

가동코일 및 DC 모터로 작동되는 유연 빔의 끝점 제어

End point Control of a Flexible Beam Actuated by Moving Coil and DC Motor

유 화 준* 남 윤 수**
Yoo, Hwa-jun Nam, Yoon-su

Abstract

In a modern control field, a control engineer who has theoretical backgrounds with some practical knowledge is demanded. That is to say, an engineer who can understand and operate the various parts such as modeling, simulation, system analysis, signal processing, statistics, and hardware is required. In order to prove the theoretical backgrounds and operate various hardwares, a lot of experimental devices for students are designed in universities. Since the conventional experimental devices are manufactured abroad and the prices of the devices are too high, it is difficult to have. If a low cost experimental device can be developed, it will be very useful for a control engineering education. In this paper, an experimental rig which has two control inputs and three sensor outputs to control the end point of a flexible beam is designed and manufactured. This rig can be used for a control field education

키워드: 유연 빔, 시스템 규명, 끝점 제어, 가동코일 모터

Key words: Flexible beam, System Identification, End point Control, Moving Coil Motor

1. 서론

현대의 제어분야 산업체에서는 이론적인 전문가 뿐만이 아니라 실제 상황에 대처할 수 있는 엔지니어를 필요로 한다. 즉, 모델링/ 시뮬레이션/ 시스템식별/ 신호처리/ 통제/ 하드웨어 등을 폭넓게 이해하고 다룰 수 있는 엔지니어를 필요로 하고 있다. 이러한 이유로 대학에서는 이론적 지식 습득 뿐만이 아니라 하드웨어를 직접 다룰 수 있도록 실험장비를 구축하는데 힘을 기울이고 있다. 기존 실험장비는 외국에서 생산된 실험기들이 주를 이루고 있으며 이 장비들은 고가이기 때문에 장비를 구축하는데 어려움을 겪고 있다. 이에 저가의

제어용 실험기기가 개발된다면 많은 도움이 되리라 예상된다. 또한, 산업분야의 70 - 90% 정도는 고전제어 이론에 근거한 제품설계가 진행되고 있다. 이 같은 추세로 인하여 대학에서는 고전제어 이론을 교육하고 있으며, 현대제어이론의 응용범위가 넓어지고 있으므로 현대제어 이론 또한 교육하며 그 응용범위가 점차로 확대될 것으로 기대된다 [1-3]. 이러한 추세에 부합하는 실험장치를 설계/ 제작하고 그 동적 운동특성을 파악하여 제어하는 것은 학사과정 및 대학원 교육에 많은 도움이 되리라 예상된다. 본 논문에서는 학사/ 대학원 과정에서 제어공학분야의 실험교육 장비로 사용될 수 있는 실험장치 개발에 관한 내용을 다룬다. 이 장치는

* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과 석사과정

** 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 부교수

유연 구조물의 위치제어에 설계문제를 이론 및 실험적으로 경험할 수 있는 실험장치이다. 낮은 댐핑 특성을 갖는 유연 빔 (flexible beam)이 칸티레버 방식으로 강체 판 (rigid plate) 위에 고정된다. 그리고 이 판은 DC 모터에 의하여 선형으로 이동된다. 유연 빔의 잔류진동을 보다 더 효과적으로 제어하기 위하여, 유연 빔 끝단에 보이스코일 모터가 부착된다. 또한, 다양한 센서의 사용경험을 제공하기 위하여 여러 센서장비, 즉 가속도계/ 광학 엔코더/ 스트레인 게이지/ 비전 시스템등이 부착될 수 있도록 실험장치가 설계되었다. 따라서, 이 실험장치는 두개의 입력장치, 그리고 다수의 출력신호를 갖는 MIMO (Multi Input Multi Output) 플랜트이다. 따라서, 본 논문에서 소개되는 실험장치는 학사과정에서는 집중상수 해석법 (lumped parameter method)에 의한 시스템 모델링과 고전제어 이론에 근거한 시스템 설계 및 평가에 사용될 수 있다. 또한, 대학원 과정에서는 시스템 식별이론의 실제적 적용과 수치 해석적인 방법에 의한 시스템 모델링, 현대 제어이론의 적용 등의 목적으로 사용될 수 있다.

