

고속/정밀 위치 제어 시스템의 강인한 제어게인 선정에 관한 연구

신호준* • 윤석찬** • 장진희*** • 한창수****

A Study on the Robust Control Gain Selection Scheme of a High-Speed/High-Accuracy Position Control System

Ho-Joon Shin*, Seok-Chan Yun**, Jin-Hee Jang*** and Chang-Soo Han****

Key Words : Taguchi Method(다구찌 방법), Bond Graph Modeling(본드 그래프 모델링), PID Controller(PID 제어), Orthogonal Array(직교배열표), Wire Bonder Head Assembly(와이어 본더 헤드 어셈블리)

Abstract

This paper presents a dynamic modeling and a robust PID controller design process for the wire bonder head assembly. For the modeling elements, the system is divided into electrical system, magnetic system, and mechanical system. Each system is modeled by using the bond graph method. The PID controller is used for high speed/high accuracy position control of the wire bonder assembly. The Taguchi method is used to evaluate the more robust PID gain combinations. This study makes use of an L18 array with three parameters varied on three levels. Computer simulations and experimental results show that the designed PID controller provides more improved signal to noise ratio and reduced sensitivity than the conventional PID controller.

기호설명

A_m	Area of the magnet [m^2]
B	Flux density [T]
H	Magnetic field intensity [A/m]
i	Current[A]
J	Moment of inertia [Kg m^2]
L	Inductance [H]
l_g	Length of the air gap[m]
M	Magnetization [A]
R	Resistance [Ohm]
V	Voltage [V]
μ_0	Permeability of air[H/m]
φ	Magnetic flux [Wb]
θ	Angular measure [radian]
ω	Angular velocity [rad/sec]

1. 서론

본 논문의 목적은 고속 / 정밀 생산 시스템의 중요한 구성 요소인 위치 제어 시스템의 각 요소들을 이해하고, 고속 / 정밀 위치제어가 가능한 제어 시스템을 구현하는 데 있다. 이를 위해 실제 산업 현장에서 상기의 목적을 가지고 사용 되어지고 있는 와이어 본더 헤드 어셈블리(wire bonder head assembly) 시스템을 선정하였다. 이 시스템은 반도체 제조 과정 중에 와이어를 접착하는 공정에 쓰여지는 시스템으로, VCM(voice coil motor) 구동기를 이용하여 혼(horn)을 회전축 주위로 왕복운동을 시킴으로써 작업 도구를 위치시키는 고속 / 정밀 위치 제어 시스템이다. 이 시스템은 전기, 자기, 기계 등의 서로 다른 물리 영역들의 구성 요소들로 복합적으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 여러 에너지 요소를 가지는 복합 시스템을 다룰 수 있도록 고안된 모델링 방법인 본드 그래프 모델링(bond graph modeling)⁽¹⁾ 기법을 이용하여 해석하였다. 시스템의 해석과 모델링의 용이성을 위하여 먼저 연관된 구성 요소들을

* 한양대 대학원 기전공학과

** 한양대 BK21 기계사업단

*** 대우자동차 기술연구소

**** 한양대 기계공학과

가지는 부분 시스템으로 구분하여 정의하였고, 부분 시스템들 사이의 관계를 정의하였다. 제어기는 산업현장에서 가장 널리 사용되고 있는 PID 제어기를 사용하였다. PID 제어기는 구조가 간단하여, 익숙하고, 신뢰성이 있다. 그러나 PID 제어기 이득을 최적으로 조정하는 문제는 아직까지도 많은 분야에서 연구되고 있다. Ferrell⁽²⁾은 PID 제어기가 실제로 사용되고 있는 산업현장에서 제어이득 조정을 최적으로 수행하지 못한 제어이득은 산업공정에 손실을 가져온다고 보았다. Ziegler - Nichols 방법⁽³⁾은 방법이 간단하고 플랜트의 수학적 모델을 알 수 없을 때 편리하기 때문에 아직까지 많이 사용되고 있다. 그러나 실제 플랜트의 작동조건이 바뀌면 제어이득을 다시 조정해야 한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 다구찌 방법(Taguchi method)⁽⁴⁾⁽⁵⁾을 이용하여 대상 시스템에 적합한 제어 이득을 구하고 이를 입력의 변화에도 강인한 제어기의 이득으로 사용하고자 한다.

