

## 레이저 마킹 장비를 위한 갈바노미터의 제어기 설계 (Controller Design of a galvanometer for Laser Marking Equipment)

방승현\* · 홍선기 · 김수길 · 강태삼

(Seoung - Hyun Bang · Sun - Ki Hong · Soo - Gil Kim · Tae - Sam Kang)

### 요 약

본 논문에서는 레이저 디스플레이, 레이저 가공, 마킹 장비등에 사용되는 갈바노미터의 제어 시스템을 설계하였다. 갈바노미터 및 거울을 DC 모터가 연결된 기본적인 2차 시스템으로 모델링하였으며, 이것의 시간 영역 분석 및 주파수 영역 분석에 기초하여 기본적인 PID 제어를 설계하였다. 기존 시스템은 폰트를 이용한 모션 발생을 위해 하나의 PC가 더 필요한데, 본 연구에서는 이 역할도 DSP가 담당하기 때문에 매우 큰 비용 절감의 효과가 있다. 갈바노미터의 정밀 위치 측정 및 구동을 위하여 16비트 A/D, D/A 변환기를 사용하였다. 실험 결과 제안된 제어 시스템이 실제 환경에서도 매우 잘 동작함을 확인하였다. 통신은 USB를 사용하였고, 따라서, 본 논문에서 제안된 제어 시스템은 사용자의 PC에 쉽게 연결될 수 있다는 장점도 가지고 있다.

### Abstract

In this paper, proposed is a control system for a galvanometer which is widely used for laser display, laser processing and marking systems. The galvanometer with mirror is modeled as a second-order dynamic system. Based on frequency responses and time domain responses of the developed model, a conventional PID controller is designed. And it is implemented using a DSP(TMS320C32) chip with precision A/D and D/A converters. Through frequency response and experimental results, it is convinced that the proposed control system works well in real environment. Furthermore, it is very easy to be connected to any PC because of USB communication port, and the cost of the marking system can be lowered very much because the DSP do the all the jobs for generating font motion as well as controlling the galvanometer.

Key Words : galvanometer, PID, DSP, controller

### 1. 서 론

레이저 마킹에 응용되는 갈바노미터(소형전동기)는 360도 회전하지 않고 제한된 작은 각도 범위 안에서만 고속 회전하는 기기로서 의료기기, 레이저 물질 공정, 영상 장비 제작, 균열 검사, 반도체 제조공정, 레이저 쇼 등에도 사용되어지며, 그 사용 범위가 확대되고 수요가 날로 증가하고 있는 추세로 관심이 증가하고 있다. 갈바노미터는 그 사용 용도에 맞게

\* 주저자 : 호서대학교 일반대학원 정보 제어전공 석사졸업.  
Tel : 02-542-9605, Fax : 02-517-7183  
E-mail : seorim96@hotmail.com  
접수일자 : 2003년 1월18일  
1차심사 : 2003년 1월28일  
심사완료 : 2003년 4월28일

## 레이저 마킹 장비를 위한 갈바노미터의 제어기 설계

비교적 토크가 크며 고속의 응답성을 나타내도록 제작되며, 특히 제어기의 성능은 품질 및 고속 처리에 크게 영향을 준다. 제어기는 보통 OP 앰프를 이용한 아날로그 방식의 제어기를 많이 사용하고 있다. 이는 각각의 파라메타를 보정 또는 수정함에 있어서 불편한 단점이 있다. 레이저 마킹 장비 기술은 크게 데이터 획득 및 잡음 제거 기술, 패러미터 식별 기술, 제어기 설계 기술, 제어기 구현 기술, 운용 소프트웨어 기술로 구성된다. 정밀한 제어를 위해서는 고정밀도의 A/D, D/A 변환기술과 더불어 OP 앰프등에 의해 발생하는 잡음의 영향을 최소화해야 한다. 또한 제어기 설계를 위한 플랜트의 수학적 모델을 구해야 하며, 모델이 정해지면 이를 기초로 제어기를 설계 및 구현하면 된다. 또한 실제 사용을 위해서는 제어시스템을 운용하기 위한 운용 소프트웨어가 구성되어야 한다. 본 논문에서는 갈바노미터를 수식적으로 모델링하고, 이에 기초하여 제어기를 설계, 구현하였다.