2. 시스템의 구조 및 운동모델

2.1 시스템 구조

본 시스템은 유연 빔의 끝점을 제어하기 위하여 다음과 같은 구조로 제작 되어 진다. 먼저 가공하기 유용한 아크릴판 위에 엔코더 일체형인 DC 모터가 부착된 리니어 가이드를 설치하고, 리니어 가이드의 테이블 위에 유연 빔이 부착된 베이스를 설치한다. 유연 빔은 두께가 얇은 알루미늄으로 제작되었고, 끝점에 질량을 부착할 수 있도록 가공되었다. 또한, 끝점에는 보이스코일과 영구자석을 설치하여 끝점을 구동할 수 있는 보이스코일 모터를 형성한다. 끝점의 질량 위에는 끝점의 상태를 관측할 수 있는 가속도 센서를 부착하고 유연 빔의 지지부에는 스트레인 게이지를 부착하여 유연 빔 끝점의 변위를 추정할 수 있게 설계하였다. 다음의 Fig. 1은 실험장치의 모형이다. 이와 같은 실험장치는 광정보저장 기기의 구동계나 우주 구조물등의 다이내믹 특성과 유사한 성질을 갖게 된다 [4-6].

2.2 시스템 운동모델

유연 빔의 끝점은 다음과 같은 두 입력신호에 의하여 구동된다. 첫째, 유연 빔의 끝점을 직접 구동하기 위하여, 끝점에 보이스코일형 구동부를 선택하였다. 보이스코일 모터는 끝점에 힘을 가하여 끝단을 직접 구동하고, 이 구동에 의하여 발생하는

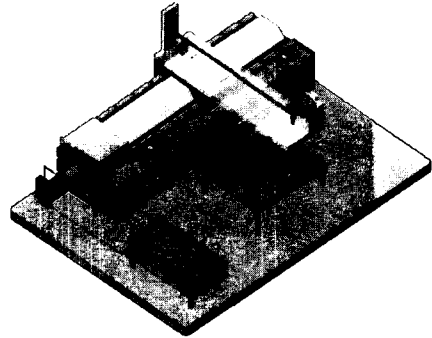


Fig. 1 시스템 모형도

움직임은 유연 빔의 지지부에 부착된 스트레인 게이지 및 끝점에 부착된 가속도계에 의하여 측정된다 [7]. 둘째, 유연 빔이 부착된 베이스를 DC 모터로 구동한다. 베이스는 리니어 가이드에 의하여 선형 운동을 한다. 이때, 베이스의 움직임은 DC 모터와 일체형으로 결합되어 있는 광 엔코더에 의하여 측정되며, 베이스의 이동으로 인하여 발생하는 유연 빔의 운동상태는 스트레인 게이지 회로와 가속도계에 의하여 측정된다. 유연 빔의 끝점 제어는 유연 빔이 유연하기 때문에 고유진동수가 낮으리라 예상되므로, 저 주파수 대역에서 가능하리라 예상된다. 설계목표는 저 주파수 대역인 5 Hz까지 제어하도록 하려 한다. 제어를 설계하기 위해서는 먼저 제어하려는 시스템이 어떤 운동 특성을 갖는지를 파악해야 한다. 다음의 Fig. 2는 보이스코일 모터 구동에 대한 스트레인 게이지 출력의 주파수 응답을 실험적으로 구한 것이다. 스트레인 게이지 출력신호는 유연 빔 끝점의 변위와 선형관계를 가지고 있으므로 끝점의 변위로 환산될 수 있다.

보이스코일 모터 구동에 대한 스트레인 게이지 출력신호에 관한 해석적 운동모델을 구하여보자. 시스템의 운동을 기술하는 해석적 모델은 끝점 질량의 운동에 대한 Newton 운동방정식과, 가동 코일 회로에 관한 Kirhhoff 전압법칙을 적용하여 얻을 수 있으며, 아래의 식 (1)과 같이 가동 코일 모터 구동앰프 입력전압 (V)과 스트레인 게이지 출력신호 (V_{out})에 관하여 3차 시스템이 된다.

$$\frac{V_{out}(s)}{V(s)} = K \frac{dK_t}{REI} \frac{G_c K}{MLs^3 + (MR + CL)s^2 + (CR + LK + K_s K_c)s + KR} \quad (1)$$

