

다구찌 방법을 이용한 고속/정밀 위치제어시스템의 PID 제어게인 선정에 관한 연구

신호준* · 채호철** · 한창수***

A Study on the PID Control Gain Selection Scheme of a High-Speed/High-Accuracy position Control System using Taguchi Method

Ho Joon Shin*, Ho Chol Chae**, and Chang Soo Han***

ABSTRACT

This paper presents a dynamic modeling and a robust PID controller design process for the wire bonder head assembly. For modeling elements, the system is divided into electrical part, magnetic part, and mechanical part. Each part is modeled 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 obtain the more robust PID gain combinations than conventional one. This study makes use of an L18 array with three parameters varied on three levels. Results of simulations and experimental show that the designed PID controller provides a improved ratio of signal to noise and a reduced sensitivity improved to the conventional PID controller.

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)

1. 서 론

본 논문의 목적은 고속/정밀 생산 시스템의 중요한 구성 요소인 위치 제어 시스템의 각 요소들을 이해하고, 고속/정밀 위치제어가 가능한 제어 시스템을 구현하는데 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 왕복운동 시킴으로써 작업 도구를 위치시키는 고속/정밀 위치 제어 시스템이다. 이 시스템은 전기, 자기, 기계 등의 서로 다른 물리 영역들의 구성 요소들로 복합

적으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 여러 에너지 요소를 가지는 복합 시스템을 모델링할 수 있도록 고안된 본드 그래프 모델링(bond graph modeling)[1] 기법을 이용하여 해석하였다. 시스템의 해석과 모델링의 용이성을 위하여 먼저 연관된 구성 요소들을 가지는 부분 시스템으로 구분하여 정의하였고, 부분 시스템들 사이의 관계를 정의하였다. 제어기는 산업현장에서 가장 널리 사용되고 있는 PID제어기를 사용하였다. PID제어기는 구조가 간단하여, 익숙하고, 신뢰성이 있다. 그러나 PID제어기 이득을 최적으로 조정하는 문제는 아직까지도 많은 분야에서 연구되고 있다. Ferrell[2]은 최적의 게인으로 조정되지 않은 PID 제어기가 산업 공정에 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 시

*한양대 대학원 메카트로닉스공학과
**한양대 대학원 정밀기계공학과
***한양대 기계공학과

시스템에 적합한 제어 이득을 구하고 이를 입력의 변화에도 강인한 제어기의 이득으로 사용하고자 한다.

본 논문의 제2장에서는 본드 그래프 모델링 구성에 대하여 언급하며, 제3장에서는 다구찌 방법을 이용하여 정현파 입력의 변화에 허용 오차 범위에서 작업을 할 수 있는 최적의 PID제어 이득 조정을 하며, 제4장에서는 실험장치 구성 및 검증을, 마지막으로 제 5장에서는 결론을 기술한다.

2. 시스템 모델링

와이어 본더 헤드 어셈블리(wire bonder head assembly)에 대하여 구동부인 VCM과 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. 1은 와이어 본더 헤드 어셈블리이다. 기존의 구동기에 비해 가볍고 구조가 간단한 VCM(voice coil motor)으로 구동되며, 혼(horn), 혼홀더(horn holder), 암(arm)이 피봇(pivot)을 중심으로 회전 왕복 운동한다. 피봇에는 정밀도에 영향을 미치는 마찰 요소가 있다[6-7].

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 VCM에 인가하도록

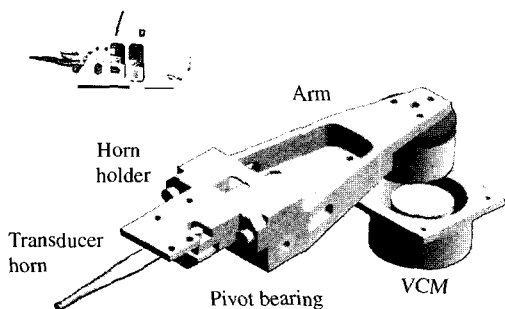


Fig. 1. The wire bonder head assembly.

