

고속/정밀 위치제어시스템의 모델링 및 제어에 관한 연구 A Study on the Modeling and Control of High-Speed/ High-Accuracy Position Control System

신호준* • 박민규** • 윤석찬*** • 한창수****

* 한양대 대학원 기전공학과 ** 삼성테크윈 *** 한양대 대학원 정밀기계공학과 **** 한양대학교 기계공학과

Abstract

This paper presents a dynamic modeling and a sliding mode controller for the high-speed / high-accuracy position control system. Selected target system is the wire bonder head assembly which is used in semiconductor assembly process. This system is a reciprocating one around the pivot point that consists of VCM(voice coil motor) as a actuator and transducer horn as a bonding tool. For the modeling elements, the system is divided into electrical circuit, magnetic circuit and mechanical system. Each system is modeled by using the bond graph method and united into the full system. Two major aims are considered in the design of the controller. The first one is that the horn must track the given reference trajectory. The second one is that the controller must be realizable by using the DSP board. Computer simulation and experimental results show that the designed sliding mode controller provides better performance than the PID controller.

Key Words : High-speed/high-accuracy position control system(고속/정밀 위치제어시스템), Wire bonder(와이어 본더), Sliding mode controller(슬라이딩 모드 제어기), VCM(보이스 코일 모터)

기호설명

B	Flux density [T]
H	Magnetic field intensity [A/m]
J	Moment of inertia [Kg m ²]
L	Inductance [H]
M	Magnetization [A]
R	Resistance [Ohm]

R _g	Magnetic reluctance of air gap [H ⁻¹]
V	Voltage [V]
φ	Magnetic flux [Wb]
θ	Angular measure [radian]
ω	Angular velocity [rad/sec]

1. 서론

제조산업을 이끌고 있는 고속 / 정밀 생산 시스템은 복잡하고, 다양한 요소들로 구성되어 있다. 정밀도나 속도 의 측면에서 보통 사람이 할 수 없는 한계 영역에서의 작업을 수행하기 위해서이다. 따라서, 시스템을 구성하고 있는 부분 요소들에 대한 연구와 그 결합에 대한 연구가 필요하다.

본 논문은 이러한 고속 / 정밀 생산 시스템에 대하여 그 중요 요소인 위치 제어 시스템을 이해하고 구현하고자 한다. 선정된 시스템에 대하여 해석하여 본드 그래프(bond graph)로 모델링(modeling)하고, 제어기(controller)를 설계하여 시스템을 구현하였다. 이를 위해 해석과 모델링이 용이하도록 자기 회로(magnetic circuit), 전기 회로(electric circuit), 기계 시스템(mechanical system)으로 구분하여 정의하였다. 정의된 부분 시스템에 대하여 중요 관심 요소를 선정하여 모델링하고, 부분 시스템들간의 관계를 정의하여 전체 시스템을 완성하였다. 시스템을 구동하기 위한 제어기로 실제 시스템의 비선형성과 외란의 영향을 고려하여 이에 적합한 슬라이딩 모드(sliding mode) 제어기를 설계하였고, 설계된 제어기의 성능을 범용의 PID 제어기와 함께 시뮬레이션(simulation)하여 비교, 검증하였다. 시뮬레이션은 수렴할 때의 속도와 안정성 성능 확인을 위한 시각과 시뮬레이션과 위치 추종 성능 확인을 위한 정현파 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 장치를 구성하고, 설계된 제어기를 적용하여 고속 / 정밀 위치 제어 시스템을 구현하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 시스템 소개

Fig.1 은 와이어 본더 헤드 어셈블리이다. 기존의 구동기에 비해 가볍고 구조가 간단한 VCM (voice coil motor)으로 구동되며, 혼(horn), 혼홀더(horn holder), 암(arm)이 피벗(pivot)을 중심으로 회전 왕복 운동한다. 피벗에는 정밀도에 영향을 미치는 마찰 요소가 있다.⁽¹⁻²⁾