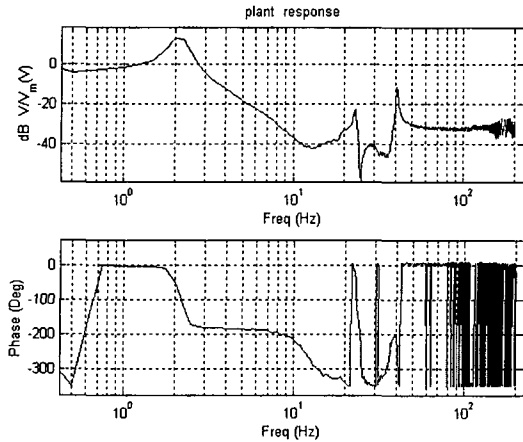


Fig.2 보이즈 코일 모터 구동에 대한 스트레인 게이지 출력신호의 주파수 응답

위 식에서, m 는 유연 빔 끝점의 질량, γ 댐핑, 스프링 상수를 의미하며, ω_n 는 가동코일 모터의 저항, 인덕턴스, 힘 상수 (force constant), 역 기전력 상수 (back EMF constant) 를 각각 나타낸다. 가동코일은 National Semiconductor 사의 전류 증폭 IC인 LM3886에 의하여 구동되며, K_t 가 그 증폭비를 나타낸다. 이들의 값들이 표 1에 정리되어 있다. 이 표에서 '*'의 위 첨자를 갖는 파라미터들은 그 값들이 측정이나 해석적인 추정을 통하여 결정될 수 없는 변수들로서, 다음 절에서 설명될 시스템 규명 방법에 의하여 결정된 값들을 나타낸다.

3. 시스템추정 기법을 통한 파라미터 결정

먼저 간략하게 실험 방법에 관한 소개를 한다. Fig. 3의 실험 구조에서 DSP (Digital Signal Processor) 를 통하여 발생하는 PRBS(Pseudo Random Binary Sequence) 신호로 유연 빔을 가진 시키고, 이때 발생하는 유연 빔의 변위 및 가속 도를 스트레인 게이지와 가속도센서로 측정한다. Fig. 4와 같은 구조에 의하여 PRBS 신호를 생성한다. Fig. 4의 SIMULINK 모델은 MATLAB RTW (Real Time Workshop) 기능에 의하여 dSPACE DS1102 보드의 TMS320C31 DSP 기계어로 변환/ 다운로드된 후 실시간으로 실행된다. 이와 같이 생성된 PRBS 신호는 DS1102 보드의 채널 2 DAC를 통하여 유연 빔

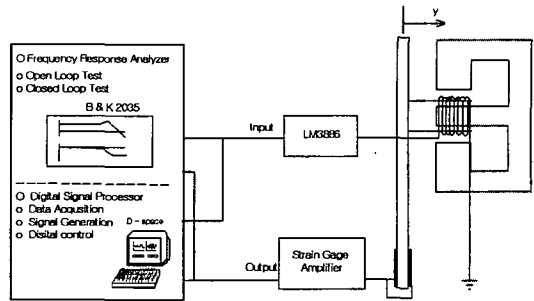


Fig.3 유연 빔 운동특성 파악을 위한 실험장치

표 1. 식 (1)에서 사용된 시스템 파라미터들의 값

Symbol	Description	Value	Unit
	Mass of end point	0.049	Kg
	Damping coefficient of flexible beam	8.8625	Newton/ (mm/s)
	Spring constant of flexible beam	1.0145	Newton/ mm
	Resistance of moving coil	1.85	
	Inductance of moving coil	2.379	mH
	Force constant of moving coil motor	0.07666	Newton/ A
	Back EMF constant of moving coil motor	7.666	Newton/ (mm/s)
	Strain gage circuit sensitivity	2.052	V/(unit strain)
	Moving coil motor AMP gain	5.188	Volt/ Volt

