

서어보형 가속도계의 PWM 제어

김정한,* 오준호,* 제우성*

Control of Electromagnetic Accelerometer with Digital PWM Technique

Jung-Han Kim,* Jun-Ho Oh,* Woo-Seong Che*

ABSTRACT

Among the various type of accelerometer, the servo rebalancing type accelerometer can be suitable for Inertial Navigation System, because of its high sensitivity and good response in low frequency. In this paper, we proposed a new technology to control inductive type accelerometer utilizing digital PWM method. The new developed digital PWM control has special design scheme for transmitting measurement value to outer device in its servo loop. So it has no quantized error of transforming outputs of sensors to digital domain. The quantized error may make serious problem in INS system, because outputs of sensor are integrated once or twice by digital computer and it happens every sensor reading times. Therefore, in order to get the accurate information such as displacement, it is necessary to measure accurately the input current. In addition, Digital Signal Processing needs digital data transmission, digital PWM method is adaptive for this purpose. We realized a practical circuit for digital PWM control, analyzed the stability of the circuit, and designed the controller etc. In this study, we solved many practical problem for this application, and got out good results.

Key Words : Accelerometer (가속도계), PWM Control (펄스폭제어), INS System(관성항법장치)

1. 서론 및 연구동기

가속도계는 외부에서 시스템에 가하는 가속도를 측정하는 센서로서 많은 응용 분야에서 사용되고 있다. 많은 종류의 가속도계중, 서어보 타입의 가속도계는 피드백 루프

를 이용하여 진자 (Pendulum) 를 영점위치로 제어시켜 주므로 디플렉션 타입(Deflection Type) 과는 달리 선형성이 좋고, 매우 낮은 주파수와 미세한 가속도의 측정 또한 가능하다. 또한 가속도계의 민감도(Sensitivity) 를 떨어뜨리지 않고도 가속도계의 측정 범위를 늘리는 것이

* 한국과학기술원 기계공학과

가능하다. 많은 종류의 가속도계중 본 연구에서 제어대상으로 하는 가속도계는 구동력은 전자기력을 이용하고, 진자의 위치 센싱은 유도 전류를 이용하는 전자기형(Electro Magnetic type) 가속도계이며, 현재 관성항법 장치에 상용화되어 있는 대부분의 가속도계는 이러한 구조를 지니고 있다. 이러한 가속도계는 기-전집적시스템(Micro Electro Mechanical System)기술과 결합하여 더욱 발전하고 있는데, 이러한 MEMS 기술은 기계-전자요소의 동시공정이 가능한 박막미세가공법이 그 근간을 이루고 있다. 부연하여 설명하자면, 이러한 MEMS 기술의 발전은 기계전자시스템의 소형화, 경량화를 이루었고, 또한 이러한 기술은 저전력소모, 고신뢰도등을 요구하는 많은 시스템에 응용될 수 있다. 1979년 Lynn Michelle Roylance 와 James B Angell 은 MEMS 기술을 이용하여 2 mm (3 mm 크기의 실리콘 가속도계를 만들어 내었다⁽³⁾). 이 가속도계는 Glass - Silicon - Glass 구조로 이루어져 있으며, 가속도를 받으면 내부의 진자가 휘어지고 이를 스트레인 게이지로 검출하는 형태의 디플렉션형(Deflection Type)의 가속도계이었다. 이후에는, 제어루프를 이용한 서어보타입(Servo Type), 진자와 케이스의 간극의 커패시탄스(Capacitance)를 이용한 진자의 위치 센싱등 여러가지 형태의 가속도계가 개발되었다. 이어서 90년 Suzuki 와 그 동료들은 커패시탄스형(Capacitor type)의 진자위치 센싱을 이용하고, 구동력으로는 정전기력(Electro-static Force)을 이용한 PWM 방식의 가속도계를 개발하였다⁽⁴⁾. 제어 방식에 펄스폭제어(Pulse Width Modulation Control)을 도입함으로써, 신호처리(Signal Processing)의 용이성 뿐만 아니라, 복잡한 선형화 회로나 보상회로의 첨가없이 매우 정확한 선형적인 출력을 얻어내었다. 본 연구에서 실험에 사용된 가속도계는 구동력은 전자기력을 이용하고, 진자의 위치 센싱은 코일의 유도기전력을 이용한 전자기 형태(Electro Magnetic type)의 실리콘(Silicon) 가속도계이다. 이러한 전자기 형태의 가속도계는 커패시탄스(Capacitance)형의 가속도계에 비해 구조가 약간 복잡하나, 미세한 가속도와 넓은 범위의 가속도, 그리고 넓은 폭의 밴드폭을 가지고 있어서, 현재 관성항법장치(INS)는 물론 많은 분야에서 이용되고 있다.

