

# Ziegler-Nichols방법을 이용한 이산형 PID제어기의 자동동조

## On the Auto-Tuning of a Discrete PID Controller Based on the Ziegler and Nichols's Method

李 榮 逸\* · 權 旭 鉉\*\*  
(Young-Il Lee · Wook-Hyun Kwon)

**Abstract** - This paper proposes an auto-tuning method of a discrete-PID controllers which is based on the Ziegler and Nichols's PID Tuning Rule. This tuning rule is derived using the Pade's first order approximation and it prevents the performance degradation caused by the time-delay effect of zero order holder when the Ziegler-Nichols tuning rule is applied to a discrete PID controller. A simple and practical auto-tuning method is proposed through combining this discrete tuning rule with the relay control. The auto-tuning scheme is implemented on a microprocessor based system and is applied to a position control system to show the effectiveness of the discrete tuning rule.

### 1. 서 론

PID(Proportional Integral Derivative: 비례 적분 미분) 제어기는 실제 산업현장에서 가장 널리 사용되는 제어 알고리즘으로서 PID제어기의 체계적인 동조방법은 Ziegler와 Nichols[1]에 의해서 처음으로 제시 되었다. 이들은 두가지의 동조 방법을 제시하였는데 비례제어를 이용해서 페루우프 시스템을 일정 진폭으로 진동하게 하고 그 진동의 주기와 이득으로부터 PID계수값을 결정하는 것이 그 하나이고 둘째 방법은 계단입력에 대한 플랜트

의 개루우프(Open loop) 응답으로 부터 몇 가지 매개변수를 찾아내고 이 매개변수로 PID제어기의 계수를 계산하는 것이다.

Ziegler-Nichols방법은 계산의 간단함과 많은 사용을 통한 신뢰성으로 인해서 실제 공정제어 분야에서 PID제어기의 동조를 위해서 널리 채택되고 있다. 그러나 이 동조방법은 연속시간 PID제어기를 위한 동조 방법으로서, 근래 널리 사용되고 있는 이산형PID제어기에 적용시키기 위해서는 적절히 수정되어야 할 필요가 있다. 즉 이산형PID제어기를 사용할 경우 0차 홀터장치에 의한 시간지연 효과 때문에, 샘플링 시간이 길어짐에 따라 계단 입력에 대한 오버슈트가 커지고 진동이 오래 가게 되는데, 지금까지는 이산형 제어기의 시간지연 효과를 상쇄하기 위한 체계적 방법이 제시되지 않고 다만 연속형 제어기에 대해 얻어진 계수값을

\*正 會 員 : 서울大 大學院 制御計測工學科 博士課程  
 \*\*正 會 員 : 서울大 工大 制御計測工學科 教授 · 工博  
 接受日字 : 1991年 1月 3日  
 1次修正 : 1991年 7月 3日

적절히 줄여 쓰고 있다[3]. 따라서 Ziegler-Nichols의 방법을 이산형 제어기에 적용할 경우에 샘플링 시간을 고려하여서 적절히 수정 하여주는 체계적 방법이 실제적으로 필요하게 된다.

이산형 PID제어기를 동조하기 위한 방법은 [6] 등에서도 제시되고 있다. 그러나 이들은 시스템의 모델을 필요로 하고 있는 고로 이들 방법을 이용하기 위해서는 시험운전중의 입출력 정보를 통해서 플랜트의 계수를 추정하거나, 해석적 방법을 통해서 계산하여야 한다. 반면에 Ziegler-Nichols의, 주파수응답을 이용한 동조를 하기 위해서 필요한 플랜트의 정보는 [2]에서 제시한 릴레이 제어를 통해서 간단하고 안전하게 얻을 수 있다. 특히 이 방법은 분산제어 시스템에 사용되는 DDC (Direct Digital Controller)에 의해서 자동적으로 수행될 수 있으므로 이를 이산화된 Ziegler-Nichols 동조방법과 연결시키면 여러개의 PID 제어기가 존재하는 대규모의 분산제어 시스템에 효과적으로 사용할 수 있는 자동동조 방식을 얻을 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 파데의 일차 근사방식을 이용하여 이산형 PID제어기의 주파수 응답을 구하고 이를 이용해서 이산형 PID제어기에 바로 적용할 수 있는 Ziegler-Nichols 방법의 이산식을 구하였다. 즉 Ziegler-Nichols의 주파수응답을 이용한 설계방법을 나이키스트 선도상에서 이득여유 및 위상 여유를 적절히 설정하는 방식으로 파악하고 이를 파데근사방식을 통해 구한 주파수 응답을 이용하여 이산형 PID제어기에 적용하였다. 또한 실제 적용시의 동작상태에 따라서 Ziegler-Nichols 동조의 성능을 손쉽게 조절할 수 있는 설계변수를 도입하였다. 또한 [2]에서 제시한 릴레이를 이용한 시스템 식별방법과 본 논문에서 제안된, Ziegler-Nichols 방법의 이산식을 연결하여 마이크로 프로세서를 이용한 DDC로 쉽게 구현할 수 있는, PID제어기의 자동동조방식을 제시하고 이를 직접 제작한 이산제어기를 이용해서 구현하였다.

