

전자기력 방식의 진동 자이로스코프 구동을 위한 디지털 제어에 관한 연구

A Study on Digital Control of Electromagnetic Force based Vibrating Gyroscope

김 모 세, 이 학 성*, 홍 성 경**
(Kim Mose, Hak-sung Lee, S.K. Hong)

* 세종대학교 전자공학과(E-mail : shadow_dancer@hanmail.net, hslee@sejong.ac.kr)

** 세종대학교 항공우주공학과(E-mail : skhong@sejong.ac.kr)

Abstract : In this study, we propose a method of digital control to drive the vibrating gyroscope using electromagnetic-force. The gyroscope requires accurate vibration control and signal processing for high performance. Conventional PLL based analog controller is not only difficult to manufacture but also weak to outer environment such as temperatures, air pressures and etc. But digital controller using DSP can consistently maintain the cylinder vibration and perform digital signal processing regardless of disturbance. DSP's PWM function was utilized to control the vibration, and rotation-detecting algorithm was developed. Finally, the controller was verified by simulation and experiment using rotation-rate table.

Keywords : vibrating gyroscope, electromagnetic-force, resonant frequency, DSP, PWM

I. 서 론

실린더형 진동 자이로스코프(그림 1)는 코리올리 힘과 전자기력을 이용한 위치/자세 보정용 관성 센서로써 관성 질량이 커 입력 각속도(rotation rate)에 대해 큰 감도를 가지며 광학식 자이로스코프에 비해 가격이 싸고 제작이 용이하다는 장점이 있다. 반면 기계적 진동을 이용하기 때문에 정밀진동제어 기술이 필요할 뿐만 아니라 출력 신호에 잡음이 크고 온도와 같은 외부 환경에 민감한 특성을 보이므로 이를 적절히 통제할 수 있는 정밀한 제어가 요구된다[1][2].

한편 기존의 PLL(phase-locked loop)를 기반으로 하는 아날로그 방식의 제어기는 구성이 복잡하고 외부 환경에 민감하여 소형화와 제품 생산 등에 어려움이 있었다. 이에 비해 PWM(pulse-width modulation)을 기반으로 하는 디지털 제어기는 대량 생산이 가능할 뿐만 아니라 작은 크기로 제작이 가능하고 외부 환경으로부터 높은 안정성과 정확성을 보장할 수 있는 이점이 있다.

그러므로 본 논문*에서는 DSP의 PWM과 ADC를 이용한 디지털 제어 방식을 제안하고자 한다. PWM 신호는 주기가 일정하고 듀티비(duty cycle)만을 조절함으로써 자이로스코프의 진동을 쉽게 조절할 수 있다. 뿐만 아니라 ADC로 출력 값을 읽어 들여 처리하기 때문에 외부 환경에 영향을 받지 않으므로 작고 정

확한 제어가 제작이 가능하다.

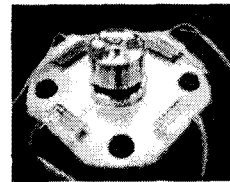


그림 1. 실린더형 진동 자이로스코프

II. 진동 자이로스코프의 동작 원리

실린더형 진동 자이로스코프는 코리올리 힘과 전자기 유도를 통해 외부 회전에 대한 정보를 검출한다. 각속도 Ω 로 회전하고 있는 좌표계에서 질량 m 인 물체가 \vec{r} 방향으로 속도 \vec{v} 로 움직이게 되면 속도 \vec{v} 에 수직하는 방향으로 코리올리 힘이 작용하여 물체의 이동 경로가 휘어지게 된다. 이때 작용하는 코리올리 힘은

$$F_{cor} = -2m \times \vec{v} \quad (1)$$

가 되며 각속도 Ω 와 속도 \vec{v} 의 외적으로 표현된다[3].

실린더형 진동 자이로스코프에서는 코리올리 힘을 유도하기 위해 속도 벡터 \vec{v} 의 발생원으로써 실린더의 진동을 이용한다. 그림 2에서처럼 정원 상태의 실린더가 x 방향으로 힘을 받게 되면 실린더에 타원 형태의

* 본 연구는 산업자원부 항공우주기술 개발사업에서 지원받았음.

변형이 발생하게 되고 다시 이 힘을 제거하게 되면 탄성에 의해 원래의 상태로 복원된다. 이때 이 과정의 주기를 적절히 조절하게 되면 x 방향으로 속도가 \bar{v} 인 실린더의 진동을 발생시킬 수 있다.