본 연구에서는 전자기형태(Electro magnetic Type)의 가속도계에 디지털 펄스폭제어(Digital PWM Control)를 도입하여 실제로 구현하였으며, 좋은 결과를 얻어내었다. 디지털 펄스폭제어(Digital PWM)라 함은 펄

스비(Duty)를 양자화(Quantization)하여 출력값의 수치화를 피한 것으로써, 그 원리와 이유는 2.3 절에서 자세히 설명하였다. 또한 실험오차와 센서의 비선형성에 대한 분석을 행하여 그 결과를 이용하여 회로를 구현하여 재구성하여 원하는 정밀도를 얻어낼 수 있었다. 이후 내용은 가속도계의 디지털방식의 펄스폭제어(Digital PWM Control) 회로에 대한 내용에 초점을 맞추어 기술하였다.

2. 기본원리

2.1 서어보형 가속도계의 작동원리

서어보형 가속도계는 외부의 가속도로 인하여 내부의 진자가 이탈된량을 감지하여 이를 보상하고, 보상하는데 필요한 힘을 가속도의 값으로 환산하는 구조로 되어있다. 진자를 항상 영점에 위치하게 제어함으로써 진자의 센싱부와 구동부(Actuator)역할을 하는 코일부의 비선형성을 제거하고 과도응답(Transient Response) 구간에서 발생하는 에러를 줄일 수 있다. 다음의 Fig. 2.1.1 은 일반적인 서어보형 가속도계의 작동원리를 보여준다.

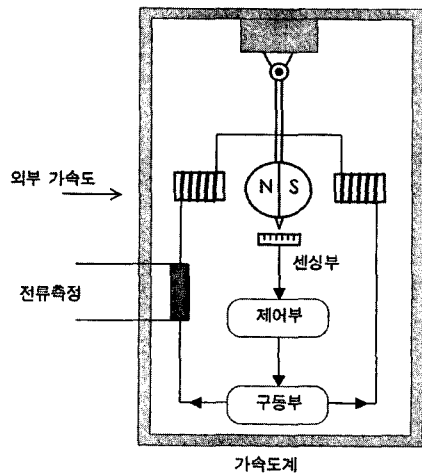


Fig. 2.1.1 Schematic Diagram of servo-accelerometer

진자를 항상 영점에 위치하는데 필요한 힘은 바로 외부에서 가해진 가속도와 비례하고 이는 코일에 가해진 전류에 비례하므로, 이에 필요한 제어입력을 측정하면 바로 가속도의 양을 측정할 수 있다.

2.2 서어보형 가속도계의 펄스폭(PWM) 제어

코일이 내장되어 있는 모터나 액츄에이터(Actuator)

의 경우, 펄스폭 제어(PWM Control) 를 사용하면, 신호의 전달에 유리하고 열손실이 적은등, 많은 장점이 있기 때문에 많은 경우에 펄스폭제어가 이용된다. 이러한 펄스폭제어는 코일이 내장된 서어보형 가속도계의 경우에도 동일한 장점을 갖는다. Fig. 2.2.1 은 가속도계의 내부와 펄스폭제어의 신호를 간략히 도시한 것이다.

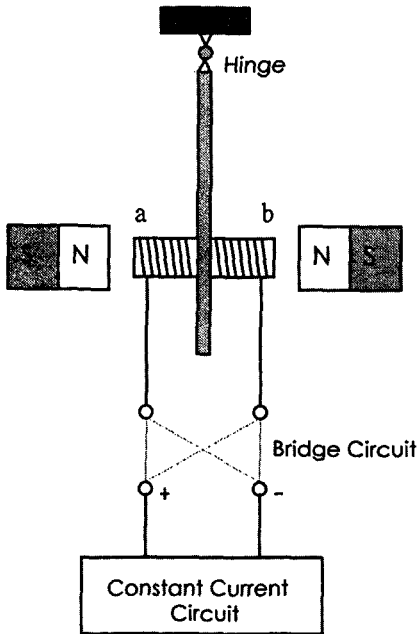


Fig. 2.2.1 Nulling of the Moving Pendulum by PWM Control

Fig. 2.2.1 은 가속도계의 내부의 구동부의 구조를 간략하게 도시한 것이다. 그림의 밑부분에 도시한 정전류회로에서 발생한 전류는, 브릿지(Bridge) 회로에서 일점쇄선으로 도시한 선과 점선으로 도시한 선을 교대로 흐르게 된다. 이는 진자에 부착되어있는 토커코일(Torquer Coil)에 PWM 펄스열을 생성하고, 이러한 펄스열은 토커코일에 전자기류(Magnetic Flow)를 유발시켜 가속도계 몸체에 고정되어 있는 자석과 반발 혹은 친화하여 구동력을 일으키게 된다.

