

論文

마이크로 자이로스코프를 위한 PD 제어기 설계 및 성능시험

성운탁*, 송진우**, 이장규*, 강태삼***

PD controller design for Micro Gyroscope and Its Performance Test

Woon Tahk Sung*, Jin Woo Song**, Jang Gyu Lee* and Taesam Kang***

ABSTRACT

This paper presents a performance improvement result with the aid of closed feedback controller loop to a micro gyroscope. The dynamic model of a micro gyroscope is derived and a conventional proportional and derivative controller is designed via frequency domain analysis. The proposed control loop is implemented using several analog devices and applied to the SNU-Bosch MEMS gyroscope to check its performance improvement in real environment. The experiments demonstrated the performance improvement with the proposed feedback control loop. The bandwidth, linearity, and bias stability are improved to 78 Hz, 0.504 %, and 0.043 deg/sec, respectively, from 35 Hz, 2.07 %, and 0.066 deg/sec of open loop system.

초 록

본 논문에서는 마이크로 자이로스코프를 위한 페루프 제어기를 설계하여 그 성능이 개선됨을 보였다. 마이크로 자이로스코프는 높은 Q값을 가지는 시스템으로 그 특성상 공진 영역에서 동작하게 되는데, 개루프로 동작할 경우 선형성, 대역폭 등의 성능에 제약이 있게 된다. 페루프 제어기는 개루프 동작시의 이러한 제약을 극복하고 성능을 개선할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 PD 제어기를 적용하였으며 실험 대상이 된 마이크로 자이로스코프는 서울대에서 설계하고 Bosch foundry에서 제작한 SNU-Bosch MEMS 자이로스코프를 사용하였다. 실험을 통해 페루프 제어기의 성능을 검증한 결과 대역폭은 35Hz에서 78Hz로, 선형성은 2.07%에서 0.504%로, 바이어스 안정도는 0.066deg/sec에서 0.043deg/sec로 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : Micro gyroscope(마이크로자이로스코프), PID control(PID 제어), Feedback loop(페루프), MEMS(초소형전자기계시스템)

1. 서 론

자이로스코프는 회전하는 물체의 각속도를 측정하는 기기로서 관성항법시스템(INS)을 운용하

는데 필요한 관성측정장치(IMU)를 구성하는 필수적인 센서이다. 정확한 항법해의 계산을 위해 관성측정장치는 정밀한 센서를 요구해왔으며 이를 위해 지금까지 주로 기계식, 혹은 광학식 자이로스코프가 사용되어 왔다[1]. 하지만 이러한 기존의 자이로스코프의 경우 그 정밀성에도 불구하고 크기, 무게, 전력사용량 등의 제약으로 인해 응용분야가 비교적 큰 시스템으로 제한되었다. 이러한 제약은 근래에 활발히 연구가 진행되고 있는 초소형 구조물 제작 기술인 MEMS (Micro-

† 2004년 10월 14일 접수 ~ 2005년 1월 24일 심사완료

* 정회원, 서울대학교 전기컴퓨터공학부

** 정회원, (주)마이크로인피니티

*** 정회원, 건국대학교 기계항공공학부

연락처자, E-mail : tskang@konkuk.ac.kr

서울 광진구 화양동 1번지

elcromechanical systems) 기술에 의해 극복될 수 있을 것으로 기대를 모으고 있으며 마이크로 자이로스코프가 그 대표적인 예이다. MEMS 기술은 제작 공정의 특성상 많은 장점을 가지고 있는데, 단일 IC칩 속에 포함할 수 있을 만큼 작게 제작이 가능하고, 실리콘 재질로 인해 그 구조물이 견고하며, 전력 소모가 매우 적다. 또한 반도체 공정을 이용하기 때문에 센서를 값싸게 대량 생산할 수 있다는 장점이 있다. 이런 점 때문에 마이크로 자이로스코프는 관성센서 분야에서 지속적으로 주목받고 있으며 특히 민수용으로의 응용분야에도 그 이용 범위가 크게 확대 될 것으로 보인다[4-7]. 마이크로 자이로스코프 외에 항법분야에서 MEMS 기술을 이용한 예로는 소형 비행체의 액추에이터 등이 있다[2,3]. 하지만 이러한 연구의 경우 그 특성상 소형의 크기가 소형 시스템에만 적용이 가능할 것이지만 마이크로 자이로스코프와 같은 센서의 경우는 성능이 우수하다면 기존의 기계식, 광학식 자이로가 차지하는 항법 센서를 대체할 수도 있는 것이다. 다만 기존의 관성항법장치를 대체하기에는 아직 많은 성능의 제약이 따르므로 이 분야의 적용을 위해서는 성능 개선이 필수적이다.

본 논문에서는 마이크로 자이로스코프의 성능 개선을 위해 PD 제어를 이용한 페루프 제어회로를 설계, 제작하였으며 각 사양별 성능 향상의 정도를 개루프와 비교하였다. 항법시스템에 필요한 자이로스코프의 주요 성능 사양으로는 동작범위, 대역폭, 선형성, 바이어스 안정도 등이 있다. 일반적으로 개루프 상에서 마이크로 자이로스코프를 동작시킬 경우 동작범위와 선형성 등에서 제약이 있으며, 특히 높은 Q값을 갖는 공진모드에서 동작하는 시스템의 특성상 발생하는 낮은 대역폭을 개선하기 위해서는 페루프 제어가 필수적이다. 개루프 상에서 대역폭을 개선하기 위해 이중 질량체(dual-mass) 구조를 갖는 자이로스코프[9]를 설계하는 경우도 있지만 이 경우 넓은 대역폭을 얻는 대신 감도가 낮아질 수밖에 없는 단점이 있다. 제어를 할 경우 감도의 희생없이 대역폭을 넓힐 수 있다. 현재까지 마이크로 자이로스코프의 제작, 실험과 관련하여 연구되어 발표된 논문은 대부분 개루프 상에서의 결과이며 소수의 페루프 제어관련 논문들은 시뮬레이션만을 수행한 것이거나[8-11] sigma-delta digital control을 이용한 것이다[12,13]. 두 경우 모두 제어기의 실제 구현에 대한 설명과 각 성능 사양별 비교 결과는 제외되어 있다. 본 논문에서는 마이크로 자이로스코프 실제 시스템에 대해 제어기를 구현하여 실험을 수행하였다.