되어 있으며, 자기 시스템인 VCM은 기계 시스템과 같이 구성되어 기계 시스템이 수직 운동을 하는 역할을 한다. VCM 드라이버와 VCM사이에는 암페어의 법칙(Ampere's law)이 성립되고, VCM 드라이버와 VCM은 운동부인 기계 시스템은 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의해서 정의된다.

2.2 부분시스템 모델링

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

2.2.1 전기시스템 모델링

VCM드라이버는 입력 전압에 비례하는 VCM에 공급하는 역할을 하며, 구동할 때 발생하는EMF(Electro Motive Force)의 영향을 VCM코일이 받지 않도록 하는 역할을 하게 된다.

Fig. 2는 전기 시스템 모델링으로 항목1은 VCM드라이버를, 항목2와 3은 각각 VCM코일의 인덕턴스와 저항을 나타낸다.

VCM드라이버의 여러 회로 구성 요소 중에서 VCM 코일에 인가되는 전압을 결정하는 저항 요소만을 본드 선도의 R요소로 표현하였다. 인가되는 전압은 저항들의 관계로 다음과 같이 구할 수 있다[8].

$$V_c = K_v V_o \tag{1}$$

2.2.2 자기시스템 모델링

Fig. 3은 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. 3과 같이 모델링 요소를 선정하고, 모델링 하

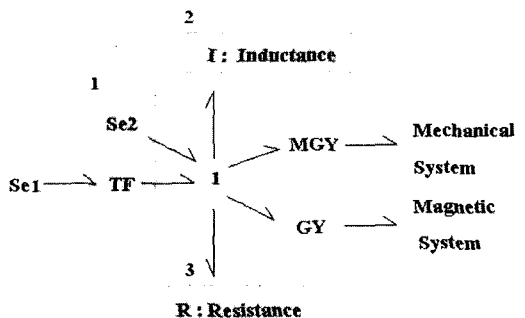


Fig. 2. Bond graph modeling of the electric part.

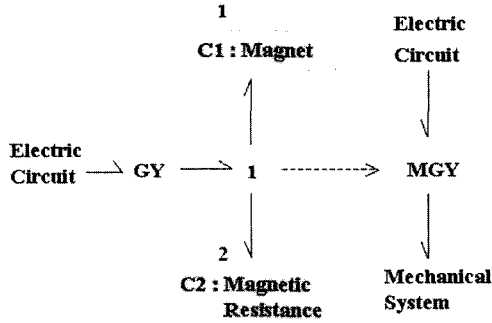


Fig. 3. Bond graph modeling of the magnetic circuit.

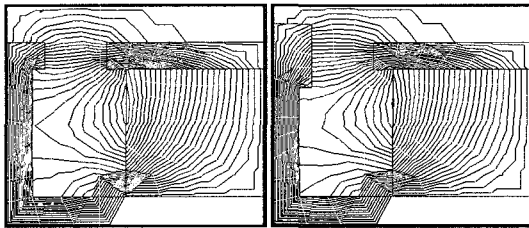


Fig. 4. Simulation for magnetic reluctance modeling of the air gap using Quick Field.

였다. 항목1은 자석의 에너지 요소를 나타내고, 항목2는 공극의 자기 저항 요소이다.

Fig. 4는 공극의 자기 저항 모델링을 위해 자기 해석 프로그램인, Quick Field로 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 주영역 속에서 흐르고 있다. 이를 근거로, Fig. 5와 같이 공극의 주영역만을 고려해서 자기 저항 모델을 구할 수 있다.

공극의 자기 저항 모델은

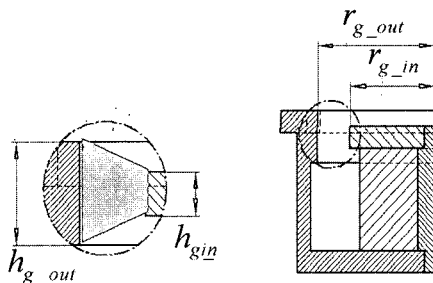


Fig. 5. Area definition for the magnetic reluctance modeling of the air gap.

