

홀로그래픽 저장장치의 각다중화를 위한 갈바노미터의 동특성 해석 및 정밀 추종 제어

Dynamic Characteristic Analysis of Galvano Meter Scanner for Angle Multiplexing of Holographic Data Storage

이재성*·최진영**·양현석**·박노철**·박영필**

Jae-Sung Lee, Jin-Young Choi, Hyun-seok Yang, No-Cheol Park and Young-Pil Park

Key Words : Galvano Meter(갈바노미터), Angle Multiplexing(각다중화), PID(PID 제어기)
Holographic Data Storage(홀로그래픽 저장장치), CCD Camera(CCD 카메라)

ABSTRACT

This paper proposes a control system for a Galvano meter which can be used in angle multiplexing for a holographic data storage. Due to the small angle multiplexing selectivity and the exposure /delay time of a CCD camera, the system needs to be controlled to satisfy the performance specification. First, the mathematical model is derived by combining the electrical and mechanical dynamic equations. Then, the obtained model was tuned by the experiments. Finally, a PID controller using DSP was designed and was applied the holographic system. From this approach, we successfully meet the performance specification.

1. 서론

홀로그래픽 저장 장치는 동일 공간에 페이지 단위로 데이터를 다중 기록 가능한 특징이 있고, 이로 인하여 고용량의 데이터 저장 용량과 빠른 데이터 전송 속도의 구현이 가능하다. 따라서 BD(Blu-ray Disk) 이후의 차세대 광 저장장치로 근래 많은 주목을 받고 있다. 이때 동일 장소에 여러 페이지의 데이터를 기록하는 방법을 다중화(Multiplexing)라 한다. 다중화 기법에는 여러가지 있으나, 본 논문에서는 구현이 비교적 쉬운 각다중화 방식을 채택하였다. 각다중화 기법은 참조빔과 신호빔 사이의 각도를 조정하여, 데이터를 기록 및 재생하는 방식이다.[1] 신호빔의 각도를 바꾸기 위하여 초기의 홀로그래픽 저장 장치에서는, 회전 스테이지나 스테핑 모터를 사용하였다. 그러나 이 경우, 응답 속도가 늦고 마찰 등에 의하여 제어 정밀도를 확보하기 쉽지 않다. 따라서 이에 대한 해결책으로 AOD(Acoustic Optic-Deflector)[2] 나 LCD(Liquid Crystal Display)[3]를 이용한 연구가 진행되었다. 그러나 이러한 경우에도 구현 측면에서 가격이 비싸고, 광의 효율이 많이 떨어지는 등의 단점이 존재한다.

근래 응답 속도가 빠르고 회전각의 정보를 피드백하여 보다 정밀 제어가 가능한 갈바노 미터가 동

장하여, 각다중화를 사용하는 홀로그래픽 저장 장치에서의 사용이 보다 용이해 졌다. 따라서 본 논문에서는 정밀 제어가 가능한 갈바노 미터를 홀로그래픽 저장장치의 적용 측면에서 해석하고, 각다중화를 적용 평가하였다. 이를 위해 먼저 갈바노미터를 수학적/실험적으로 모델링 하였다. 다음으로 재생 시 저장 매체로부터 최대 효율을 얻기 위해, 목표 각도에 대해 정확한 각도 추종과 CCD 카메라의 프레임당 노출시간을 고려한 성능지수를 설정하였다. 마지막으로 설정된 지표로 제어기를 설계 후 DSP를 이용하여 적용 평가하였고, 이에 대한 결과를 간단히 정리하였다.

2. 갈바노 미터의 동특성

2.1 주파수 및 시간 도메인 특성 실험

본 논문에서 사용되는 갈바노 미터에 대한 모델링은 두 가지 방법으로 접근하였다. 먼저 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer, 35670A)를 통해 주파수 응답을 얻고, 이를 곡선 적합(curve fitting)을 통하여 시스템을 모델링 하였다. 그러나 이 경우, 시스템 자체의 과전류 보호 회로에 의하여 고주파 대역에 대한 정확한 응답 특성 해석이 불가능 하였다. 이러한 이유로 곡선 적합으로부터 얻어진 모델과, 실제 플랜트와의 과도 응답 특성이 다르게 얻어지는 결과를 가져왔다.