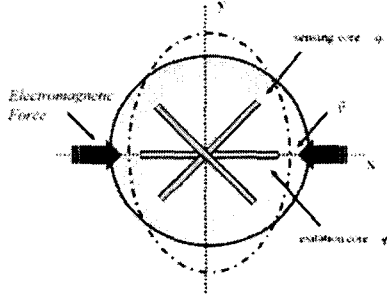


그림 2. 속도가 \bar{v} 인 실린더 진동 변위

여기서 실린더의 진동은 자이로스코프 내부의 가진 코어에 의해 제어된다. 코일이 감겨진 가진 코어에 전류가 흐르게 되면 자기장이 발생하게 되어 실린더가 자화되고 이와 동시에 힘을 받게 된다. 이 힘은 입력으로 작용하게 되며 실린더의 변형을 유발한다. 이때 발생하는 전자기력 F_{mag} 는

$$F_{mag} \propto N \frac{i^2}{r} \quad (2)$$

로 코일의 권선수 N 과 전류 i^2 에 비례하고 거리 r 에 반비례한다. 그러나 실제로 전자기력에 의해 발생하는 실린더의 진동은 상당히 작기 때문에 유도되는 코리올리 힘 또한 작을 수밖에 없다. 그러므로 센싱 감도를 증가시키기 위해서는 공진 현상을 이용한다. 실린더가 공진하게 되면 단위 시간 동안의 변위가 최대가 되며 이는 속도 \bar{v} 와 동일하므로 센싱 감도를 극대화시킬 수 있다. 한편 실린더가 자기장에 의해 자화되면 역으로 전류를 유도할 수 있다. 자화된 실린더는 자기장을 발생시키고 실린더의 진동은 센싱 코어에 작용하는 자기장을 변화시킨다. 이는 솔레노이드 속에 자석을 넣었다 뺐다하는 것과 같은 원리이며 자기장의 변화에 비례하여 센싱 코어로부터 전류를 검출할 수 있다. 이때 유도되는 기전력 E 는 Faraday의 법칙으로부터

$$E \propto \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (3)$$

가 된다.

III. 진동 자이로스코프의 모델링

실린더형 진동 자이로스코프는 이상적으로 2차 미분 방정식 형태로 모델링할 수 있으며 식 (4)는 이에 대한 관계식이다[4].

$$\begin{aligned} \ddot{q}_e + 2\zeta_e w \dot{q}_e + w^2 q_e - 2G\Omega \dot{q}_s &= F_0 \sin(pt) \\ \ddot{q}_s + 2\zeta_s w \dot{q}_s + w^2 q_s - 2G\Omega \dot{q}_e &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 q_e 와 q_s 는 각각 가진축과 센싱축에 대한 실린더의 변위이며 p 는 전자기력 신호의 주파수, w 는 실린더의 고유 진동수, ζ_e 와 ζ_s 는 모드 q_e 와 q_s 에 대한 감쇄비(damping ratio), Ω 는 입력 각속도, G 는 실린더의 유효 질량, F_0 는 전자기력의 크기를 의미한다.

식 (4)에서 입력 회전에 대한 출력 결과는 두 번째 식으로부터 유도할 수 있으며 전달 함수를 구하게 되면

$$\frac{Q_s}{Q_e} = \frac{2G\Omega S}{S^2 + 2\zeta_s w S + w^2} \quad (5)$$

이 되고, 이에 대한 응답(response)은 다음과 같다.

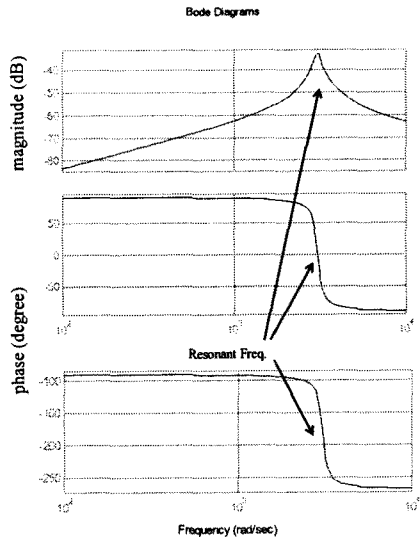


그림 3. 회전에 의한 시스템 응답

이 결과로부터 실린더형 진동 자이로스코프는 공진 주파수일 때 이득이 최고가 되며 회전 방향에 따라 출력 신호 간에 180°의 위상차가 발생한다.

IV. 디지털 제어기

본 장에서는 DSP(TMS320LF2403) 소자를 이용하여 실린더 진동에 필요한 PWM 기반의 가진 회로를 구현하였으며 출력 신호 처리를 위한 센싱 회로를 RC 소자와 디지털 필터를 혼용하여 설계하였다[5].