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \int_{r_{g,in}}^{r_{g,out}} \frac{1}{\mu_0 2\pi r h_g(r)} dr \quad (2)$$

이다. 공극의 자기화와 자속의 관계식은

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

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

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

와 같은 동작점을 구할 수 있다.

2.2.3 기계시스템 모델링

요소 중에서 혼, 혼 홀더, 암은 질량체로서 회전축에 대하여 관성 모멘트(moment of inertia)를 가지고 있으며, 질량 중심에서 중력의 영향을 받고 있다. 피벗 베어링은 회전에 대하여 마찰 요소를 포함하고 있다.

따라서, 작동 기구부는 Fig. 6과 같이 모델링 되어질 수 있다. 항목1은 회전축에 대한 강체의 관성 모멘트이고, 항목2는 강체의 질량 중심에서의 중력의 영향이고, 항목3은 피벗 베어링에 있는 마찰 요소이다.

그리고, 마찰 모델에 있어서 Dahl은 미끄럼에 관하여 수학적 모델을 제시하였다[6]. Jang은Dahl의 모델을 수정 보완하여 교착과 슬립, 두 가지 형상을 표현하였다[7]. 수정된 Dahl모델식은

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

여기서 $e(\omega) = e^{-(\omega/d_s)^2}$

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

d_s : 스트리벡(stribeck) 효과를 가정한 속도 영역

식(5)의 파라미터는 본더를 피벗축에 대하여 자유운동 회전 실험을 한 후 시뮬레이션 값과 비교하여 구하

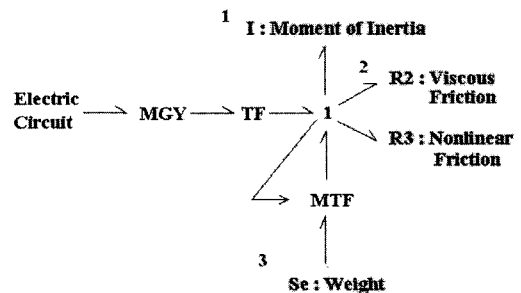


Fig. 6. Bond graph modeling of the mechanical system.

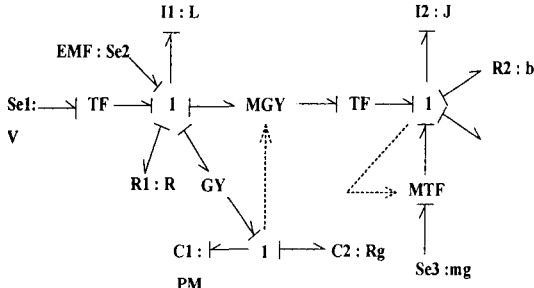


Fig. 7. Bond graph modeling of the full system.

였다[8].

2.3 전체시스템 모델링

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

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

로 정의하고, 다음과 같이 상태 방정식을 유도하였다.

$$\dot{x}_1 = EMF + k_v V_0 - \frac{R_1}{L_1} x_1 - G\dot{x}_2 - N\dot{\phi} \tag{7}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{2\mu_0 A}{\phi^2} \left(G\frac{x_1}{L} - Mx \frac{dw_2}{dx} x_2 - d_1 \dot{x}_3 \right)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{J} \left[\frac{l_{cg} d_1}{A_g L} \left(\frac{P}{L} x_1 + Q \right) x_1 - mg d_2 \sin(x_2) - b x_3 - f x_3 \right]$$

여기서 $\left(P = -\frac{\mu_m A_m N_c}{l_m + \mu_m A_m R_g}, Q = \frac{l_m}{l_m + \mu_m A_m R_g} \phi_0 \right)$ 이다.

Fig. 8은 시스템 모델링 결과를 검증하기 위하여 실험과 비교한 결과이다. 제어기를 적용하기 이전이므로, 출력 각도가 회전축에서 0.02 rad정도가 되도록 입력 전압의 크기와 속도를 조절하였다. 비교 결과 시스템 모델링이 실제 시스템을 잘 표현하고 있음을 확인하였다.