Fig. 2.2.2 는 토커코일에 흐르는 전류의 형태를 도시한 것이다. 토커코일에 흐르는 전류의 방향을 브릿지회로에서 교대로 바꾸어주게 됨에 따라, Fig. 2.2.1의 a, b 부분의 마그네틱 극성이 교대로 바뀌게 된다. 이때 브릿지회로의 스위칭 시간을 조정해줌으로써 진자에 시계방향, 혹은 반시계 방향의 모멘트를 발생시킬 수 있다. Fig. 2.2.2 의 펄스비(Duty) 가 50 %인 경우를 보면 A 부분

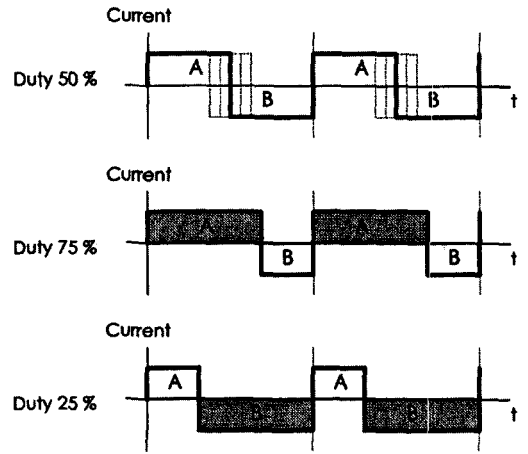


Fig.2.2.2 Various Duties in PWM Control

과 B 부분의 면적이 같으므로 진자에 가해지는 평균 모멘트가 없으나, 펄스비(Duty) 가 75 % 나 25 % 인 경우에는 각각 + 방향, - 방향으로 면적의 차이에 비례하는 양으로 모멘트가 가해지는 것을 알 수 있다. 단, 펄스폭제어시 운반주파수(Carrier Frequency) 는 진자의 고유진동수보다 충분히 높아야 한다.

2.3 서어보형 가속도계의 디지털 펄스폭 제어 (Digital PWM Control)

서어보형 가속도계는 주로 관성항법장치등에서 변위 측정용으로 주로 사용된다. 따라서 서어보형 가속도계로부터 나온 신호는 필연적으로 적분 혹은 기타의 신호처리를 거쳐 신호가 처리되므로, 영점위치로 제어 되고 있는 가속도계로부터 얼마만한 정확도로 값을 읽어올 수 있는냐 하는 것이 위치 검출 시스템의 정확도가 된다. 만약 아날로그 방식의 제어인 경우는 반드시 AD 변환기를 통해 디지털값으로 변환하는 과정을 거친다. 따라서 고 정밀도의 AD 변환기를 사용한다 할지라도 미소한 작은 오차들이 발생하게 된다. 이때 발생하는 오차는 매우 미소한 양이긴 하지만, 문제는 시간의 흐름에 따라 오차들이 누적된다는 점에 있다. 만약에 아날로그방식의 가속도계를 1 kHz 로 샘플링 해서 값을 읽어들었다면, 1 초에 1000 번이나 오차가 누적되게 되고 몇시간 혹은 몇일이 흐른뒤에는 이를 무시하지 못할만큼 큰 양이 된다. 이와 반면에 디지털 펄스폭제어(Digital PWM Control) 방식에서는 구동부에 가해주는 입력전류의 양을 양자화(Quantized) 해서 가해주고 시간에 따른 빈도수를 측정함으로써 사용된 전류의 양을 정확하게 측정할 수 있다.

