

마이크로 자이로스코프를 위한 제어기 설계 및 진공도에 따른 성능 분석

성운탁*, 이장규*, 강태삼**
 *서울대학교 전기컴퓨터공학부, **건국대학교 기계항공공학부

Controller design for microgyroscope and performance analysis at various vacuum level

Woon Tahk Sung*, Jang Gyu Lee*, Taesam Kang**
 *School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University
 **School of Electrical Engineering & Computer Science, Konkuk University

Abstract - 본 논문에서는 진동형 마이크로 자이로스코프를 위한 페루프 제어기를 설계하였으며 실험을 통하여 설계된 제어기의 성능을 검증하였다. 일반적으로 진동형 자이로스코프를 동작시키기 위해서는 구동축과 검출축의 공진 모드가 일치되도록 설계를 하며 높은 감도를 얻기 위해서는 이 두 모드의 Q값이 클수록 유리하다. 하지만 이러한 개루프 상에서 동작 하에서는 대역폭과 선형성 등의 성능에 제약이 가쳐오게 되며 이를 개선하기 위해 페루프 제어기가 필요하다. 본 논문에서는 진공도에 따른 Q값의 변화와 이에 따른 제어기의 성능을 분석하였으며 실험 결과로부터 설계된 제어기가 만족할 만한 성능의 개선을 가져옴을 확인하였다.

1. 서 론

본 논문에서는 반도체 공정을 이용한 초소형 구조물 제작 기술인 MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems)공정을 이용하여 제작된 마이크로 자이로스코프의 신호처리회로와 제어기 설계를 다루었다. 이러한 MEMS 공정을 이용하여 제작된 센서는 그 이점과 앞으로의 응용 가능성 때문에 현재 가장 활발히 연구되고 있는 분야중의 하나이며 관성센서 영역에 있어서도 그 활용도가 매우 커지고 있는 추세이다[1-4].

MEMS 공정으로 제작된 초소형 구조물의 특성상 관성력을 받는 물체의 질량이 매우 작으므로 높은 감도를 얻기 위해서는 가능한 큰 변위를 가질 수 있도록 설계를 해야한다. 이를 위해서 일반적으로 관성 질량체가 시스템의 공진 모드 상에서 구동되도록 한다. 이러한 공진 모드는 공진 주파수와 Q factor로 그 특성을 나타낼 수 있다. 마이크로 자이로스코프는 높은 구동 변위를 얻기 위해서 공진 주파수로 진동을 시키게 되는데 이 때문에 이러한 구조를 갖는 마이크로 자이로스코프를 진동형 자이로스코프라고도 한다[1-4]. 구동 변위는 Q값에 비례하게 되므로 감도를 높이기 위해서는 높은 Q값을 갖도록 설계를 하며 일반적으로 진공 환경하에서 동작할 수 있도록 제작을 한다[1-4].

마이크로 자이로스코프에는 높은 Q 특성을 갖는 두 개의 모드가 있는데 이는 구동 모드와 검출 모드로서 서로의 진동축이 직교하는 모드이다[1]. 자이로스코프를 동작시킬 때에는 이 두 모드의 공진 주파수가 일치되도록 하며, 이 경우 전체 시스템의 감도는 두 모드의 Q값의 곱에 비례하게 된다. 하지만 개루프 상에서 동작시킬 경우 이러한 높은 Q값은 높은 감도를 가져오는 반면 시스템의 응답 특성을 느리게 만든다. 따라서 이를 개선하기 위해 페루프 제어를 적용하게 된다. 제어를 적용할 경우, 검출 모드의 특성이 바뀌어 시스템의 응답특성이 빨라지게 되고 시스템이 Q값에 크게 의존하지 않게 된다. 반면에 감도 면에서는 페루프 제어를 하는 경우가 플랜트의 이득의 감소를 가져오게 되므로 제어를 하기 전보다 낮아질 수 있다. 본 논문에서는 진공도에 따른 Q값의 변화를 관찰하고 이에 따른 제어효과를 실험을 통해 검증하였다.

