키기 위해서는 보상 과정 진행 동안 디바이스의 대역폭에서의 밴드 노이즈를 줄여야 한다.

초기 전압 조정은 포지티브 공급과 그라운드 사이에 적합한 저항을 으로 할 수 있다. 2.5V 조차 중심 전압은 대칭적인 스윙 레인지를 위한 것이다. 만약 스윙 출력이 비대칭적이면 포지티브 공급단에 저항을 연결하면 디지털 공급단의 노이즈를 피할 수 있으며 초기 불안정성을 조절할 수 있다.

$$R_{null} = \frac{2.5 \times 180,000}{V_{null0} - V_{null1}}$$

V_{null0} 는 영점 출력이고 V_{null1} 은 목표 초기 값

이다. 만약 초기 값이 원하는 값보다 낮은 경우에는 커먼 또는 그라운드 단에 저항을 연결하고, 반대로 원하는 값보다 높은 경우에는 5V 전원 공급 단에 저항을 연결한다. 저항은 1MΩ에서 5MΩ 사이의 값으로 조정한다.

자기진단기능은 가속도와 관련하여 전자적인 특정 방법에 의하여 각 센싱 구조에 특정신호를 보내어 진단할 수 있게 되어 있다. 표준 논리 신호를 보내서 자가진단 출력단에 -0.8V, +0.8V 출력 전압으로 진단할 수 있게 되어 있다. 자가 진단에 결과는 초기 바이어스 쉬프트에 따라서 정확하게 매칭할 필요는 없다. 때문에 자가진단 결과가 실행되는 것으로 판단될 경우 손상되지 않았다고 판단한다.

동작방향으로 2G에서 6G사이의 가속도 성분이 존재할 경우 디바이스의 가속도 센싱값에 영향을 준다. 고려해야할 상황은 정지상태에서 기준값의 쉬프팅 현상과 기준값에 인가되는 노이즈 상황이다. 스케일 팩터는 수백 m/s²까지는 영향을 주지는 않는다.

주축에 인가되는 0.00002(°/s)/(m/s²)² 과 상측 방향의 대각선으로 인가되는 가속도 성분을 위한 0.0003(°/s)/(m/s²)² 은 20kHz 주파수 정도의 진동은 정류된다. 절대값 300m/s² 정도는크게 영향을 주지는 않는다. 14kHz 센서 공진값 근처의 스펙트럴 댄시티 선형 진동은 출력에 노이즈로 인가된다.

가속도 대역폭(±40Hz) 이내에서는 공진을 해야 하므로 영향을 주는 고주파수 진동은 고려해야 한다. 또한 정지상태에서 인가되는 G 에 의한 감도변화는 0.15°/g 이며, 인 밴드 노이즈는 3mV (rms) 에서 5mV(rms) 정도이다. 또한 광대역 진동효과에 대한 고려가 필요하다. 저역필터에 의해 저주파수 노이즈는 1% 이내로 통과시켜 많은 노

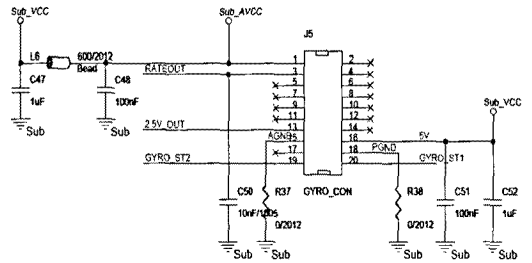
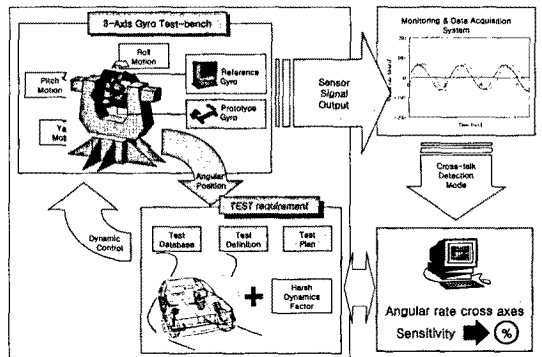