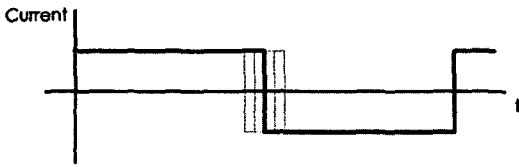


Fig.2.3.1 Digital PWM Signal

디지털 펄스폭제어(Digital PWM Control) 방식에서는 PWM의 펄스비(Duty)가 고주파 주파수로 양자화(Quantization)되어 있어서, 이 고주파의 정수배에 비례한 만큼으로만 출력을 내보낼 수 있다. 만약, 가속도계의 진자에 가해줘야 하는 전류의 양이 1.25 mA 이고 디지털 PWM 제어는 정수배, 즉 1 mA 와 2mA로 밖에는 출력을 발생하지 못한다고 할 때, 제어기는 1과 2를 번갈아 발생시키는데, 그 발생 비율은 다음과 같은 식을 만족한다.

$$1mA \times x + 2mA \times y = 1.25mA \times f \times sec \quad (2.3.1)$$

$$x + y = f \times sec$$

여기서 f 는 펄스폭제어의 운반주파수(Carrier Frequency)이고 sec 는 데이터를 받은 시간을 지칭한다. 예를들면, 1 kHz로 데이터를 수집하여 10초가 흘러서 10000번의 신호가 발생되었을때는 1 mA가 7500번, 2mA가 2500번 발생되게 된다. 따라서 발생하는 빈도만 측정하면 정확한 측정값을 얻을 수 있다. 이러한 방식은 신호의 적분치를 측정하고자 할 때 매우 정밀한 수치를 측정할 수 있다. 양자화해서 가해준 그 신호의 시간에 따른 누적치는 현재까지 내가 가해준 전류의 정확한 값을 나타낸다. 이러한 특징은 가속도 신호를 두번 적분한 변위 신호의 정확도를 크게 향상시키고, 저주파수에서 탁월한 성능을 요구하는 변위측정용 관성항법장치 등에서 매우 유용하다. 또한 양자화 하는 양을 적절히 조정함으로써, 위에서 설명한 성질을 간단한 방법으로 조절할 수도 있다. 따라서 디지털 PWM 방식은 PWM 펄스의 펄스폭(Duty)에 대한 정보만 전송하면, AD 변환기를 사용하지 않고 매우 고정밀도의 측정치를 얻을 수 있다. 또한 디지털 PWM 제어는 앞에서 설명한 바와 같이, 들어간 전류의 양을 정확하게 알 수 있다는 장점과 함께 신호처리가 간편하다는 점, 또한 PWM 펄스비와 가속도와의 선형성⁽¹⁾ 등 여러가지 장점이 있다. Fig. 2.3.2는 가속도계의 디지털 PWM 제어의 블럭선도이다.

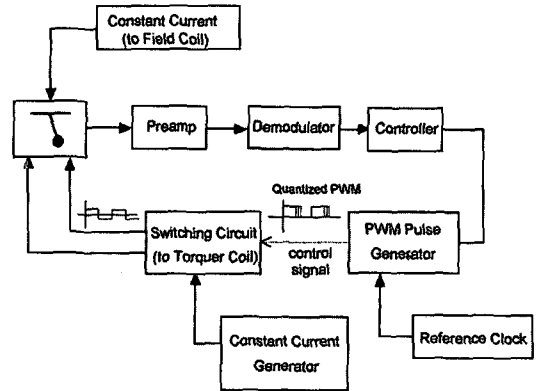
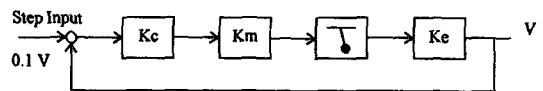


Fig. 2.3.2 Block Diagram of Digital PWM Control

2.4 진자(Pendulum) 조립체의 모델링

여기서의 진자 조립체라 함은 제어 회로를 제외한 가속도센서 자체를 말한다. 진자 조립체는 6개의 코일과 실리콘 진자, 실리콘와셔등 많은 부품으로 이루어져 있고 복잡한 형상을 띠고 있어서 분석적으로 모델을 구해내기가 쉽지않다. 그러나 전체 시스템의 시뮬레이션과 제어기설계를 위해서는 진자 조립체의 모델링이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 특별한 제어회로를 구성하여 가속도계에 스텝입력을 가하여 분석함으로써 진자 조립체를 모델링하였다. 서어보형 가속도계의 진자가 움직이는 범위는 대략 0.1도(degree) 정도 밖에 안되기 때문에, 개루프(Open Loop)로써 시스템의 응답을 관찰하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 가속도계의 모델링을 위해 Fig 2.4.1에 나타낸 바와 같은 특별한 페루프를 구성하였다.



Ke: position to voltage gain :230 V/rad
 Kc: controller gain(V to I):15
 Km: current to torque gain :4.2E-3Nm/A

Fig.2.4.1 Block Diagram of Accelerometer System for Modeling

여기에 사용된 Kc, Km, Ke 값은 대상 시스템이 개루프(Open Loop)의 특성에 보다 가깝게 하기 위하여, 실제의 게인(Gain) 보다 매우 낮게 조정하였다. Fig. 2.4.2는 전체 시스템의 페루프(Closed Loop) 시스템의 스텝입력 응답이다.

