

# 다구찌방법을 이용한 다축 동시 PID 제어시스템의 제어이득 조정

이기하\*, 김종원\*

## Control Gain Tuning of a Simultaneous Multi-Axis PID Control System by Taguchi Method

Kiha Lee\*, Jongwon Kim\*

### ABSTRACT

This paper presents a control gain tuning scheme for multi-axis PID control systems by Taguchi method. As an experimental set-up, a parallel mechanism machine tool has been selected. This machine has eight servodrives and each servodrive has four control gains, respectively. Therefore, total 32 control gains have to be tuned. Through a series of design of experiments, an optimal and robust set of PID control gains is tuned. The index of the sum of position error and velocity error is reduced to 61.4% after the experimental gain tuning regardless of the feedrate variation.

**Key Words** : Taguchi method(다구찌방법), Design of experiment(실험계획법), Gain tuning(이득조정), PID controller (PID 제어기)

### 1. 서론

새로운 제어이론이 많이 제시되고 있음에도 불구하고, 아직까지 산업사회에서 가장 널리 사용되고 있는 제어기는 PID 제어기이다. PID 제어기는 구조가 간단하여, 작업자와 제어기 설계자에게 익숙하고, 신뢰성이 있다. 그러나 PID 제어기 이득들을 최적으로 조정하는 문제는 아직까지도 많은 분야에서 연구되고 있다.

Ziegler 와 Nichols<sup>(1)</sup>부터 시작하여 많은 연구자들은 수동 또는 자동으로 제어이득을 조정하는 방법을 제안하였다. 지글러-니콜스 방법은 단위계단 입력에 대한 플랜트의 응답을 보면서 변수를 구하는 첫번째 방법과, 비례이득의 증가에 의하여 처음으로 진동이 발생하였을 때의 제어이득과 주파

수에 기초를 둔 두번째 방법으로 나뉜다. 이 방법은 간단하고 플랜트의 수학적 모델을 알 수 없을 때 편리하기 때문에 아직까지 많이 사용되고 있다. 그러나, 제어 출력이 진동을 유지하기가 어려울 때 사용할 수 없고, 실제 플랜트의 작동조건이 바뀌면 제어이득을 다시 조정해야 한다는 단점이 있다<sup>(2)</sup>.

한편, Astrom 과 Hagglund 은 Nyquist 선도에서 임계이득과 임계주파수를 지연 되먹임(relay feedback)을 이용하여 찾아내는 자동조정(auto-tuning)방법을 제안하였다<sup>(2,3)</sup>. 자동조정 방법은 지연 되먹임을 이용하였기 때문에, 잡음에 대해 신뢰성이 높고, 자동조정으로 인하여 시간을 절약할 수 있다. 그러나, 이 방법은 함수를 근사화 하였기 때문에, 불감시간(dead-time)이 긴 경우에는 임계점

\* 서울대학교 기계항공공학부



Fig. 1 Parallel Mechanism Machine Tool: Eclipse

을 정확하게 추정할 수 없다. 또한, 하나의 제어이득을 독립적으로 조정하기 때문에, 다축 시스템에 적용이 어렵고, 자동이득조정을 위해서 별도의 장치가 필요하다.

또한, 많은 산업현장에서 Bode 선도나 Nyquist 선도를 사용하여 제어이득을 조정한다. 이는 이득 여유와 위상여유를 고려하여 모델링 오차를 고려하여 제어를 설계할 수 있고, 설계자가 원하는 동특성을 주파수 영역에서 직접 확인 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 이 방법은 플랜트의 모델을 수학적으로 구하거나 실험으로 구해야 하는 어려움이 있다. 또한, 자동조정 방법과 같이, 다축 시스템에 적용이 어렵다.

Ferrell<sup>(4)</sup>은 PID 제어가 실제로 사용되고 있는 산업현장에서 제어이득조정을 최적으로 조정하지 못하는 이유를 수학적 모델과 실제 시스템과의 오차 때문이라고 간주하였고, 이와 같이 최적으로 조정되지 못한 제어이득은 산업 공정에 손실을 가져온다고 보았다. 이런 이유로 시스템의 수학적 모델링 없이 제어이득을 다구찌방법<sup>(5,6,7)</sup>을 사용하여 신속하게 조정하는 방법을 제안하였다. Ferrell

은 화학공정에서 증기와 물의 양을 조절하는데 사용되는 11 개의 제어이득의 조합을 직교배열표(orthogonal arrays)를 이용한 부분실험시법(fractional factorial experiment)으로 선정하였다. 각 제어이득을 2 개의 수준(level)으로 하여, 제어이득의 조합을 전조실험시법(full-factorial experiment)으로 선정한다면  $2^{11}$ (2048)번의 실험을 수행해야 하지만,  $L_{16}(2^{15})$ 의 직교배열표를 이용하면 16 번의 실험으로 제어이득의 조합을 선정할 수 있다. 이 방법은 단지 제어이득만을 직교배열표에 의하여 변화시키면서 손실을 가장 작게 하는 제어이득의 조합을 찾아내기 때문에, 시스템의 수학적 모델링이 필요하지 않고, 또한, 부가장치 없이 간단히 습기의 양과 온도의 양의 측정만으로 제어이득을 조정할 수 있다. 그러나, 여기서는 여러 잡음인자를 고려하지 않았으며, 제어이득을 2 개의 수준으로 하여 실험하였기 때문에 최적의 제어이득 선정이라고 할 수 없다.