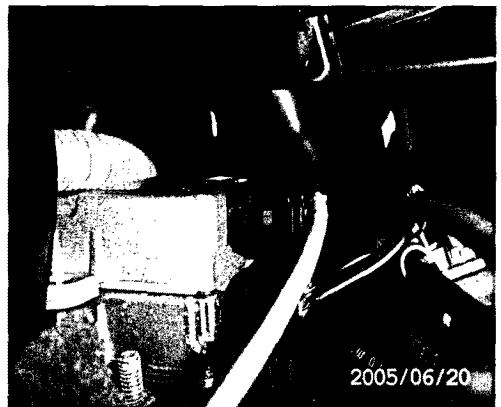
그림 6. 자이로 센서 응용 회로

이즈를 제거할 수 있다.

상기 절차에 의하여 개발된 자이로 센서의 실차 적용 및 평가를 위하여 전용 평가용 테스트 벤치를 제작하였다. 자동차에서 발생하는 동특성은 yaw, roll, pitch의 가속도 성분이 복합적으로



(a) Test bench of gyro sensor



(b) Sensor attachment on real vehicle

그림 7. 자이로 센서 차량 장착 및 평가

동시에 발생되고 극한 동작 상황을 모사하여야 한다. 이를 위하여, 그림 4와 같이 자이로 테스트 벤치를 구성하여 시제품 평가를 수행하였다. 테스트 벤치의 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. 자이로 센서의 정확한 평가를 위하여 자이로 센서를 적용 차량의 무게중심에 위치시키도록 하여 기존 양산 제품과의 성능을 비교. 평가하였다.

4. 결과 및 분석

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 1의 검지영역, 내전압, 감도와 같은 일반 성능은 동일하나 선형성 $\pm 0.7\%$, 동작온도 $-25\sim 120^{\circ}\text{C}$, 영점변화 $1.0^{\circ}/\text{sec}$, 크기(용량) 3.0cc로서 본 연구에서 개발한 센서대비 특성이 약간 열악하다.

그림 8은 2Hz, 10deg/sec 조건에서 측정한 MEMS 자이로센서의 scale factor로서 25mV/deg/s이고 그림 9는 Agilent 35670A dynamic signal analyzer를 이용하여 측정한 자이로 검지부의 공진 특성을 나타내고 있다. 검지부의 가진

표 1. MEMS 자이로센서의 주요 사양

Specifications	Value
Detection range	-90 ~ 90°/sec
Scale factor	25mV/°/sec
Linearity	Within $\pm 0.6\%$
Zero drift	Within $\pm 0.37^{\circ}/\text{sec}$
Temperature range	-40 ~ 125°C
Electric protection	8.0 ~ 16.0V
Size(volume)	2.8cc

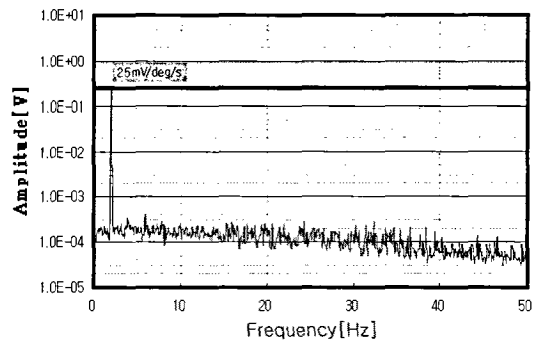


그림 8. 자이로센서의 Scale factor

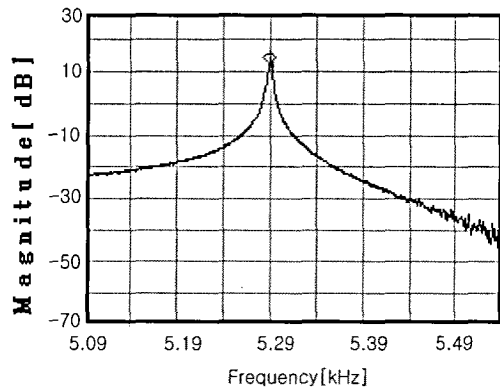


그림 9. 자이로센서의 공진 주파수

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 10은 자이로 센서를 정지시켜 놓았을 때, 발생하는 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 자이로 센서는 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 10은 자이로 전용