## 2. 레이저 마킹장비의 구성

레이저 마킹 장비는 크게 레이저 광원, 갈바노미터 및 제어기, 운용소프트웨어 및 컴퓨터 시스템으로 구성된다고 볼 수 있다[1]. 갈바노미터는 서보 모터와 거울이 결합된 것으로 레이저 빛을 원하는 곳으로 반사시키는 역할을 한다. 레이저나 광학적 스캐닝(scanning)을 필요로 하는 모든 장비들은 이 갈바노미터를 사용한다. 갈바노미터를 제어하는 기술은 레이저 마킹 장비의 핵심 기술이며, 이 기술이 마

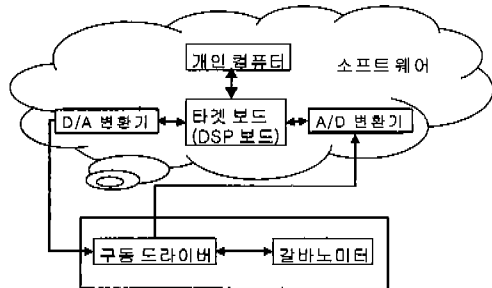


그림 1. 전체 개발 환경 및 제어 시스템 개략도  
Fig. 1. Schematic for galvanometer system

킹 속도 및 품질을 결정한다.

그림 1은 본 논문에 사용된 레이저 마킹 장비에 대한 구성의 개략도이다. 전체 시스템은 개인용 컴퓨터와 타겟 보드(DSP 보드), 16비트의 고속 A/D 변환기 및 D/A 변환기, 그리고 이들을 운영하는 소프트웨어, 마지막으로 갈바노미터의 구동 드라이버와 실제 구동되는 갈바노미터로 구성된다.

### 2.1. 제어 시스템 구성

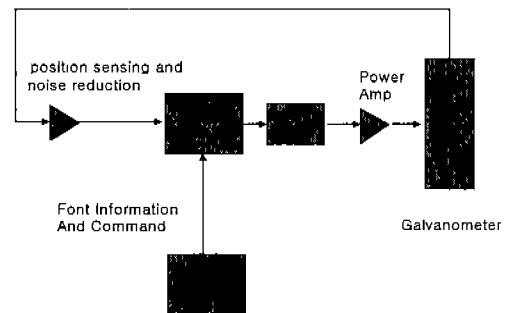


그림 2. 제어 시스템의 개략적 구조  
Fig. 2. Control system structure

갈바노미터의 제어를 위한 서보 시스템은 그림2와 같으며 그 동작은 다음과 같다. 갈바노미터의 제어기에 위치 명령이 컴퓨터로부터 가해진다. 위치 명령은 차등 증폭기를 통해서 가해지며, 이 명령은 역시 차등 증폭기를 통해서 들어온 갈바노미터의 위치 신호와 비교되어, 오차가 구해진다. 이 오차는 제어기의 연산 장치인 TMS320C32에 입력되며, 이 마이크로프로세서는 미리 정해진 제어 파라미터를 이용하여 제어 출력을 구한다. 그리고 이 출력은 전원 등에서 들어오는 잡음을 줄이기 위해서 노치 필터를 통과하며, 노치 통과 후 전력 증폭기로 들어간다. 전력 증폭회로는 고급의 전력 구동용 반도체를 사용하며, 정밀도를 위하여 PWM이 아닌 아날로그 신호를 내보내며, Power OP AMP를 사용한다. 이 전력 증폭단의 출력은 바로 갈바노미터에 연결되어 갈바노미터를 주어진 명령에 맞게 움직이게 된다.

### 2.2. 갈바노미터 특성 해석 및 제어기 설계

갈바노미터는 보통  $\pm 20^\circ$  이내로 작동범위가 작

고 수십 [ms]에서 수백 [us] 사이에 응답해야 한다. 따라서 기계적인 마찰력과 관성이 작으며 순간적으로 큰 토크를 낼 수 있도록 설계되어진다 [2],[3]. 그림 3은 갈바노미터의 등가회로이다. 그림 3에 나타내어진 각 변수와 파라미터를 이용하여 갈바노미터의 운동 방정식을 유도하면 다음과 같다 [4],[6].