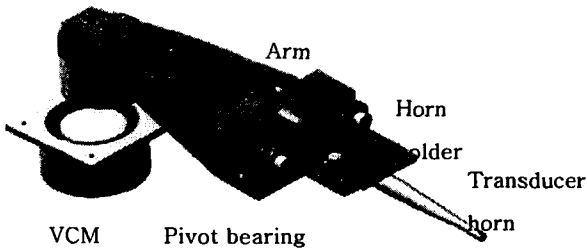


Fig.1 The wire bonder head assembly

Fig.2 는 전체 시스템의 구성도이다. 서로 다른 에너지 영역을 가지는 부분 시스템으로 구분하였다. 구동부와 운동부는 서로 로렌츠 힘(Lorentz force) 관계에 있고, 구동부 내에서 운동자에 해당하는 전기 회로와 고정자에 해당하는 자기 회로는 서로 암페어 법칙(Ampere's law) 관계에 있다.

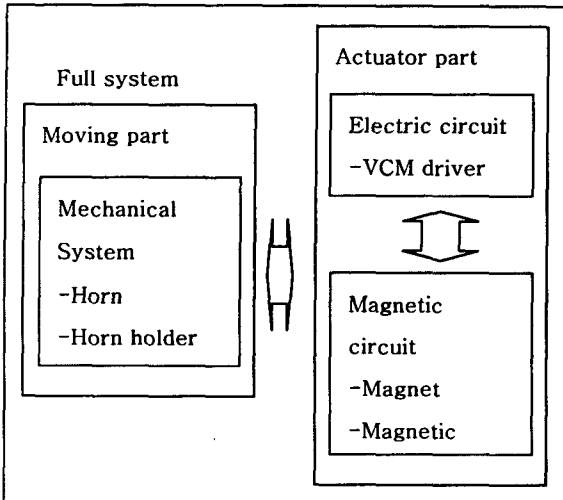


Fig.2 Component diagram of the full System

2.2 시스템 모델링

2.2.1 자기 회로

Fig.6 은 자기 회로의 구성 요소와 다른 부분 시스템과의 관계이다. 자석은 자속(flux)이라는 에너지를 저장하고 있다. 자석 커버와 공극은 각각

재질과 공기에 의한 자속 흐름을 방해하는 자기 저항 요소를 가지게 되며, 이러한 자기 저항 요소에 의해 자석의 동작점(operating point)이 결정되어진다. 모델링에 대하여 다음과 같이 가정하였다.

- 1) 자속 밀도와 자기력은 단면적에 대하여 균일하게 분포한다.
- 2) 자석 커버의 자기 저항 요소는 무시한다.
- 3) 모든 자속은 자기 회로를 따라 흐른다.

따라서, Fig.3 과 같이 모델링 요소를 선정하고, 모델링 하였다. 항목 1 은 자석의 에너지 요소를 나타내고, 항목 2 는 공극의 자기 저항 요소이다.

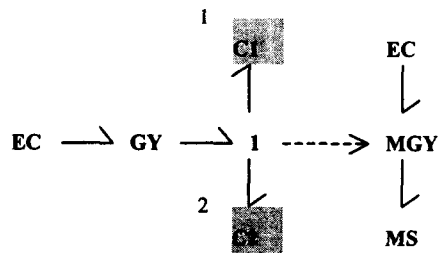


Fig.3 Bond graph modeling of the magnetic circuit

네오다이뮴(Neodymium) 계열 자석의 감자 곡선(demagnetization curve)은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.⁽³⁾

$$B = -\mu_m H + B_r \quad (1)$$

여기서,
$$\mu_m = \frac{B_r}{H_c}$$

모델링을 위해서 $M = H l_m$, $\varphi = B A_m$ 의 상관 관계를 이용하여 감자 곡선 식(1)은

$$\varphi = -\mu_m \frac{A_m}{l_m} M + \varphi_0 \quad (2)$$

여기서, $\varphi_0 = B_r A_m$

와 같이 표현할 수 있다. 공극의 자기 저항은 그 기하학적인 모양과 경험으로 대략적인 계산식을 이끌어 낼 수 있다.⁽⁴⁾

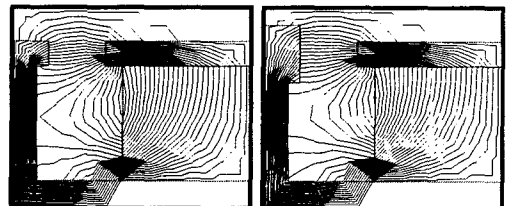


Fig.4 Simulation for magnetic reluctance modeling of the air gap using Quick Field