본 논문의 제 2 장에서는 본드 그래프 모델링 구성에 대하여 언급하며, 제 3 장에서는 다구찌 방법을 이용하여 정현과 입력의 변화에 허용 오차 범위에서 작업을 할 수 있는 최적의 PID 제어 이득 조정을 하며, 제 4 장에서는 실험장치 구성 및 검증을, 마지막으로 제 5 장에서는 결론을 기술한다.

2. 시스템 모델링

와이어 본더 헤드 어셈블리(wire bonder head assembly)에 대하여 구동부인 VCM 과 VCM 드라이버(driver), 기구부로 나누어 시스템에 대하여 원리를 이해하고 본드 그래프를 이용하여 모델링 하였다. 시스템을 작동 영역별로 부분 시스템으로 나누어 전기시스템과 자기시스템, 그리고 기계시스템에 대하여 모델링 하였고, 이들을 연결시켜 전체시스템 모델링을 완성하였다.

2.1 시스템 개요

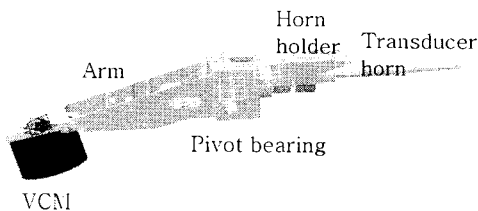


Fig.1 System Components

와이어 본더 헤드 어셈블리는 Fig 1 과 같으며 리니어 모터(linear motor)로 이루어진 고속/정밀 XY-테이블(table) 위에 장착되고, 피봇(pivot)을 중심으로 수직 왕복 운동을 하며 작업을 수행한다. 와이어 본더이란 반도체 칩(chip)상의 본딩 패드(bonding pad)와 리드 프레임(lead frame)의 니어 리드 팁(near lead tip)을 급세선(혹은 알루미늄 세선)으로 접합 시켜 주는 과정이다.

본 시스템은 초음파 본딩에 사용되어지는 와이어 본더 헤드 어셈블리이다. 구동기로는 가격이 저렴하면서 높은 정밀도(high resolution)가 요구되며 구동범위가 수 mm 이상으로 구동할 수 있는 VCM 이 장착되어져 있다. 운동부의 위치 정보를 측정하기 위해서는 근접 위치 센서(proximity sensor)가 사용된다. 수직 왕복 운동의 범위는 약 7mm 이며, 반복 정밀도는 $\pm 5\mu m$, 최대 운동 범위에 대하여 0.01 초 내에 안정된 수렴을 목표로 하고 있다.

또한, 전체 시스템(full system)은 크게 전기 시스템 (electric system)과 자기 시스템(magnetic system) 그리고 기계 시스템(mechanical system)으로 크게 세 개의 시스템으로 구성 되어 있다. 전기 시스템과 자기 시스템은 기계 시스템을 운동하게 하는 구동부(actuator part)라고 정의 할 수 있다. 기계 시스템은 운동부(moving part)를 구성하고 있다. VCM 드라이버인 전기 시스템은 외부의 입력 전압을 안정되게 VCM 에 인가하도록 되어 있으며, 자기 시스템인 VCM 은 기계 시스템과 같이 구성되어 기계 시스템이 수직 운동을 하는 역할을 한다. VCM 드라이버와 VCM 사이에는 암페어의 법칙(Ampere's law) 이 성립되고, VCM 드라이버와 VCM 은 운동부인 기계 시스템은 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의해서 정의 된다.

2.2 부분 시스템 모델링

전체 시스템을 크게 전기 시스템 그리고 자기 시스템과 기계 시스템으로 나누어서 각 시스템에 대하여 모델링을 하였다.

2.2.1 전기 시스템(Electric system)

VCM 드라이버는 입력 전압에 대하여 저항들의 비로 증폭된 전압을 VCM 코일에 안정되게 공급하는 역할을 하며, 구동할 때 발생하는 EMF(Electro Motive Force)의 영향을 VCM 코일이 받지 않도록 하는 역할을 하게 된다. VCM 코일에 공급된 전압에 비례한 전류가 코일에 흐르게 된다.