본 논문에서 적용한 제어기는 고전적인 PID 제어기법을 이용한 것으로 설계가 용이하면서도 성능 개선 효과는 비교적 큰 장점을 지니고 있다. LQR, H_2 제어기법 등을 이용한 고차의 제어기의 경우 성능 개선 정도에 비해 제어기를 회로적으로 구현하기에 부담이 되는 단점이 있다. 예를 들어 5차 혹은 6차 제어기를 실제 회로로 구현하기 위해서는 최소 3개의 필터회로와 몇 개의 곱셈기, 덧셈기 등이 필요한데 이 경우 정확한 회로소자의 값을 맞추기가 어려울 뿐만 아니라 구현된 회로의 크기도 커지므로 초소형센서의 개발이라는 연구의 취지와도 맞지 않을 수 있다. 이를 피하기 위해 낮은 차수의 제어기로 근사화하여 구현하는 방법이 있지만 이 경우 다소의 추가적인 해석과 설계과정이 필요하다. 본 논문에서 설계한 PD 제어기의 경우 비례, 미분 이득부와 덧셈기를 포함하면 3개의 Op-amp만을 이용한 회로구성이 가능해지며 회로 구현상의 오차를 보정하기 위한 튜닝도 용이하다.

본 논문에서는 먼저 마이크로 자이로스코프의 동작 특성에 대해 알아보고 이러한 특성에 맞는 PD 제어기 구성을 다루었으며, 이어서 설계된 제어기의 회로적인 구현과 성능 시험 결과를 제시하였다.

II. 시스템 동작 특성

2.1 동역학 방정식

마이크로 자이로스코프의 운동 역학은 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 구동시키

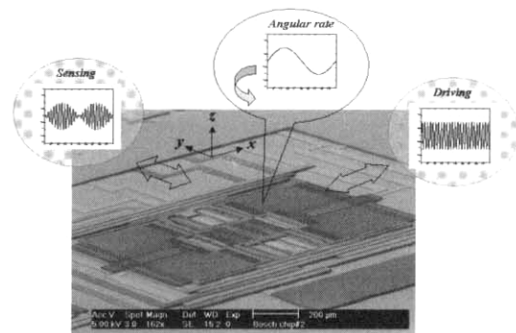


그림 1. 마이크로 자이로스코프의 동작원리

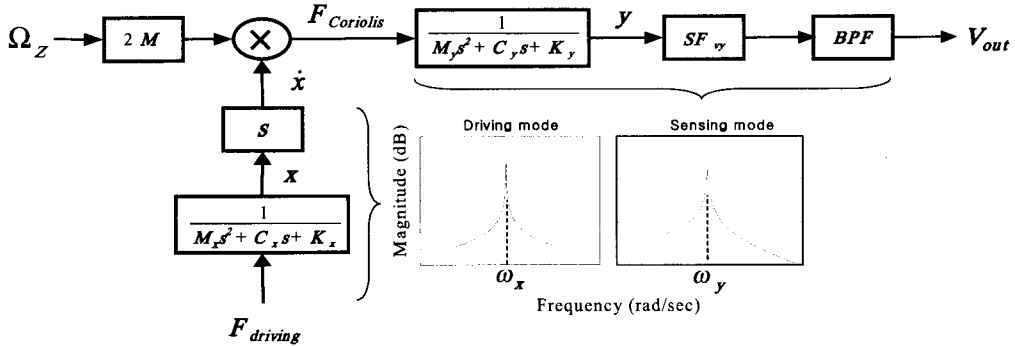


그림 2. 시스템 블록 선도

는 모드이다. 구동 모드는 그림 1에서 x 축 방향이며 높은 Q 값을 갖는 2차 시스템의 고유 공진 주파수로 구동된다.

두 번째 모드인 검출 모드는 그림에서 z 축 방향으로 인가되는 외부 각속도 입력에 대해 구동 방향과는 직각인 y 축 방향으로 반응하는 모드이다. 이 때 발생하는 코리올리 힘은 질량체의 x 축 방향 구동 속도와 외부 각속도의 곱에 비례하며 결과적으로 질량체는 그림과 같이 변조된 형태로 움직인다. 두 번째 모드 또한 높은 Q 값을 가지며, 구동 주파수에 변조되어 인가되는 코리올리 힘에 반응하도록 하기 위해 구동 모드의 공진 주파수와 거의 동일한 공진 주파수를 가지도록 설계된다[4]. 두 모드 모두 높은 Q 값을 갖도록 설계하는 이유는 최소한의 에너지로 최대한의 변위를 유발시켜 큰 감도를 얻을 수 있기 위함이다. 이를 위해서 마이크로자이로스코프 구조물은 댐핑이 작아지도록 대개 진공 패키징 된다. 이러한 두 가지 모드 특성을 갖는 마이크로 자이로스코프의 운동 방정식과 전달 함수식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_x \ddot{x} + C_x \dot{x} + K_x x = F_{driving} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{X(s)}{F_{driving}(s)} &= \frac{1}{M_x s^2 + C_x s + K_x} \quad (2) \\ &= \frac{1/M_x}{s^2 + \omega_x/Q_x s + \omega_x^2} \end{aligned}$$

$$M_y \ddot{y} + C_y \dot{y} + K_y y = F_{Coriolis} = 2M_y \Omega_z v_x \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{F_{Coriolis}(s)} &= \frac{1}{M_y s^2 + C_y s + K_y} \quad (4) \\ &= \frac{1/M_y}{s^2 + \omega_y/Q_y s + \omega_y^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{V_{out}(s)}{F_{Coriolis}(s)} \quad (5) \\ &= \frac{1/M}{s^2 + \omega_y/Q_y s + \omega_y^2} \times SF_{vy} \times BPF \end{aligned}$$