실제로 PID 제어이득을 조정하다가 보면, 작동조건이 바뀔 경우에, 제어이득을 다시 변경해야 할 필요성이 발생된다. 따라서, 작동조건이 바뀔지라도 제어출력이 변화가 최소화되는 PID 제어이득을 선정하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 작동조건을 변화하는 잡음인자로 고려하여, 다구찌 방법을 적용해서 시스템의 실제 작동조건에 대해서도 견실하게 플랜트의 성능을 유지할 수 있는 제어이득을 선정하는 방법을 제안한다. 시스템이 비선형인 성질을 고려하여 각 제어이득을 3 개의 수준으로 한다. 한편, 다수입력-다수출력(MIMO: multi-input multi-output) 시스템인 경우에도, 단일입력-단일출력(SISO: single-input single-output)에서와 같은 방법으로 수학적 모델 없이, 쉽고 편리하게 제어이득조정을 할 수 있음을 보인다. 적용실례로서 Fig. 1 에서와 같은 8 축 병렬기구공작기계 이클립스(Eclipse)의 위치제어의 총 32 개 제어이득을 한꺼번에 조정하는 체계적인 실험을 수행한다. 그리고, 시행착오방식으로 조정된 제어이득과 비교하여, 추종오차와 속도오차의 감소효과를 보인다. 제어이득조정 실험은 크게 두 단계로 구성된다. 제 1 단계에서는 8 개의 서보모터를 종류별로 3 개의 그룹으로 분류한 뒤에, 각 그룹별로 3 개의 서보모터를 선정하여, 무부하상태에서 각각 실험계획법을 적용하여 최적의 제어이득을 찾아낸다. 제 2 단계에서는 제 1 단계에서 설정한 제어이득을 초

기값으로 하여, 실제 작동 조건을 대표하는 이송 경로에 대하여, 이송속도가 변화함에도 불구하고, 가장 작은 위치 및 속도 제어오차를 발생하는 총 32 개의 제어이득을 실험계획법을 통하여 선정한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2 장에서는 일반적인 다구찌방법의 이론과 용어들에 대해서 기술하며, 제 3 장에서는 실험대상기체인 8축 병렬기구공작기계 이클립스의 구조와 특징들을 언급하며, 제 1 단계 체계적인 실험인 단일 서보모터 제어이득조정과 제 2 단계 체계적인 실험인 8 개 서보모터 제어이득조정에 대해서, 각각 4, 5 장에서 기술한다. 마지막으로, 결론을 기술한다.

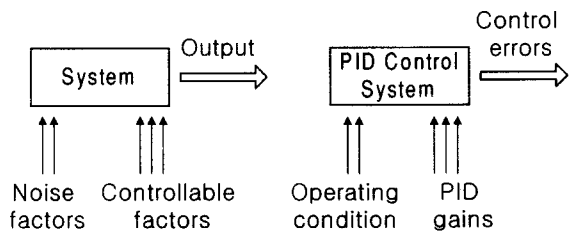
## 2. 다구찌방법

시스템의 출력의 변화에 영향을 미치는 변수 들은 Fig. 2(a) 에서와 같이 조정불가능변수(noise factor)와 조정가능변수(controllable factor)로 구분된다. 조정가능변수는 시스템 설계자가 임의의 값으로 선정할 수 있는 변수이며, 조정불가능변수는 시스템 설계자가 임의로 결정할 수 없는 변수이다. 다구찌방법의 목적은, 조정불가능변수가 변화하더라도, 출력의 변화를 최소화하는 조정가능변수를 체계적 실험방법으로 결정하는데 있다. Fig. 2(b)의 PID 제어시스템을 예로 들어서 설명하면, 다구찌방법을 적용하여, 시스템의 작동조건이 변화하더라도 제어오차의 변화를 최소화하는 PID 제어이득을 체계적 실험방법으로 결정할 수 있다. 한편, 다구찌방법에서 제시하는 망소(Smaller-the-Better)특성치에 대한 S/N 비(Signal-to-Noise Ratio,  $\eta$ )의 정의를 이용하면, 제어오차의 변화를 최소화하는 것은 물론, 제어오차의 절대값 자체도 동시에 최소화할 수 있는 PID 제어이득을 결정할 수 있다. 본 논문에서는 다구찌방법을 이용하여 실제로 8 개의 서보모터에 대한 총 32 개의 제어이득을 조정하는 실험을 제시한다. 다구찌방법에 의거한 실험계획법(Design of experiment)의 각 단계는 다음과 같다:

- (1) 실험 목적의 설정: 어떠한 문제를 해결하려고 하는지를 기술한다. 본 논문에서는, 8 축 동시 제어가 필요한 병렬기구 공작기계를 시운전하는 과정에서, 이송속도가 저속에서 고속으로 변화하면 점점 공구 끝단의 진동이 심해지고 추

종오차가 증가하는 문제가 발생하여, 최적 제어이득선정을 통하여 이를 해결하려고 한다.

- (2) 목표특성치의 선택: 목표특성치는 망목(Nominal-the-Best), 망소(Smaller-the-Better), 망대(Larger-the-Better) 특성치로 구분된다. 망목특성은 시스템출력이 도달해야 하는 목표치가 있는 경우이며, 망소특성은 출력이 작을수록 좋은 경우이고, 망대특성은 출력이 클수록 좋은 경우를 말한다. 본 논문의 목표특성치는 서보드라이브 시스템의 위치 및 속도 오차의 합으로서, 망소특성치에 해당된다.
- (3) 변수의 선정: 변수는 조정가능변수와 조정불가능변수로 나뉜다. 조정가능변수는 설계자가 임의의 값에 그 값을 설정하고 유지시킬 수 있는 변수이다. 반면에, 조정불가능변수는 설계자가 임의로 조정하기가 불가능한 변수이다. 본 논문에서는, 조정가능변수로서 각 서보드라이브 시스템의 제어이득 4 종류를 선정하였으며, 조정불가능변수로서 공구 끝단의 이송속도를 선정하였다.
- (4) 직교배열표의 선정: 조정가능변수가 많은 경우에, 변수를 하나씩 변경시키면서 목표특성치가 어떻게 변화하는지를 실험으로 확인하려면, 수많은 조합에 대하여 실험을 해야한다. 예를 들어서, 13 개의 조정가능변수가 있고, 각 변수당 세개의 값을 수준으로 정하면, 총  $3^{13}=1,594,323$  번의 실험을 해야 한다. 이것은 거의 불가능한 일이다. 따라서, 다구찌박사는 직교배열표를 이용하여 실험하는 것을 제안하였다. 직교배열표를 이용하면, 앞에서 제시한 예의 경우  $L_{27}(3^{13})$  직교배열표를 이용하면 27 번의 실험으로, 각 변수가 목표특성치에 미치는 민감도를 파악할 수 있다.