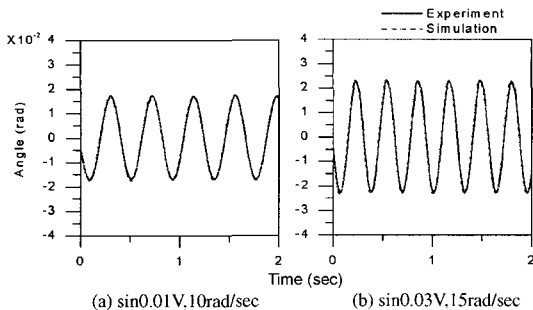


Fig. 8. Comparison between simulation model and experiment.

3. 다구찌 방법을 이용한 PID제어

본 연구에서 적용대상인 와이어 본더헤드 어셈블리는 이송속도가 저속에서 고속으로 변하면서 점점 혼 끝단의 진동이 심해지고 추종오차가 증가하는 것이 문제이다. 따라서 이런 문제점을 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 게인 값을 선정하였다.

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

S/N비를 최대화 할 수 있는 조정가능변수, 즉, 제어 이득을 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 직교배열표선정

직교배열표는 인자들간의 교호작용이 균등하게 배치된 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ array를 사용하였다. $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표는 인자(Factor)가 2수준 인자 1개와 3수준 인자 7개로 구성되어 있다. 그 중에서 2수준 인자를 제외하고 3수준 인자의 배치를 이용하여 다구찌 방법을 적용하였다.

3.2 시뮬레이션을 이용한 다구찌 방법

다구찌 방법을 적용하기 위하여 먼저 상용 프로그램인 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통하여 제어 이득을 구하였다. 먼저 PID의 게인(Gain)은 여러 번의 조정 후 적절하다고 선정되는 값을 선정하였으며, Table 1과 같이 인자의 선정은 각 게인 값의 10%로 선정하였다.

Table 1. Control factor

	-10%	Nominal	+10%
P	315	350	385
I	10800	12000	13200
D	0.27	0.3	0.33

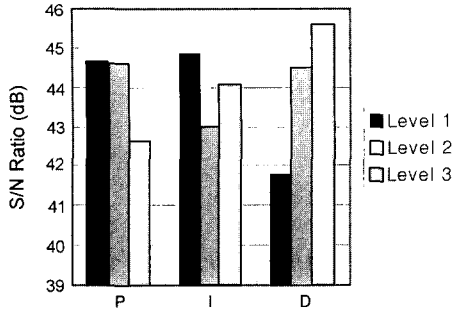


Fig. 9. Ratio of Signal to Noise.

본 논문은 혼이 이송시에 나타나는 오차(error)의 최대치를 최소화하는 것을 목표로 했기 때문에 망소 특성(Smaller the Better)을 가지며, 식(8)과 같이 표현되어진다.

$$SN_S = -10 \log 1/n(\sum y_1^2) \quad (8)$$

다음 Fig. 9는 PID게인을 각 3수준 인자로서 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표에 배치한 후, 각 계인에 따른 S/N비를 나타낸 것이다. 이 때 시스템의 기준입력을 크기 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz의 각속도를 갖는 정현입력과 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz의 각속도를 사각파입력, 그리고 각각의 입력에 대한 진폭의 변화를 주어 잡음인자를 설정하여 입력으로 하였다. P계인은 1수준, I계인은 1수준이 그리고 D계인은 3수준의 조합으로 S/N비가 높음을 알 수 있다.

오차에 대한 최대값을 이용하여 S/N비와 오차의 평균을 계산하면 Table 3과 같이 나타난다.

잡음인자에 의한 입력에 있어서는 선정된 게인 값에 비하여 2.08dB의 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 평균 오차 또한 -0.002121295[rad]정도의 감소 효과를 얻을 수 있었다.