이러한 현상을 피하기 위해, 전기, 기계적 운동방정식으로부터 전달함수를 구해 시스템 파라미터를 수치적으로 대입하여 동적모델을 구하였다.[4]

* 연세대학교 CISD

E-mail : pandora@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

** 연세대학교 CISD

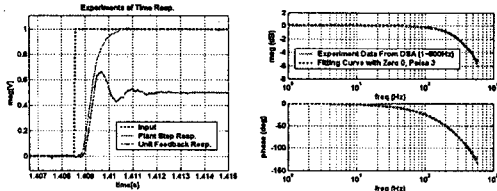


Fig. 1. 시스템의 계단응답과 주파수 응답

Fig. 1은 갈바노 미터의 시간 응답과 주파수 응답을 실험적으로 얻은 결과를 보여준다.

2.2 시스템 파라미터를 이용한 동적모델링

실험에 사용된 갈바노 미터는 Cambridge Tech.사의 6450 모델이고 사양은 표 1과 같다. [5]

표 1. Model6450 사양

Specification	value	Specification	Value
Rated angular excursion	40°	Back EMF	0.04mV/dcg/sec
Rotor inertia	2.3 gm*cm ²	RMS current	1.77 amps
Max load recommended	0.18 gm*cm ²	Torque constant	4.4*10 ⁶ dyne*cm/amp
Coil inductance	450 uH	Peak current	6 amps
Coil resistance	4.0 Ohm	Step response time	2000 usec
Linearity	99.9 %	Repeatability	2 urad

이 제품은 디지털/아날로그 신호를 모두 입력으로 사용할 수 있고, 엔코더를 내장하여 회전각을 피드백 할 수 있다. 1V 입력 시 시스템은 2° 각도의 출력을 보이고, 이 수치는 엔코더를 통하여 0.675V 로 출력한다. 이를 페루프 제어하기 위해 dSpace 사의 DSP1130 보드와 Matlab 의 시뮬링크를 이용하여 실험하였으며, 그 개략도를 Fig. 2 에 제시하였다.

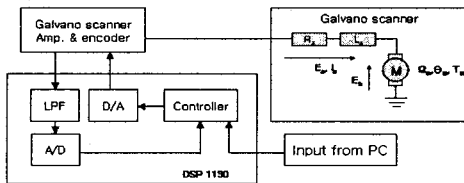


Fig. 2. 실험 구조도

시스템을 수학적으로 모델링하면, 식(1), (2)와 같은 관계가 성립하고, 이를 라플라스 변환하면 최종적으로 식(3), (4)가 얻어진다.

$$\begin{cases} E_s(t) = L_s(t) \frac{d\theta_m(t)}{dt} + R_s(t) \dot{\theta}_m(t) + E_b(t) \\ E_b(t) = K_b(t) \frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_b \omega_m(t) \end{cases} \quad \text{(Electrical part)} \quad (1)$$

$$T = K_T i_a(t) \quad \text{(Mechanical part)} \quad (2)$$

$$\frac{\theta_m(s)}{E_s(s)} = \frac{K_T}{(L_s s + R) (J s^2 + B s + K_b) + K_b K_T s}, \quad E_o(s) = H_{sm} \theta_m(s) \quad (3)$$

$$\frac{E_o(s)}{E_s(s)} = \frac{1.008 \times 10^8}{0.001035 s^3 + 14.15 s^2 + 5.539 \times 10^4 s + 1.008 \times 10^8} \quad (4)$$

$$(L_s = 450 \times 10^{-6}, R_s = 4, K_T = 0.8 \times 4.4 \times 10^6, K_b = 768 \times 10^6 \times \frac{\pi \text{rad}}{180^\circ})$$

$$J = 2.3, K_b = 2.521 \times 10^7, B = 1.101 \times 10^4, H_{sm} = \frac{1}{0.625}$$

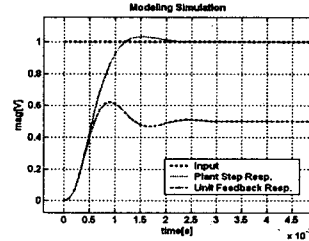


Fig. 3. 동적 모델링에 대한 개,페루프 계단응답
이때, K_s, B 를 조절하면서 Fig. 1 과 유사한 응답을 보이는 값을 찾아 동적 모델링을 하였고 Fig. 3 이 그에 따른 시간응답이다.