2. 마이크로 자이로스코프의 동작 특성

2.1 동작 원리

마이크로 자이로스코프는 두 개의 직교하는 축으로 움직이는 2차 스프링-질량-댐퍼 시스템으로 모델링 할 수 있다. 센서의 성능은 이 두 모드의 특성에 크게 영향을 받는다. 첫 번째 모드인 구동 모드는 외부 각속도에 대해 코리올리 힘을 유도하기 위해 질량체를 구동시키는 모드로서 그림 1에서 x축 방향으로 움직이며 높은 Q값의 공진점을 갖는 모드이다. 두 번째 모드인 검출 모드는 z축 방향으로 인가되는 각속도 입력에 대해 구동축과는 직각 방향으로 작용하는 모드로서 그림 1에서는 y축 방향으로 움직이는 모드이다. 검출 모드 또한 높은 Q값을 가지며 구동 모드의 공진 주파수와 거의 동일한 공진 주파수를 가지도록 설계된다. 두 모드 모두 높은 Q값을 갖도록 설계하는 이유는 최소한의 에너지로 최대한의 변위를 유발시켜 큰 감도를 얻을 수 있기 위해서이다. 이를 위해서 자이로스코프 구조물은 댐핑이 작은 구조로 설계를 하며 진공 패키징이 되도록 제작한다.

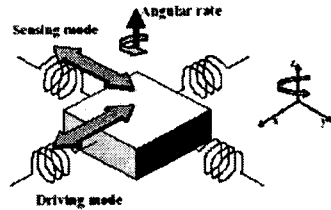


그림 1. 마이크로 자이로의 동작원리

2.2 동역학 방정식 및 모드 특성

그림 2는 이러한 두 모드가 포함된 전체 시스템의 블록도이다. 외부에서 가해진 각속도 입력은 구동 모드를 통과한 신호와 곱해져 검출 모드의 입력 신호가 된다. 검출 모드는 검출축 2차 운동 다이내믹스와 변위를 전압으로 변환하는 환산

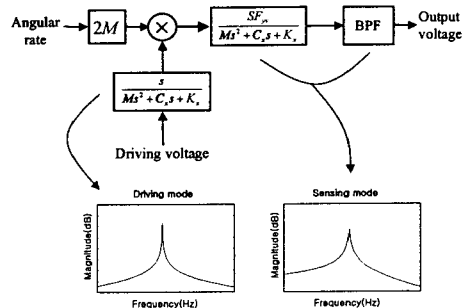


그림 2. 시스템 블록도

계수 그리고 2차의 대역통과필터로 구성된다. 일반적으로 자이로스코프를 동작시킬 경우 이 두 모드의 공진 주파수와 검출 모드측 대역통과필터의 중심 주파수를 일치시킨다. 구동측과 검출측의 운동방정식을 수식으로 나타내면 식(1)과 같다. 여기서 M, C, K 는 각각 질량, 댐핑 계수, 스프링 상수를 나타내며 아래첨자 x, y 는 각각 구동 및 검출측 방향으로의 운동을 나타낸다. $F_0 \sin \omega t$ 는 구동측에 가해지는 구동 신호를, $2M\Omega v_x$ 는 검출측 방향으로 유도되는 코리올리의 힘을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + C_x\dot{x} + K_x x &= F_0 \sin \omega t \\ M\ddot{y} + C_y\dot{y} + K_y y &= 2M\Omega v_x \end{aligned} \quad (1)$$

이 때 구동측과 검출측의 공진 주파수가 일치하고 ($\omega_x = \omega_y = \omega$) 식(1)과 같이 ω 의 주파수를 갖는 구동력으로 구동한다고 했을 경우 Ω 의 각속도 입력에 대해 검출측의 변위는 식(2)와 같이 나타내어진다. 여기서 Q_x, Q_y 는 각각 구동 및 검출 모드의 Q factor이다.

$$y(t) = 2\Omega F_0 \frac{Q_x Q_y}{M\omega^3} \cos \omega t \quad (2)$$

M 과 ω 는 정해진 값이라고 했을 때 식으로부터 검출측 변위는 구동측과 검출측 Q값의 곱에 비례하는 것을 알 수 있다. 이 Q값은 진공도가 낮을수록 증가하므로 개루프 상에서 감도를 높이기 위해서는 진공도를 낮게 유지하는 것이 필요하다. 하지만 공진 영역에서 동작하는 마이크로 자이로스코프의 특성상 Q가 커지게 되면 대역폭이 좁아들므로 그 만큼 시스템의 응답은 느리게 된다. 따라서 대역폭의 희생없이 감도를 증가시킬 수 있는 방안이 필요하다. 이를 위해 페루프 제어기가 제안되었다.

3. 제어기 설계

2.1 PD 제어기

본 논문에서는 널리 사용되는 고전적인 PID 제어기법을 사용하였다. 마이크로 자이로스코프의 경우 수 kHz 대의 높은 주파수를 갖는 공진 모드 영역에서 동작하므로 실질적으로는 비례-미분 제어기(PD 제어)의 형태를 띈다. 페루프 시스템의 특성은 미분 이득값이 결정지며 비례 이득값은 신호의 왜곡을 방지하도록 조정하는 부수적인 역할을 한다. 이러한 PD 제어기를 실질적으로 회로에 적용할 경우에는 미분 제어기가 고주파 잡음 성분을 증폭시키는 역할을 하게 되므로 시스템을 불안정하게 할 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위해 제어기 다음단에 고주파 잡음을 제거하는 저역통과필터를 삽입하여 사용한다. 이 때 저역통과필터의 차단 주파수는 공진 주파수 영역보다 크게 설정하므로 제어 성능에는 큰 영향이 없게 된다. 그림 3은 이러한 제어기가 포함된 페루프 시스템의 블록도를 나타낸 그림이다.