Table 2. Ratio of signal to noise and error

	Predicted	
	S/N[dB]	Error[rad]
Initial	44.12	0.011110709
Optimal	47.11	0.008989415
Gain	2.08	-0.002121295

Table 3. Control factor

	-10%	Nominal	+10%
P	283.5	315	346.5
I	9720	10800	11880
D	0.693	0.33	0.363

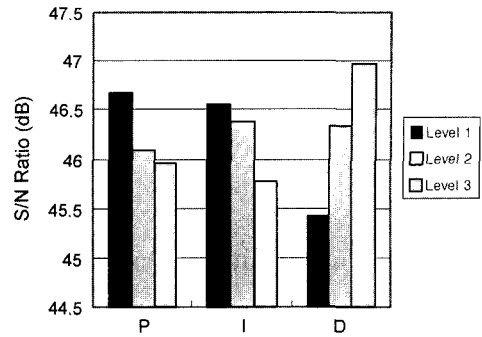


Fig. 10. Ratio of Signal to Noise.

Table 4. Ratio of signal to noise and error

	Predicted	
	S/N[dB]	Error[rad]
Initial	46.31	0.029251942
Optimal	47.73	0.024530033
Gain	1.42	-0.004721909

수 있었다.

위에서 다구찌 방법을 이용하여 얻은 게인 값에 다시 한번 다구찌 방법을 적용함으로써 더 정확한 게인 값을 찾을 수 있다. 인자는 Fig. 9에서 S/N비가 높은 인자를 선정하여, Table 3과 같이 선정된 인자에 10%로 선정하였다.

Fig. 10은 Table 3의 계인을 직교배열표에 배치 한후, 각 계인에 따른 S/N비를 나타낸 것이다. 이때의 기준 입력은 앞에서와 같이 입력으로 하였다. P계인은 1수준, I계인은 1수준이, 그리고 D계인은 3수준의 조합으로 S/N비가 높음을 알 수 있다.

오차에 대한 최대값을 이용하여 S/N비와 오차의 평균(β)을 계산하면 Table 4와 같이 나타난다.

잡음인자에 의한 입력에 있어서는 선정된 게인 값에 비하여 1.42dB의 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 평균 오차 또한 -0.004721909 [rad]정도의 감소 효과를 얻을 수 있었다.

4. 실험장치 구성 및 검증

4.1 실험장치 구성

다구찌 방법을 이용하여 얻은 PID제어기의 게인 값의 성능을 확인하기 위해서 Fig. 11과 같은 실험 장치를 구성하였다.

제어 게인의 성능 검증을 위해 DSP보드(Digital Sig-

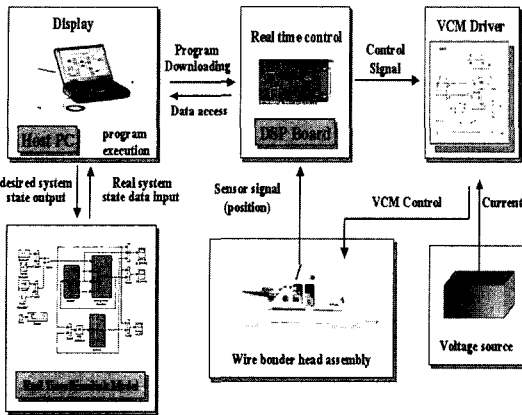


Fig. 11. The experiment setup.

nal Processor board)의 DAC, VCM드라이버, 근접 센서, 파워 서플라이 등을 연결하는 인터페이스(interface)를 구성였다. 또한, Simulink로 작성된 제어를 real time workshop을 이용하여 DSP칩에 다운로드(down loading)하여 시스템을 구동하게 되며, 센서로 측정된 위치 정보는 DSP의 ADC로 연결된다. 사용된 컴퓨터의 CPU는Intel사의P-III 700 MHz, DSP보드는 dSPACE사의 DS1102모델, DSP 칩은 TI사의 TMS320C31을 사용하여 최대 샘플링 타임이 33.33ns로 실시간 연산이 가능하다. 근접 위치 센서는 측정 분해능이 2 μm 인 KEYENCE사의 AH-110을 사용하였다.

4.2 검증

실험은 다구찌 방법을 적용하기 전과 적용 후로 속도 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 그리고 혼의 직선 이송거리가 0.01 mm, 0.02 mm, 0.03 mm가 되도록 정현파 입력과 사각파 입력으로 실험을 하였고, 다구찌 방법을 적용하기 전과 3차의 다구찌 방법을 적용 후, 각 경우에 대한 검증 시험을 하였다.