3. 각다중화를 위한 갈바노 미터 제어

3.1 홀로그래픽 저장에 각다중화를 위한 조건

각다중화를 이용하면, 저장물질의 고정된 지점에 대하여 참조빔의 각을 변경하며 새로운 데이터 페이지를 중복 저장에 할 수 있다. Fig. 4 는 논문에서 구현한, 갈바노 미터를 이용하여 각다중화를 개략적인 구성을 보여주고 있다.

참조빔 각을 변화시킬 경우, 어느 각에서 이전에 저장된 회절무늬에 의한 회절의 강도가 약해져서 0 이 되는 첫번째 null point 가 존재하고 이 각도에 이르면 이전 데이터는 재생되지 않는다(Fig. 5). 이 위치에 새로운 페이지를 저장할 수 있게 된다. 이는 재생 과정에서도 같은 원리로 적용되며 이때의 각을 각선택도(angle selectivity)라 한다. 이는 광학적 요소 및 배치에 관련되고 실험에서 사용된 시스템에서는 0.0045° (2.25mV)가 된다. Fig.5 에서 정확한 위치각이 아닌 오차로 인해서 회절효율이 떨어지는 것을 확인하였다.

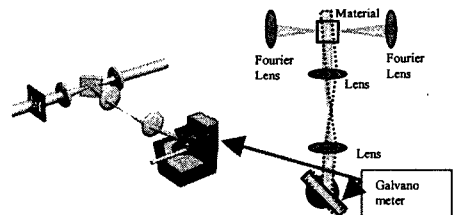


Fig. 4. 갈바노미터를 이용한 각다중화 구조도

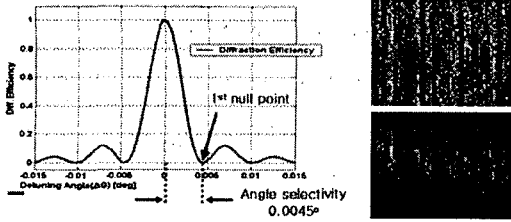


Fig. 5. 각변화에 따른 회절효율 및 페이지 데이터의 선명도

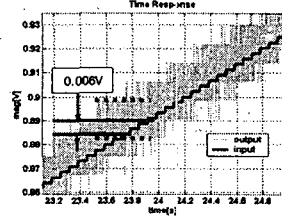


Fig. 7. 각선택도의 크기로 증가하는 계단 입력의 시간 응답

3.2 CCD 카메라를 사양을 고려한 성능지수

본 실험은 참조빔의 각을 변화시켜 CCD 카메라에서 가장 높은 효율의 데이터를 얻기 위한 갈바노미터의 각도 제어를 해야 한다. 또한 재생 시 CCD의 각 프레임마다 재생하기 위해 빠르게 각 변화도 시켜야 한다. 시스템의 정밀한 제어를 위하여 펄프를 구성하였고, 이때 0.0045°의 아주 정밀한 수치를 가지는 계단 모양의 입력을 추종하게 하였다.

실험에 사용되는 CCD 카메라는 Redlake 사의 ES1.0 으로 프레임율은 초당 15 프레임이다. Fig. 6에서 유저 트리거 발생 시, 20ms 지연 후 66ms 동안 첫번째 프레임에 대해 노출되고 5ms의 지연 후 두번째 프레임에 대해 노출된다. 갈바노 미터의 각도 변화는 이 5ms 내에서 이루어 져야 한다. 즉 첫 노출이 끝난 후 바로 각변화가 이루어 져서 5ms 동안 최소한 80%이상 회절효율을 갖도록 각변화를 하여야 한다. 비록 노출 후 최대는 아니지만 노출시간 중간 시간에서 최대 효율을 얻게 하여야 한다. 80%의 효율을 얻기 위해서는 약 0.0015°(허용오차 33%, 0.00075V)에 도달해야 하고 33ms 내에 정상상태오차 0으로 만들어야 한다.