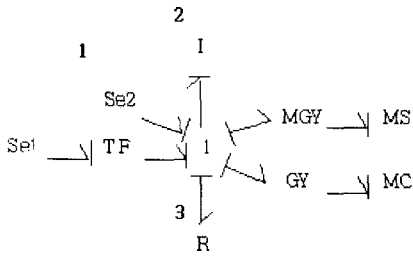


Fig.2 Bond graph modeling of the electric circuit

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

VCM 드라이버의 여러 회로 구성 요소 중에서 VCM 코일에 인가되는 전압을 결정하는 저항 요소만을 본드 선도의 R 요소로 표현하였다. 인가되는 전압은 저항들의 관계로 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁸⁾

$$V_i = K_i V_o \quad (1)$$

2.2.2 자기 시스템(Magnetic system)

Fig.3 은 자기 시스템의 구성 요소와 다른 부분 시스템과의 관계로 나타난 결과이다. 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 결정 되어진다. 따라서, Fig.3 과 같이 모델링 요소를 선정하고, 모델링 하였다. 항목 1 은 자석의 에너지 요소를 나타내고, 항목 2 는 공극의 자기 저항 요소이다.

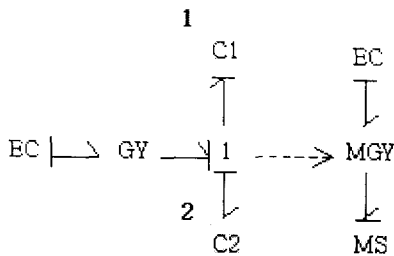


Fig.3 Bond graph modeling of the magnetic circuit

Fig.4 는 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 주변 영역을 흐르는 주변 자속(fringe flux)의

영향을 고려해야 하는 반면, 시스템에 적용되어진 모양일 경우에는 거의 모든 자속이 정의된 주영역속에서 흐르고 있다. 이를 근거로, Fig.5 와 같이 공극의 주영역만을 고려해서 자기 저항 모델을 구할 수 있다.

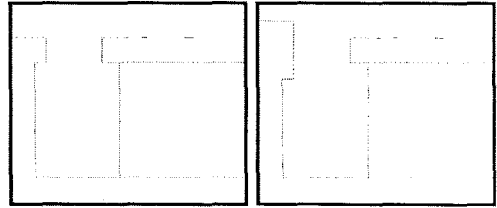


Fig.4 Simulation for magnetic reluctance modeling of the air gap using Quick Field

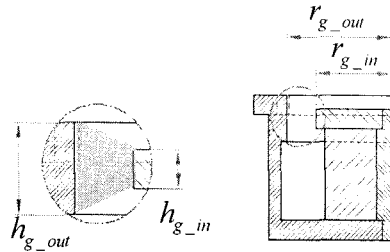


Fig.5 Area definition for the magnetic reluctance modeling of the air gap

공극의 자기 저항 모델은

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

이다. 공극의 자기화화 자속의 관계식은

$$M_g = R_g \phi_g \quad (3)$$

이며, $\phi_m = \phi_g$, $M_m = -M_g$ 의 관계로부터 네오다임(Neodymium) 계열 자석의 감자 곡선(demagnetization curve) 식⁽⁸⁾과 식(3)으로부터

$$\phi_m = \frac{1}{1 - \mu_m \frac{A_m}{l_m} R_g} \phi_0 \quad M_m = -R_g \phi_m \quad (4)$$

와 같은 자기 시스템의 동작점을 구할 수 있다.

2.2.3 기계 시스템(Mechanical system)

요소 중에서 혼, 혼 홀더, 압은 질량체로서 회전축에 대하여 관성 모멘트(moment of inertia)를

가지고 있으며, 질량 중심에서 중력의 영향을 받고 있다. 피봇 베어링은 회전에 대하여 마찰 요소를 포함하고 있다.

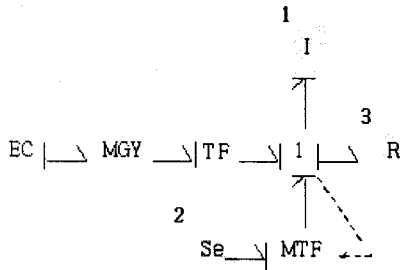


Fig.6 Bond graph modeling of the mechanical system

따라서, 작동 기구부는 Fig.6 과 같이 모델링 되어질 수 있다. 항목 1 은 회전축에 대한 강체의 관성 모멘트이고, 항목 2 는 강체의 질량 중심에서의 중력의 영향이고, 항목 3 은 피봇 베어링에 있는 마찰 요소이다.