- M_x : x 축 moving plate의 질량
- M_y : y 축 moving plate의 질량
- C_x : x 축 변위의 댐핑 계수
- K_x : x 축 변위의 스프링 상수
- x : 질량체의 x 축 방향 변위
- v_x : 질량체의 x 축 방향 속도
- ω_x : 구동 모드의 공진 주파수
- Q_x : 구동 모드의 quality factor
- C_y : y 축 변위의 댐핑 계수
- K_y : y 축 변위의 스프링 상수
- y : 질량체의 y 축 방향 변위
- ω_y : 검출 모드의 공진 주파수
- Q_y : 검출 모드의 quality factor
- Ω_z : z 축 입력 각속도
- $F_{driving}$: 구동력 (x 축 방향)
- $F_{Coriolis}$: 코리올리 힘 (y 축 방향)
- SF_{vy} : 환산계수 (검출변위 vs. 출력전압)
- V_{out} : 출력 전압

식 (1), (2)는 두 모드간 커플링이 없다고 가정했을 경우(잘 설계된 구조물의 경우 일반적으로 성립)의 x 축 방향, 식 (3), (4)는 y 축 방향의 운동 방정식과 전달 함수를 나타낸 것이며 이를 전체 시스템에 대한 블록 다이어그램으로 나타낸 것이 그림 2와 같다. 그림에서 구동 모드는 구동 정전력에 대한 질량체의 x 축 방향 속도로의 전달 함수 그래프로, 검출 모드는 코리올리 힘에 대한 전압 출력으로의 전달 함수 그래프로 나타내었다. 이 때 검출 모드에는 변위를 전압출력으로 바꾸어주는 환산 계수와 대역통과필터가 포함되어 전체로는 4차 전달 함수 형태가 된다. 대역통과 필터는 구동 주파수 외의 잡음 성분을 억제하고 신호처리시 사용되는 고주파의 캐리어 신호를

제거하기 위해 포함되었다. 제어기 설계시에는 위의 블록 다이어그램에서 구동 모드를 제외한 검출 모드만을 플랜트로 설정하여 고려하게 되는데 이렇게 할 경우 플랜트의 입력은 각속도가 아니라 코리올리 힘이 된다. 이렇게 하여 계산된 실제 플랜트의 전달 함수는 (4)식의 자이로스코프 동력학과 환산계수, 대역통과 필터를 포함하여 (5)식과 같아진다. 표 1에는 위의 식에 적용된 자이로스코프의 주요한 실제 설계 변수값을 나타내었다[14].

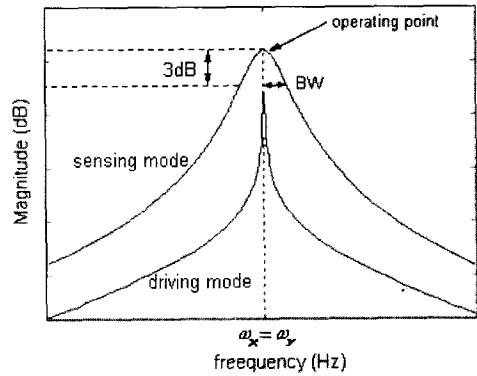
표 1. 자이로스코프 설계 변수값

변수	설계값	변수	설계값	단위
Q_x	500	Q_y	150	
k_x	4.57	k_y	4.73	N/m
ω_x	3.08	ω_y	3.62	kHz
M_x	12.2×10^{-9}	M_y	9.14×10^{-9}	kg

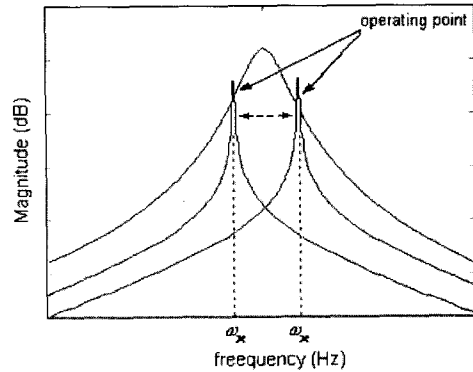
2.2 개루프 주파수 응답 특성

그림 3은 개루프 동작시 두 모드의 주파수 특성을 비교해서 나타낸 그림이다. 일반적으로 두 모드의 공진 주파수는 거의 일치되도록 하여 동작을 시키는데 이 때 센서의 대역폭은 (a)에서 보는 바와 같이 검출모드의 피크가 되는 지점에서 3 dB가 되는 주파수 폭의 반에 해당되는 크기이다. 이 때 반이 되는 이유는 동작점 부근의 신호가 구동신호에 변조된 신호로서 구동 주파수를 기준으로 양쪽으로 대칭되는 신호가 나타나게 되고 이를 복조하여 낮은 주파수 대역으로 옮겨간 최종 출력신호는 반쪽에 해당되는 신호가 복원되기 때문이다.

마이크로 자이로스코프는 높은 Q값을 갖는 공진점에서 동작하게 되므로 그림에서와 같이 개루프로 동작시킬 경우 앞서 얘기한 대역폭은 상당히 제한된다. 만약 개루프상에서 대역폭을 크게 하기 위해 구조물의 댐핑을 키워 Q값을 낮게 설계할 경우에는 감도가 떨어져 센서의 성능이 저하되게 된다. 따라서 감도를 희생하지 않고 대역폭을 키우기 위해서는 피드백을 이용한 제어기의 구성이 필요하다. 또한 실제 자이로스코프 구조물의 제작시에는 두 모드의 공진 주파수가 그림 (b)와 같이 이격이 생기게 되는데 이 때에는 동작 지점에 따라서 감도와 오프셋 등의 출력특성이 상당히 틀려지게 된다. 이를 방지하기 위해서도 검출모드의 대역폭을 키워 동작점 부근 피크에서의 평평한 영역을 되도록 크게 하여 구동 주파수의 변화에 민감하지 않도록 한다.