Fig.4 은 공극의 자기 저항 모델링을 위해 자기 해석 프로그램인, Quick Field 로 시뮬레이션 한 결과이다. 공극의 마주보는 면사이의 영역을 주영역으로 고려했을 때, 같은 모양의 면일 경우엔 주변영역을 흐르는 주변 자속(fringe flux)의 영향을 고려해야 하는 반면, 시스템에 적용되어진 모양일 경우엔 거의 모든 자속이 정의된 주영역속에서 흐르고 있다. 따라서, Fig.5 와 같이 공극의 주영역만을 고려해서 자기저항 모델을 구할 수 있다.

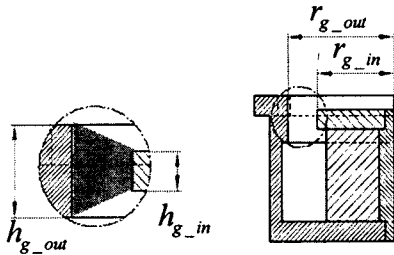


Fig.5 Area definition for magnetic reluctance modeling of the air gap

공극의 자기 저항 모델식은

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \int_{r_{g_in}}^{r_{g_out}} \frac{1}{\mu_0 2\pi r h_g(r)} dr \quad (3)$$

이다. 공극의 자기화과 자속의 관계식은

$$M_g = R_g \phi_g \quad (4)$$

이며, 가정에 의한 $\phi_m = \phi_g$, $M_m = -M_g$ 의 관계로 식(2)과 식(4)로부터

$$\phi_m = \frac{1}{1 - \mu_m \frac{A_m}{l_m} R_g} \Phi_0 \quad M_m = -R_g \phi_m \quad (5)$$

과 같은 자기 회로 동작점을 구할 수 있다.

그 동작점은 Fig.6.과 같이 감자곡선상에서 표현되어진다.

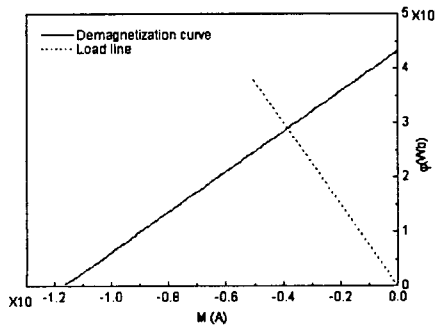


Fig.6. Operating point of the magnetic circuit

2.2.2 전기 회로

VCM 드라이버는 입력 전압에 대하여 저항의 구성으로 증폭된 전압을 VCM 코일에 안정되게 공급하는 역할을 하며, 구동할 때 발생하는 EMF의 영향을 VCM 코일이 받지 않도록 하는 역할을 하게 된다. VCM 코일에 공급된 전압에 비례한 전류가 코일에 흐르게 된다.

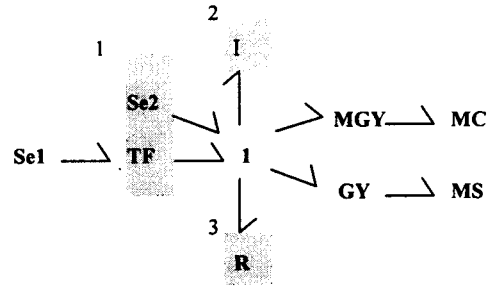


Fig.4 Bond graph modeling of the electric circuit

Fig.4는 전기 회로 모델링으로 항목 1은 VCM 드라이버를, 항목 2와 3은 각각 VCM 코일의 인덕턴스와 저항을 나타낸다.