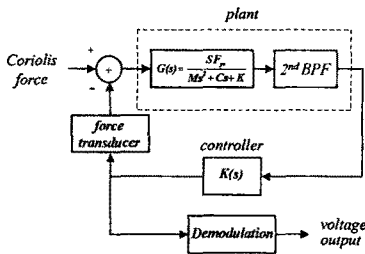
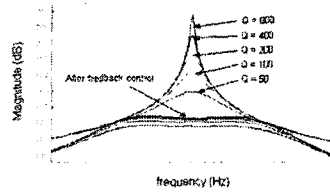


그림 3. 페루프 시스템 블록도

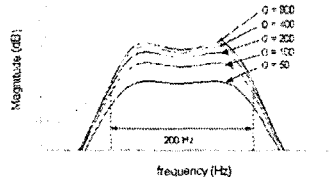
2.2 Q값에 따른 제어 성능과 안정도

그림 4는 미분이득 및 비례이득 값이 적절히 정해졌

을 때 Q값의 변화에 따른 시스템의 특성 변화를 나타낸 그림이다.



(a) 플랜트 출력의 보드 선도



(b) 제어기 출력의 보드 선도

그림 4. Q값의 변화에 따른 제어 전후의 모드 특성

(a)는 제어기 동작 전후의 플랜트의 출력을 나타낸 것으로 개루프의 경우에는 시스템의 특성이 Q값에 매우 민감하여 공진점에서의 크기는 증가하나 대역폭은 작아지는 것을 보여주고 있다. 그래프에서 하단에 있는 부분은 페루프에서 변위가 레플레이팅 되어 시스템 출력이 매우 낮아지는 것을 볼 수 있다. (b)는 페루프상에서 제어기의 출력을 나타낸 것으로 출력이 Q값에 민감하지 않고 대역폭이 충분히 확보되는 것을 알 수 있다. 그래프에 나타내어진 출력은 그림 3에서 force transducer 이후의 값을 본 것으로 그래프의 0dB 부근 출력값은 입력이 Coriolis force를 추종하는 것을 나타낸다. 이때 우리가 실질적으로 제어기 출력으로 얻는 값은 force로 변환되기 이전의 전압값을 보는 것이므로 전압 출력 레벨은 그림 (b)의 것과는 달라지게 된다. 이 레벨을 결정 짓게 되는 것이 force transducer로서 이는 자이로스코프 구조물 내의 제어 전극의 특성에 의해 결정된다.

마지막으로 Nyquist plot을 통해 페루프 시스템의 안정성을 검토해보면, 그림 5에서 보는 바와 같이 시스템의 안정성은 보장되며 Q값의 변화에 따른 stability margin의 변화는 크지 않은 것을 알 수 있다.

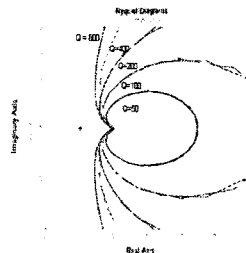


그림 5. Nyquist plot

4. 실험 결과

설계된 제어기의 성능을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 먼저 자이로스코프의 신호검출을 위한 검출회로를 설계 제작하였으며, 설계된 제어기를 op-amp와 필터칩을 이용하여 구현하였다.

그림 6은 실험 환경을 나타낸 것이다. 자이로스코프칩이 장착된 회로는 진공 챔버 내에 넣고 나머지 신호처리 회로와 제어회로는 챔버 외에 설치한 후 진공 펌프로 챔버내의 진공도를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 각속도 신호가 가해질 수 있도록 진공 챔버는 레이트 테이블 위에 장착하였으며 테이블 컨트롤러를 사용하여 정현파 각속도 신호를 인가하였다.