2절에서는 Ziegler-Nichols 방법을 나이키스트 선도 상에서 해석하고 3절에서는 파데의 일차 근사방식을 이용하여 Ziegler-Nichols 방법의 이산식을 구한다. 4절에서는 Åstrom과 Hägglund[2]의 릴레이 제어와 본 연구에서 제안된 이산 동조식을 결합한 이산형 PID제어기의 자동동조방식을 제안하고, 실험을 통해서 이산식의 유용성을 확인한다.

2. Ziegler-Nichols 방법의 해석

Ziegler-Nichols[1]의 PID 제어기는 표준형의 PID로서 식(1)과 같이 정의된다.

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \tag{1}$$

그림 1의 페루우프에서  $r=0$ 인 상태에서  $\tau_i = \infty$ ,  $\tau_d = 0$ 으로 두고 출력이 어떤 초기값에 의해서 일정한 진폭( $A_c$ )과 주기 ( $2\pi/\omega_c$ )의 진동을 유지하도록  $K_c$ 를 설정할 수 있다면,  $s = j\omega_c$ 가 그림1의 페루우프시스템의 극점중의 하나임을 알 수 있다. 따라서 식(2)가 성립한다.

$$1 + K_u G_p(j\omega_c) = 0 \tag{2}$$

여기서  $K_u$ 는 일정진동이 유지될 때의  $K_c$ 의 값  
 식(2)에서  $\text{Arg}(G_p(j\omega_c)) = -180^\circ$ 이고  $|G_p(j\omega_c)| = 1/K_u$ 임을 알 수 있다. 즉 우리는 플랜트의 나이키스트 선도상의 임계점(Critical Point)을 안 것이다. 이와 같이 플랜트의 나이키스트 선도상의 한 점을 알았을 때, PI, PD 또는 PID제어를 이용하여 그 점을 복소평면상의 임의의 점으로 놓을 수 있다. 그림2에서 보듯이 플랜트의 나이키스트 선도상의 한 점 A를 알았을 때 우리는 A를 비례요소로



그림 1 연속시간 폐환 제어 루우프  
 Fig. 1 Continous time feedback control loop

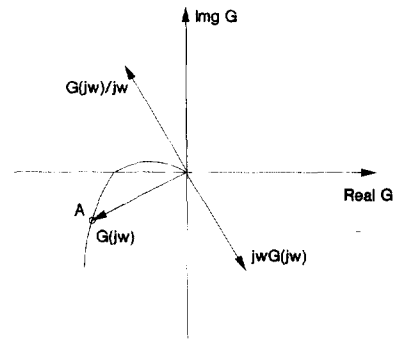


그림 2 A점이 비례, 미분, 적분 요소에 의해서  $G(j\omega)$ ,  $j\omega G(j\omega)$ ,  $G(j\omega)/j\omega$  방향으로 움직인다.

Fig. 2 The point 'A' can be moved to the directions  $G(j\omega)$ ,  $j\omega G(j\omega)$ , and  $G(j\omega)/j\omega$  by the proportional, derivative and integral terms respectively

써  $G(j\omega)$  방향으로, 미분요소로써  $j\omega G(j\omega)$  방향으로, 적분요소로써  $G(j\omega)/j\omega$  방향으로 각각 옮길 수 있다. 따라서 각 요소의 이득을 조절함으로써 A를 복소평면상의 임의의 점으로 옮겨 놓을 수 있음을 알 수 있다. 이 점에 착안 하여 Ziegler-Nichols [1]의 경우 비례제어를 통해서 찾은 플랜트의 임계점을 P, PI, PID제어를 통해서 각각 어떤 점으로 옮기는지 살펴 본다.