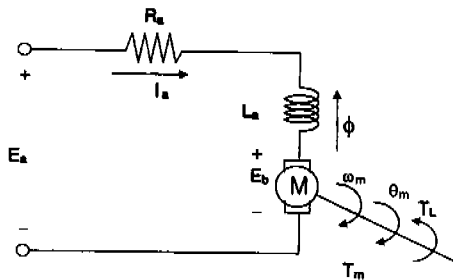


그림 3. 갈바노미터의 등가 모델  
Fig. 3. Galvanometer model of equivalence

먼저 갈바노미터의 전기적인 동적 방정식을 구하면,

$$E_a(t) = L_a \frac{d i_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_b(t) \quad (1)$$

이다. 역기전력은 회전자 각속도와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$E_b(t) = K_b \frac{d \theta_m(t)}{dt} = K_b \omega_m(t) \quad (2)$$

또한, 갈바노미터의 기계적인 동적 방정식은

$$T = K_T * i_a(t) = J \frac{d \omega_m(t)}{dt} + B \omega_m(t) + K_s \theta_m(t) + T_L(t) \quad (3)$$

이다. 단  $K_T$ 는 토크상수 (dyne-cm/A)이다.

따라서 식 (1),(2),(3)을 가지고 갈바노미터의 상태 방정식을 구하고, 갈바노미터에서는 거울 밖에 부하가 없으므로 거울의 관성을  $J$ 에 포함시키고, 댐핑항을  $B$ 에 포함시키면  $T_L$ 은 영으로 둘 수 있다. 이때  $E_a(t)$ 에서  $\theta_m(t)$ 로 이르는 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_T}{A_s} \quad (4)$$

$$A_s = L_a J s^3 + (L_a B + R_a J) s^2 + (L_a K_s + R_a B + K_T K_b) s + R_a K_s$$

본 연구에서 사용된 갈바노미터는 Cambridge Technology 사의 Model 6860이다. 이 갈바노미터에 대한 구체적인 사양은 표 1과 같다.

표 1. Model 6860의 사양  
Table 1. Model 6860 specification

갈바노미터 MODEL NO. 6860		
항목		단위
회전각도 ( $\theta_m(t)$ )	40	degrees p-p
회전자 관성 ( $J$ )	0.6	gm-cm <sup>2</sup>
권장 부하	0.3~6.0	gm-cm <sup>2</sup>
토크 상수 ( $K_T$ )	9.3E + 04	dyne-cm/amp
코일 저항 ( $R_a$ )	1.4	ohms
코일 인덕턴스 ( $L_a$ )	160	μH
역기전력 상수 ( $K_b$ )	170	μV/degrees/s

갈바노미터의 특성을 고려하여, 각각의 변수와 파라미터를 이용하여 그 운동방정식을 유도하면[4,5], 갈바노미터의 전달함수  $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{93000}{0.0001526s^3 + 1.42s^2 + 1617s + 714} \quad (5)$$

이때, 플랜트의 주파수 응답은 그림 4와 같다. 주파수 응답을 보면 통과 대역은 약 35rad/sec이다.

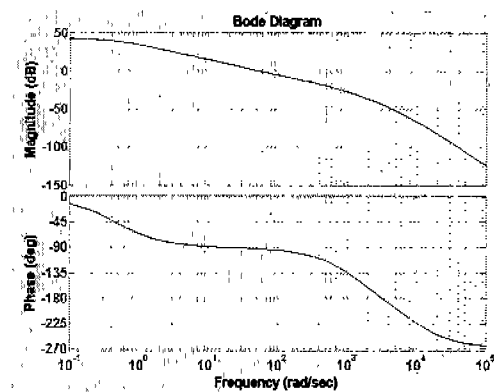


그림 4. 갈바노미터의 개루프 주파수 응답  
Fig. 4. Open loop frequency response

그림 5는 갈바노미터의 개루프 계단 입력응답인데, 정착시간이 약 0.7초 정도임을 알 수 있다.