(a) $\omega_x = \omega_y$



(b) $\omega_x \neq \omega_y$

그림 3. 개루프 동작시의 두 모드

제어를 할 경우 제어기의 출력을 제어전극을 통해 피드백함으로써 검출축으로 움직이는 질량체의 변위를 항상 0에 가깝도록 유지하게 된다. 이때 구조물의 변위를 0으로 유지시키기 위해 가해지는 힘은 입력 각속도로 발생한 코리올리 효과에 의해서 구조물에 가해지는 힘과 크기가 같으며 부호는 반대가 된다. 따라서, 제어시 사용한 제어기 출력으로부터 외부에서 가해진 입력 각속도를 측정할 수 있다. 페루프 시스템의 대역폭은 자이로 구조물과 제어기의 역학이 결정을 하며, 따라서 제어기를 개선함으로써 페루프 시스템의 대역폭을 개선할 수 있다. 특히 감도를 키우기 위해서는 x축 구동부와 y축 감지부의 공진 주파수가 근접하도록 해야 하는데, 개루프에서는 이 두 모드가 근접하면 서로 간섭을 일으켜 안정성이 떨어진다. 그러나 페루프 제어기를 사용할 경우 y축 감지부는 제어기의 전기적 댐핑효과로 인하여 거의 움직이지 않으므로, 구동부와 감지부의 공진으로 인한 불안정성이 개선된다.

III. 제어기 설계

3.1 페루프 제어회로

제어기 설계를 위한 페루프 회로의 블록 선도는 그림 4와 같다. 플랜트는 스프링-질량-댐퍼 시스템으로 구성되는 마이크로 자이로스코프의 2차의 운동 역학과 변위 신호를 전압으로 바꾸어주는 환산계수, 그리고 변위 출력을 필터링하는 2차의 대역필터로 구성되는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 검출모드를 나타내며 최종적인 플랜트의 차수는 4차가 된다. 2차의 대역통과필터가 추가되는 이유는 동작점인 공진 주파수 외의 잡음 성분을 제거하기 위함이다. 또한 본 연구에서는 변위 신호의 검출을 위해 고주파의 캐리어 신호를 사용하게 되는데 이때 구동 주파수 성분을 캐리어 신호로부터 분리해내기 위해서도 복조에 따른 대역통과필터가 필요하다.

본 논문에서는 널리 쓰이는 고전 제어 기법인 PID 제어를 이용하여 마이크로 자이로스코프를 위한 피드백 루프를 구성하였다. 실제 제어기 설계에 있어서는 적분기를 제외한 PD 제어기의 형태로 설계가 되는데 이는 자이로스코프의 동작점이 구동 및 검출 모드의 공진 주파수 영역인 수 kHz 대의 높은 주파수에서 동작되기 때문이다. 즉, 일반적인 플랜트에서의 정상상태와는 달리 자이로스코프의 경우에는 일정한 각속도 입력에 대해 플랜트의 실제 입력은 구동 주파수에 변조된 일정한 사인파의 입력이 된다. 따라서 일반적인 제어기설계에 있어서 정상상태 오차를 줄이기 위한 적분기는 더 이상 필요가 없게 된다. 이를 수식적으로 나타내보면, 그림 4의 페루프 회로에서의 코리올리 입력에서 플랜트 출력으로의 전달 함수식은 다음과 같으므로

$$G_{cf}(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)K(s)} \quad (6)$$

제어기의 식을 $K(s) = K_p + K_f/s + K_Ds$ 라 하고 플랜트 내의 대역통과 필터식에서 중심주파수와 Q값을 다음과 같이 $\omega_f \approx \omega_y$, $Q_f \approx Q_y$ 에 대해 나타내면(실제 회로 설계에서 이렇게 설정한다),

$$\begin{aligned} BPF(s) &= \frac{\omega_f/Q_f s}{s^2 + \omega_f/Q_f s + \omega_f^2} \\ &\approx \frac{\omega_y/Q_y s}{s^2 + \omega_y/Q_y s + \omega_y^2} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (5), (6)을 이용하여 페루프의 플랜트 출력은

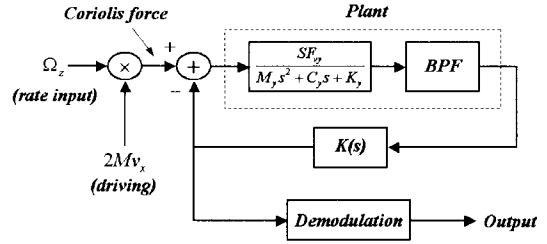


그림 4. 페루프 회로의 블록 선도

다음과 같이 얻어진다.

$$G_{cf}(s) = \frac{\frac{(SF_{vy}/M)(\omega_y/Q_y s)}{(s^2 + \omega_y/Q_y s + \omega_y^2)^2}}{1 + \frac{(SF_{vy}/M)(\omega_y/Q_y s)}{(s^2 + \omega_y/Q_y s + \omega_y^2)^2} (K_p + \frac{K_f}{s} + K_D s)} \quad (8)$$

여기서 우리가 원하는 것은 공진주파수에서의 출력이 레귤레이션되어 0으로 수렴하는 것이므로 위 식에서 $s \leftarrow j\omega_y$ 를 대입하여 주파수 응답특성의 크기에 대한 식으로 정리하면

$$|G_{cf}(s)|_{s=j\omega_y} = \frac{\frac{SF_{vy}}{M} \omega_y}{\left| \frac{SF_{vy}}{M} (K_f - \omega_y^2 K_D) - \frac{\omega_y^3}{Q_y} + j \frac{SF_{vy}}{M} \omega_y K_p \right|} \quad (9)$$

와 같다. 이 식에서 SF_{vy}/M 은 매우 큰 값을 가지며, K_f 는 $\omega_y^2 K_D$ 에 비해 매우 작은 값을 가지므로 K_f 와 ω_y^3/Q_y 를 무시하고 다시 정리하면 다음 식과 같이 근사화할 수 있다.