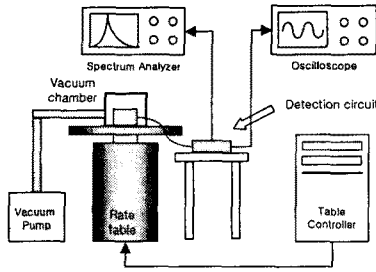


그림 6. 실험 환경

그림 7은 100deg/sec, 1Hz의 정현파 각속도 입력이 가해졌을 때 제어기 동작 전후의 시스템 출력을 나타낸 것이다. 위의 신호는 플랜트 출력을 아래 신호는 제어기 출력을 나타낸 것이다. 그림으로부터 제어기 동작후 플랜트의 출력이 레귤레이션 되고 제어기가 입력 신호를 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

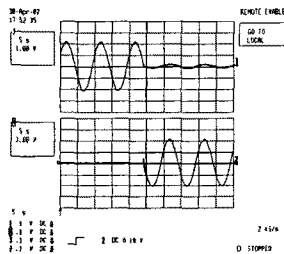


그림 7. 제어기 동작 전후의 정현파 출력

위의 그림과 같은 실험을 다양한 진공도에 대하여 수행하여 진공도에 따른 개루프와 폐루프의 감도를 측정하였다. 다음으로는 진공도에 따른 대역폭의 변화를 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 수십 Hz대의 높은 주파수를 갖는 실제 각속도 신호를 레이트 테이블을 이용해서는 구현할 수 없으므로 대역폭 실험을 위해서는 전기적인 등가신호를 가해주는 회로를 구성하여 실험을 수행하였다. 실험에 대한 결과가 그림 8에 나타나 있다. 실험 결과로부터 개루프의 경우 진공도에 매우 민감특성을 보이고 진공도가 낮아짐에 따라서 감도는 증가하는 반면 대역폭은 작아지는 것을 볼 수 있다. 폐루프의 경우에는 전체적인 감도는 낮은 편이지만 대역폭은 개루프에 비해 월등히 크며 주파수 특성이 진공도에 크게 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다.

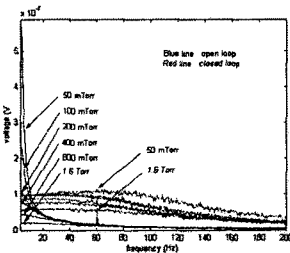


그림 8. 진공도에 따른 주파수 응답 특성

마지막으로 실험 결과를 종합하여 진공도에 따른 제어 효과를 그래프로 나타내었다. 그림 9의 좌측은 진공도 변화에 따른 감도의 변화를, 우측은 대역폭의 변화를 나타내고 있다. 그래프로부터 감도의 경우 300mTorr 부근을 기준으로 해서 그보다 낮을 경우에는 제어를 하지 않을 경우가, 그보다 높을 경우에는 제어를 할 경우가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 대역폭의 경우에는 모든 진공도에 대해서 제어를 할 경우가 그렇지 않을 경우보다 월등히 나은 성능을 보이는 것을 볼 수 있다. 따라서 센서의 성능 향상을 위해 제어를 적용함에 있어 감도와 대역폭 사양에 따라 trade-off가 필요하겠지만 전반적으로 넓은 진공도 영역에서 제어를 통해 시스템의 성능이 크게 향상되는 것을 볼 수 있다.

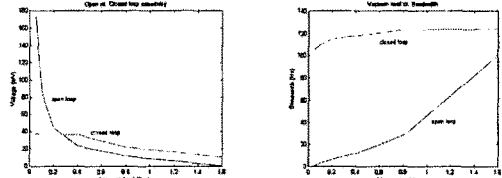


그림 9. 진공도에 따른 감도와 대역폭의 변화

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로 자이로스코프의 성능 향상을 위하여 PID 제어기를 이용한 폐루프 제어회로를 설계하였다. 자이로스코프의 특성상 높은 Q값을 가지도록 설계하며 이를 위하여 일반적으로 진공 환경하에서 동작하게 된다. 본 연구에서는 진공도를 변화시켜 가며 실험을 수행하였으며 실험 결과 넓은 진공도 영역에서 제어기가 시스템의 성능을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대 자동제어특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. W. Song, J. G. Lee, T. Kang, W. T. Sung, H. T. Lim, and Y. K. Kim, "Design of a Gimbal-Structured Micro Gyroscope and Signal Processing Part," Proceedings of ICCAS2001, pp.1266-1269.
- [2] N. Yazdi, F. Ayazi and K. Najafi, "Micromachined Inertial Sensors," Proceeding of the IEEE, vol. 86, No. 8, August 1998, pp. 1640-1659
- [3] F. Ayazi and K. Najafi, "A HARPSS Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope," Journal of Microelectro-mechanical system, vol. 10, No. 2, June 2001, pp. 169-179
- [4] W. Geiger, J. Merz, T. Fischer, B. Folkmer, H. Sandmaier and Walter Lang, "The silicon angular rate sensor system DAVED," Sens. and Actuators 84(2000) 280-284