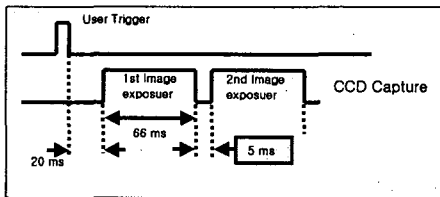


Fig. 6. CCD 카메라 노출 시간표

3.3 노이즈 및 증가계단 입력에 따른 영향

갈바노 미터 센서의 의한 아날로그 출력 신호는 외부적인 잡음의 영향을 받게 된다. 크기는 약 20mV 이다. 이는 미분기를 제어기에 포함할 경우 미분오차의 증가로 제어입력을 크게 하여 불안정 시스템을 초래할 수 있다. 이에 저역통과 필터를 출력단에 포함하여 제어기를 설계 하였다.

또한 개루프 시스템에 증가하는 계단 입력을 할 경우 누적 오차로 인하여 Fig.7 에서처럼 약 23.7 초(약 350 번째 재생)에서 6mV의 오프셋(offset) 오차가 발생하게 된다. 이는 각선택도의 3 배에 가까운 수치로 잘못된 페이지의 데이터를 읽게 되는 결과를 얻는다.

이것의 방지를 위하여, 센서 출력단으로부터 들어오는 신호에 대역폭 300Hz의 저역 필터를 적용하고, 제어기에 적분기를 포함하여 저역 게인을 높였다.

4. 갈바노 미터 제어기 설계

앞서 정한 성능계수를 만족하기 위해 모델링한 전달함수를 토대로 제어기를 포함한 개루프 함수의 보드선도와 근궤적 (Fig.8)을 조정하였다

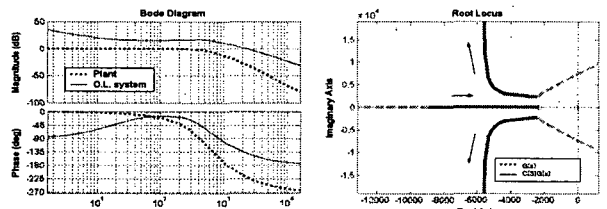


Fig. 8. 개루프 전달함수의 주파수 응답 및 근궤적 곡선

정상상태오차를 0으로 하기 위해 저주파대역의 기울기를 -20dB/dec로 하고 빠른 응답을 위해 높은 DC 게인을 확보해야 한다. 이를 위하여, 적분기를 추가하였다. 그리고 CCD의 프레임 률을 고려하여, CCD의 프레임이 소요하는 시간 내에서 빠른 수렴을 위하여 영점을 설정하였다. 또한 목표치, 0.0015°(0.00075),에 빠른 수렴을 위해 복소 극점 근처에 실수 영점을 두어 빠른 응답을 하는 근궤적으로 변형하였다.

결과적으로 얻은 제어함수 C(s)는 식(5)와 같다.

$$C(s) = \frac{0.0025s^2 + 6s + 580}{0.001035s^3 + 14.15s^2 + 5.539 \times 10^4 s + 1.008 \times 10^8} \quad (5)$$

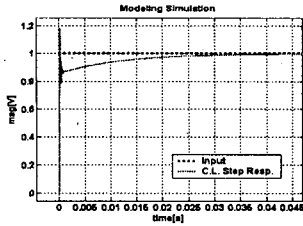


Fig. 9. 페루프 계단응답

Fig.9 는 페루프 전달함수에 대한 계단입력 응답 시뮬레이션 곡선이다.