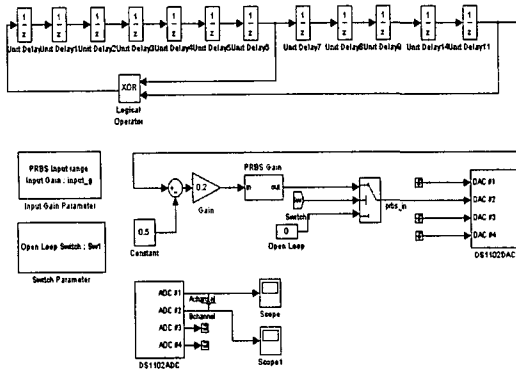


Fig. 4 SIMULINK를 이용한 PRBS 신호 생성

을 가진 시키고, 이에 의하여 생성된 유연 빔의 상태는 스트레인 게이지와 가속도센서에 의하여 측정된 후 채널 #2 ADC와 채널 #3 ADC를 통하여 DSP 보드로 입력된다. Fig. 4의 PRBS 신호 생성회로는 시프트 레지스터 역할을 하는 12개의 단위 지연기 (unit delay, z^{-1})와 모듈로 2 가산기 (modulo 2 adder)인 배타적 OR 논리소자로 구성되어 있으며, PRBS 신호의 on/ off을 위하여 스위치가 사용되고 있다. 또한, PRBS 출력 신호의 크기를 조절할 수 있도록 가변 게인 요소 (PRBS gain block)가 사용된다. 중요한 설계 인자는 단위 지연기에 연동된 샘플링 시간 (τ), 시프트 레지스터의 개수 (n), 그리고 PRBS 신호의 크기이다.

먼저, 샘플링 시간, τ 는 샘플링 정리 (sampling theorem)에 의하여 결정되며, 본 실험에서는 10 ms으로 선정 되었다. 또한, PRBS 신호는 다음의 식 (2)로 결정되는 주기를 갖게 되므로, 레지스터의 개수를 12로 정하게 되면 대략 20초마다 PRBS 신호가 반복되게 된다. 이 시간은 유연 빔의 정착시간 (settling time) 보다는 충분히 큰 값이 된다.

$$T = (2^n - 1)\tau \quad (2)$$

PRBS 신호의 크기는 유연 빔의 선형 작동영역을 벗어나지 않도록 하면서, S/N 비 (Signal to Noise ratio)가 가능한 한 크게 되도록 선정하여야 한다. 위와 같은 실험 방법으로 얻어진 데이터에 대하여, 최소 자승법 (least square method)에 근거한 추정 모델인 ARX, ARMAX, OE, 그리고 상태 공간식 모델을 사용하여 부하제원 장치에 관한 시스템 규명이 수행되었다.

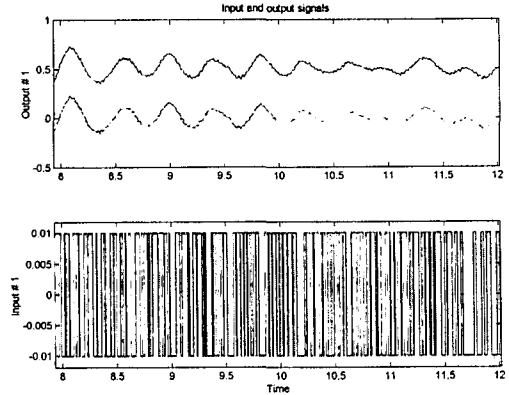


Fig. 5 PRBS and generated/estimated Strain gage output

PRBS 신호의 크기를 10 mV로 하여 얻어진 데이터를 분석한 결과를 시간 영역에서 요약하면 Fig. 5가 된다. Fig. 5의 Output#1의 첫 번째와 두 번째 그림은 유연 빔에 부착된 스트레인 게이지신호와 OE 3차 추정모델을 적용하여 얻어진 시간응답 특성을 비교한 것이다. 신호의 구분을 위하여 스트레인 게이지 출력 신호는 0.5 Volt 만큼 위로 이동되었다. 두신호가 거의 같은 응답을 보이므로, 시스템 추정 결과에 의한 OE 3차 모델은 충분히 정확한 것이라 생각된다. Fig. 5의 두번째 창의Input#1은 시스템에 인가된 PRBS신호이다. OE 3차모델을 적용하여 얻어진 가진기 운동 추정모델이 상태 공간식모델이나 ARX, ARMAX등을 사용하여 추정된 모델보다 더 우수한 결과를 나타냈으며, 그 결과는 아래의 식 (3)으로 주어진다

$$\frac{V_{out}(s)}{V(s)} = \frac{132.013 \times 10^4}{s^3 + 869.01s^2 + 1663.608s + 160.958 \times 10^3} \quad (3)$$

위의 전달함수 단위는 Volt/ Volt 이며, 이 식과 식 (1)로 주어지는 전달함수의 계수를 서로 비교함으로써 표 1의 시스템 상수 값들을 추정할 수 있다. Fig. 5의 첫 번째 창의 그림에서 알 수 있듯이 식 (3)의 추정모델은 실제 유연 빔의 운동 특성을 상당히 근접하게 표현하고 있음을 볼 수 있다.