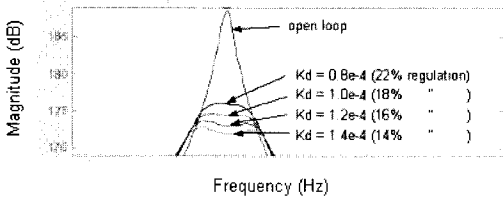
$$|G_{cf}(s)|_{s=j\omega_y} \approx \frac{1}{\sqrt{\omega_y^2 K_D^2 + K_p^2}} \quad (10)$$

결국 식 (10)으로부터 페루프 플랜트의 출력크기는 미분이득 K_D 에 의해 대부분 결정되며 K_D 값을 키울수록 플랜트 출력이 0에 가까워지는 것을 알 수 있다. 위와 동일한 방법으로 K_D 값을 키울수록 제어기의 출력이 코리올리 입력에 가까워지는 것을 보일 수 있다.

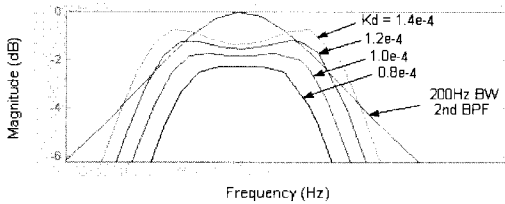
앞서 설명한바와 같이 마이크로 자이로스코프를 위한 PID 제어기 설계에 있어서 적분기의 역할은 거의 없으므로 다음 장에서는 비례제어기 및 미분제어기의 설계를 주파수 영역 상에서 도 시하여 적절한 이득값을 선택하는 과정을 설명하였다.

3.2 미분 이득값 설정

그림 5는 미분 이득 K_f 의 변화에 따라 페루프 시스템의 주파수 응답 특성의 변화를 동작지점인



(a) 플랜트 출력의 보드 선도



(b) 제어기 출력의 보드 선도

그림 5. 미분 이득 K_d 의 변화에 따른 동작점 부근에서의 페루프 보드 선도

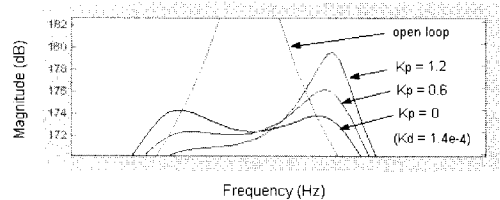
공진점 부근에서 확대한 그림이다. (a)는 플랜트의 출력력을, (b)는 제어기의 출력을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 제어 이득이 증가함에 따라 플랜트의 출력에 해당하는 변위는 작아지며 제어기 출력은 증가하여 0 dB 지점에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 이는 제어기 출력이 변위를 레귤레이팅 시키며 입력을 추종하는 것을 나타낸다. 또한 제어기 출력에서 미분 이득의 증가에 따라 대역폭이 증가하는 것을 볼 수 있는데 비교를 위해 200 Hz의 대역폭을 갖는 대역통과필터의 그림을 추가로 나타내었다. 그림에서 미분 이득이 증가함에 따라 대역폭이 증가하고 제어기 출력이 입력에 가까워지는 반면, 봉우리 모양의 그래프에서 양 모서리 부분이 중심 부분에 비하여 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 최종출력에서 오버슈트로 나타난다. 따라서 K_d 값을 정하는데 있어 적절한 대역폭의 범위 내에서 너무 큰 오버슈트가 발생하지 않도록 설정하여야 한다. 만약 충분한 대역폭을 확보하지 않은 상태에서 오버슈트가 생길 경우 K_d 값을 크게 정한 다음 뒷단에 필터를 추가하여 오버슈트 부분을 감쇄시킬 수는 있다. 이 외에 K_d 를 어느 수준 이상으로 증가시킬 경우에는 시스템의 잡음이 크게 증가할 수 있으므로 잡음을 최소화하며 대역폭을 확보할 수 있는 값을 정하여야 한다. 여기에서는 그림으로부터 비례이득값을 대략 $K_p=1.2\sim 1.4\times 10^{-4}$ 정도로 설정하였다. 만약 실제회로 구현에 있어서 이렇게 설정한 값이 적절한 동작을 위한 값과 차이

가 있는 경우 회로소자 하나의 파라미터값의 변화만으로 간단히 조정이 가능하다. 3차 이상의 고차의 제어기의 경우에는 PD 제어기와 비교했을 때 이점에서 상당히 불리하다.

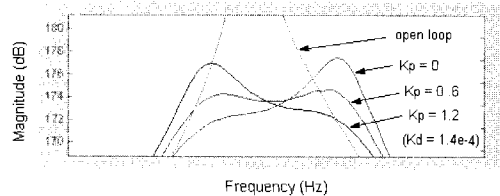
3.3 비례 이득값 설정

비례 이득 K_p 의 경우에도 시스템의 출력에 영향을 미치지만 미분 이득과 비교해서는 비교적 부수적인 역할을 한다. 그림 6은 K_p 값의 변화에 따른 플랜트 출력 그래프의 변화를 나타낸 것으로 동작지점 부근을 확대한 그림이다.