(a) Definition of system (b) PID control system  
 Fig. 2 The definition of system in Taguchi method and PID control system

(5) 실험 수행 및 실험 결과 분석: 조정불가능변수의 변화에 대하여 목표특성치가 변하는 정도는 S/N 비로 정량화 할 수 있다. S/N 비가 클수록 목표특성치는 조정불가능변수의 변화에 대한 영향을 적게 받는다. 즉, 시스템의 견실성이 증가한다. 본 논문에서는 S/N 비를 최대화할 수 있는 조정가능변수, 즉, 제어이득을 실험을 통하여 찾아낸다. 이러한 제어이득은 기계의 작동조건의 변화에도 불구하고, 견실하게 속도오차, 제어오차 및 그 변화량을 최소로 유지하게 만든다.

### 3. 실험대상기계: 병렬기구 공작기계 '이클립스'

다구찌방법에 의한 PID 제어이득 조정기법의 효율성을 보이기 위해서, Fig. 3 과 같은 병렬기구

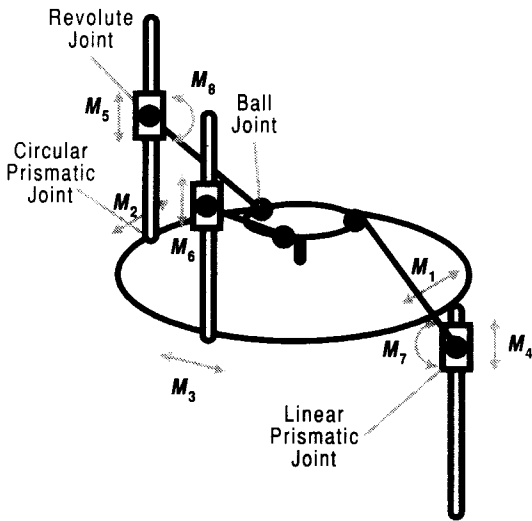


Fig. 3 Mechanism structure of the Eclipse

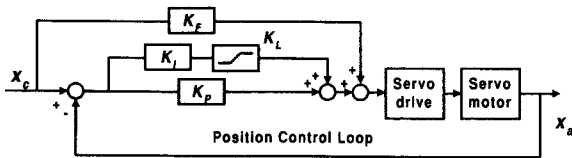


Fig. 4 Position controller structure of the Eclipse servo system

로 구성된 공작기계인 '이클립스'를 실험 대상으로 선정하였다. Fig. 1 은 제작이 완성된 이클립스의 전경이다. Fig. 3 에서 보는 바와 같이, 이클립스는 고정된 원형 가이드를 따라, 각각 독립적으로 움직이는 세 개의 PRS 직렬기구로 구성된다. 여기서, P는 직선 이송 조인트, R은 회전 조인트, S는 볼 조인트를 나타낸다. 스튜어트 플랫폼과 같은 병렬기구는 완전한 대칭구조를 가지는 것에 비해, 이클립스는 스피들 모터와의 간섭을 피하기 위해 작업 플랫폼과 연결된 세개의 고정 링크 중의 하나가 아래쪽으로 내려가도록 설계되었다. 이클립스는, 다른 병렬기구 공작기계와 달리, 위치 작업 영역뿐만 아니라 자세 작업영역(orientation workspace)도 크게 하여 수직 위치에서 수평 위치까지 연속적으로 움직일 수 있으며, 어떠한 자세에서도 소재를 중심으로 360 도 회전할 수 있어서, 소재를 한번 셋업하여 5 면을 모두 가공할 수 있다<sup>(8,9)</sup>.

이클립스는 총 8 개의 서보제어 축으로 구성되어 있는데, 각 축은 서보모터와 드라이브로 구성되어 있으며, 총 8 개의 서보모터가 동시에 위치제어를 통해 제어된다. 위치제어알고리즘은 PC 내부에 장착된 DSP 보드 상에서 수행된다. 공구 끝단을 원하는 경로로 이송하기 위해서는, 각축의 위치증분을 매 샘플링 시간마다 계산하여 서보모터의 해당 펄스 수로 변환해 주어야 한다. 서보모터 1 회전은 엔코더에서 8,192 펄스에 해당한다. 매 샘플링 시간마다 결정된 공구의 경로는 병렬기구의 역기구학식(inverse kinematics)을 통해 해당되는 조인트 스페이스의 관절값으로 변환되어, 8 개의 서보모터를 구동시킨다.

### 4. 제 1 단계 실험: 단일 서보모터 제어이득 독립조정

이클립스의 서보모터는, 원형 가이드를 선회하는 수직칼럼을 구동하는 3 개의 서보모터  $M_1, M_2, M_3$ , 고정링크가 연결된 캐리지를 이송시키는 3 개의 서보모터  $M_4, M_5, M_6$ , 그리고, 2 개의 회전관절을 구동하는 서보모터  $M_7, M_8$ 의 세 그룹으로 크게 분류할 수 있다. 각 그룹에 소속된 서보모터는 서로 동일하며, 삼성전자 제품이다.  $M_1, M_2, M_3$  그룹의 서보모터는 모델명 CSMG-06 이며,  $M_4, M_5, M_6$  그룹은 모델명 CSMG-04, 그리고,  $M_7, M_8$  그룹은 모델명 CSMG-02 인 서보모터가 각각 사용되었다.

제 1 단계 실험에서는 각 그룹별로 무부하상태에서 독립적으로 제어이득을 선정한다. 물론, 같은 그룹의 서보모터라 할지라도 제어이득이 조금씩 달라져야 한다. 이러한 미세조정은 제 2 단계 실험에서 수행하며, 다음 절에서 자세히 설명한다. 각 서보모터의 위치제어이득은 Fig. 4 에서 보이는 것과 같이, 비례이득( $K_p$ ), 적분이득( $K_I$ ), 적분한계이득( $K_L$ ), 그리고 앞먹임이득( $K_F$ ) 등 모두 4 개이다.

먼저, 각 그룹별로 세 종류의 서보모터에 대하여, 위치제어기 제조회사인 삼성전사에서 추천하는 방법<sup>(10)</sup>으로, 제어이득을 선정하였으며, 정리하면 다음과 같다:

- (1)  $K_p$  Tuning :  $K_p, K_L, K_F$  을 모두 0 으로 설정하고  $K_p$  를 단계적으로 증가 시키면서 모터가 진동을 발생했을 때 이득의 3/4 정도로 정한다.
- (2)  $K_I, K_L$  Tuning : 정시 상태에서 위치 오차 값이 1 또는 2 정도 될 때까지 올린다.
- (3)  $K_F$  Tuning : 두 점을 이동하면서, 이 때 발생하는 위치 오차를 최소화 하면서 조정한다.