Fig. 12~Fig. 17은 각 입력 주파수별로 정현파와 사각파에 대한 위치 추종오차를 나타낸다. 여기서 실선은 기존의 PID제어 계인에 대한 오차, 점선은 다구찌 방법을 이용하여 선정한 PID제어 계인에 대한 오차를 나타낸다. 기준 입력의 변화에 대하여 다구찌 방법을 사용한 계인은 위치 오차를 현저히 감소 시킬 수 있다.

각 그래프에서 알 수 있듯이 작동 주파수가 커질수록 위치 추종오차의 감소효과가 증대되며, 정현파와, 사각파 모두 오차의 감소효과가 보인다.

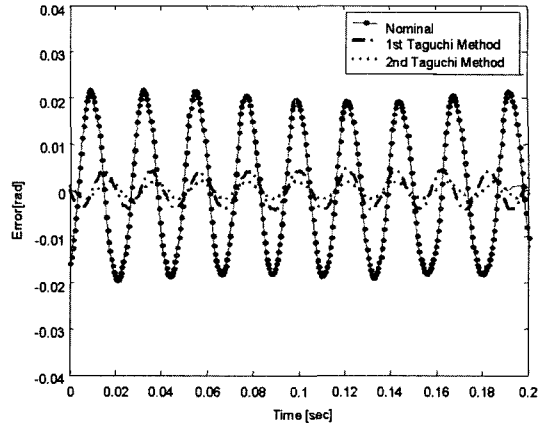


Fig. 12. 5Hz-sine input.

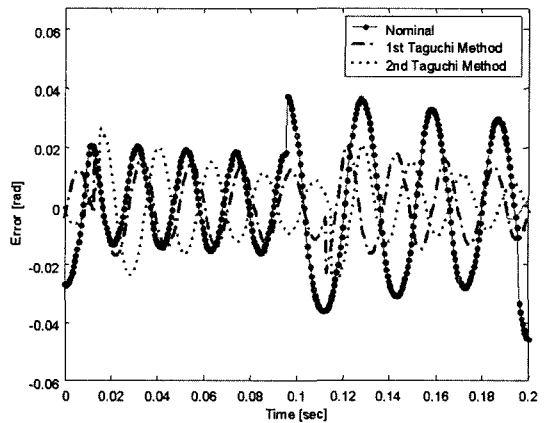


Fig. 13. 5Hz-pulse input.

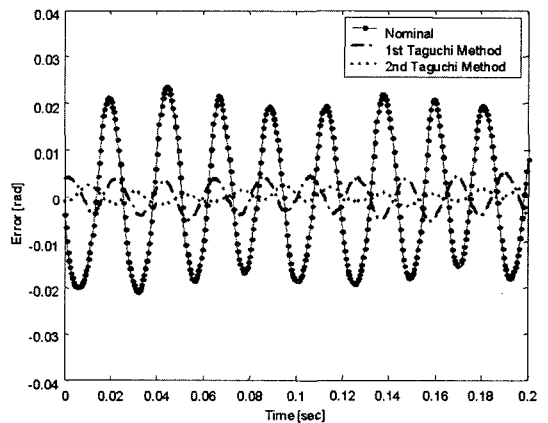


Fig. 14. 10Hz-sine input.

각 속도에 따른 최대 오차의 변화율은 Fig. 18과 Fig. 19와 같이 감소함을 확인할 수 있고, 오차의 RMS

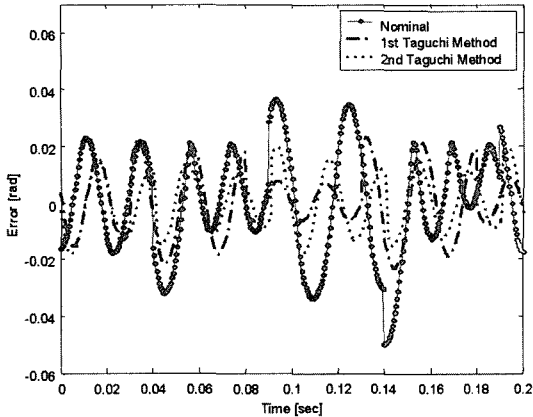


Fig. 15. 10Hz-pulse input.