앞서 언급한 바와 같이 플랜트는 자이로스코프 검출모드의 2차 운동 역학과 2차의 대역통과필터로 구성되는 4차 시스템이다. 이 경우 검출모드의 공진주파수와 2차 대역통과필터의 중심주파수는 일치되어야 한다. 이는 동작지점인 공진 주파수 외의 주파수 영역 상의 신호를 제거하는 것이 필터의 역할이며 그렇지 않을 경우 적절한 신호검출이 일어나지 않기 때문이다. 하지만 실제적으로는 이 두 주파수가 정확히 일치되는 것은 거의 불가능하다. 왜냐하면 회로상에서의 필터 구현은 저항과 커패시턴스가 포함된 능동필터로 구성되는데 이 소자의 값들이 특정한 주파수를 갖는 필터를 구성하는데 정확히 일치하지 않기 때문이다. 이러한 불일치는 출력 신호의 오버슈트와 같은 왜곡현상을 일으킬 수 있는데 비례 이득값을 조정하여 이를 방지할 수 있다.



(a) 대역통과필터의 중심 주파수가 검출모드의 공진 주파수와 일치할 경우

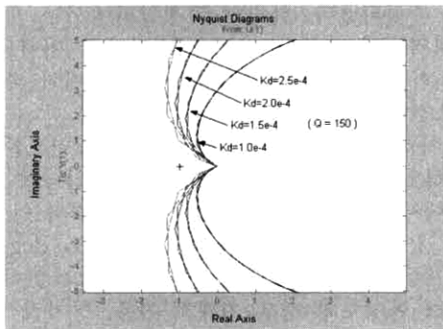


(b) 대역통과필터의 중심 주파수가 검출모드의 공진 주파수와 2% 어긋날 경우

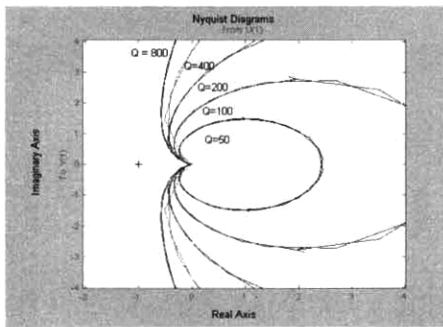
그림 6. 비례 이득 K_p 의 변화에 따른 플랜트 보드 선도

그림6(a)는 필터의 중심주파수가 검출모드의 공진 주파수와 일치하는 경우를, 그림6(b)는 중심 주파수가 공진 주파수보다 2% 작은 경우를 나타낸 것으로 개루프 보드 선도의 그래프가 왼쪽으로 약간 치우친 것을 볼 수 있다. (a)에서는 K_p 가 0일 경우에 보드 선도의 왜곡 현상이 없는 반면 (b)에서는 K_p 가 0.6인 경우에 그래프가 한 쪽으로 치우치는 왜곡이 없는 모양을 보인다. 보드 선도에서의 이러한 그래프의 왜곡이 최종 출력에서의 오버슈트와 같은 신호의 왜곡 현상을 일으키므로 K_p 를 조정하여 이를 바로 잡아야 한다. 만약 필터의 중심 주파수가 공진 주파수보다 큰 경우, 즉 앞서 설명한 경우와 반대인 경우에는 K_p 의 값을 음으로 하면 동일한 결과를 얻을 수 있다.

그림 7은 이렇게 구한 제어기에 대한 Nyquist plot을 나타낸 것이다. (a)는 미분이득 변화에 따른 안정도 그래프를, (b)는 시스템의 가장 중요한 파라미터 중의 하나인 Q값의 변화에 따른 그래프를 나타내었다. 그림으로부터 설계된 제어기가 충분한 여유를 가지고 시스템을 안정화시키는 것을 확인할 수 있다.



(a) 미분이득 변화에 따른 그래프



(b) 시스템 Q값의 변화에 따른 그래프

그림 7. Nyquist 선도

IV. 제어회로 제작

설계된 제어기의 성능을 검증하기 위해 회로를 설계, 제작하였다. 제어회로에 앞서 구동회로, 용량검출회로 및 복조회로를 포함한 신호처리회로를 설계하였으며 이를 PCB로 제작하였다. 실험에 사용된 자이로스코프는 서울대에서 설계하고 Bosch foundry에서 제작된 마이크로 자이로스코프를 사용하였다. 구동 신호는 구동모드의 공진 주파수인 3.1 kHz의 정현파 신호를 사용하였으며, 효과적인 용량검출과 신호처리를 위해 62.5 kHz의 carrier를 사용하였다. 설계된 PD 제어기는 몇 개의 저항과 커패시터, 그리고 연산 증폭기를 사용하여 구현하였다. 제어기로부터 나오는 전압출력이 입력 코리올리 힘을 상쇄시키는 토크를 발생하게 되는데 이 때의 힘은 정전기력으로서 입력으로만 작용하게 된다. 이를 위해 제어기에서 나오는 출력을 두 개의 반전, 비반전 신호로 만든 다음, 적절한 DC 오프셋 전압을 더하여 자이로스코프 양단에 배치된 제어전극을 통해 인가하였다. 이렇게 하면 제어전압과 이로 인해 질량체에 가해지는 등가 정전력이 선형적인 관계가 된다. 제작된 신호처리회로와 제어회로를 그림 8에 나타내었다.

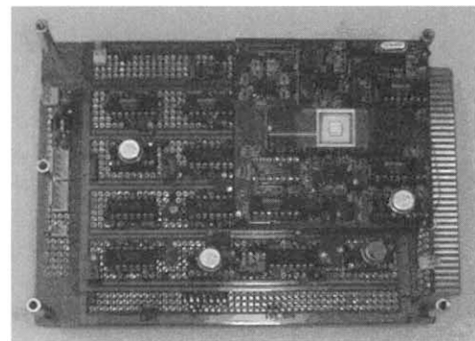


그림 8. 신호처리 및 제어회로

V. 실험 결과

설계된 제어기의 성능을 검증하기 위해 동적 및 정적 실험을 수행하였다. 일반적인 각속도 입력은 레이트 테이블을 이용하여 인가하였으며 고 주파 및 매우 큰 각속도 입력이 필요한 경우에는 전기적인 등가 신호를 이용하였다.