이와 같이 선정된 제어이득은 Table 1 과 같다.

Table 1 과 같은 제어이득으로 서보모터  $M_5$  를 주축과 분리한 상태, 즉, 무부하상태에서 구동한 결과는 Fig. 5 와 같다. 대표적인 작동조건인 이송속도가 저속( $f_L = 1350\text{pulse}/50\text{ms}$ ), 중속( $f_M = 4000\text{pulse}/50\text{ms}$ ), 고속( $f_H = 6800\text{pulse}/50\text{ms}$ )으로 변화함에 따라서, 위치제어오차(Fig. 5(a) 참조)와 속

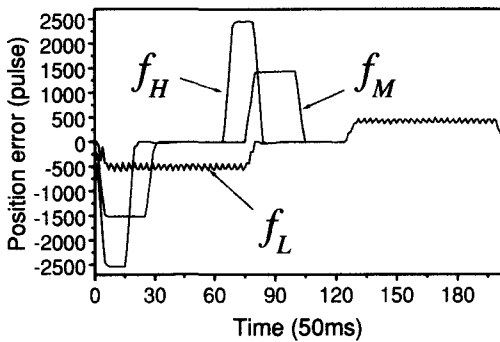
도제어오차(Fig. 5(b) 참조)가 변화함을 알 수 있다. 이것은 Table 1 과 같이 선정된 제어이득은 이송속도 변화에 대하여, 견실성을 보장하지 못한다는 것을 보여준다. 따라서, 다구찌방법을 이용하여 새로운 제어이득을 선정한다. 목표특성치  $y$  는 아래와 같다:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_{a,i} - \theta_{c,i}|}{\left(\sum_{i=1}^n |\theta_i|\right) \times n} + \frac{\sum_{i=1}^n |\dot{\theta}_{a,i} - \dot{\theta}_{c,i}|}{|\dot{\theta}_{\max} \times n|}$$

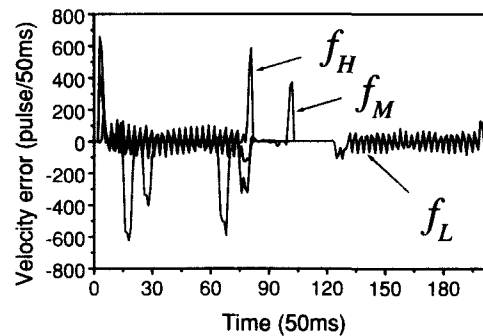
여기서,  $\theta_a$  [encoder pulse] 는 모터의 실제 위치이고,  $\theta_c$  [encoder pulse] 는 모터의 지령 위치이다.  $\dot{\theta}$  [pulse/50ms] 는 모터의 속도이며,  $n$  은 샘플링 개수의 합이다. 여기서,  $y$  는 작으면 작을수록 좋으므로, 망소(small-the-better) 특성이 목표특성치가 된다.

한편, 조정가능변수는 서보모터  $M_5$  에 대한 위치제어기의 제어이득  $K_p, K_I, K_L, K_F$  이고, 조정불가능변수는 대표적인 작동조건인 이송속도  $f$  로 선정하며, 각 변수의 수준은 Table 1 의 초기 제어이득을 기준으로 Table 2 와 같이 선정한다.

Table 2 와 같이 선정된 변수들에 대하여, 다구찌방법에서 제시하는 직교배열표<sup>(5,6,7)</sup>  $L_9(3^4)$  를 사용하여 실험한다. 여기서 3 은 3 개의 수준을 뜻하며, 윗 첨자 4 는 4 개의 조정가능한 변수  $K_p, K_I, K_L, K_F$  이며 아래 첨자 9 는 9 번의 실험을 뜻한다. 직교



(a) Position error



(b) Velocity error

Fig. 5 Position and velocity errors of the servomotor  $M_5$ , according to the level of feedrates with the initial control gains presented in Table 1

배열표  $L_9(3^4)$ 와 실험결과는 Table 3 과 같다. 예를 들어서, 실험번호 1(test #1)은 각 조정가능변수의 수준이 1 인 경우, 즉,  $K_p = 40, K_I = 1, K_L = 500, K_F = 100$  에서, 이송속도  $f_L, f_M, f_H$  에 대하여 각각 실험을 하여, 위치 및 속도 오차의 합인 실험목표특성치  $y$  를 구한 것이다.  $L_9(3^4)$  직교배열표에 의하여 실험번호가 1 부터 9 까지 있으며, 각 실험번호에 대하여, 조정불가능변수, 즉, 이송속도 의 각 수준마다 1 번씩 실험을 하므로, 총  $9 \times 3 = 27$  회의 실험을 수행한다.

Table 1 Initial values of position control gains

Group	Servomotors	$K_p$	$K_I$	$K_L$	$K_F$
I	$M_1, M_2, M_3$	50	3	1000	100
II	$M_4, M_5, M_6$	80	4	800	100
III	$M_7, M_8$	60	2	1000	3

Table 2 Levels of the controllable and noise factor at stage 1 for the servomotor  $M_5$

Group	Symbol	Level 1	Level 2	Level 3
II	$K_p$	40	70	100
	$K_I$	1	3	5
	$K_L$	500	1000	1500
	$K_F$	100	200	300
Noise factor	$F$	1350	4000	6800

Table 3 Experimental results based on the orthogonal array  $L_9(3^4)$  for the servomotor  $M_5$

# of test	Controllable factor				y			$\eta$
	$K_p$	$K_I$	$K_L$	$K_F$	$f_L$	$f_M$	$f_F$	
1	1	1	1	1	0.052	0.063	0.078	23.69
2	1	2	2	2	0.049	0.057	0.07	24.55
3	1	3	3	3	0.043	0.052	0.065	25.35
4	2	1	2	3	0.038	0.03	0.038	28.94
5	2	2	3	1	0.057	0.036	0.046	26.48
6	2	3	1	2	0.041	0.033	0.041	28.26
7	3	1	3	2	0.041	0.024	0.029	29.87
8	3	2	1	3	0.037	0.022	0.026	30.79
9	3	3	2	1	0.049	0.026	0.033	28.55