4. 페루프 가진 제어기 설계 및 평가

4.1 보이스코일 모터 제어기 설계

Fig. 2로 표현되는 시스템 주파수 응답 특성을 갖는 유연 빔 시스템 구조에 대하여 가능한 최대의 대역폭을 제공할 수 있는 제어기를 설계하여 보았

다. Fig. 2에서 주파수 응답의 크기선도를 살펴보면, 41 Hz 주파수 대역에서 나타나는 고차의 진동모드의 크기가 4 Hz 근처에서의 크기와 거의 같은 값을 갖고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 지금과 같은 기계적 특성을 갖는 가진기 구조에 대하여 5 Hz 이상의 대역폭을 갖도록 제어기를 설계하는 것은 상당히 어려운 문제가 된다. 또한, 5 Hz에서의 위상지연 특성을 살펴보면 -180° 근처로 상당히 불안정한 값을 가지고 있다. 이제 5 Hz의 대역폭을 갖는 페루프 제어기를 설계하여 보자. 대역폭의 확장을 위하여 위상 앞섬 필터(PLF: Phase Lead Filter)를 사용하였다. 아래의 식 (4)는 사용된 PLF를 표현하며, 6 Hz 근처에서 대략 36° 의 위상 보상 (phase compensation)을 할 수 있도록 설계되었으며 위상보상이 더 필요하기 때문에 PLF를 3개 사용하여 110° 의 위상 보상을 하였다.

$$K_1(s) = \frac{(0.03183s+1)^3}{(0.007958s+1)^3} \quad (4)$$

그러나, 식 (4)의 PLF를 현재의 가진 시스템에 그대로 사용하게 되면 PLF가 고 주파수 대역에서의 게인을 크게 하기 때문에 고차의 공진모드 영향으로 설계된 페루프 시스템은 불안정 해진다. 즉, PLF를 사용하게 되면, 루프 게인 보드 선도 (loop gain bode plot)에서 고차 공진모드의 크기는 0 dB보다 크게 되어 페루프 시스템은 불안정해진다. 이를 해결하기 위하여, 아래의 식 (5)와 같이 15 Hz의 차단 주파수를 갖는 2차 LPF를 사용되었다

$$K_2(s) = \frac{1}{(0.0001126s^2 + 0.01485s + 1)} \quad (5)$$

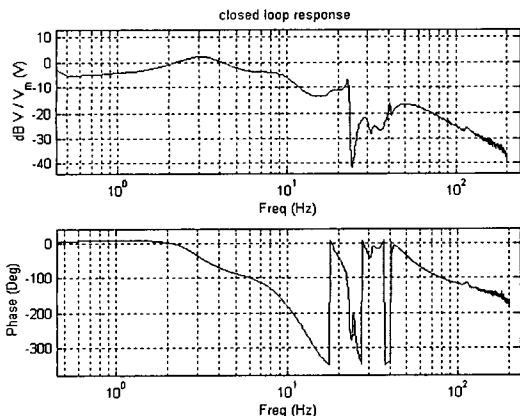


Fig. 6 루프게인 주파수 응답

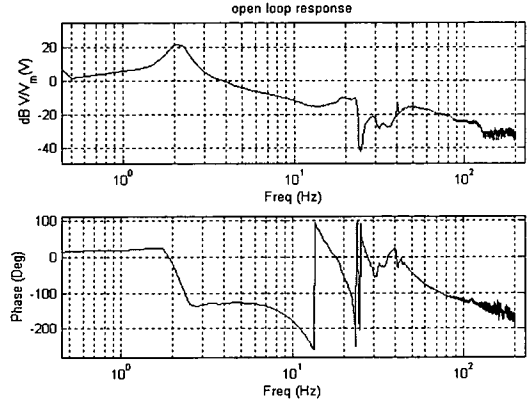


Fig. 7 페루프 주파수 응답 특성

또한, 24 Hz와 41 Hz에서 고차 진동모드의 피크 값이 0dB보다 높게 올라가기 때문에 시스템이 불안정하므로, 식 (6)과 같은 노치 필터를 사용하였다.