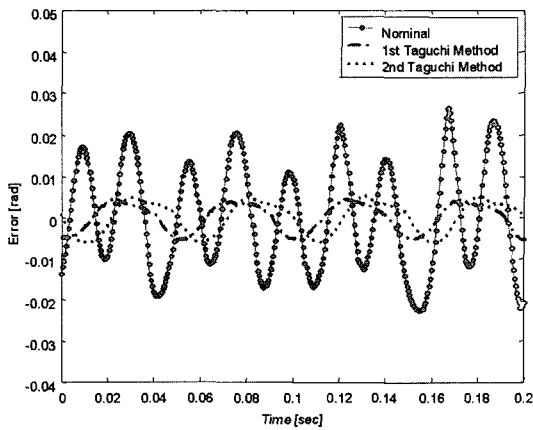


Fig. 16. 20Hz-sine input.

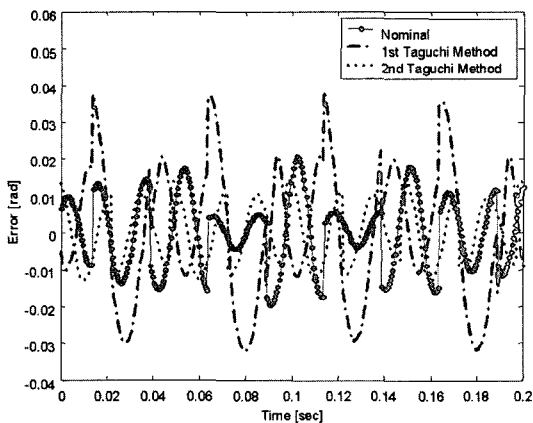


Fig. 17. 20Hz-pulse input.

의 변화는 Fig. 20과 Fig. 21 같이 감소됨을 확인할 수 있다. 그러나 초기 다구찌 방법의 적용시 오차의 감소

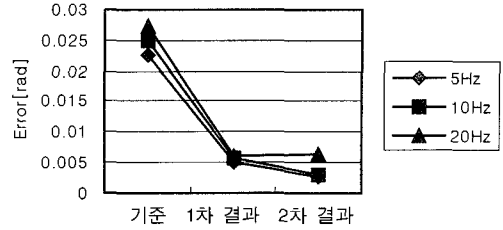


Fig. 18. Maximum position error (sine input).

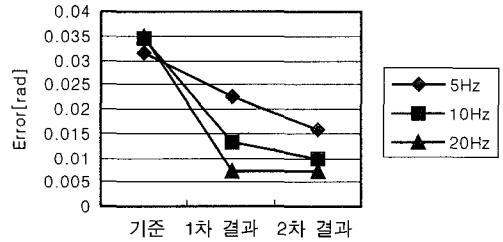


Fig. 19. Maximum position error (pulse input).

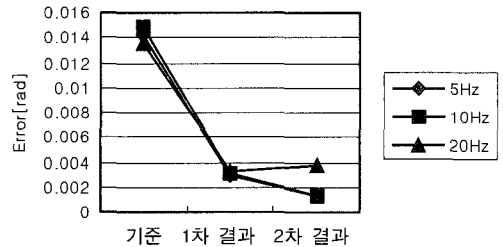


Fig. 20. RMS of position error (sine input).

가 확인해지나 적용 횟수가 증가할수록 오차의 감소 정도는 일정량 이상 증가하지 않으므로, 3차 정도의 적용에 의해 최적의 게인에 도달했다고 생각할 수 있다. 기준 입력의 속도가 커질수록 전체 시스템의 오차가 커지나, 이 때 다구찌 방법에 의해 게인은 오차의 감소 정도 역시 증가 한다. 따라서 다구찌 방법에 의해 선정된 게인은 기준입력 속도의 변화에 대하여 강한 게인이라 할 수 있다.