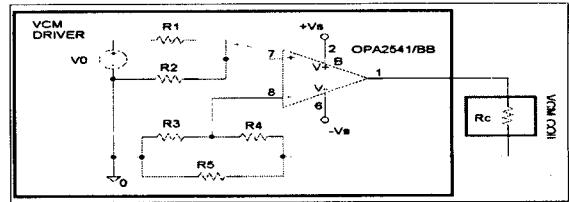


Fig.5 Voltage determinant components of VCM driver

Fig.5는 VCM 드라이버의 여러 회로 구성 요소 중에서 VCM 코일에 인가되는 전압을 결정하는 요소만을 표현하였다. 인가되는 전압은 저항의 관계로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_c = K_v V_0 \quad (6)$$

$$K_v = \frac{(R_3 + R_4) R_5 + R_c}{R_3 + R_4 + R_5} \frac{R_3 + R_4}{R_3} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

VCM 드라이버와 VCM 코일의 파라미터는 계측기로 측정하여 값을 구하였다.

2.2.3 기계 시스템

요소 중에서 혼, 혼홀더, 암은 질량체로서 회전축에 대하여 관성 모멘트(moment of inertia)를

가지고 있으며, 질량 중심에서 중력의 영향을 받고 있다. 피벗 베어링은 회전에 대하여 마찰 요소를 지니고 있다. 모델링에 대하여 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- 1) 혼, 혼홀더, 압은 하나의 강체다.
- 2) 마찰은 미끄럼(slip)과 교착(stick)을 가진다.

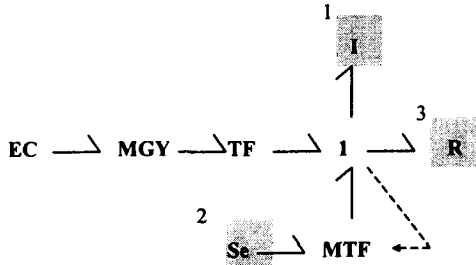


Fig.9 Bond graph modeling of the mechanical system

따라서, Fig.9 과 같이 모델링 하였다. 항목 1 은 회전축에 대한 강체의 관성 모멘트이고, 항목 2 는 강체의 질량 중심에서의 중력의 영향이고, 항목 3 은 피벗 베어링에 있는 마찰 요소이다.

강체의 관성 모멘트와 질량 중심을 계산하기 위해서 3 차원 강체 모델링 해석 프로그램인 Solid Edge 로 모델링하고 해석하였다. 질량은 전자 저울로 측정하여 적용하였다.

마찰 모델에 대하여 Dahl 은 미끄럼에 관해 수학적 모델을 제시하였다.⁽⁵⁾ Jang 은 Dahl 의 모델을 수정 보완하여 교착과 슬립, 두 가지 형상을 표현하였다.⁽⁶⁾ 수정된 Dahl 모델식은

$$F_f(\omega) = \text{sign}(\omega)(\lambda_0 + \lambda_1 e(\omega)) + \lambda_2 \omega \quad (7)$$

여기서, $e(\omega) = e^{-(\omega/d_s)}$

$\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$: 임의의 양의 상수

d_s : 스트리벡(stribeck) 효과를 가정한 속도 영역으로 표현된다.

Fig.10 와 같이 자유 운동 실험과 비교하여 파라미터 값을 획득하였다.

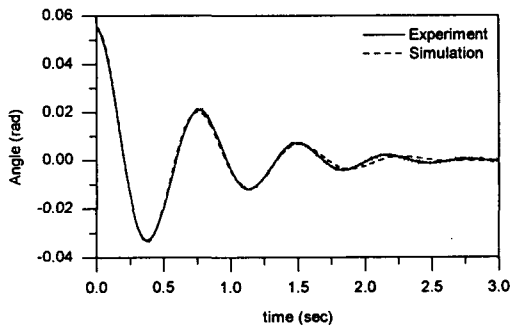


Fig.10 Free motion experiment and simulation with the friction parameters

2.3 전체 시스템 모델링

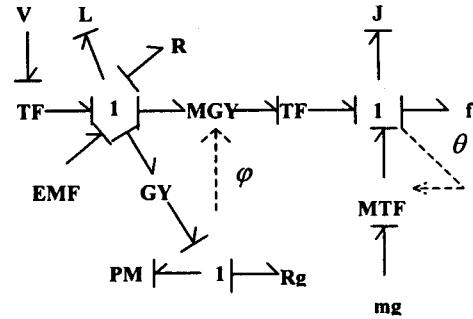


Fig.11. Bond graph modeling of the full system

각 부분 시스템을 로렌츠 힘 관계와 암페어 법칙을 이용해서 하나로 통합해서, 각각의 모델링 요소와 causality 를 적용하였다. 상태 변수를

$$x_1 = \lambda = Li, \quad x_2 = \theta, \quad x_3 = h = J\dot{\theta} \quad (8)$$