$$K_3(s) = \frac{(1.507 \times 10^{-5}s^2 + 7.764 \times 10^{-5}s + 1)}{(1.507 \times 10^{-5}s^2 + 0.001747s + 1)} \quad (6)$$

저 주파수 대역에서 DC 게인이 낮기 때문에 위상 뒤집필터를 사용하여 DC 게인을 증가시켜 정상상태 응답특성을 좋게 하였다

$$K_4(s) = \frac{(6.325s + 10)}{(6.325s + 1)} \quad (7)$$

Fig. 6은 제어기 특성이 고려된 가진기의 루프 게인 주파수 응답을 나타낸다. PLF 제어기를 사용하여 위상특성이 좋아졌으며 노치 필터 사용하여 고차 진동의 특성을 좋게 개선하였다. 5 Hz인 크로스오버 주파수 (crossover frequency)에서 위상지연 값이 -180° 보다 적게 나타나고 있다. 루프게인 주파수 응답특성으로 보아 페루프 주파수 응답 특성은 안정한 특성을 가질 것으로 예상된다. Fig 7은 페루프 주파수 응답 특성이다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 실제적인 페루프 시스템은 대략 50° 정도의 위상여유 (phase margin)를 갖고 있음을 의미한다. 또한, 페루프 시스템은 거의 12 dB의 게인 여유 (gain margin)를 갖게 된다.

페루프 시스템의 시간영역 응답 특성이 Fig. 8에 정리되었다. Fig. 8에 0.1 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz 및 10 Hz의 정현파 입력에 대한 페루프 응답특성이 순서대로 그려져 있다. 0.1 Hz에서 5 Hz까지의 정현파 입력에 대하여 거의 추종하지만 10 Hz에서는 대략

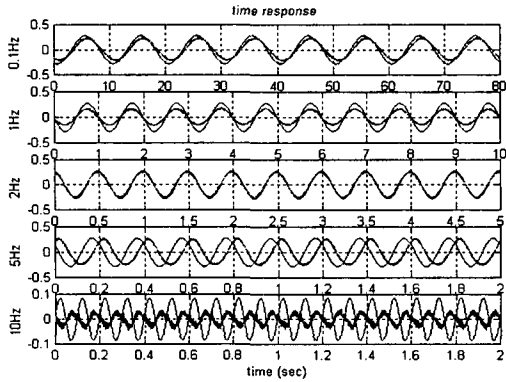


Fig. 8 페루프 제어기의 시간영역 응답

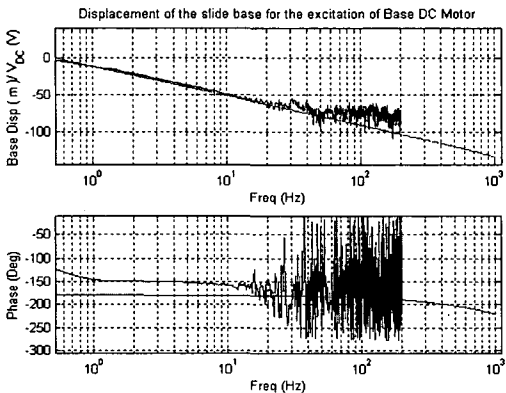


Fig. 9 DC 모터 구동에 대한 베이스의 출력의 주파수 응답선도

40% 정도까지 추종하고 있는 것을 볼 수 있다.

4.2 DC 모터 제어기 설계

유연 빔이 부착된 베이스를 구동하는 DC 모터에 대한 베이스 이동 변위에 대한 주파수 응답이 Fig. 9에 도시되어 있다. Fig. 9에 실은 실선은 실험적이고, 가는 실선은 3절에서 설명된 바와 동일한 방법을 적용한 파라미터 추정을 통하여 구한 값을 해석적 모델식에 대입하여 구한 것이다. 실험적 주파수 응답을 볼 때, 간단한 비례 제어기의 적용으로 대략 30°의 위상여유를 확보할 수 있음을 알 수 있다. 비례 제어기의 값을 100으로 하면, 대략 5 Hz의 대역폭을 확보할 수 있다.