4.1 PWM(Pulse-Width Modulation) 가진 회로

디지털 제어기에서는 PWM 신호의 듀티비를 통해 진동에 필요한 전자기력 신호를 조절할 수 있으며 PWM 주기를 공진에 필요한 주파수로 설정할 수 있다. 그러나 실제 PWM 신호로는 실린더 진동에 필요한 충분한 에너지를 공급할 수 없으므로 DSP와 자이로스코프 사이에 전력 버퍼를 배치할 필요가 있다. 전력 버퍼는 OP-AMP를 이용한 전압 증폭기를 통해 구현되며 그림 4에 이를 도시하였다.

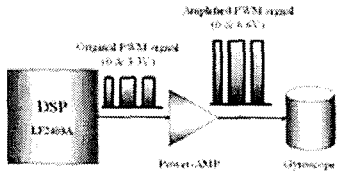


그림 4. PWM 가진 회로에 대한 블록도

4.2 자이로스코프 센싱 회로

입력 회전과 실린더의 진동으로부터 발생하는 코리올리 힘은 전기적인 신호로 변환되어 제어기에 의해 처리된다. 자화된 실린더의 진동은 센싱 코어의 코일에 기전력을 유도하고 이 전압 신호를 제어기의 ADC를 통해 읽어 들임으로써 회전량과 회전 방향을 계산할 수 있다. 자이로스코프의 출력 신호는 회전량에 비해한 크기로 갖는 정현파 신호로써 대각선 방향의 센싱 코어에서 측정한다. 그림 5는 정지 상태에서의 출력이며, 여기에 외부로부터 회전이 인가되게 되면 그림 6에서처럼 진폭이 증가하게 된다.

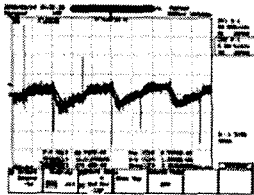


그림 5. 정지 상태에서의 자이로스코프 출력

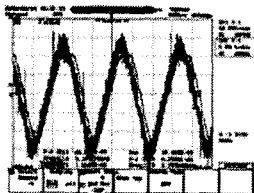


그림 6. 회전 발생시의 자이로스코프 출력

그림 7은 자이로스코프의 출력을 처리하기 위해 잡음제거 필터와 증폭기, 진폭 검출기의 센싱 회로를 설계한 그림이다. 그림 8은 오실로스코프를 통해 각 회로의 값을 측정한 결과로써 증폭기에서는 100배 증폭

과 함께 잡음이 제거된 것을 볼 수 있으며 진폭 검출기를 통해 진폭이 DC 값으로 검출되었다. 여기서 DC 값이 실제 파형의 진폭과 다른 것을 볼 수 있는데, 이는 검출기 내부에 포함된 다이오드에 의한 영향으로 DSP 측에서 대수적으로 처리할 수 있다.

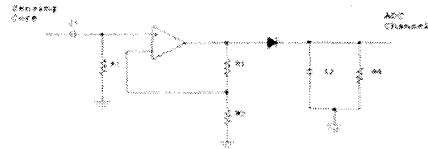


그림 7. 자이로스코프 센싱 회로

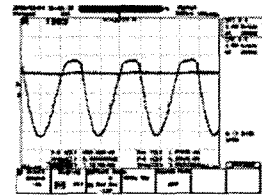


그림 8. 센싱 회로 출력

최종적으로 디지털 제어기에서는 진폭 검출기의 DC 출력으로부터 회전량을 계산하며, 이때 계산의 정확도를 높이기 위해 DC에 포함된 리플 성분을 제거할 수 있도록 식 (6)의 디지털 평균 필터를 포함하였다[6].

$$y(k) = \frac{1}{n} \sum_{l=0}^{n-1} x(k-l) \quad (6)$$

한편 인가되는 회전의 방향은 출력 신호의 위상차를 통해 구분한다. 앞의 자이로스코프의 운동 방정식으로부터 회전 방향에 따라 q_s 가 q_e 에 대해 0° 또는 180° 의 위상차가 발생하는 것을 확인하였는데 실제 제어기가 인식하는 신호는 q_s 가 유도하는 전압 신호이므로 이를 전기적으로 해석할 필요가 있다. 센싱 코어에 작용하는 자기력선속 Φ 은 q_s 에 비례하므로 Faraday의 법칙을 q_s 에 대해 재정의할 수 있고, 여기서 q_s 를 정현파 $\sin(\omega t)$ 라고 가정하면

$$E = K \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (7)$$

이 된다. 그러므로 제어기가 인식하는 신호는 가진 신호에 대해 $\pm 90^\circ$ 위상차를 갖게 되고 이를 가진 신호의 위상과 비교함으로써 방향을 검출할 수 있다.

V. 실험

본 장에서는 디지털 제어기의 성능을 검증하기 위해 회전 인가 장치인 레이트 테이블(rotation-rate table)을

통해 실험하였다. 그림 9는 본 실험에서 사용한 제어기와 레이트 테이블이다.