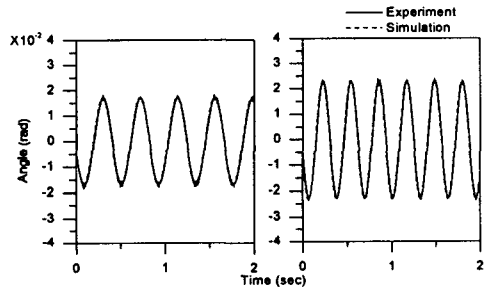
로 정의하고, 상태 방정식을 유도하였다.

$$\dot{x}_1 = K_v V_0 - \frac{R}{L} x_1$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{J} x_3$$

$$\dot{x}_3 = \frac{I_m d_s}{A_s L} \left(\frac{P}{L} x_1 + Q \right) x_1 - mg d_s \sin(x_2) - \frac{b}{J} x_3 - f \left(\frac{1}{J} x_3 \right) \quad (9)$$

여기서, $\left(P = -\frac{\mu_m A_m N_c}{I_m + \mu_m A_m R_s}, \quad Q = \frac{I_m}{I_m + \mu_m A_m R_s} \phi_0 \right)$



(a) sin0.01V,10rad/sec (b) sin0.03V,15rad/sec
Fig.12 Comparison between simulation model and experiment model

Fig.12 는 시스템 모델링을 검증하기 위해서 실험과 비교한 결과이다. 제어기를 적용하기 이전 이므로, 출력 각도가 회전축에서 $\pm 0.02\text{rad}$ 정도가 되도록 입력 전압의 크기와 속도를 조절하였다. 비교 결과 시스템 모델링이 실제 시스템을 잘 표현하고 있음을 확인하였다.

3. 제어기 설계

VCM 드라이버에 입력되는 전압을 제어하여 암의 회전 각도가 원하는 각도 입력을 추종하도록 제어한다. 제어기를 설계하기 위한 슬라이딩 방정식은

$$e = y - y_d = x_2 - \dot{x}_d \quad (10)$$

이며, 제어 입력 변수가 나올 때까지 시간 미분을 하였다.

$$\begin{aligned} \ddot{e} &= \frac{1}{J} \ddot{x}_3 - \ddot{x}_d \\ &= \frac{1}{J} \left[\frac{l_{cg} d_1}{A_g L} \left(\frac{2P}{L} x_1 + Q \right) \left(K_v V_0 - \frac{R}{L} x_1 \right) - \frac{mg d_2}{J} \cos(x_2) x_3 \right. \\ &\quad \left. - \frac{b}{J} \left\{ \frac{l_{cg} d_1}{A_g L} \left(\frac{P}{L} x_1 + Q \right) x_1 - mg d_2 \sin(x_2) - \frac{b}{J} x_3 - f \left(\frac{1}{J} x_3 \right) \right\} \right. \\ &\quad \left. - \dot{f} \left(\frac{x_3}{J} \right) \right] - \ddot{x}_d \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)과 같이 슬라이딩 방정식의 3차 시간 미분에서 제어 입력 변수가 나왔으므로 $n=3$ 이고, 이다. 슬라이딩 조건식에 대입하고, 채터링 현상을 고려하여 제어 입력 변수에 대해 정리하면 슬라이딩 오차 평면 방정식은

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 e = \ddot{e} + 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e \quad (12)$$