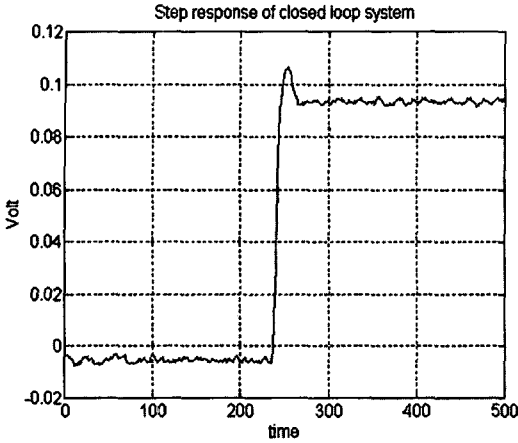


Fig. 2.4.2 Step Response of Closed Loop System

가속도계는 2차식으로 근사화 할 수 있으므로, 실험에서 구한 라이징 타임(Rising time)과 오우버 슈트(Overshoot) 등 2차시스템의 파라미터를 이용하면, 전체 전달함수를 구할 수 있고, 실험장치의 페루프에서 나머지 파트의 계인을 알 수 있으므로 이를 이용하면 전자조립체의 전달함수를 구해낼 수 있다. 실험을 통해 구한 전자조립체의 모델링은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \bullet P(s) &= \frac{934.2}{s^2 + 129.6s + 864} \\
 \bullet \omega_n &\approx 30 \\
 \bullet \zeta &\approx 2.16
 \end{aligned}
 \tag{2.4.1}$$

3. Controller 의 설계 및 Simulation

가속도계의 제어회로의 설계는 일반적인 설계방법을 적용시킬 수 있으나, 이산제어(Digital Control)에서와는 달리 제어회로 자체가 전자회로로 구현되므로, 설계한 제어기의 특성을 전자회로로 근사화 하는 작업이 필요하다. 이에 따른 여러가지 근사방법(Approximation Method)이 존재하며, 매우 다양한 형태로 구현될 수 있다. 이해를 돕기위해 Fig. 3.1 은 그중 간단하게 설계된 비례 적분제어기를 도시하였다.

Fig. 3.1 은 PWM방식의 제어에 사용된 제어기의 회로도이다. Fig. 3.1 에 도시된 회로의 주파수 응답특성은 Fig. 3.2 에 도시되어 있다. 관성항형 장치등에서 관심을 가지는 주파수 영역은 주로 0 - 300 Hz 정도의 저주파이

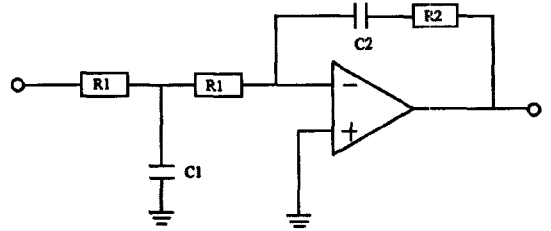


Fig. 3.1 Controller of Digital PWM Accelerometer

다. 이보다 고주파의 영역은 항공기나 미사일의 질량에 비추어보아 노이즈나 기타 신호이므로 필터링하여 걸러주어야 한다. Fig. 3.2 를 살펴보면 저주파에서의 Bode Plot 기울기가 -20 dB로, 그 영역에서 Integration Action 이 있음을 알 수 있다. 만약 가속도계의 서어보제어 회로에 비례제어기만 사용한다면, 정상상태오차가 존재하므로 원하는 정밀도의 가속도신호를 얻어낼 수 없다. 따라서 고 정밀도의 가속도계의 제어기는 저주파의 관심 영역에서의 Integrate Action 이 반드시 포함되어 있어야 한다. Fig 3.1의 제어기의 설계는 전체 시스템의 주파수 응답의 특성을 토대로 설계하였다. 이 제어기의 전달함수는 아래의 식 3.1 과 같고 Fig. 3.2 는 위 전달함수의 보데 선도(Bode Plot)이다.