● P 제어

$$\text{PID계수} : K_c = 0.5K_u, \tau_i = \infty, \tau_d = 0 \quad (3a)$$

제어기 특성

$$|G_c(j\omega_c)| = 0.5K_u \quad (3b)$$

$$\text{Arg}(G_c(j\omega_c)) = 0 \quad (3c)$$

보상결과

$$|G_c(j\omega_c)G_p(j\omega_c)| = 0.5 \quad (3d)$$

$$\text{Arg}(G_c(j\omega_c)G_p(j\omega_c)) = -180^\circ \quad (3e)$$

플랜트의 임계점이 제어기에 의해 보상된 개루우프 시스템의 임계점이 된다. 보상된 시스템의 이득여유가 2임을 알 수 있다.

● PI 제어

$$\text{PID계수} : K_c = 0.45K_u, \tau_i = \pi/0.6\omega_c, \tau_d = 0 \quad (4a)$$

제어기 특성

$$|G_c(j\omega_c)| = 0.458K_u \quad (4b)$$

$$\text{Arg}(G_c(j\omega_c)) = -10.8^\circ \quad (4c)$$

보상결과

$$|G_c(j\omega_c)G_p(j\omega_c)| \approx 0.458 \quad (4d)$$

$$\text{Arg}(G_c(j\omega_c)G_p(j\omega_c)) \approx -190.8^\circ \quad (4e)$$

적분요소의 위상뒤짐 효과에 위해서 플랜트의 임계점이 보상 후에  $G_p(j\omega_c)/j\omega$  방향으로  $10^\circ$  가량 치우친다. 실제 플랜트는 대부분의 경우, 주파수 성분이 낮아질수록 이득이 커지고 위상뒤짐이 작아지므로 보상된 시스템의 위상교차주파수는  $\omega_c$  보다 작아지고 새로운 위상교차주파수에 대한 개루우프시스템의 이득은 0.458 보다 커진다, 따라서 보상된 시스템의 이득여유는  $1/0.458$  보다 작게 된다,

● PID 제어

$$\text{PID계수} : K_c = 0.6K_u, \tau_i = \pi/\omega_c, \tau_d = \pi/4\omega_c \quad (5a)$$

제어기 특성

$$|G_c(j\omega_c)| = 0.662K_u \quad (5b)$$

$$\text{Arg}(G_c(j\omega_c)) = 25^\circ \quad (5c)$$

보상결과

$$|G_c(j\omega_c)G_p(j\omega_c)| \approx 0.662 \quad (5d)$$

$$\text{Arg}(G_c(j\omega_c)G_p(j\omega_c)) \approx -155^\circ \quad (5e)$$

주파수가  $\omega_c$  인 성분에 대해서는 미분요소에 의한 위상앞섬의 효과가 적분요소에 의한 위상뒤짐의 효과 보다 커서 플랜트의 임계점이 보상후에  $j\omega G_p(j\omega_c)$  방향으로 약  $25^\circ$  가량 치우친다. 실제 플랜트는 대부분의 경우, 주파수 성분이 높아질수록 응답이득이 작아지고 위상 뒤짐이 커지므로 보상된 시스템의 위상교차주파수는  $\omega_c$  보다 더 크고, (5a)로 미루어 볼 때, 이득여유는  $1/0.662$  보다 작아지게 될 것이다.

이상에서 살펴본 바에 의하면 Ziegler-Nichols [1]의 PID동조방법은 플랜트의 임계점을 적절히 옮겨서 보상된 시스템의 이득여유가 2정도 되도록 하는 방법이라고 할 수 있다. PI와 PID제어의 경우에는 물론 적분요소에 의해서 계단입력에 대한 정상상태 오차를 배제하는 특성도 아울러 가지게 된다. PID제어의 경우 매개변수가 세가지이므로 (5a)의 PID계수로부터 (5b, c)와 독립인 조건식을 하나 더 찾아 낼 수 있다. 이를 (5f)로 정한다.

$$\tau_i = (\pi/\omega_c) \times \alpha \quad (5f)$$

(5f)식은 (5a)식과 같은 계수를 가진 PID제어기의 비례요소와 적분요소의 비이다. 여기서  $\alpha$ 는 시스템의 성능에 따라서 비례요소와 적분요소의 비를 조절해 주기 위한 설계변수으로써  $\alpha$ 를 1보다 크게 하면 적분요소의 비가 상대적으로 작아져서  $\omega_c$  이하의 주파수에 대한 시스템의 위상뒤짐이 적어져서 원래 Ziegler-Nichols 동조방법보다 위상여유가 좋아질 수 있으며  $\alpha$ 를 1보다 작게 하면 적분요소의 비가 반대로 커져서 오차가 빨리 줄어든다.