다음으로, 다구지방법에 의거하여, S/N 비를 정의한다. 여기서는 목표특성치  $y$  가 망소특성, 즉, 작으면 작을수록 좋은 경우이므로, 아래와 같이 정의한다<sup>(5)</sup>.

$$\eta_i = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 y_{ij}^2 \right)$$

여기서,  $i = 1, 2, \dots, 9$  이고,  $j = 1, 2, 3$  이며,  $y_{ij}$  는 실험번호  $i$  에 대하여, 조정불가능변수의 수준이  $j$  일 때 측정된 목표특성치이다. S/N 비의 정의에 의하여, 조정불가능변수의 변화에도 불구하고, 목표특성치의 변화가 작을수록 S/N 비가 커지며, 동시에, 목표특성치의 평균값이 작을수록 S/N 비가 커진다. 따라서, 각 인자에 대해서 S/N 비를 최대화 하는 수준을 결정한다.  $K_p$  를 예를 들면, Table 3 의 S/N 비에 대해서 각 수준을 계산하면 다음과 같다:

$$K_p \text{ 의 1 수준 } \eta = \frac{23.69 + 24.55 + 25.35}{3} = 24.53$$

$$K_p \text{ 의 2 수준 } \eta = \frac{28.94 + 26.48 + 28.26}{3} = 27.89$$

$$K_p \text{ 의 3 수준 } \eta = \frac{29.87 + 30.79 + 28.55}{3} = 29.74$$

이와 같이 각 인자의 수준에 대해서 S/N 비를 계산한 반응표는 Fig. 6 과 같다.

Fig. 6 의 그래프를 보면  $K_p$  와  $K_F$  는 기울기가 크고,  $K_I$  와  $K_L$  은 기울기가 작다. 즉,  $K_p$  와  $K_F$  는 S/N 비에 영향을 크게 미치는 반면,  $K_I$  와  $K_L$  은 S/N 비에 영향을 거의 미치지 않는다.  $K_p$  와  $K_F$  는 S/N 비를 가장 크게 하는, 즉, 3 수준인 100 과 300 으로 각각 선정한다. 이때, 선정된 변수들의 집합에 대하여 실험결과가 없을 경우에는, S/N 비의 예측이 필수적이며, 선정된 변수들에 대하여 확인 실험을 해야 한다. 여기서는, Table 3 에서와 같이,  $K_p$  와  $K_F$  가 각각 3 수준인 것은 실험번호 8 번으로 존재하므로 확인실험을 할 필요가 없다.

선정된 제어이득으로, 서보모터  $M_5$  를 무부하 상태에서 구동한 결과는 Fig. 7 과 같다. 이 그림을 Fig. 5 와 비교한다면, 위치제어오차와 속도제어오차의 절대치가 줄었을 뿐만 아니라, 동시에 이송속도 변화에 대한 변화량도 감소하였다. 즉, S/N 비

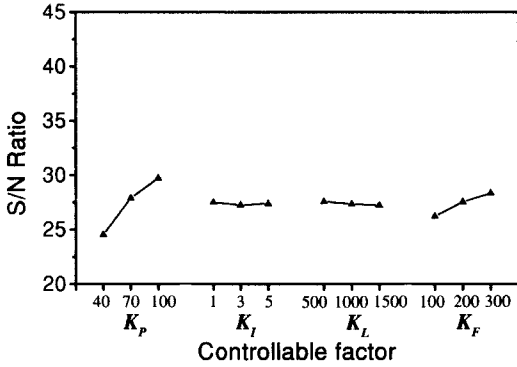
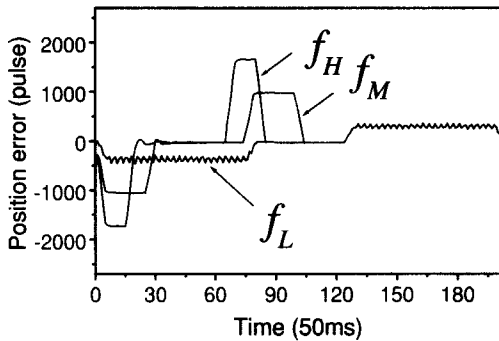


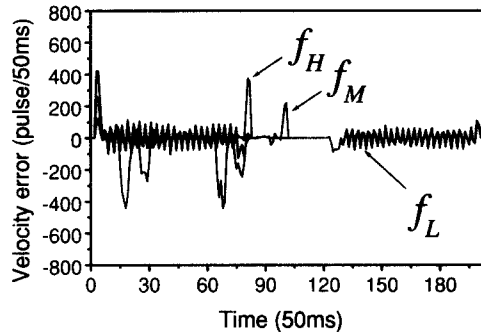
Fig. 6 Response graph based on Table 3 for the servomotor  $M_5$

는 2.1dB 증가하였고, 위치오차와 속도오차의 합은 평균 22.3% 감소하였다. 그러나, 그 개선효과가 크지 않으므로, 다시 한번 더 실험계획법을 적용한다.

여기서,  $K_p$ 와  $K_f$ 가 S/N 비를 최대로 하는 것이 3수준이라는 것과, S/N 비가 계속 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉, S/N 비를 최대로 하는  $K_p$ 와  $K_f$ 가 앞에서 설정한 값보다 더 클 수 있을 수 있으므로, 앞에서 선정된  $K_p$ 와  $K_f$ 값을 중심으로 다시 한번 제이득조정을 수행한다. 제 2차 이득조정(stage 2)에서는,  $K_p$ 의 수준을 100, 130, 160으로,  $K_f$ 의 수준을 300, 600, 900으로 선정한다. 제 2차 이득조정에서의 실험순서, 인자의 선택, 직교배열표, 그리고, 실험 방법은 제 1차 이득조정과 같다.