레이저 마킹 장비를 위한 갈바노미터의 제어기 설계

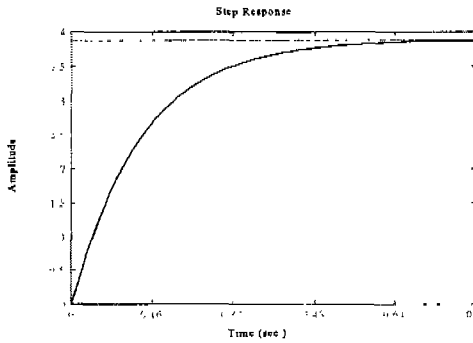


그림 5 갈바노미터 자체의 계단 응답  
Fig. 5. Step response by Galvanometer

제어기로는 산업 현장에서 가장 많이 쓰이는 PID 제어기를 사용하였다. PID 제어기의 기본적인 형태는 다음과 같다.

$$K(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (6)$$

저주파에서 루프이득이 50[dB] 이상이 되고, 이득 여유 및 위상 여유는 각각 20[dB]와 ±60도 이상이 되며, 대역폭은 60[Hz] 이상이 되도록, 제어기의 파라미터 값을 조정하면서 설계하였다. 최종적으로  $K_p, K_i, K_d$ 를

$$K(s) = 9.55(0.7 + \frac{0.7}{s} + 0.0014s)$$

가 되도록 정하였을 때 앞의 조건을 만족시킴을 알 수 있었으며, 이때 제어기가 부착된 개루프의 주파수 응답은 그림 6과 같다. 그림 6을 보면, 통과 대역은 500 [rad/sec] 정도이고 이득 여유는 60[dB] 정도이며 위상 여유는 ±110도 정도임을 알 수 있다.

그림 7은 이때 폐루프 주파수 응답이고, 그림 8은 폐루프 계단 입력 응답이다. 상승 시간은 5 [ms] 정도이고, 정착 시간은 13 [ms] 정도이다. 개루프에 비하여 응답 속도가 약 54배정도 빨라진 것을 알 수 있다. 그리고 오버 슈트도 전혀 없다.

### 2.3 시스템 노이즈

본 논문의 하드웨어를 실험하면서 외래 잡음 중 특히 전원 노이즈와 시스템 내부에 본질적으로 존재하는 진성 잡음원에 의한 노이즈는 A/D 및 D/A변