### 3. Ziegler-Nichols동조방법의 이산화

본 절에서는 몇가지 근사식을 이용하여 이산형 PID제어기를 포함한 이산제어시스템의 주파수 특성을 구하고 이를 통해서 2절에서 논의한 Ziegler-Nichols동조방법을 이산화한다. Ziegler-Nichols의 방법은 연속형 PID제어기의 동조방법이나 실제 이 방법으로 동조되어 사용하는 제어기는 이산형 PID제어기일 경우가 많다. 이 경우 영차 홀더장치에 의한 시간 지연효과 때문에 이산형 제어기를 사용하는 경우에 그 성능이 나빠질 수 있다. 샘플

링시간을 충분히 빨리 잡거나, 연속형 PID제어기에 대해서 주어진 제어변수 값을 적절히 줄여 이산형 제어기에 사용할 수 [3] 있겠으나 플랜트의 특성이 빠를경우 샘플링 시간을 플랜트의 특성에 비해 충분히 짧게 잡기가 힘들며, 제어변수값을 적절히 줄여 잡는 방법은 그리 효과적인 방법이 아닐 것이다. 본 절에서 유도하는 Ziegler-Nichols 방법의 이산식은, 파데의 일차 근사식을 유효하게 사용할 수 있도록 샘플링 주기  $T$ 가  $\omega_c T \leq 1$ 을 만족할 정도로 빠른 한, 샘플링 시간에 관계 없이 이산형제어기를 사용하여 연속형 제어기와 거의같은 성능을 얻을 수 있는 체계적 방법을 제시하는 것이다.

그림3의 이산제어루우프를 그림1의 연속제어루우프와 비교해 보았을 때, 이산제어루우프에서 연속제어루우프의 연속형 PID제어기를 대신하는 것이 이산형 PID제어기와 0차의 홀더장치 그리고 샘플러를 합친  $G_{cd}(j\omega)$ 임을 알 수 있다. 따라서 이산형 PID제어기를 사용하는 경우에도 연속형 PID를 사용하는 경우와 같은 Ziegler-Nichols의 동조효과를 얻기 위해서는  $G_{cd}(j\omega_c)$ 가 다음의 식을 만족해야함을 식(5b, c, f)로부터 알 수 있다.

$$|G_{cd}(j\omega_c)| = 0.662K_u \quad (6a)$$

$$\text{Arg}(G_{cd}(j\omega_c)) = 25^\circ \quad (6b)$$

$$\text{P요소}/\text{I요소} = (\pi/\omega_c) \times \alpha \quad (6c)$$

한편  $G_{cd}(j\omega)$ 는 다음과 같이 주어진다[4][5].

$$G_{cd}(j\omega) = \frac{1}{T} H(\exp(j\omega T)) G_{zoh}(j\omega) \quad (7)$$

$H(z)$ : 이산제어알고리즘,  $G_{zoh}(s) = \frac{1}{s}(1 - \exp(-sT))$

여기서

$$H(z) = K_p + \frac{K_i T z}{z-1} + \frac{K_d}{T} \frac{z-1}{z} \quad (8)$$

(7)식의  $1/T$ 항은 샘플러에 의한 효과를 나타낸다[4]. (8)식의  $H(z)$ 는 속도알고리즘을 이용한 이산형 PID제어기의  $z$ -변환 형태이다. 다음과 같

은 일차의 파데근사식을 이용해서 (7)식에 포함된 초월함수들을 근사화 시킨다.

$$\exp(-d_m s) \approx \frac{1 - 0.5 d_m s}{1 + 0.5 d_m s} \quad (9)$$

따라서 (9)식을 이용해서  $H(\exp(-j\omega T))$ 의 근사식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H(\exp(j\omega T)) &\approx H\left(\frac{1 + j0.5\omega T}{1 + 0.5\omega T}\right) \\ &= K_p + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d 0.5\omega^2 T}{1 + (0.5\omega T)^2} \\ &\quad + j\left(\frac{K_d}{1 + (0.5\omega T)^2} - \frac{K_i}{\omega}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

다음으로  $G_{zoh}(j\omega)$ 의 근사식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{zoh}(j\omega) &\approx \frac{1}{j\omega} \left(1 - \frac{1 - 0.5j\omega T}{1 + 0.5j\omega T}\right) \times \\ &\quad \frac{T}{\sqrt{1 + (0.5\omega T)^2}} \exp(-0.5\omega T) \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)의 두번째줄은  $\tan^{-1}(0.5\omega T) \approx 0.5\omega T$ 의 근사식을 이용해서 구한다. (10)식과 (11)식을 이용하여 (7)의  $G_{cd}(j\omega)$ 의 근사식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{cd}(j\omega) &\approx \frac{1}{T} \left\{ \left( K_p + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d 0.5\omega^2 T}{1 + (0.5\omega T)^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + j\left( \frac{K_d \omega}{1 + (0.5\omega T)^2} - \frac{K_i}{\omega} \right) \right\} \\ &\quad \times \frac{T}{\sqrt{1 + (0.5\omega T)^2}} \exp(-0.5\omega T) \end{aligned} \quad (12)$$