$$H(s) = \frac{R_2 C_2 s + 1}{R_1^2 C_2 C_1 s^2 + 2R_1 C_2 s}
 \tag{3.1}$$

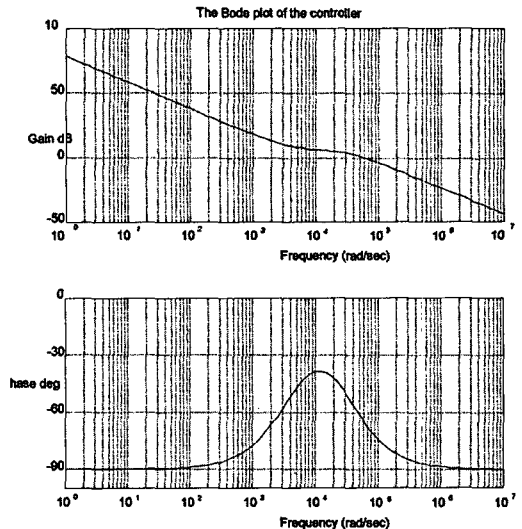


Fig. 3.2 Bode Plot of the PWM Controller

진자의 위치정보신호는 원래 값이 매우 미약하고, 또 넓은 범위의 가속도를 측정하려면 필연적으로 높은 게인(Gain)값이 필요하다. 따라서 진자의 위치신호 자체를 크게하는 것이 시스템의 안정성면에서 매우 유리한데, 이는 프리앰프와 디모듈레이터(Demodulator)의 설계의 지표가 된다. Fig. 3.3 은 실제적인 PWM 제어의 블럭선도이다.

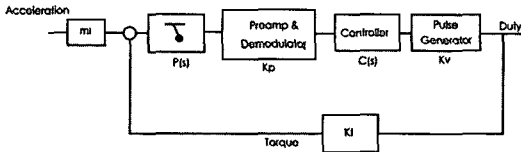


Fig.3.3 Block diagram of digital PWM Control

$$p(s) = \frac{934.2}{s^2 + 129.6s + 864}$$

$$Kp = 114 \text{ V/rad} \quad (3.2)$$

$$C(s) = \frac{6.624 \times 10^{-6} s^2 + 2.676s + 10^5}{5.76 \times 10^{-3} s^2 + 0.27612s}$$

$$Kv = 2.026 \text{ duty(\%)/V}$$

Kp 는 PWM 신호크기(Signal Amplitude), 프리앰프, 디모듈레이터(Demodulator)등으로 결정되는 진자 위치 - 전압 (Position to Voltage)계수이다. C(s)는 앞 절에서 설계한 제어기이고, Kv 는 제어기에서 나온 전압의 펄스비(Duty) 변환 계수이다. Kt 는 펄스비 당 낼 수 있는 토크(Torque) 의 양 변환 계수이다. 위에서 설계한 제어기를 이용하여 전체 시스템을 제어했을때의 성능 특성을 관찰하기위하여 모의실험(Simulation)을 행하였다. 다음의 Fig. 3.4 는 실험에 사용된 실제값들인 식 3.2의 계수들을 이용하여 위의 블럭선도 전체의 전달 함수를 구하여 모의실험한 결과이다. 주파수 응답곡선을 보면 DC 상태에서 부터 100 Hz 까지 평탄한 특성을 유지하였으며, 이때 가속도의 측정 범위는 ±4g 정도이었다.

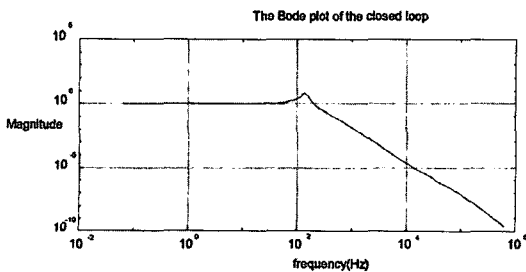


Fig.3.4 Simulation of digital PWM controller

4. 실험 및 결과

4.1 측정결과

구성된 가속도계 펄스폭제어(PWM Control) 시스템의 성능 실험을 위하여 Fig. 4.1.1 과 같이 각도 분할 테이블에 고정시키고 정적 테스트를 수행하였다. 사용된 분할 테이블의 분해능은 0.45 (이고 실험은 4.5 (씩 회전하면서 측정하여 중력가속도에 대한 응답을 측정하였다.