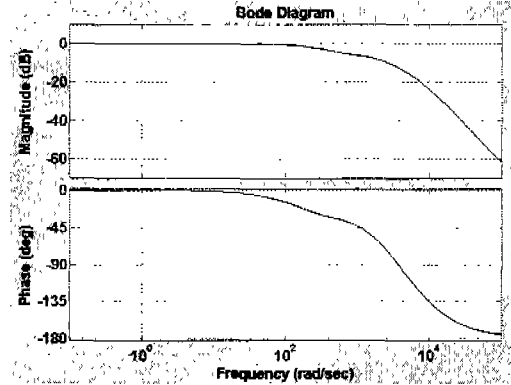


그림 6. 폐루프 주파수 응답  
Fig. 6. Closed loop frequency response

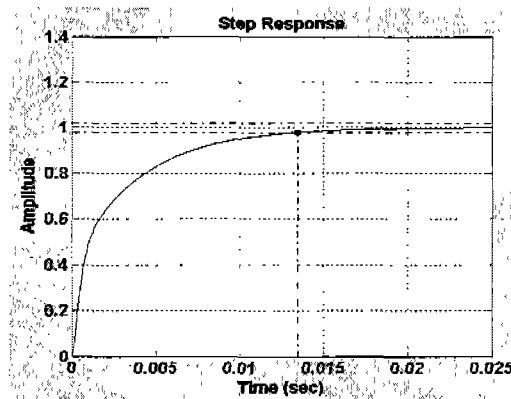


그림 7. 폐루프 계단 응답  
Fig. 7. Closed loop step response

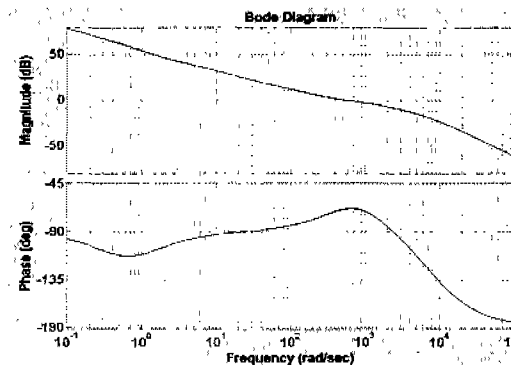


그림 8. 갈바노미터와 제어기의 개루프 주파수 응답  
Fig. 8. open loop frequency response of control & galvanometer

환기와 구동 드라이버에 많은 어려움을 겪게 하였다 [5]. D/A 변환기의 경우 CS와 LDAC 단자에 인가하는 타이밍 사이의 시간이 200[ns] 이상의 시간을 유지해야 정확한 변환 결과치를 출력할 수 있다.

또한, 전원 외래 잡음을 줄이는 것은 매우 중요하며, 특히 도선을 통한 잡음을 안정화시키기 위하여 저역통과 필터와 노치 필터를 DSP칩의 전원 부분과 각 IC 소자 및 도선에 적용하여 잡음을 제거하였다. 또한 전원공급장치의 공급 전원을 안정화시키기 위하여 교류전원과 직류전원 사이에 노이즈 필터를 설치하였다. 회로를 동작시키기 위해서는 반드시 직류전원을 회로에 접속해야 한다. 직류전원은 보통 교류전원을 정류해서 얻고 있으므로 회로의 소자 쪽에서 보면 전원단자-> 직류전원-> 교류전원과 전기적으로 이어지게 된다.

교류전원은 잡음을 많이 포함하고 있고 특히 50[Hz] ~ 60[Hz] 및 고주파성분의 잡음이 존재한다. 전원라인에 포함된 잡음의 영향을 줄이려면 전원의 바이패스 회로를 충분히 낮은 임피던스로 할 필요가 있다. 그리고 마지막으로 마이크로 프로세서 및 TTL 로직 IC의 구동 전원(전압레벨 5V)용 소자는 SMPS 스위칭 소자보다는 REGULATOR 소자를 사용하였다. SMPS 스위칭 전원소자는 최소 42[KHz]로 스위칭하기 때문에 REGULATOR 전원 소자에 비하여 많은 잡음 성분을 가지고 있다. 또한 회로구성에 있어서 입력 부분과 출력 부분의 너무 가까워 정계환 루프를 구성하여 발진 현상이 일어나는 경우가 있으므로, 회로 구성시 이를 잘 검토하여야 한다.

### 3. 실험 및 고찰

그림 9와 10은 노이즈 대책 전후의 그림이다. D/A 변환기의 변환 타이밍이 제품의 사양에서 원하는 타이밍을 만족함을 확인하였으며, 전원 분리와 전원부에 노치 필터와 저역 통과 필터의 사용으로 시스템 보드의 안정화를 통한 잡음의 저감 효과를 확인하였다. 노이즈 제거 전에는 전원의 리플전압이 200[mV]였던 것이 50[mV]로 줄어들었다. 그림 9와 그림 10의 D/A출력은 0[mV], 200[mV], 0[mV]의 순서로 변화하고 있다.

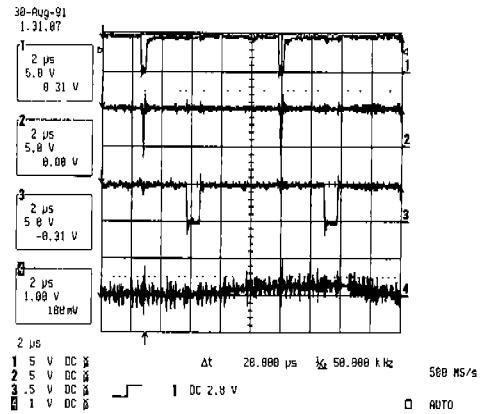


그림 9. 노이즈 대책전의 DA 변환기의 출력신호  
Fig. 9. D/A output signal before noise compensation