흔의 이송속도와 이송거리에 대하여 다구찌 방법을 적용하기 전에는 약0.012378 [rad]의 평균오차를 가지고 있었으나 1차에 걸쳐 다구찌 방법을 적용한 결과 약0.00685 [rad]의 평균오차로 약 44.7%의 평균오차의 감소를 보았다. 2차 다구찌 방법의 적용결과 1차 결과보다 약25.8%의 감소효과를 보았다. 2차 다구찌 방법을 적용함으로써 총 약58.9%의 감소효과를 얻을 수 있었다. 이로 인하여 Table 5와 같이 약 9.78dB의 성능향상과 0.007294 [rad]의 평균오차의 감소가 있음을 알 수 있다.

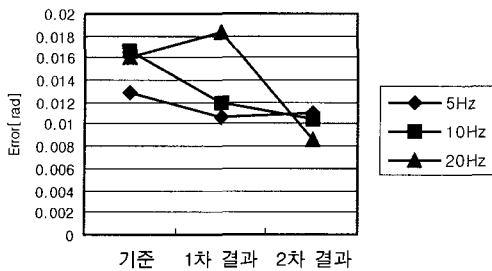


Fig. 21. RMS of position error (pulse input).

Table 5. Ratio of signal to noise and error (Test)

	Test Result	
	S/N[dB]	Error[rad]
Initial	30.73429	0.012378
Optimal	40.51153	0.005083
Gain	9.77724	-0.007294

5. 결 론

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

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본드 선도를 이용하여 다양한 에너지 영역의 부분 시스템으로 연결된 와이어 본더 시스템의 모델링을 완성 및 제안 하였다.

2. 정현파 입력과 사각파 입력에 대하여 강인한 위치 추종이 가능한 제어게인을 다구찌 방법을 사용하여 선정하였다. 이때, 각 인자들의 교호작용이 고려되어 있는 L18직교 배열표를 사용한 후 제어인자를 3수준으로 정의하여 다구찌 방법을 적용하였다.

3. 다구찌 방법을 적용하여 제어게인을 선정한 결과 정현파 입력에 있어서 S/N비의 약 9.78 dB의 향상과 민감도가 감소 되었음을 확인하였으며, 평균 위치 추종

오차가 약 58.9% 향상 되었음을 확인하였다.

본 논문에서는 시스템의 위치 추종 능력을 고려하기 위하여 정현파와 사각파, 그리고 혼의 이송거리에 대한 강인한 제어 이득을 찾는데 노력하였으며 더 강인한 제어게인을 선정하기 위해서는 다른 잡음인자의 영향을 추가한 게인의 선정이 필요한 것이라 생각된다.

참고문헌

- Dean C. Karnopp, "System Dynamics", J. Wiley (1990).
- 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. 29, pp. 321-325 (1995).
- Ziegler, J. G. and N. B. Nichols, "Optimum setting for automatic controller", ASME Trans., 64, 99:759-768 (1942).
- Fowlkes, W. Y. and C. M. Creveling, "Engineering methods for robust product design", Addison-Wesley (1993).
- Phillip J. Ross, "Taguchi Techniques for Quality Engineering", McGraw-Hill (1988).
- Dahl, P. R., "Solid Friction Model", AFO 4695-C-0158, Aerospace Corporation, El Segundo, CA (1968).
- J. H. Jang, H. C. Chae and C. S. Han, "Dynamic Modeling and Simulation of Friction Phenomenon", 추계학술대회논문집A, 대한기계학회, pp. 732-737 (1996).
- 박민규, 한창수, "고속/정밀 위치제어시스템의 모델링 및 제어에 관한 연구", 제어·자동화·시스템공학회 논문집, 7(5), 제어·자동화·시스템공학회, pp. 399-406, 2001. 5.
- 신호준, 윤석찬, 장진희, 한창수, "고속/정밀 위치 제어 시스템의 강인한 제어게인 선정에 관한 연구", 추계학술대회 논문집, 대한기계학회, pp. 747-753 (2001).