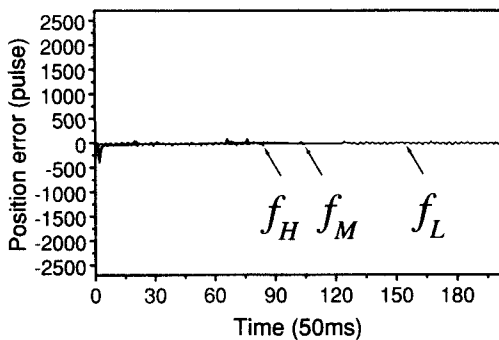


(a) Position error

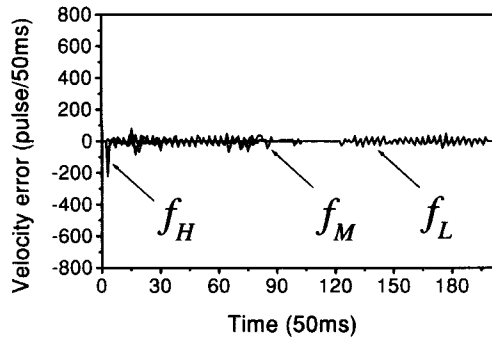


(b) Velocity error

Fig. 7 Position and velocity errors of servomotor  $M_5$ , according to the level of feedrates with the control gains selected at stage 1



(a) Position error



(b) Velocity error

Fig. 8 Position and velocity errors of servomotor  $M_5$ , according to the level of feedrates with the control gains selected at stage 4

제 2 차 이득조정을 종료하고, S/N 비와 위치오차와 속도오차의 합을 개선 효과를 더 도출할 수 있으면, 다시 제 3 차 이득조정을 위한 실험계획법을 수행한다. 본 연구에서는 결국, 이와 같은 방법으로, 제 4 차 이득조정까지 수행한다. Table 4 는 제 1 차, 제 2 차, 제 3 차, 제 4 차 이득조정에서 선택한 각 제어이득의 값들이다. 굵은 숫자가 각 이득조정 단계에서 S/N 비를 최대로 하는 값들이다.

Fig. 9 의 제 3 차 이득조정(stage 3)에서 보면,  $K_p$  와  $K_f$  의 S/N 비는 더 이상 증가하지 않으므로, 각 제어이득의 최대치는 2 수준 근처에 있다고 판단할 수 있다. 선정된 제어이득에 대해서, 마지막으로 정밀하게 제어이득 수준의 범위를 작게 하여 조정한다.

제 4 차 이득조정에서 선정된 제어이득으로 서보모터  $M_5$  를 무부하상태에서 구동한 결과는 Fig. 8 같다. 이 그림을 Fig. 7 과 비교한다면, S/N 비는 12.1dB 증가하였고, 위치오차와 속도오차의 합은 평균 79.8% 감소하였다. 즉, 제 4 차 이득조정에서 선정된 제어이득은 이송속도 변화에 대하여, 견실성을 보장한다.

Table 4 Levels of the controllable factor from stage 1 to stage 4 for the servomotor  $M_5$

Stage Num	Levels	Control Factors			
		$K_p$	$K_f$	$K_L$	$K_f$
1	L1	40	1	500	100
	L2	70	3	1000	200
	L3	<b>100</b>	5	1500	<b>300</b>
2	L1	100	1	500	300
	L2	130	3	1000	600
	L3	<b>160</b>	5	1500	<b>900</b>
3	L1	160	<b>1</b>	<b>500</b>	900
	L2	<b>190</b>	3	1000	<b>1200</b>
	L3	220	5	1500	1500
4	L1	180	<b>1</b>	300	1100
	L2	190	2	<b>500</b>	1200
	L3	<b>200</b>	3	700	<b>1300</b>
Final		200	1	500	1300

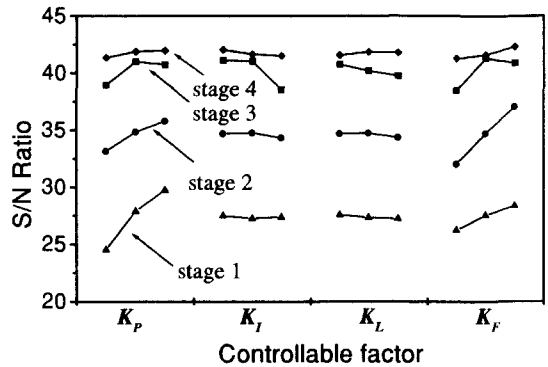


Fig. 9 Response graphs achieved from the stage 1 to the stage 4 for the servomotor  $M_5$

### 5. 제 2 단계 실험: 8 축 서보모터 제어이득 동시조정

제 1 단계 실험에서 각 그룹별로 무부하상태에서 독립적으로 조정된 제어이득은 실제 작동 조건에서는 달라질 수 있다. 또한, 같은 그룹의 서보모터라 할지라도 제어이득은 조금씩 틀리다. 따라서, 제 2 단계 실험의 목적은 실제작동조건을 대표하는 이송경로에 대하여, 공구 끝단의 이송속도가 변화함에도 불구하고, 8 개의 서보모터의 위치오차와 속도오차를 개별적으로 작게 하는 것이다. 이때의 목표특성치는 각 서보모터의 위치오차와 속도오차의 합을 개별적으로 작게 하는 망소특성으로 한다. 조정가능변수는 제 1 단계 이득조정과 같이, 위치제어오차인  $K_p$ ,  $K_f$ ,  $K_L$ ,  $K_f$ 로 선정한다. 직교배열표도 각 축을 개별적으로 조정하기 때문에, 제 1 단계의  $L_9(3^4)$ 을 사용한다. 8 개의 서보모터의 초기 제어이득들은 각 서보모터가 소속된 그룹별로 제 1 단계 실험의 제 4 차 이득조정에서 선정된 값으로 한다.

조정불가능변수는 공구 끝단의 이송속도로서, 공구 끝단의 속도를 저속( $f_L = 0.6$  m/min), 중속( $f_M = 1.2$  m/min), 고속( $f_H = 2.4$  m/min)의 3 개의 수준으로 한다. 이 때 공구 끝단의 경로는, Fig. 10 과 같이 수직 자세에서 y 축을 중심으로 90도 회전하는 경로 1, z 축을 중심으로 90도 회전하는 경로 2, 처음 공구의 위치인 수직 자세로 돌아오는 경로 3, 그리고, z 축을 중심으로 -90도 회전하는 경로 4로 이루어진다.