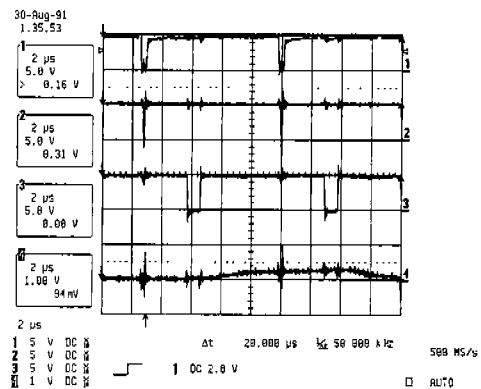


그림 10. 노이즈 제거후의 D/A 변환기의 출력  
1. R/W 타이밍 2. CS 타이밍  
3. LDAC 타이밍 4. DA 변환기 출력  
Fig. 10. D/A output signal after noise reduction  
1. R/W timing 2. CS timing  
3. LDAC timing 4. D/A output signal

그림 11을 보면 제단 입력에 대하여 잘 응답하는 것을 알 수 있을 것이다. 정착 시간은 약 5[ms]정도이며 상승시간은 2[ms] 정도이다. 제어기 출력과 제어 각도 출력이 서로 반대인 이유는 현재의 제어기 출력에 반전증폭기를 설치하여 위상이 반전된 것일 뿐, 차이점은 없다. 제어기 출력신호나 회전각도 출력을 비교하여 보면 시스템이 안정된 상태임을 알 수 있다.

레이저 마킹 장비를 위한 갈바노미터의 제어기 설계

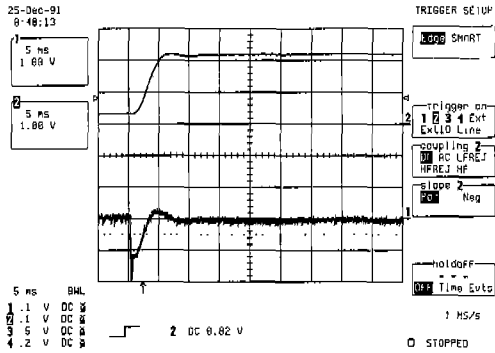


그림 11. 시스템의 갈바노미터의 폐루프 계단응답  
 1. 제어기 출력 2. 회전각도 출력  
 Fig. 11. Closed loop step response of the galvanometer system  
 1. Controller output 2. Position angle output

그림 12와 그림 13은 0.5[V] 스케일에서 영문자 'H'를 출력한 것이다. 글자 출력에 있어서 글자를 그리는 순서(폰트의 패턴)는 매우 중요하다. 그림 12에서 갈바노미터의 X축 위치신호 파형을 보면 원점에 대하여 서로 대칭임을 알 수 있다. 이렇게 위치신호를 서로 원점대칭이 되도록 갈바노미터의 구동신호를 주는 이유는 갈바노미터의 거울에 의한 댐핑을 최소화하기 위해서이다.

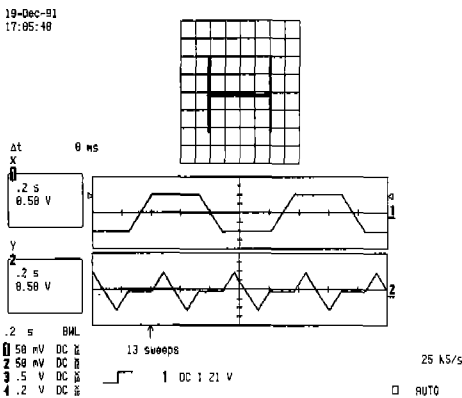


그림 12. 갈바노미터로 H 출력  
 1. X축의 위치신호 2. Y축의 위치신호  
 Fig. 12. Charter 'H' output by Galvanometer  
 1. Position output of X axis 2. Position output of Y axis

만약 갑작스런 구동신호를 주면 그림 13과 같이 올바른 글자를 출력할 수 없게 된다. 물론 제어출력에 PID 제어기를 사용하여 위치신호를 입력받아 출력을 제어하지만, 제어기의 제어 범위를 넘어서는 명령에 대해서는 그림 13과 같은 오차를 포함하는 글자를 출력하게 되는 것이므로, 제어 입력의 범위 안에서 가장 빠른 폰트의 패턴을 그리는 것이 중요하다.