양자화 펄스폭제어(Digital PWM) 방식에서는 펄스의 펄스비(Duty) 가 양자화(Quantization) 되어 있으므로 이를 2Mhz 의 고주파와 AND 연산을 취하여 펄스의 갯수를 세면, 간단하게 펄스비(Duty) 를 0 에서 4096 사이의 수치로 표현하는 것이 가능하다. Fig. 4.1.2 는 서어보형 가속도계의 양자화 펄스폭제어(Digital PWM

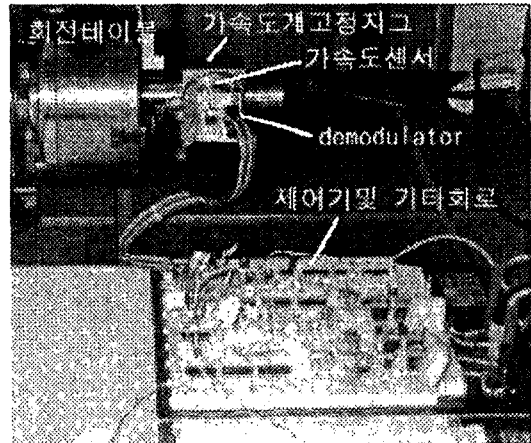


Fig. 4.1.1 Picture of Rotary table with Digital PWM Accelerometer and Control Circuit

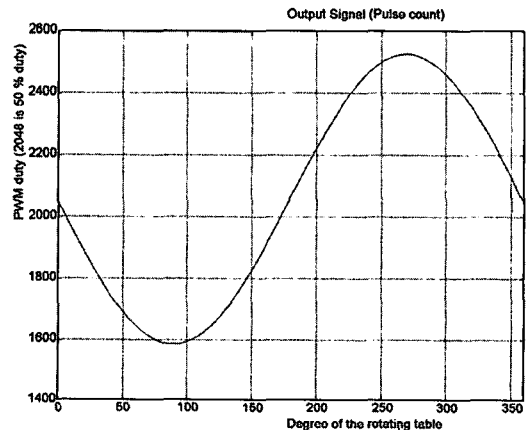


Fig. 4.1.2 Response of the Accelerometer for Gravity

Control)에 의한 정적 성능 결과이다.

Fig. 4.1.2 는 가속도계를 회전 테이블(Rotating Table)에 장치하여 회전시키면서, 80 개의 측정점에서 각각 10000개의 값을 취하여 평균을 취한 값을 도시한 것이다.

4.2 Sensor Calibration

센서의 출력값을 정량화하고 비선형성을 측정하려면 위 측정 데이터의 페이즈 이동(Phase Shift)과 크기(Amplitude), 오프셋(Offset)을 근사화 시켜야한다. 그런데 중력가속도에 대한 응답 측정시 중력방향과 정확히 수직을 이루는 0g 상태를 생성하려면 고가의 장비와, 별도의 기기를 필요로 한다. 본실험에서는 센서의 이상적인 상태에서의 출력신호를 기준으로 실험을 행하고 나중에 최소자승법(Least Square)를 이용하여 센서의 페이즈 이동(Phase Shift)과 스윙(Swing)의 폭, 오프셋등을 구해내어 센서의 출력특성을 정량화 함으로써 실험 절차를 간소화 하였다. Fig. 4.2.1 은 최소자승법을 이용하여 구한 값을 이용하여 x 좌표축을 g 축으로 변환하여 선형화시킨 것이다.

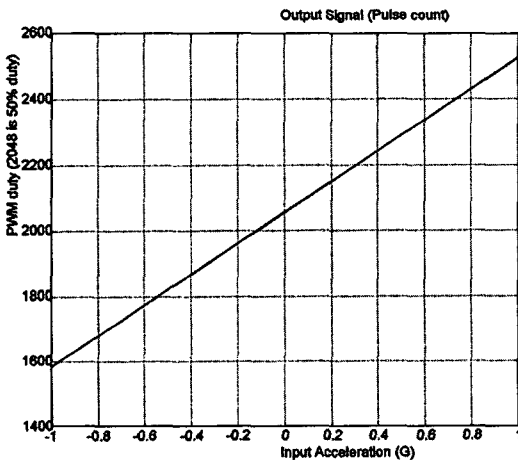


Fig.4.2.1 Response of the Accelerometer for Gravity(2)

정적 실험에 의해 구해낸 센서의 출력특성은 다음과 같다.

- 0 g 에서의 출력값(Null Position) : 2056.13948(pulse)
- +1g 상태의 출력값 : 2557.67593(pulse)
- 1 g 상태에 해당하는 pulse의 갯수 : 501.53645(pulse)
- 측정 가속도 range : ± 4 g
- 센서의 비선형성 : 0.015 %

5. 결 론

본연구에서는 서어보형 가속도계에 양자화 펄스폭제어(Digital PWM Control) 방식을 도입하였고, 가속도계의 펜들럼조립체를 모델링하고, 그를 근거로 비례-적분 제어기(PI Controller)와 전체 회로를 설계, 구현하였다. 또한 센서의 교정(Calibration)을 최소자승법(Least Square)을 이용하여 센서의 출력 특성을 정량화 함으로써 실험 절차를 간소화하고, 구현된 센서의 출력특성으로부터 실험 오차를 분석하였다. 본 실험에서 구현한 센서의 정적 특성은 다음과 같다.