그리고, 마찰 모델에 있어서 Dahl 은 미끄럼에 관하여 수학적 모델을 제시하였다.⁽⁶⁾ Jang 은 Dahl 의 모델을 수정 보완하여 교착과 슬립, 두 가지 현상을 표현하였다.⁽⁷⁾ 수정된 Dahl 모델식은

$$F_t(\omega) = \text{sign}(\omega)(\lambda_0 + \lambda_1 e(\omega)) + \lambda_2 \omega \quad (5)$$

여기서 $e(\omega) = e^{-\omega/d_1}$

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

d_1 : 스트리백(stribeck) 효과를 가정한 속도 영역으로 표현된다.

식(5)의 파라미터는 본더를 피봇축에 대하여 자유운동 회전 실험을 한 후 시뮬레이션 값과 비교하여 구하였다.⁽⁸⁾

2.3 전체 시스템 모델링

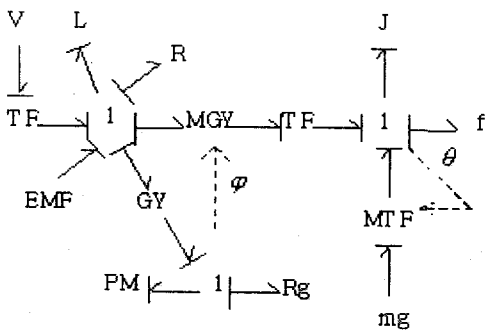


Fig.7 Bond graph modeling of the full system

Fig.7 은 각 부분 시스템을 로렌츠 힘 관계와 암페어 법칙을 이용하여 하나로 통합 후, 각각의 모델링 요소와 causality 를 적용한 본드 선도이다. 상태 변수를

$$x_1 = \lambda = Li, \quad x_2 = \theta, \quad x_3 = h = J\dot{\theta} \quad (6)$$

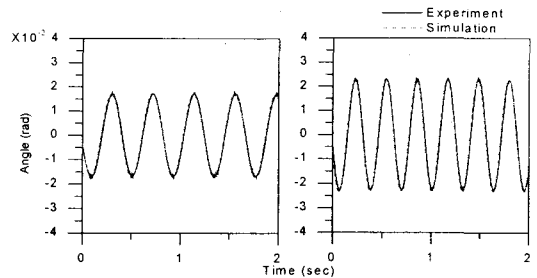
로 정의하고, 다음과 같이 상태 방정식을 유도하였다.

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

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

$$\dot{x}_3 = \frac{l_{se} d_1}{A_s L} \left(\frac{P}{L} x_1 + Q \right) x_1 - mg d_s \sin(x_2) - \frac{b}{J} x_3 - f \left(\frac{1}{J} x_3 \right)$$

(7)



(a) sin0.01V,10rad/sec (b) sin0.03V,15rad/sec

Fig.8 Comparison between simulation model and experiment

Fig.8 은 시스템 모델링 결과를 검증하기 위하여 실험과 비교한 결과이다. 제어기를 적용하기 이전이므로, 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. 다구찌 방법을 이용한 PID 제어

본 논문에서는 다구찌 방법을 이용하였다. VCM 에 대한 제어이득을 조정하였다. 다구찌 방법에 의거한 실험계획법의 각 단계는 다음과 같다.

와이어 본더헤드 어셈블리 이송속도가 저속에서 고속으로 변하면서 점점 혼 끝단의 진동이 심해지고 추종오차가 증가하는 것이 문제이며, 다구찌 방법을 이용한 제어 이득 선정을 통하여 해결하고자 한다. 또한 목표 특성치는 위치오차로서 정의되며, 이는 망소 특성치에

해당한다. 변수는 조정 가능 변수와 조정 불가능 변수로 나뉘게 되는데, 조정 가능 변수로서 개인 값을 선정 하였다.