이다. 슬라이딩 조건식에 대입하고, 채터링 현상을 고려하여 제어 입력 변수에 대해 정리하면

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{1}{K_v} \left[\frac{R}{L} x_1 + \frac{A_g L^2}{l_{cg} d_1 (2P x_1 + LQ)} \left\{ \frac{mg d_2}{J} \cos(x_2) x_3 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{b}{J} \left\{ \frac{l_{cg} d_1}{A_g L} \left(\frac{P}{L} x_1 + Q \right) x_1 - mg d_2 \sin(x_2) - \frac{b}{J} x_3 - f \left(\frac{1}{J} x_3 \right) \right\} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \dot{f} \left(\frac{1}{J} x_3 \right) + J \left[\ddot{x}_d - 2\lambda \left[\frac{1}{J} \left\{ \frac{l_{cg} d_1}{A_g L} \left(\frac{P}{L} x_1 + Q \right) x_1 - mg d_2 \sin(x_2) \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. \left. - \frac{b}{J} x_3 - f \left(\frac{1}{J} x_3 \right) \right\} - \dot{x}_d \right] - \lambda^2 \left(\frac{1}{J} x_3 - \dot{x}_d \right) - \eta \text{sat} \left(\frac{s}{\Phi} \right) \right] \right\} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} s &= \frac{1}{J} \left\{ \frac{l_{cg} d_1}{A_g L} \left(\frac{P}{L} x_1 + Q \right) x_1 - mg d_2 \sin(x_2) - \frac{b}{J} x_3 - f \left(\frac{1}{J} x_3 \right) \right\} \\ &\quad - \dot{x}_d + 2\lambda \left(\frac{1}{J} x_3 - \dot{x}_d \right) + \lambda^2 (x_2 - \dot{x}_d) \end{aligned}$$

이다.

4. 시뮬레이션

시스템 모델식에 설계된 제어기와 범용의 PID

제어기를 적용하였다. 입력 값은 회전축에서의 각도이며 팔호 안의 값은 혼 끝의 위치 값이다.

4.1 사각파 시뮬레이션

위치 변화에 대하여 안정된 수렴과 수렴 속도를 평가하였다.

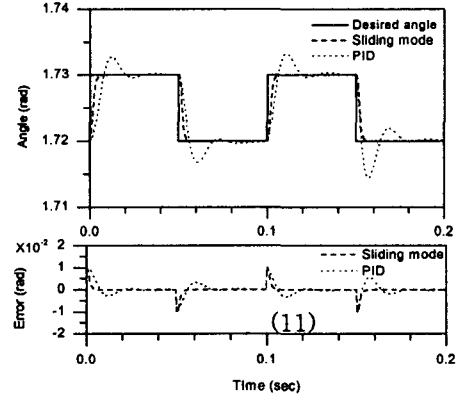


Fig.13 Comparison of the sliding mode vs the PID (3)

Fig.13 은 위치 변화가 0.01rad(1mm)인 입력에 대한 결과로 0.005 초안에 오차 범위 내로 안정되게 입력 신호를 추종한다. 반면에 PID 제어기는 불안정하게 수렴하고 있다.

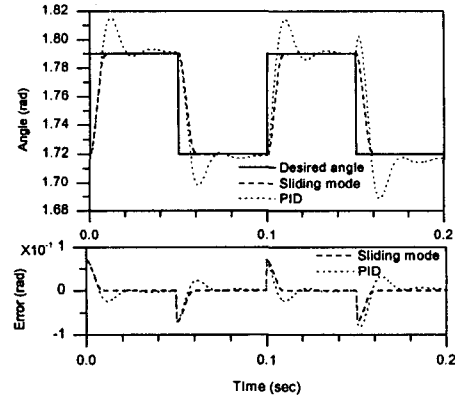


Fig.14 Comparison of the sliding mode vs the PID (4)

Fig.14 은 위치 변화가 0.07rad(7mm)인 입력에 대한 결과이다. 설계된 제어기는 약 0.01 초안에 오차 범위 내로 입력 신호를 추종하며, 안정된 수렴 곡선을 보여준다. 반면에 PID 제어기는 더욱 불안정한 수렴을 보여준다.

4.2 정현파 시뮬레이션

시스템의 위치 추종 능력을 평가하였다

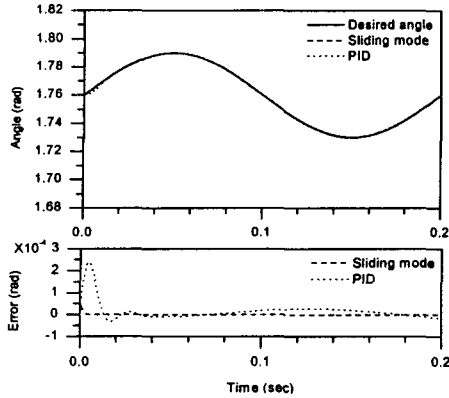


Fig.15 Comparison of the sliding mode vs. the PID (1)

Fig.15 는 5Hz 의 입력에 대한 결과이다. 설계된 제어기는 0.01 초 내에서 입력 신호를 추종하기 시작해서 약 $\pm 0.00002\text{rad}(\pm 2\mu\text{m})$ 내의 오차를 유지하며 잘 추종하고 있다. PID 제어기보다 적은 오차를 유지하고 있다.