그러므로 식(12)와 식(6a, b)로부터 다음식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &\left( K_p + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d 0.5\omega_c^2 T}{1 + (0.5\omega_c T)^2} \right) \\ &\quad + j\left( \frac{K_d \omega_c}{1 + (0.5\omega_c T)^2} - \frac{K_i}{\omega_c} \right) \\ &= 0.662K_u \sqrt{1 + (0.5\omega_c T)^2} \exp(0.5\omega_c T + 0.437) \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)의 양변을 실수부와 허수부로 나누어 생각하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &K_p + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d 0.5\omega_c^2 T}{1 + (0.5\omega_c T)^2} \\ &= X \cos(0.5\omega_c T + 0.437) \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\frac{K_d \omega_c}{1 + (0.5\omega_c T)^2} - \frac{K_i}{\omega_c} = X \sin(0.5\omega_c T + 0.437) \quad (14b)$$

여기서  $X = (0.662K_u) \times \sqrt{1 + (0.5\omega_c T)^2}$

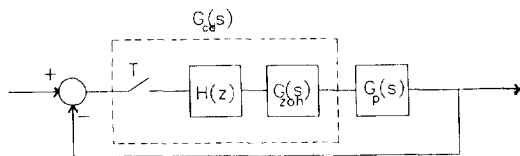


그림 3 이산시간 폐환 제어 루우프  
Fig. 3 Discrete time feedback control loop

또한 식(14)로부터 이산형PID제어부의 주파수 응답에서 아나로그 PID제어기의 D계수와 I계수의 역할을 하는 항들을 다음과 같이 잡을 수 있으므로

$$P\text{계수} : K_p + \frac{K_i T}{2}$$

$$I\text{계수} : K_i$$

식(6c)는 다음과 같이 구현할 수 있다.

$$K_p = (\pi/\omega_c \times \alpha - 0.5 T) K_i \quad (14c)$$

(14a-c)식으로 부터, 속도알고리즘을 이용한 이산형 PID제어기에 대한 이산화된 Ziegler-Nichols 동조식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_i = \frac{X}{R + T} \{ \cos(0.5\omega_c T + 0.437) - 0.5\omega_c T \sin(0.5\omega_c T + 0.437) \} \quad (15a)$$

$$K_p = R \times K_i \quad (15b)$$

$$K_d = \frac{1 + (0.5\omega_c T)^2}{\omega_c} \left\{ \frac{K_i}{\omega_c} + X \sin(0.5\omega_c T + 0.437) \right\} \quad (15c)$$

여기서  $R = \frac{\pi}{\omega_c} \times \alpha - 0.5 T$ ,

$$X = 0.662 K_u \sqrt{1 + (0.5\omega_c T)^2}$$

#### 4. 이산동조식을 이용한 자동동조 PID의 구현

3절에서 제안된 이산동조방식을 이용한 자동동조 PID제어기를 i8086범용 마이크로프로세서와 12 bit의 A/D 및 D/A변환기를 사용한 직접이산제어기에 구현하고 이를 실험용 서어보 모터를 이용한 위치제어에 적용하여 보았다. 시스템 식별방법으로는 [2]에서 제안한 릴레이를 이용한 방법을 사용한다. 릴레이제어는 이산제어기에 의해서 손쉽게 구현될 수 있다. 즉 두개의 아나로그 입력을 통해서 충분히 빠른 빈도로 설정치와 시스템 출력을 읽어 들이고 이를 비교하여 그 차이가 양(+)일 경우에는 일정 크기의 양의 출력을, 음(-)일 경우에는 양일 경우와 같은 크기의 음의 출력을 시스템입력에 가한다. 샘플링 간격 때문에 시스템 입력의 변화를 시스템 출력의 0점 교차와 완전히 일치 시킬 수는 없겠으나 샘플링 시간이 시스템에 비해서 충분히 빠르다면 그 불일치의 효과는 크지 않다. 특히 실제의 경우 노이즈에 의한 영향을 고려하여 릴레이 출력을 변화시키는, 설정치와 시스템 출력의 오차에 얼마간의 사구간(Ddead Band)을 두는 것이 상례이고 릴레이 제어는 계산이 극