조정 가능 변수가 많은 경우, 변수를 하나씩 변경시키면서 목표 특성치가 어떻게 변하는지를 실험으로 확인하려면, 수많은 조합에 대하여 실험을 해야 하는 부담이 있다. 따라서 최소의 실험을 위하여 인자들간의 교호작용이 균등하게 배치된 직교 배열표 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 를 이용하였으며, 각 특성치에 미치는 민감도를 파악할 수 있다.

S/N 비를 최대화 할 수 있는 조정가능변수, 즉, 제어이득을 시뮬레이션(simulation)과 실험을 통하여 비교하고자 한다. 이러한 제어 이득은 기계의 조정 불가능 변수(noise factor)인 혼의 이송 속도 변화에도 불구하고, 견실하게 변위오차, 제어오차 및 그 변화량을 최소로 유지하게 만들어야 한다.

3.1 직교배열표 선정

직교배열표는 Table 1 과 같이 인자들간의 교호작용이 균등하게 배치된 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ array 를 사용하였다.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

3.2 시뮬레이션을 이용한 다구찌 방법

다구찌 방법을 적용하기 위하여 먼저 상용 프로그램인 Matlab 을 이용한 시뮬레이션을 통하여 제어 이득을 구하였다. 먼저 PID 의 개인(Gain)은 여러 번의 조정 후 적절하다고 선정되는 값을 선정하여, Table 2 와 같이 인자의 선정은 각 개인 값의 $\pm 10\%$ 로 선정하였다.

Table 2 Control Factor

	-10%	Nominal	+10%
P	270	300	330
I	9000	10000	11000
D	0.3645	0.405	0.4455

$L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표는 인자(Factor)가 2 수준 인자 1 개와 3 수준 인자 7 개로 구성되어있다. 그 중에서 2 수준 인자를 제외하고 3 수준 인자의 배치를 이용하여 다구찌 방법을 적용하였다.

본 논문은 혼이 이송시에 나타나는 오차(error)의 최대치를 최소화하는 것을 목표로 했기 때문에 망소 특성(Smaller the Better)이며, 식(7)과 같이 표현되어진다.

$$SN_s = -10 \log \frac{1}{n} (\sum y_i^2) \quad (7)$$

오차에 대한 최대값을 이용하여 S/N 비와 오차의 평균(β)을 계산하면 Table 3 과 같이 나타난다.

Table 3 Signal to Noise Ratio and Sensitivity

	Predicted	
	S/N[dB]	Error [μ rad]
Initial	47.94	63.272
Optimal	50.01	49.306
Gain	2.08	-13.967

정현과 입력에 있어서는 선정된 개인 값에 비하여 2.08dB 의 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 오차의 평균 또한 13.967 [μ rad] 정도의 감소 효과를 얻을 수 있었다. Fig 9 에서와 같이 P 개인은 3 수준이, I 개인은 1 수준이 그리고 D 개인은 3 수준의 조합으로 S/N 비가 높음을 알 수 있다.

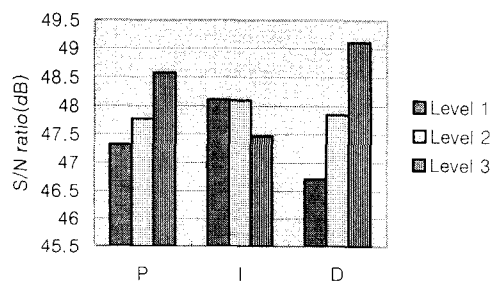


Fig.9 Signal to Noise Ratio

실험에 앞서 위에서 다구찌 방법을 이용하여 얻은 계인 값에 다시 한번 다구찌 방법을 적용함으로써 더 정확한 계인 값을 찾을 수 있다. 인자는 Fig.9 에서 S/N 비가 높은 인자를 선정하여, 선정된 인자에 $\pm 10\%$ 로 선정하였다. S/N 비와 민감도는 선정된 인자는 Table 4 와 같이 나타난다.

Table 4 Control Factor

	-10%	Nominal	+10%
P	297	330	363
I	8100	9000	9900
D	0.401	0.4455	0.4901

식(7)을 이용하여 S/N 비와 오차의 평균(β)을 계산하면 Table 5 와 같이 나타난다.