- 민감도(Sensitivity) : 10^{-4} g
- 센서의 비선형성 : 0.015 %
- 양자화 주파수(Pulse Quantized resolution) : 2Mhz
- 펄스폭제어 운반 주파수(PWM Carrier Frequency) : 500 Hz
- 측정 가속도 범위 : ± 4 g

서어보형 가속도계는 위치 검출용 센서로 주로 사용되므로 긴 시간동안 적분한 값이 그동안 가한 정확한 입력의 값의 적분값과 일치하지 않으면 안된다. 따라서 이러한 양자화 펄스폭제어(Digital PWM Control) 방식의 제어는 위치검출용 센서에 적합한 방식이라고 할 수 있으며, 시간의 경과에 따른 드리프트를 최소화할 수 있다. 또한 펄스폭제어 방식의 가속도계는 기존의 아날로그 방식에 비하여 센서의 선형성이 뛰어나고, 이후의 신호 처리 과정이 매우 간단하기 때문에 아날로그 형과 같은 민감도(Sensitivity)를 갖는다고 할 지라도 고 정밀 A-D 변환에 드는 비용을 고려하면 훨씬 유리하다. 가속도계는 시스템 자체가 원래 민감하고 파트들이 서로 밀접하게 커플(Coupled)되어 있어서, 펄스폭제어 방식의 제어 시스템의 설계가 쉽지 않으나, 정확한 분석에 의한 설계와 회로의 구현기술이 뒷받침되어 준다면 좋은 성능을 낼 수 있다.

참 고 문 헌

1. Suzuki, S.Tuchitani, K.Sato, S.Ueno, Y.Yokata, M.Sato, M.Esashi, "Semiconductor Capacitance-type Accelerometer with PWM Electrostatic Servo Technique", *Sensors and Actuators*, 21-23 pp.316-319, 1990.

2. F.Rudolf, A.Jornod, J.Bergqvist and H.Leuthold, "Precision Accelerometers with (g resolution", *Sensors and Actuators*, pp.297- 232, 1990.
3. Lynn Michelle Roylance, James B Angell, "A batch-Fabricated Silicon Accelerometer", *IEEE Trans. Electron devices*, Vol ED-26 pp.1911 - 1917, 1979.
4. Ebrahim Abbaspour-Sani, Ruey-Shing Huang, Chee Yee Kwok, "A linear electromagnetic accelerometer". *Sensors and Actuators*, A 44, pp.103-109, 1994.
5. H.Leuthold and F.Rudolf, "An Asic for High-resolution Capacitive Microaccelerometers", *Sensors and Actuators*, pp. 278 - 281, 1990.
6. S.Marco, J.Samitier, O.Ruiz, A.Herms and J.R.Morante, "Analysis of electrostatic-damped piezoresistive silicon accelerometers", *Sensors and Actuators*, 37-38, pp.317-322, 1993.
7. R.P van Kampen, M,J Vellekoop, P.M Sarro and R.F Wolffenbutte, "Application of electrostatic feedback to critical damping of an integrated silicon capacitive accelerometer", *Sensors and Actuators*, 43, pp.100-106, 1994.
8. Henry V.Allen, Stephen C.Terry and Diederik W De Bruin, "Accelerometer Systems with Self-testable Features", *Sensors and Actuators*, 20, pp.153-161, 1989.
9. Thomas Tschan and Nico de Rooij, "Damping of piezoresistive silicon accelerometers", *Sensors and Actuators*, A 32, pp.375-379, 1992.
10. Mark Van Paemel, "Interface Circuit for Capacitive Accelerometer", *Sensors and Actuators*,17, pp.629-637, 1989.
11. F.Rudolf, "A Micromechanical Capacitive Accelerometer with A two-point inertial-mass suspension", *Sensors and Actuators*, 4 pp.191-198, 1983.
12. S.Nihtianov and T.Minkova, "Magnetic-field-sensitive device with frequency output", *Sensors and Actuators*, 30, pp.101-104 , 1992.
13. Ernest O.Doebelin, *Measurement System*, McGRAW-Hill, 1990.