히 간단하여 샘플링 주기를 PID제어알고리즘을 돌릴때에 비해서 크게 줄여 잡을 수 있어서 이산제어기로 릴레이 제어를 하는 것은 아나로그 경우와 거의 그 효과가 같다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 10msec 간격으로 출력값을 감시하면서 진동의 주기와 진폭을 측정한다. 이때 진동의 주기는 0점 통과(zero crossing)를 점검하여 계산하며, 진폭은 진동의 최대값과 최소값의 차이로부터 계산한다. 좀 더 정확한 측정방법으로서 최소자승추정(least square estimation)이나 칼만필터 등을 이용할 수 있겠으나 시뮬레이션이나 실제시스템에의 적용 결

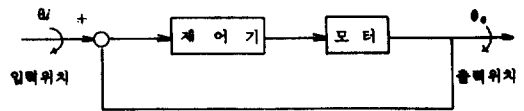


그림 4 DC-서어보 모터를 이용한 위치제어 시스템

Fig. 4 A position control system using the DC-servo motor

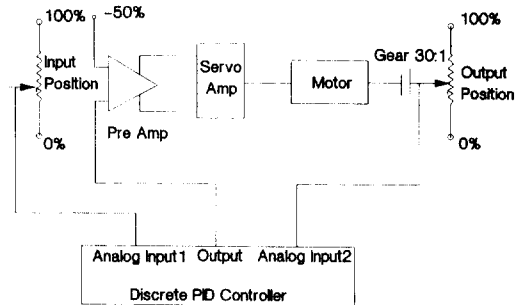


그림 5 제어시스템의 결선도

Fig. 5 Configuration of the control system

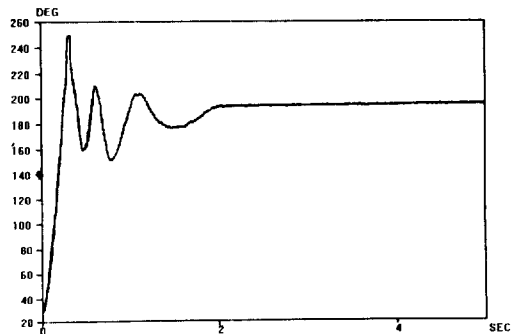
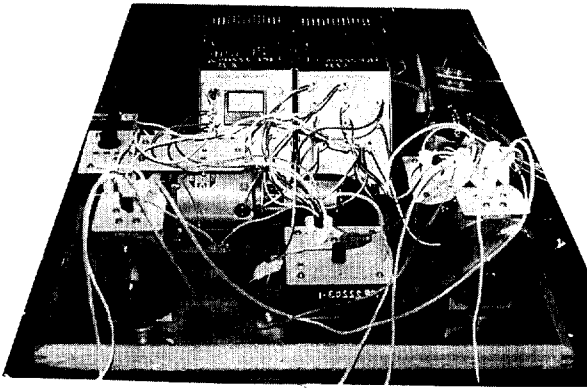
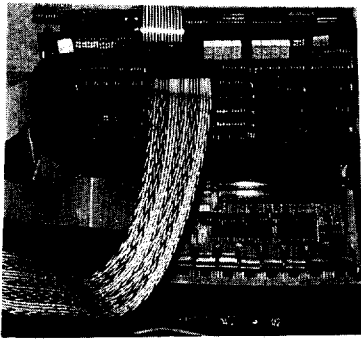


그림 6-1 초기동조와 제어시의 출력 (T=10msec)

Fig. 6-1 The output of the initial tuning (T=10msec)



(a)



(b)

사진 1 실험용 시스템(a)과 제작된 제어기 (b)  
Photo 1 The position control system and the controller

표 1 자동동조시의 실험 데이터  
Table 1 Data of the Auto-Tuning experiment

Samp. 주기 계수	10msec	20msec	30msec	40msec
$K_p$	0.469	0.466	0.362	0.307
$K_i$	1.104	1.137	0.852	0.731
$K_a$	0.024	0.029	0.030	0.039
$\alpha$	2	2	2	2
$\omega_c$	14.612	14.959	14.279	14.279
$K_u$	0.865	0.974	0.861	0.871

과, 앞의 간단한 방법을 사용하는 것에 비해서 큰  
잇점이 없다고 알려져있다[2]. 릴레이 제어를 시  
작하여 나타나는 2번째 0점 통과 시기로 부터 시  
작하여 4번째 0점통과 때 까지를 한 주기로 보고  
그동안 측정된 진동의 최대값, 최소값, 주기로부터  
 $K_u$ 와  $\omega_c$ 를 찾아내고 (15)식을 이용해서 PID계  
수를 구한다. PID계수를 계산한 다음 스텝에서 부  
터는 PID제어를 수행한다.