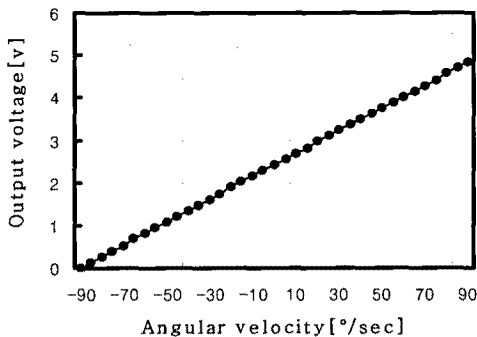


그림 10. 온도변화에 의한 선형성 변화

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 11, 12는 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. 자

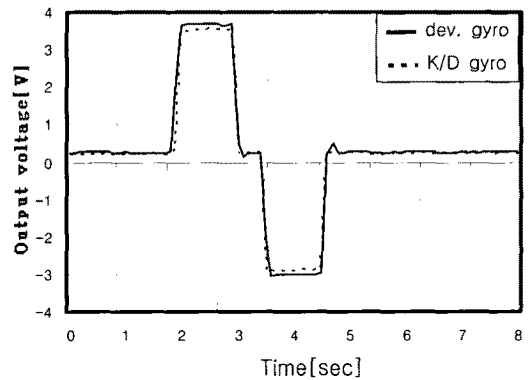


그림 11. 불규칙한 각속도 변화에 의한 출력

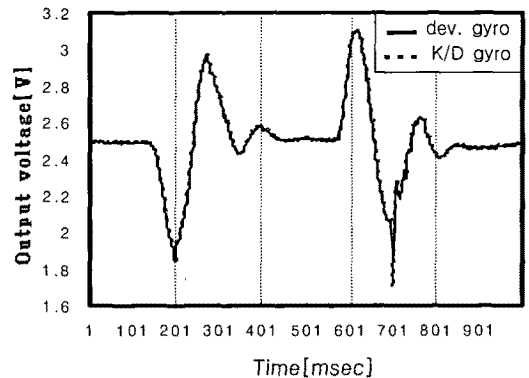


그림 12. 단일 차선 변화에 의한 각속도 변화

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.

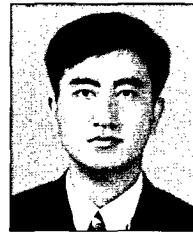
5. 결 론

자동차 안전도 향상을 위한 Chassis 시스템 성능 향상을 위해서는 일반 기계 기반의 시스템으로서는 한계성을 나타내고 있다. 이의 대안으로서 자동차 Chassis 시스템의 IT 기술 적용에 대한 방안으로서 자이로 센서 설계 및 제작을 통하여 자동차 적용 가능성을 확인하였다.

자동차용으로 제작된 자이로 센서를 전용 테스트 베드에 적용하여 표준 자이로와의 일반 성능을 비교 평가하여 동등 또는 그 이상의 특성 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 테스트베드 상에서 평가한 자이로 센서를 실차에 장착하여 기존 양산 제품과의 비교 평가를 통하여 상용화 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. D. Johnson, S. Z. Zarabadi, D. R. Sparks, "Surface Micromachined Angular Rate Sensor," SAE Technical Paper Series, 950538.
- [2] J. Berinstein S Cho, A. T. King, A. Kourepenis, P. Maciel, M. einberg, A Micromachined Comd-Drive Tuning Fork Rate Gyroscope," 0-7803-0957-2/93, 1993 IEEE.
- [3] K. Funk, A. Schilip, M. Offenber, "Surface-micromaching of Resonant Silicon Structure," Transducer 95, 519-News, pp. 50.
- [4] A. Reppich, R. Willing, "Yaw Rate Sensor for Vehicle Dynamics Control Systems," SAE Technical Paper 950537, 1995.



김 병 우

- 1987년 한양대학교 기계공학과 졸업.
- 1990년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(석사).
- 2002년 한양대학교 정밀기계공학과(박사).
- 1989년 일본 KOSAKA연구소 초빙연구원.
- 1994년~2006년자동차부품연구원 전장기술연구센터장.
- 2006년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수
- 관심분야 : 지능형자동차, 텔레매틱스, 임베디드시스템, 자동차 네트워크