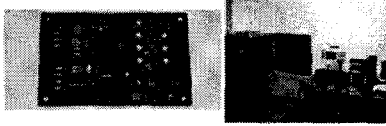


그림 9. 디지털 제어기와 레이트 테이블

5.1 실린더 공진 실험

그림 10은 입력 각속도가 없을 때 PWM 신호의 듀티비를 10%에서 90%까지 10% 단위씩 증가시켜가며 자이로스코프의 출력을 관찰한 결과이다. 듀티비가 50%일 때 최대 출력을 얻을 수 있었으며 그 이외에는 선형적으로 감소되는 특성을 보인다. 이는 인력이 작용되는 시간과 복원되는 시간과의 관계에 의한 것으로 이 두 시간이 동일할 때 변위가 최대가 된다.

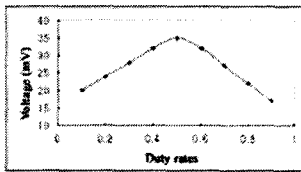


그림 10. PWM 듀티비에 따른 출력 변화

5.2 회전량 검출

회전량 검출 실험은 자이로스코프와 제어기를 포함한 전체 시스템을 레이트 테이블을 통해 회전 속도를 변화시켜가며 수행하였다. 0~100 deg/sec까지는 10deg/sec 단위로 증가시켜가며 측정하였으며 300 deg/sec까지는 50 deg/sec 단위로 측정하였다. 실험 결과는 그림 11에서와 같이 약 200 deg/sec 까지 선형적으로 증가됨을 볼 수 있으며 그 이후로는 지수적으로 감소한다.

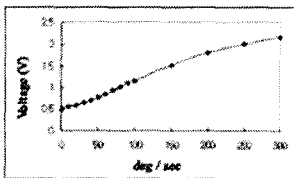


그림 11. 회전량 검출 데이터

5.3 회전 방향 검출

앞서 설명한 바와 같이 자이로스코프의 출력은 외부 회전에 의해 위상 천이가 발생하며 이를 통해 회전 방향을 알 수 있다. 디지털 제어기에서는 가진 신호로써 PWM의 펄스파를 이용하고 이는 정현파 가진 신호와

동일한 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 입력 신호의 시작점에서 위상 선형인 경우 양(+)의 출력 값을 가지고, 반대로 위상 지연이면 음(-)의 출력 값을 가지기 때문에 이를 감지하여 방향을 판단할 수 있다. 그림 12는 회전 방향에 따른 출력 신호의 위상 변화를 보인 것으로 (a) CW 시에는 가진 신호에 대해 90도 위상 지연(phase-lag)이, (b) CCW 일 때는 90도 위상 선형(phase-lead)이 발생되는 것을 확인할 수 있다.

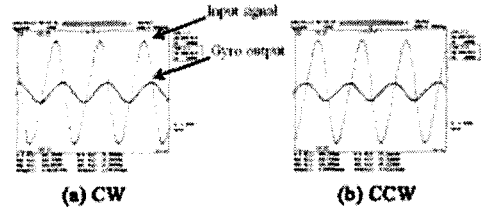


그림 12. 회전 방향 검출

VI. 결 론

본 논문에서는 실린더형 진동 자이로스코프 구동에 필요한 제어기를 디지털 방식으로 구현하였다. 먼저 진동 자이로스코프의 운동 방정식으로부터 전기적 특성을 유도하였고 이를 바탕으로 제어기를 설계하였다. 진동 제어를 위한 가진 회로에서는 PWM의 듀티비와 주기를 조절하여 실린더 진동에 필요한 전자기력 신호를 인가하였으며 출력 신호 처리를 위한 센싱 회로를 RC 회로와 디지털 필터를 혼용하여 구성하였다. 그리고 실험을 통해 제어기의 성능을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김모세, 이학성, 홍성경, "DSP를 이용한 실린더형 진동 자이로스코프 제어기 설계", 대한전자공학회 하계학술대회, pp.2485-2488, 2003.
- [2] 이정영, 홍성경, "전자기력을 이용한 실린더형 진동 자이로스코프연구", 제어·자동화·시스템 학회지 게재 예정.
- [3] Philip W. Loveday, "Analysis And Compensation of Imperfection Effects In Piezoelectric Vibratory Gyroscopes", 박사학위논문.
- [4] 권혁성, 이학성, "전자기력을 이용한 실린더형 진동 자이로스코프의 모델링", 대한전자공학회 하계학술대회, pp.2597-2600, 2003.
- [5] TI, "TMS320LF/LC240xA DSP Controllers References Guide", 2002.
- [6] Sanjit K. Mitra, "Digital Signal Processing 2nd Ed.", McGraw-Hill, 2001.