먼저 설계된 제어기의 동작을 확인하기 위해 출력의 레귤레이션을 실험하였다. 그림 9는 제어

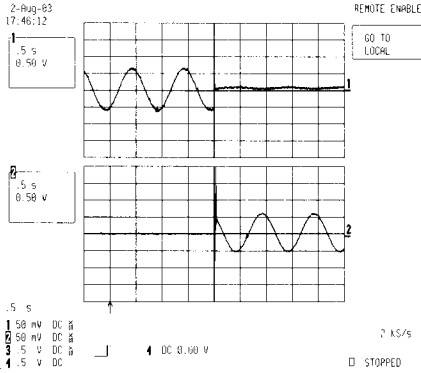


그림 9. 제어기 동작 전후의 플랜트 및 제어기 출력

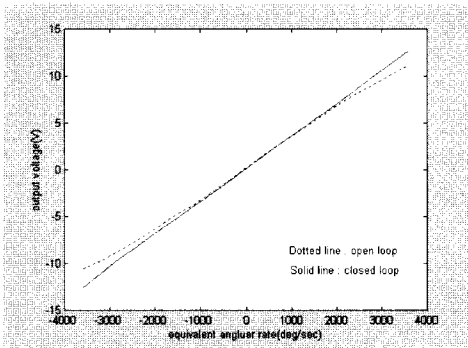


그림 10. 개루프 및 폐루프 회로의 선형성

기 동작 전후의 플랜트 출력과 제어기 출력을 나타낸 그림이다. 인가된 각속도는 50 deg/sec, 1 Hz의 정현파 입력이며 그래프의 시간축 중간 지점에서 제어기를 동작하였다. 그림에서 보는 바와 같이 제어기 동작 후 플랜트 출력이 약 10% 가량으로 레귤레이션 되며 제어기 출력이 입력을 추종하는 것으로 보아 제어기가 적절히 동작하는 것을 알 수 있다.

제어기가 적절히 동작하는 것을 확인한 다음에는 성능 실험을 수행하였으며 개루프의 경우와 결과를 비교하였다. 입력력의 선형성에 대한 실험 결과는 그림 10에 나타나 있으며 그 결과는 개루프의 경우 2.07%, 폐루프의 경우는 0.504%의 비선형 오차가 나타나 폐루프 제어회로가 출력의 선형성을 크게 개선시키는 것을 알 수 있다. 선형성 실험에서는 입력 범위를 ± 3600 deg/sec로 비교적 크게 하였는데 이는 실험에서 사용한 자이로스코프 칩의 진공도가 낮은 관계로 개루프 상에서도 그 범위 자체가 매우 작기 때문이다. 추후에 진공 패키징 기술이 발전하여 더 높은 진

공도의 칩이 개발될 경우 그 범위는 현재보다 클 것으로 보이며 이 때의 선형성 개선의 효과를 보여주기 위해 고진공도의 칩의 경우와 등가적인 질량체의 변위를 가져오는 큰 입력에 대한 실험을 하였다. 이 외의 실험에서는 400 deg/sec의 입력 범위를 기준으로 하였다.

다음으로는 대역폭 실험을 수행하였다. 대역폭 측정을 위해서는 100 deg/sec의 정현파 신호를 등가 전압으로 인가하였으며 주파수를 점차 증가 시키가며 출력을 관찰하였다. 스펙트럼 분석기를 이용하여 입력 신호를 주파수 스위핑하여 측정하였을 경우에도 그 결과는 동일하였다. 그 결과는 그림 11에 나타나있다. 실험 결과 개루프의 35 Hz에 비해 폐루프의 경우 78 Hz로 두 배 이상 대역폭이 증가하는 것을 볼 수 있다. 미분이득값을 키우면 대역폭은 더 증가될 수 있으나 이 경우에는 오버슈트가 증가하게 되고 시스템의 잡음이 증가하여 불안정해질 수도 있으므로 이를 고려하여 적절히 조정하였다. 본 실험에서 사용한 자이로스코프의 경우 앞서 말한바와 같이 진공도가 낮아 개루프 상에서의 대역폭도 비교적 큰 편으로 제어에 의한 대역폭 개선효과가 상대적으로 낮게 측정되었다. 하지만 고진공하에서는 개루프의 대역폭이 대개 수 Hz 이내이므로 이때의 제어에 의한 대역폭 개선 효과는 같은 제어 파라미터 조건하에서 더 클 것으로 예상된다.

마지막으로 바이어스 안정도에 대한 실험을 수행하였다. 60분 동안 외부 각속도 입력이 없는 상태에서 출력을 관찰하였으며 그 결과는 그림 12와 같다. 실험 결과 개루프는 0.066 deg/sec, 폐루프는 0.044 deg/sec의 값을 보이고 있다. 바이어스 안정도의 경우 기계적 잡음, 전기적 잡음, 온도 등의 영향이 복합적으로 나타나는 결과이다. 특히 기계적 잡음과 전기적 잡음이 간섭을 일으키면서 정류오차(rectification error)를 일으