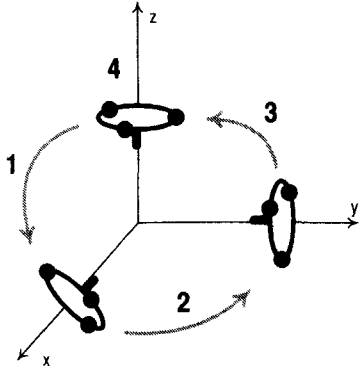
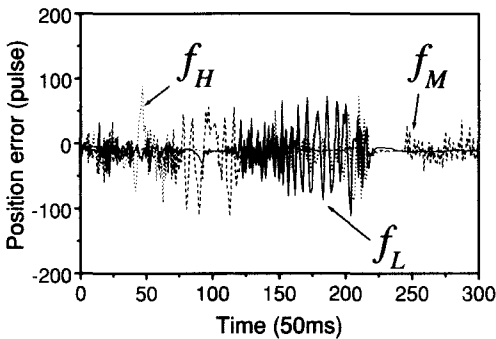


Fig. 10 Test-path of the spindle for the final control gain tuning

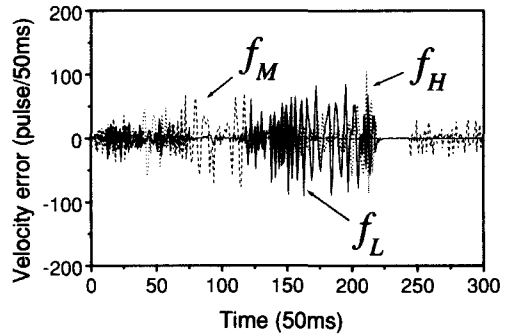
Fig. 10 과 같은 경로로 공구 끝단이 움직일 때, 서보모터  $M_5$  의 위치오차와 속도오차는 Fig. 11 과 같다. 제어이득은 제 1 단계 실험의 제 4 차 이득 조정으로 선정된 값이다.

Table 5 는 서보모터  $M_5$  와 동일한 서보모터  $M_4$  와  $M_6$  의 제 2 단계 실험의 제 1 차 이득조정(stage 1)과 제 2 차 이득조정(stage 2)에서 사용된 제어이득을 보여준다. 제 1 차 이득조정은 제 1 단계 실험의 제 4 차 이득조정으로 선정된 제어이득을 초기값으로하여 제어이득을 조정 한다. 제 2 차 이득조정에서는 제 1 차 이득조정에서 선정된 제어이득을 초기값으로 하여, 마지막으로, 제어이득을 미세조정한다.

Fig. 12 는 제 2 단계 실험의 제 2 차 이득조정

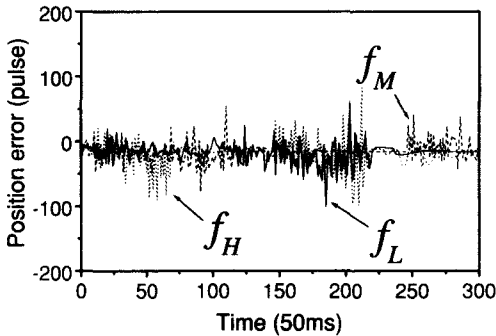


(a) Position error

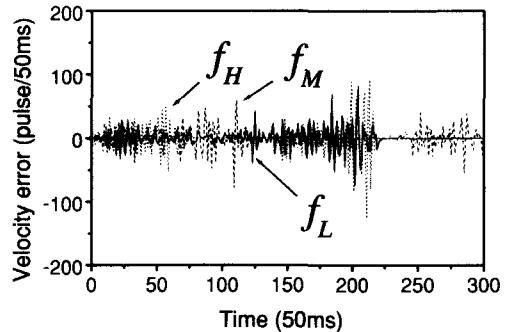


(b) Velocity error

Fig. 11 Position and velocity errors of the servomotor  $M_5$  for the path in Fig. 10 according to the level of feedrates with the initial control gains presented in Table 5



(a) Position error



(b) Velocity error

Fig. 12 Position and velocity errors of the servomotor  $M_5$  for the path in Fig. 10 according to the level of feedrates with the control gains selected at the stage 2

에서 최종적으로 선정된 제어이득으로, Fig. 10의 경로로 서보모터  $M_5$ 를 구동하였을 때의 위치오차와 속도오차를 보여준다. 이 그림을 Fig. 11과 비교한다면, S/N 비는 1.35dB 증가하였고, 위치오차와 속도오차의 합은 평균 12.2% 감소하였다.

Table 5 Levels of the controllable factor at the stage 1 and the stage 2 for the servomotor  $M_4, M_5, M_6$

# of M	Gains	Initial values	Stage 1			Stage 2		
			L1	L2	L3	L1	L2	L3
$M_4$	$K_p$	200	160	180	<b>200</b>	<b>200</b>	210	220
	$K_i$	1	<b>1</b>	3	5	<b>1</b>	2	3
	$K_L$	500	<b>500</b>	1000	1500	300	<b>500</b>	700
	$K_F$	1300	900	<b>1100</b>	1300	1000	1100	<b>1200</b>
$M_5$	$K_p$	200	160	<b>180</b>	200	170	<b>180</b>	190
	$K_i$	1	<b>1</b>	3	5	1	2	<b>3</b>
	$K_L$	500	<b>500</b>	1000	1500	300	500	<b>700</b>
	$K_F$	1300	900	<b>1100</b>	1300	1000	1100	<b>1200</b>
$M_6$	$K_p$	200	160	<b>180</b>	200	170	<b>180</b>	190
	$K_i$	1	<b>1</b>	3	5	1	<b>2</b>	3
	$K_L$	500	<b>500</b>	1000	1500	300	500	<b>700</b>
	$K_F$	1300	900	<b>1100</b>	1300	1000	1100	<b>1200</b>

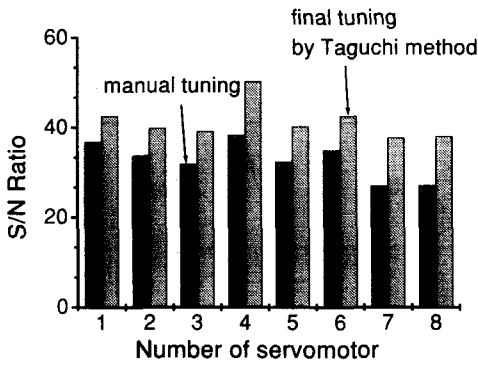
제 2 차 이득조정에서 최종적으로 선정된 제어

이득들은, Table 5에서 보는 것과 같이, 동일한 서보모터일지라도 서로 조금씩 틀리다. 같은 구조의 이송부에 연결되어 있지만, 각 이송부의 조립오차에 따른 마찰력과, 이송중에 각 서보모터가 받는 외력등이 틀리기 때문에, 제어이득이 조금씩 틀리게 선정된다.