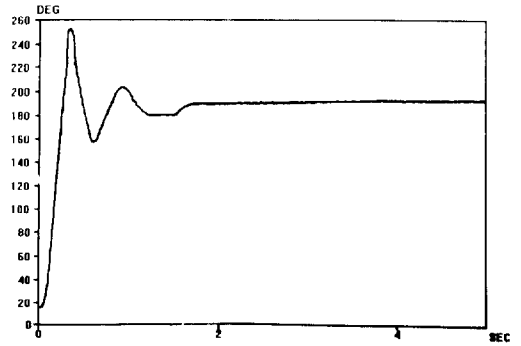


그림 6-2  $T=10\text{msec}$ 시의 계단응답  
Fig. 6-2 The step response  
( $T=10\text{msec}$ )

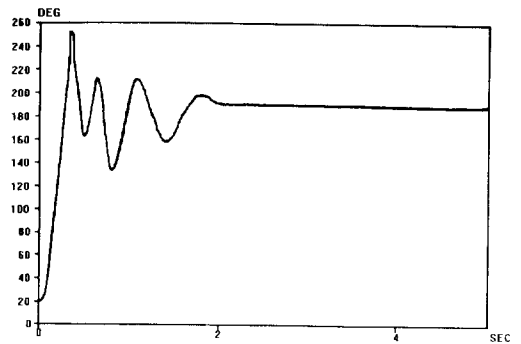


그림 7-1 초기동조와 제어시의 출력 ( $T=20\text{msec}$ )  
Fig. 7-1 The output of the initial tuning  
( $T=20\text{msec}$ )

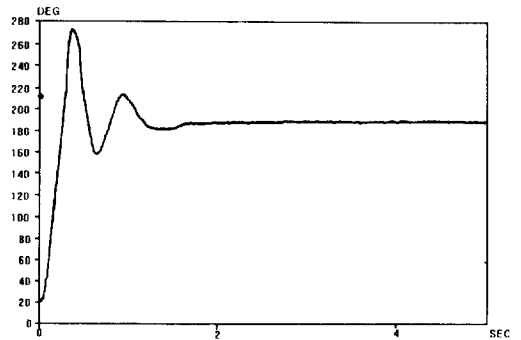


그림 7-2  $T=20\text{msec}$ 시의 계단응답  
Fig. 7-2 The step response  
( $T=20\text{msec}$ )

대상시스템은 DC서어보모터를 이용한 위치제어  
시스템으로서 전체적인 제어시스템의 블록다이아  
그램은 그림4와 같다.

그림5는 이산제어기와 모터시스템의 대략적인  
결선도이며 사진1은 대상시스템과 제어기의 실험물

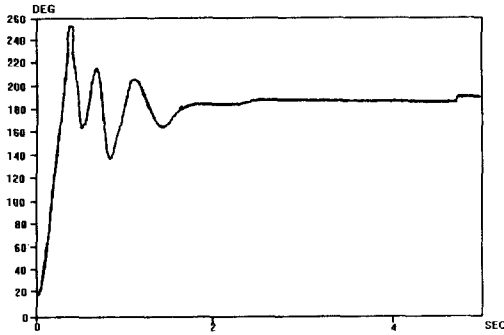


그림 8-1 초기동조와 제어시의 출력 ( $T=30\text{msec}$ )  
 Fig. 8-1 The output of the initial tuning ( $T=30\text{msec}$ )

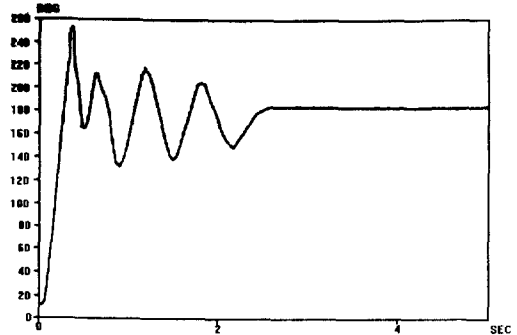


그림 9-1 초기동조와 제어시의 출력 ( $T=40\text{msec}$ )  
 Fig. 9-1 The output of the initial tuning ( $T=40\text{msec}$ )

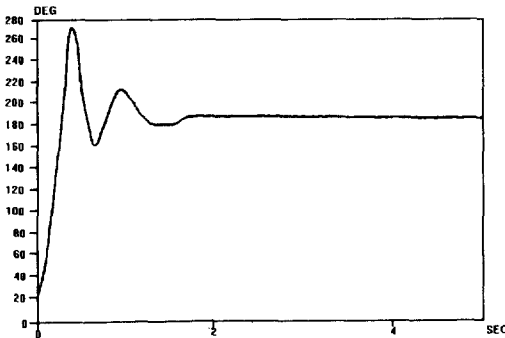


그림 8-2  $T=30\text{msec}$ 시의 계단응답  
 Fig. 8-2 The step response ( $T=30\text{msec}$ )