Table 5 Signal to Noise Ratio and Sensitivity

	Predicted	
	S/N[dB]	Error[μ rad]
Initial	49.71	50.239
Optimal	51.63	39.872
Gain	1.92	-10.367

정현과 입력에 관하여 다구찌 방법을 2 차로 적용한 결과 1.92dB 의 개선효과를 추가적으로 얻을 수 있었으며, 민감도 또한 10.367[μ rad] 정도의 감소 효과를 얻을 수 있었다. 또한 Fig.10 과 같이 S/N 비가 P 계인은 3 수준이, I 계인은 1 수준이 그리고 D 계인은 3 수준의 조합으로 높음을 알 수 있다. 따라서 Table 6 과 같이 계인 값을 선정하였다.

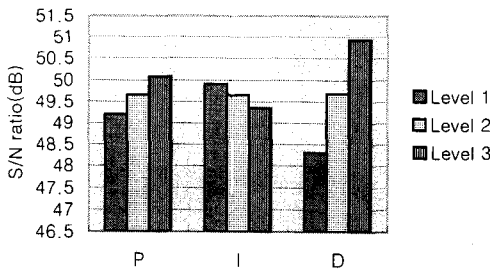


Fig.10 Signal to Noise Ratio

Table 6 PID gain

	1 수준	2 수준	3 수준
P	297	330	363
I	8100	9000	9900
D	0.401	0.4455	0.4901

4. 실험 장치 구성 및 검증

4.1 실험 장치 구성

다구찌 방법을 이용하여 얻은 PID 제어기의 계인 값의 성능을 확인하기 위해서 Fig 11 과 같은 실험 장치를 구성하였다.

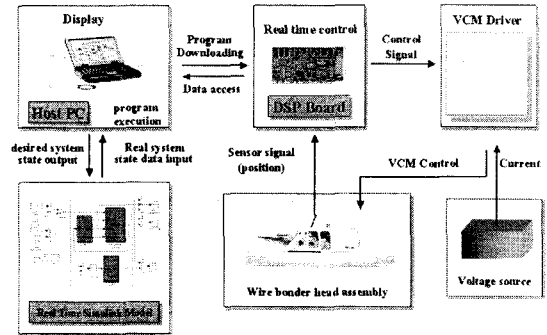


Fig.11 The experiment setup

고속 / 정밀 위치 제어 시스템을 실시간 제어하기 위해 DSP 보드(Digital Signal Processor board)를 통하여, VCM 드라이버, 근접 센서, 파워 서플라이 등을 연결하는 인터페이스(interface)를 구성한다. 또한, 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-III 700MHz, DSP 보드는 dSPACE 사의 DS1102 모델, DSP 칩은 TI 사의 TMS320C31 을 사용하여 최대 샘플링 타임이 33.33ns로 실시간 연산이 가능하다. 근접 위치 센서는 측정 분해능이 2 μ m 인 KEYENCE 사의 AH-110 을 사용하였다.

4.2 검증

실험은 다구찌 방법을 적용하기 전과 적용 후로 정현과 입력으로 실험을 하였고, 첫번째 다구찌 방법 적용과 두번째 다구찌 방법의 적용 후로 나누어서 검증 실험을 하였다. Fig.12 는 정현과 기준 입력이 가해졌을 때의 출력을 나타내며, 실선은 기준 입력, 점선은 기존의 PID 계인 그리고 일점쇄선은 다구찌 방법을 이용하여 선정한 PID 제어 계인을 나타낸다. Fig.13 은 다구찌 방법 적용 전과 적용 후의 위치 오차를 나타내며, 실선이 기존의 PID 제어 계인에 대한 오차, 점선이 다구찌 방법을 이용하여 선정한 PID 제어 계인에 대한 오차를 나타낸다.