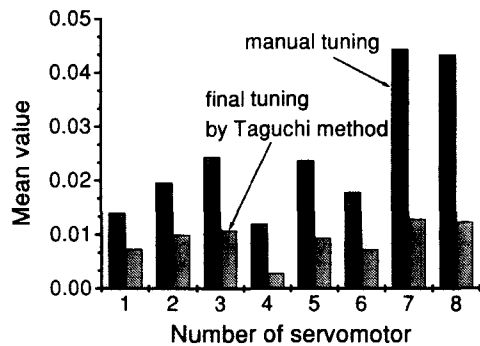
Fig. 13은 위치제어기 제조회사인 삼성전자에서 추천하는 방법으로 선정된 제어이득과 다구찌 방법을 사용하여 최종적으로 선정된 제어이득으로, Fig. 10의 이송 경로를 따라서, 서보모터를 각각 구동하였을 때, S/N 비와, 추종오차와 속도오차의 평균값을 8개의 서보모터별로 비교한 것이다. S/N 비는 각각  $M_1$ : 5.8dB,  $M_2$ : 6.1dB,  $M_3$ : 7.3dB,  $M_4$ : 12dB,  $M_5$ : 7.9dB,  $M_6$ : 7.6dB,  $M_7$ : 10.7dB,  $M_8$ : 10.9dB 증가하였고, 위치오차와 속도오차의 합은 각각  $M_1$ : 47.4%,  $M_2$ : 49.2%,  $M_3$ : 56.5%,  $M_4$ : 75.7%,  $M_5$ : 59.7%,  $M_6$ : 57.6%,  $M_7$ : 70.6%,  $M_8$ : 71.9% 만큼 감소하였다. 즉, 평균적으로 S/N 비는 8.5dB 증가하였고, 위치오차와 속도오차의 합은 61.4% 만큼 감소하였다.

### 6. 결론

본 논문의 목적은 다구찌방법을 이용하여, 다축 동시 PID 제어시스템의 제어이득을 조정하는데 있다. 적용실례로서, 병렬기구 공작기계인 8축 이클립스의 위치제어기의 총 32개 제어이득을 조



(a) S/N ratio



(b) Mean value

Fig. 13 S/N ratio and mean value of the control errors in each servomotor with the manual tuning by trial and error and the final tuning by Taguchi method

정하였다.

본 논문의 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 8 축 병렬기구 공작기계인 이클립스에 대하여, 이송 속도의 변화에도 불구하고, 위치제어오차와 속도제어오차의 변화와 그 절대값이 최소가 되는 제어이득을 조정하였다. Fig. 10 과 같은 이송경로를 실험 기준 경로로 선정하였고, 이송 속도를 저속, 중속, 고속으로 분류하였다.
- (2) 실험계획법을 제 1 단계와 제 2 단계 실험으로 구분하여 수행하였으며, 제 1 단계 실험에서는 제 1 차부터 제 4 차 이득조정을 하였고, 제 2 단계 실험에서는 제 1 차와 제 2 차 이득조정을 하였다.
- (3) 제 1 단계 실험에서는 8 개의 서보모터를 종류별로 3 개의 그룹으로 분류하여, 각 그룹 단위로, 최적의 제어이득을 찾아내었다. 서보모터  $M_3$  를 무부하상태에서 구동한 결과, 제 1 차 이득조정에서는 삼성전자에서 추천하는 방법보다, S/N 비는 2.1dB 증가하였고, 위치오차와 속도오차의 합은 평균 22.3% 감소하였다. 제 4 차 이득조정에서는, 제 1 차 이득조정에서보다 S/N 비는 12.1dB 증가하였고, 위치오차와 속도오차의 합은 평균 79.8% 감소하였다.
- (4) 제 2 단계 실험에서는 제 1 단계에서 설정한 제어이득을 초기값으로 하여, 총 32 개의 제어이득을 선정하였다. 삼성전자에서 추천하는 방법과 비교해 볼 때, 평균적으로 S/N 비는 8.5dB 증가하였고, 위치오차와 속도오차의 합은 61.4% 만큼 감소하였다.

## 후기

본 연구는 서울대학교 제어계측신기술 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Ziegler, J. G. and N. B. Nichols, "Optimum setting for automatic controllers," *ASME Trans.*, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
2. Astrom, K. J. and T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and

- amplitude margins," *Automatica*, Vol. 20, No. 5, pp. 645-651, 1984.
3. Astrom, K. J., C. C. Hang, P. Persson and W. K. Ho, "Towards Intelligent PID Control," *Automatica*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-9, 1992.
4. Ferrell, W. G. and Reddivari, V. R., "Higher quality products with better tuned controllers," *Proceedings of the 17th Int. Conference on Computers and Industrial Engineering*, Vol. 29, pp. 321-325, 1995.
5. Ginichi Taguchi, *Taguchi on Robust Technology Development*, ASME Press, 1993.
6. Peace, G. S., *Taguchi Methods: A hands-on approach to quality engineering*, Addison-Wesley, 1993.
7. Fowlkes, W. Y. and C. M. Creveling, *Engineering methods for robust product design*, Addison-Wesley, 1995.
8. J. W. Kim, C. B. Park, J. Kim, and F. C. Park, "Performance analysis of parallel manipulator architectures for CNC machining," *1997 ASME IMECE Symposium on Machine Tools, Dallas, U.S.A., 1997*, Vol. 6.2, pp. 341-348, 1997 .
9. S.-J. Ryu, J. W. Kim, J. C. Hwang, C. Park, H. S. Cho, K. Lee, Y. Lee, U. Cornel, F. C. Park, J. Kim, "Eclipse: An Overactuated Parallel Mechanism For Rapid Machining," *1997 ASME IMECE Symposium on Machine Tools, Anaheim, U.S.A., November*, Vol. 8, pp. 681-689, 1998.
10. 삼성전자 생산기술센터, *Multi-motion 제어기 사용자 설명서*