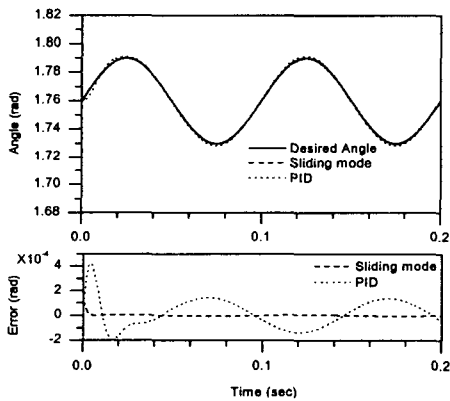


Fig.16 Comparison of the sliding mode vs. the PID (2)

Fig.16 은 10Hz 의 입력에 대한 결과이다. 설계된 제어기는 약 $\pm 0.00005\text{rad}(\pm 5\mu\text{m})$ 내의 오차를 유지하며 잘 추종하고 있다. 반면에 PID 제어기는 오차가 크게 증가하였다.

5. 실험

5.1 실험 장치 구성

설계한 제어기를 실제 실험 장치에 적용하여 성능을 확인하기 위해서 Fig.17 와 같은 실험 장

치를 구성하였다. 고속 / 정밀 위치 제어 시스템을 실시간 제어하기 위해 DSP 보드(Digital Signal Processor board)를 이용하며, 보드, VCM 드라이버, 근접 센서, 파워 서플라이 등을 연결하는 인터페이스(Interface)를 구성한다. 또, Simulink 로 작성된 제어기를 Real time workshop 을 이용하여 DSP 칩에 다운로드(down loading)하여 시스템을 구동하게 되며, 센서로 측정된 위치 정보는 DSP 의 제어기로 연결된다.

사용된 컴퓨터의 CPU 는 Intel 사의 P-II 400MHz, DSP 보드는 dSPACE 사의 DS1102 모델, DSP 칩은 TI 사의 TMS320C31 를 사용하여 최대 샘플링 타임이 33.33ns 로 실시간 연산이 가능하다. 근접 위치 센서는 측정 분해능이 $2\mu\text{m}$ 인 KEYENCE 사의 AH-110 모델을 사용하였다.

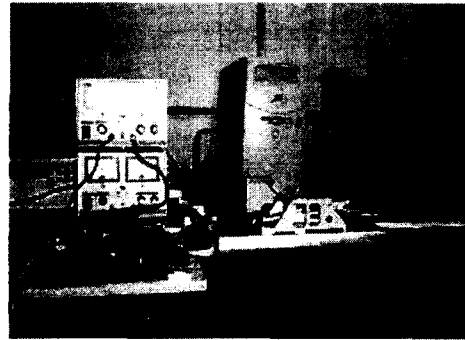


Fig.17 The experiment setup

5.2 실험 장치를 통한 검증

시뮬레이션과 동일한 내용으로 실험하여 모델링의 타당성과 제어기의 성능을 확인하였다. 먼저 위치 추종 확인을 위하여 Fig.18 과 같이 정현파 추종 실험을 하였다. 빠르고 안정된 위치 수렴을 확인하기 위해서 Fig.19 과 같이 사각파 추종 실험을 하였다. 각 실험은 입력 전원의 안정성과 DSP 보드의 출력 전압을 고려하여 위치 변화의 크기와 속도를 정하였다. 실험 결과로 약 $\pm 0.0002\text{rad}(\pm 20\mu\text{m})$ 의 오차를 확인하였다. 이 오차는 실제 센서의 분해능과 약 $1\mu\text{m}$ 의 센서 오차에 의한 것으로 추측되며, 센서 오차를 적용하여 시뮬레이션을 한 결과 약 $\pm 0.00015\text{rad}(\pm 15\mu\text{m})$ 의 오차를 확인하였다. 따라서, 설계된 제어기는 $\pm 0.0001\text{rad}(\pm 10\mu\text{m})$ 의 오차 범위 내에서 시스템을 구동시킬 수 있음을 확인하였다.