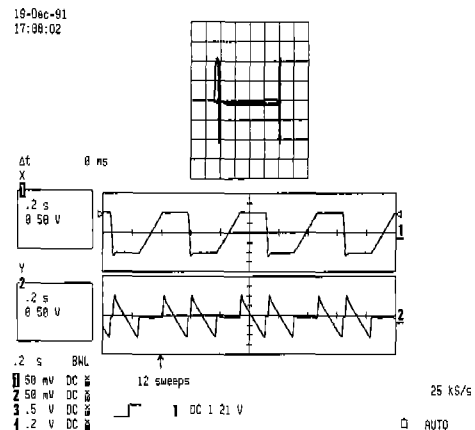


그림 13. 갈바노미터로 H 출력  
 1. X축의 위치신호 2. Y축의 위치신호  
 Fig. 13. Charter 'H' output by Galvanometer  
 1. Position output of X axis 2. Position output of Y axis

4. 결 론

본 논문에서는 갈바노미터의 모델을 연구하고, 이에 기초하여 제어기를 설계하였으며, 이것을 DSP 및 A/D, D/A 변환기 및 검출회로, 구동회로를 이용하여 구현하였다. PCB 보드의 사용과 적절한 필터의 설계, 그리고 전원 분리 등으로 구동 잡음을 현격하게 줄였으며, 따라서 시스템의 안전성이 향상되었다. 실험 결과 상승 시간이 5 [ms] 정도로 선진국에서 개발되고 있는 아날로그 갈바노미터 제어기와 비슷한 성능을 나타내었다. 또한 사용자의 편리성을 위하여 USB 장치를 이용한 컴퓨터 인터페이스를 완성함으로써, 사용자의 입장에서 보다 간편하며, 매우 저렴하고 유용한 기능들을 제공할 수 있게 하였다.

본 연구는 학국과학재단 지정 지역협력 연구센터인 호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

### References

- [1] International Laser Display Association, "ILDA Laser Glossary", Terminology standardization committee, pp.1-35, Nov. ,1993.
- [2] Bruce Rohr, "Testing High Performance Galvanometer Based Optical Scanners", Cambridge Technology, Inc. , pp. 2-4 1992.
- [3] Bruce Rohr, " Speed vs. Accuracy in Galvo-Based Scanners", Cambridge Technology, Inc, pp. 1-2. 1992.
- [4] M. Nirei and Y. Yamamoto, Kobayashi, and T. Maruyama,, "Torque Form Design of Laser Scanning Actuator Based on Statistical Method", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 5, pp. 4242-4244, Sept., 1997.
- [5] Clifford R. Pollock, Fundamentals of optoelectronics, Richard D. Irwin, INC., pp. 453 - 490, 1995.
- [6] Benjamin C. Kuo, Automatic Control Systems, Prentice-Hall, 1991.

### ◇저자소개◇

#### 방승현(方勝鉉)

1977년 6월 19일생, 2001년 호서대 정보제어공학과(공학사), 2003년 호서대 대학원 정보제어공학과 석사 졸업, 현재 (주)유유 '센서 사업부'에서 근무중.

#### 홍선기(洪瑄基)

1965년 1월 24일생, 1987년 서울대 전기공학(학사), 1989년 서울대 대학원 전기공학과(석사), 1993년 서울대 대학원 전기공학과(박사), 1995~현재 호서대학교 정보제어공학과 부교수.

#### 김수길(金秀吉)

1965년 8월 2일생, 1988년 서울대 전기공학과(학사), 1991년 서울대 대학원 전기공학과(석사), 1997년 서울대 대학원 전기공학과(박사), 1997~현재 호서대학교 정보제어공학과 조교수.

#### 강태삼(姜泰三)

1986년 서울대 제어계측공학과(학사), 1988년 서울대 대학원 제어계측공학과(석사), 1992년 서울대 대학원 제어계측공학과(박사), 1994~2001 호서대학교 정보제어공학과 부교수, 2001.8~현재 건국대학교 항공우주공학과 부교수.