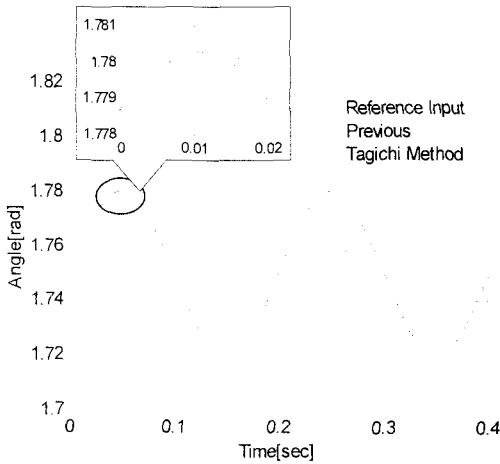


Fig.12 Reference Input tracking test

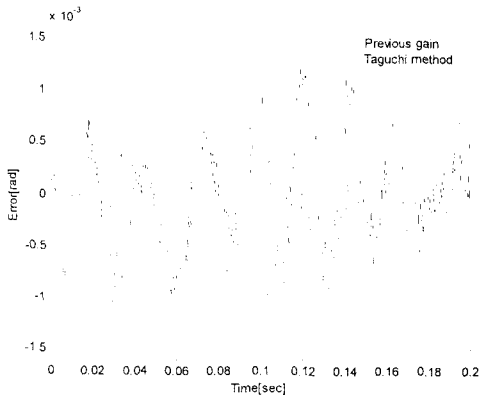


Fig.13 Position error of the reference input tracking test

Fig.12 에서는 다구찌 방법을 정현파 입력에 적용 함으로서 입력을 잘 추종함을 확인할 수 있었으며, Fig.13 에서와 같이 다구찌 방법의 적용 후는 확실한 오차의 감소가 있음을 알 수 있었다.

Table 7 Signal to Noise Ratio and Sensitivity(Test)

	Test Result	
	S/N[dB]	Max. Error[μ rad]
Initial	57.077	140
Optimal	59.172	110
Gain	2.095	-30.0

혼의 이송 속도 변화를 일으키는 정현파 입력의 속도를 30rad/sec, 60rad/sec, 그리고 80rad/sec 로 주었을 경우, 다구찌 방법을 적용하기 전에는

452.38[μ rad]의 평균오차를 가지고 있었으나 두 번에 걸쳐 다구찌 방법을 적용한 결과 322.86[μ rad]의 평균오차로 약 29%의 오차의 감소를 보였다. 최대 오차 또한 앞의 Table 7 과 같이 21.4%의 감소가 있음을 알 수 있었다.

5. 결론 및 향후 과제

다구찌 방법을 적용함으로써 와이어 본더의 혼이 안정되게 동작하게 제어할 수 있는 강인한 제어 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

1. 본드 선도를 이용하여 다 에너지 영역의 부분 시스템으로 연결된 와이어 본더 시스템의 모델링을 완성 및 제안 하였다.
2. 다구찌 방법을 적용하여 제어제인을 선정할 결과 정현파 입력에 있어서 S/N 비의 향상과 민감도가 감소 되었음을 확인하였으며, 평균 위치 추종 오차가 약 29% 향상 되었음을 확인하였다.

본 논문에서는 시스템의 위치 추종 능력을 고려하기 위하여 정현파에 대한 강인한 제어 이득을 찾는데 노력하였으나 위치 변화와 수렴 시 안정도를 고려하기 위해서는 사각파의 제어이득을 확인할 필요가 있다. 최종적으로는 정현파와 사각파에 강인한 제어 이득을 찾아야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Dean C. Karnopp, "System Dynamics," J. Wiley, 1990
- (2) Ferrell, W. G. and Reddivari, P. Persson and W. K. Ho, "Higher quality products with better tuned controllers," Proceedings of the 17th Int. Conference on Computers and Industrial Engineering. Vol.29.pp.321-325, 1995
- (3) Ziegler, J. G. and N. B. Nichols, "Optimum setting for automatic controller," ASME Trans., Vol.64,99.759-768,1942
- (4) Fowlkes, W. Y. and C. M. Creveling, "Engineering methods for robust product design," Addison-Wesley, 1993
- (5) Phillip J. Ross, "Taguchi Techniques for Quality Engineering," McGraw-Hill, 1988
- (6) Dahl, P. R., "Solid Friction Model," AFO 4695-C-0158, Aerospace Corporation, El Segundo, CA, 1968
- (7) J. H. Jang, H. C. Chae and C. S. Han, "Dynamic Modeling and Simulation of Friction Phenomenon," 추계학술대회논문집 A, 대한기계학회, pp.732-737, 1996
- (8) 신호준, 박민규, 윤석찬, 한창수, "고속/정밀 위치제어시스템의 모델링 및 제어에 관한 연구," 추계학술대회 논문집, 공작기계학회, pp.326-331, 2000