지금까지 시스템으로 입력되는 2 개의 구동부, 즉 보이스 코일 모터 및 DC 모터에 대한 페루프 제어기 설계에 대하여 논의하였다. 페루프 시스템의 성능을 최적으로 하기 위한 노력을 하지 않았지만, 두 입력에 대하여 대략 5 Hz의 대역폭을 갖는 시스템이 설계되었다. 이제, 두 페루프를 적용한 상태에 대한 성능시험 결과에 대하여 알아보자. 베이스를 구동하는 DC 모터에 0.05 Hz의 직각파를 입력시킨 조건에 대하여, 보이스코일 구동루프를 닫은 상태, 그리고 개방시킨 상태에 대한 시간 영역 응답 특성을 살펴 보았다. Fig. 10은 그 실험 결과를 보여 준다. 이 그림에서 첫 번째 응답은 베이스 구동 명령신호와 이에 대한 베이스 출력 값을 도시한 것이다. Fig. 9의 루프게인 선도에서도 알 수 있듯이, DC 모터에 의한 베이스 구동 시스템은 Type 2의 제어 성능을 갖는다. 따라서, 스텝형 입력에 대하여는 정상상태 오차가 존재하지 않는다. Fig 10의 두 번째 및 세 번째 그림은 유연 빔의 운동상태를 나타내는 스트레인 게이지 출력 신호와 가속도계 출력 신호를 나타낸다. Fig. 10에서 최초 22초 구간은 모든 루프를 닫은 상태, 그리고 22초 후에는 보이스코일 구동부를 개방시킨 상태를 각각 의미한다. 최초 22초 구간은 베이스 구동에 의한 유연 빔의 잔류 진동이 잘 억제된 결과를 보여 주고 있으며, 22초 이후에는 보이스코일 구동이 개방되어 있기 때문에 유연 빔의 잔류 진동이 심하게 나타남을 보여주고 있다. 이는 설계된 두 페루프 시스템이 적절함을 의미한다.

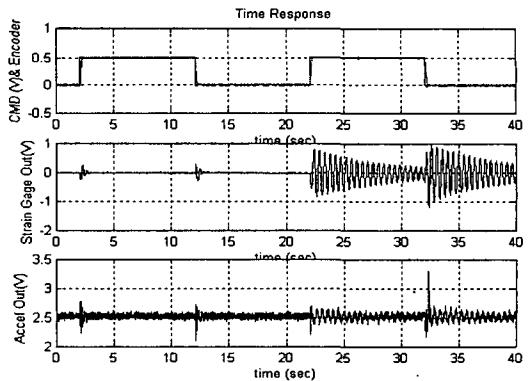


Fig. 10 DC 모터 구동에 대한 유연 빔의 시간영역 응답

5. 결론

본 연구를 통하여 대략 5 Hz 정도의 대역폭을 갖는 유연 빔 제어 시스템이 설계/제작 되었다. 최초 설계/ 제작되는 시스템이기에 페루프 시스템의 성능을 최적화 시키기위한 연구는 심도있게 진행 되지 않았다. 그러나, 학부과정의 제어공학 관련분야에 사용될 수 있는 실험장치가 설계/ 제작되었음에 그 의의가 있다고 볼 수 있다. 앞으로의 연구분야는 페루프 시스템의 성능을 보다 개선시키기 위한 작업이 진행되어야 한다. 또한, 사용자가 보다 많은 센서 사용의 경험을 갖을 수 있도록 하기 위하여, 유연 빔 끝단의 운동을 감지하는 비전 시스템을 (machine vision system) 추가할 필요가 있다. 또한, 유연 빔의 표면에 압전소자 패치 (piezoelectric patch)를 사용하여 구동 장치의 다양화를 시도할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] N.,A.Kheir, and et al, "Control Systems Engineering education," Automatica, No. 2,pp.147-166, 1996
- [2] S.Yukovitch, and et al, "Control System Testbeds and Toys : Serendipitous or Suspect," Proc. of ACC, pp. 2692-2696, 1997
- [3] R.Isermann,"Mechatronic Systems - A Challenge for Control Engineering," Proc. of ACC, pp. 2617-5965, 1997
- [4] M. Steinbuch and et al, "Robust Control of a Compact Disc player," Proc. of Decision and Control, pp. 2596-2600, 1992
- [5] M. Ogawa and Furukawa, "Robust Servo System of Optical Disk Drive," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 31,pp.643-647, 1992
- [6] H.J.Dunn, "Experimental Results of Active Control on a Large Structure to Suppress Vibration," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Vol.2,pp.779-791, 1991
- [7] Analog Devices,"ADX05 Single Chip Accelerometer Data Sheet"