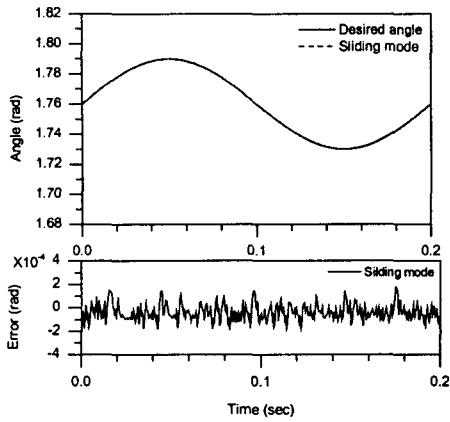


Fig.18 Experimental result with the sliding mode controller (1)

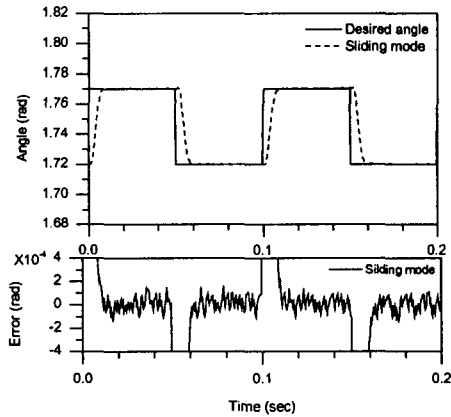


Fig.19 Experimental result with the sliding mode controller (2)

6. 결론

본 논문은 반도체 제조 공정 중 와이어 본딩 (Wire Bonding) 공정에서 사용되어 지고 있는 와이어 본더(Wire Bonder)에 대하여 알아 보았다. 먼저 시스템의 자기적 회로와 전기적 회로 그리고 기계적 시스템을 살펴보았다.

- (1)구성 시스템을 통하여 전체시스템에 대한 본드 그래프 모델을 구성.
- (2)본드그래프 모델을 근거로 시스템의 운동방정식을 비교적 용이하게 유도.
- (3)제어기는 비선형성과 외란의 영향을 고려하여 슬라이딩 모드 제어기를 설계.
- (4)슬라이딩 모드 제어기와 범용의 PID 제어기를 함께 시뮬레이션.
- (5)시스템 모델링과 설계된 제어기의 타당성을 검증.

본 연구의 추후과제로 지금의 대상 시스템은 와이어 본더 내에서 수직 왕복 운동을 하는 와이어 본더 헤드(Wire Bonder Head Assembly)에 대한 것이므로 대상시스템의 확장과 더불어 확장된 시스템을 위한 해석이 필요 할 것이다.

참고 문헌

1. H. S. Chang, S. E. Baek, and Y. K. Byun, "Modeling of Pivot Friction using Relay Function and Estimation of its Frictional Parameters," Proceedings of the American Control Conference, San Diego, pp.3784-3789, 1999
2. H. S. Lee, "Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed/High-Accuracy Positioning Systems," Graduate Division of the Univ. of California at Berkeley, 1994
3. G. A. Kyriazis, "Prediction of Magnetic Field and Force in Rare-Earth Magnet Electromagnetic Shakers Using Magnetic Circuit Concepts," pp.597-606, 1999
4. Herbert A. Leupold, "Approaches to Permanent Magnet Circuit Design," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.29, No.6, pp.2341-2346, 1993
5. Dahl, P. R., "Solid Friction Model," AFO 4695-C-0158, Aerospace Corporation, El Segundo, CA, 1968
6. J. H. Jang, H. C. Chae and C. S. Han, "Dynamic Modeling and Simulation of Friction Phenomenon," 추계학술대회논문집 A 대한기계학회, pp.732-737, 1996
7. S. A. Nasar, "Electromechanics and Electric Machines," J. Wiley, 1983
8. Dean C. Karnopp, "System Dynamics," J. Wiley, 1990