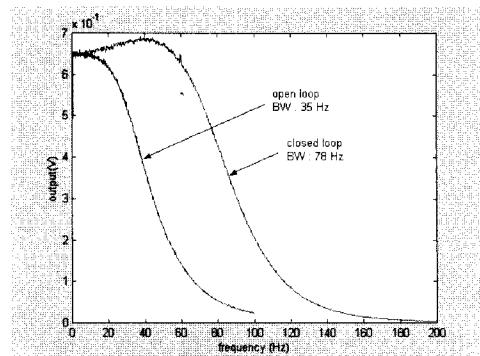


그림 11. 개루프 및 폐루프 회로의 대역폭

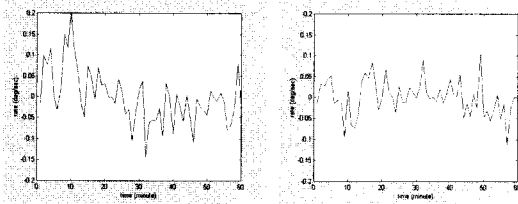


그림 12. 개루프 및 폐루프 회로의 바이어스 안정도

키는데, 제어로 인하여 질량체의 변위가 제한되고, 따라서 이 정류오차에 의한 불확실성이 줄어들기 때문이라 판단된다. 즉, 개루프에서는 감지축 변위가 입력에 신호에 따라 변하고, 또 구동축과 감지축의 공진 주파수가 가까이 있으므로 인한 커플링 등으로 인하여 폐루프에 비하여 바이어스 안정도가 저하되는 것으로 판단된다. 감도를 개선하려면 진공도를 더 키워야하는데, 이 경우 개루프에서의 질량체의 기계적 변위는 더 증가하며, 따라서 이러한 정류오차의 효과는 더 커질 것으로 예상되며, 따라서, 제어기에 의한 성능 개선 효과도 더 클 것으로 예상된다. 추후 높은 진공도의 자이로가 제작되면 이에 대한 추가적인 실험을 통해 그 효과를 검증할 수 있을 것이다. 성능 시험에 관한 결과는 표 2에 종합하였다.

표 2. 시험 결과 종합

	개루프	폐루프
동작영역	400 deg/s	400 deg/s
감도	30 mV/deg/s	30 mV/deg/s
대역폭	35 Hz	78 Hz
바이어스 안정도	0.066 deg/s	0.044 deg/s
비선형 오차 (4000deg/s범위)	2.07 %	0.504 %

V. 결 론

본 논문에서는 마이크로 자이로스코프를 위한 제어기를 설계하였으며 회로적인 구현과 실험을 통해 그 성능 개선을 검증하였다. 폐루프 제어는 마이크로 자이로스코프의 높은 Q 특성으로 인한 성능의 제약을 극복하여 선형성을 개선시키고 대역폭을 확장시킨다.

본 연구에서 적용된 PD 제어기는 쉬운 회로적 구현에 비해 성능 개선의 효과는 비교적 크다는 장점이 있다. 시스템의 안정성을 보장하고 오버슈트와 같은 신호의 왜곡이 없이 개선된 출력을

보장하기 위해서는 미분 이득과 비례 이득의 값이 플랜트의 특성에 맞게 적절히 조정되어야 한다.

실험 결과 선형성은 2.07 %에서 0.504 %로, 대역폭은 35 Hz에서 78 Hz로, 바이어스 안정도는 0.066 deg/sec에서 0.044 deg/sec로 각각 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험에서 대상으로 한 마이크로 자이로스코프의 경우 낮은 진공도로 인해 Q값이 비교적 작았으나 추후 진공도 개선으로 높은 Q의 샘플을 대상으로 할 경우에는 폐루프 제어로 인한 성능 개선의 효과가 더욱 클 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2003년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임.

참고문헌

- 1) 박찬국, 진용, 원종석, “관성항법시스템을 위한 센서오차의 최적추정 기법”, 한국항공우주학회지, Vol. 26, No. 5, 1998, pp. 116-125.
- 2) 이대훈, 박대은, 윤의식, 권세진, “KAIST의 MAV용 MEMS 엔진 개발 현황”, 한국항공우주학회지, Vol. 30, No. 6, 2002, pp. 01-06.
- 3) 백창일, 추원식, 안성훈, “기계식 마이크로 가공을 이용한 마이크로 로켓의 개발”, 한국항공우주학회지, Vol. 31, No. 9, 2003, pp. 32-37.
- 4) 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.
- 5) N. Yazdi, F. Ayazi and K. Najafi, "Micromachined Inertial Sensors", Proceeding of the IEEE, vol. 86, No. 8, August 1998, pp. 1640-1659.
- 6) 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.
- 7) W. Geiger, J. Merz, T. Fischer, B. Folkmer, H. Sandmaier and Walter Lang, "The silicon angular rate sensor system DAVED", Sensors and Actuators 84, 2000, pp. 280-284.
- 8) A. M. Shkel, R. Horowitz, A. A. Seshia,

S. Park, and R. T. Howe, "Dynamics and control of micromachined gyroscopes", Proceedings, American Control Conference, San Diego, Calif., June 2-4, 1999. pp. 2119-2124.

9) C. Acar, S. Eler, and A. M. Shkel, "Concept, Implementation, and Control of Wide Bandwidth MEMS Gyroscopes", Proceeding of The American Control Conference, June 25-27, 2001, pp. 1229-1234.

10) Sungsu Park, Horowitz, R. "Adaptive control for z-axis MEMS gyroscopes", Proceedings of the 2001 American Control Conference Arlington, VA, USA, June 25-27, vol. 2, pp.1223-1228.

11) R. P. Leland, "Lyapunov Based Adaptive Control of a MEMS Gyroscope", Proceedings of the 2002 American Control Conference,

Anchorage, AK, pp. 3765-3770.

12) X. Jiang, J. I. Seeger, M. Kraft, and B. E. Boser, "A Monolithic Surface Micromachined Z-Axis Gyroscope with Digital Output", in Symp. on VLSI Circuits Dig. of Tech. Papers, June 2000, pp. 16-19.

13) M. Kranz, S. Burgett, T. Hudson, M. Buncick, P. Ruffin, P. Ashley, and J. McKee, "A wide dynamic range silicon-on-insulator MEMS gyroscope with digital force feedback", The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS '03, Boston, June 8-12, 2003, pp. 159-162.

14) 임형택, "MEMS 기술을 이용한 비연성된 평면 진동형 방식의 관성 항법 장치용 마이크로 자이로스코프의 설계, 제작 및 평가에 관한 연구", 2001. 8, 서울대학교 공학박사 학위논문.