5. 실험 결과

500 개의 연속된 페이지를 재생할 때, CCD 카메라의 프레임율을 고려한 시간변화에 따라 입력을 설계하였다. 이 입력에 대하여 정확한 각도 추종제어를 할 수 있는지 실험하였고, 또한 100 개의 페이지 범위 내에서 임의 입력에 대하여 시스템이 잘 추종하는지 실험하였다.

Fig. 10-(a)는 $1V(2^\circ)$ 를 입력할 경우의 응답곡선이다. 20%의 오버슈트가 발생하며 0.04 sec 에 정착하는 것을 알 수 있다. 하지만 2° 의 각도에 대한 응답곡선은 약 500 번째 페이지로 바로 각도 변화시킬 때 나타나는 것으로, 실제 플랜트에서의 페이지 데이터를 이와 같이 구성하지 않는다.

Fig. 10-(b)에서는 연속적으로 각을 변화시켜가며 응답을 알아볼 경우 약 0.01 초에 정착하게 되고 이는 CCD 카메라의 프레임 노출시간인 0.067 초보다 6 배 빠른 응답특성이다. Fig. 10-(c)는 100 페이지 안에서 임의적으로 각을 변화시킬 때의 응답이다. 실험적으로 약 10 페이지 이내에서 각도를 변화시켜갈 경우 0.02 초에 목표각도에 도달하였다. 이는 CCD 카메라의 프레임 당 노출시간의 약 1/3 이다. 또한 제어기 설계의 기준을 목표치의 80%도달 시간을 0.001sec 로 두었기 때문에 Fig. 10-(a),(b),(c) 도 두 배 빠른 80% 도달시간을 가지고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 갈바노 미터에 대해 DSP 를 이용하여 각도 추종제어를 연구하였다. 먼저 갈바노 미터를 실험적/수학적으로 모델링하고, 그 동적인 특성을 분석하였다. 분석된 특성을 바탕으로, 각 다중화를 사용하는 홀로그래픽 시스템에 적용하기 위하여 제어 정밀도 및 CCD 카메라 특성을 고려한 성능 지표를 설정하였다. 설정된 성능 지표를 달성하기 위하여, DSP 를 이용하여 PID 제어기를 설계하고 평가하였다.

설계된 제어기를 통하여, 각다중화를 구현하기 위한 정밀도 및 응답 특성이 확보되었음을 실험적으로 증명하였다.

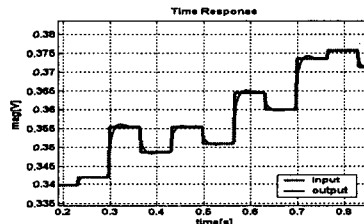
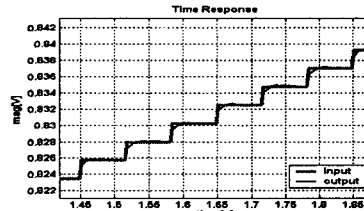
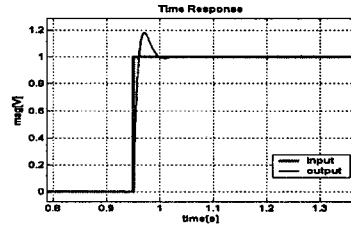


Fig. 10-(a),(b),(c). 다양한 기준 입력에 따른 시간응답 실험

후기

본 연구는 산업자원부의 차세대 대용량 정보저장장치 개발사업(00008145)과 한국과학 재단(R11-1997-042-11002-2)의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) F.H.Mok, M.C. Tachitt and H.M. Stroll, "Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO₃ Crystal", Opt. Lett. 16 605-607 (1991)
- (2) F.H.Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate", Opt. Lett. 18 915-917 (1993)
- (3) S.K. Kim, K.T. Kim and E.S.Kim, "Non-Mechanical Angular Multiplexed Holographic Memory System using Moving Window on Liquid Crystal Display", Jpn.J.Appl.Phys. 38. 38-40(1999)
- (4) 방승현, 홍선기, "레이저 마킹 장비를 위한 갈바노미터의 제어기 설계", Journal of KIIEE, Vol. 17, No. 3, May 2003
- (5) Cambridge Technology Inc., "Model 6450 Galvanometer Optical Scanner Instruction Manual"