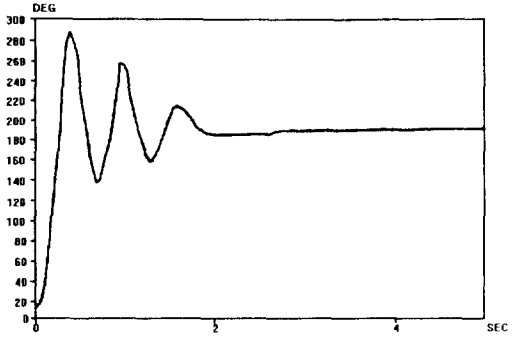


그림 9-2  $T=40\text{msec}$ 시의 계단응답  
 Fig. 9-2 The step response ( $T=40\text{msec}$ )

이다. 입력위치와 출력위치의 측정을 위해서 가변 저항을 이용했으며 모터를 양방향으로 돌리기 위해서  $-50\%$ 로 바이어스(bias)된 전단앰프를 사용하였다.

실험에서는 계단입력이 주어진 상태에서 릴레이 제어를 시작하여 PID의 계수들을 구하고 즉시 이들 계수에 의해 여러가지 샘플링 주기로 PID제어에 들어가는 경우를 먼저 보았고 다음으로 이들 계수로 PID제어가 이루어지고 있는 중에 계단입력이 들어가는 경우의 응답을 각 샘플링 주기별로 살펴보았다. 표1에 릴레이 제어에 의해 측정된  $\omega_c$ 와  $K_u$  그리고 이들로부터 4가지 샘플링 시간에 대해서 식(15)의 이산동조식을 통해 계산된 PID계수 값들이 나타나 있다. 이 표에서 볼때에  $\omega_c$ 와  $K_u$ 는 각 경우에 비슷하게 측정되었다. 또한 샘플링 간격이 길어질 수록  $K_p$ 와  $K_i$ 계수는 적어지고  $K_d$ 계수는 반대로 커져서 샘플링 간격에 의한 시간 지연 효과를 감쇄시키려는 경향을 표에서 발견할 수

있다.

그림(6)-(9)에 각 샘플링 시간의 경우의 동조시의 출력 파형과 계단입력에 대한 응답파형이 나타나 있다. 이들에서 볼 때에 샘플링 주기  $T$ 가  $\omega_c T < 0.5$ 이하인 경우에는 샘플링 주기의 변화에 따른 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 Ziegler-Nichols의 동조방법을 나 이크스트선도 상에서의 동조방법으로 해석하고 이를 이산형 PID제어기에 적용하여 샘플링 효과를 고려한 이산형 Ziegler-Nichols동조식을 만들어 내었다. 릴레이 제어를 이용한 시스템 식별방법과 개발된 동조식을 연결함으로써 플랜트의 식별로부터 제어기 매개변수 결정까지의 전과정을 마이크로프로세서를 사용하여 자동화할 수 있음을 실험을 통하여 보였다. 실험결과에서, 이산형 PID제어

기에 이산화된 동조식을 적용한 경우에는 샘플링 시간  $T$ 가  $\omega_c \times T \leq 0.5$ 를 만족할 정도로 작으면 그 성능이 샘플링 시간에 영향을 받지 않음을 볼 수 있었다. 이 방법은 이산 PID제어기가 다수 사용되는 대규모 시스템에 적용되어 제어기동조에 소요되는 노력을 크게 절감시킬 수 있을 것으로 기대된다. 실험에서 보는 것처럼 Ziegler-Nichols 방법으로 동조한 경우 계단입력에 대한 오우버슈트가 비교적 크음을 알 수 있는 데 이런 단점은 2절에서 언급한 설계변수를 적절히 조절함으로써 어느 정도 보완될 수 있으리라 본다.

### 참 고 문 헌

[1] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," Trans-

actions of the ASME, 1942.

- [2] K.J. Åstrom and T. Haggglund, "Automatic Tuning of simple regulator with specifications on Phase and Amplitude Margins," *Automatica*, Vol. 20, No. 5, 1984.
- [3] R. Kofahl and R. Isermann, "A Simple Method for Tuning of PID Controllers based on Process Parameter Estimation," *ACC*, Boston, Vol. 2, 1985.
- [4] K.J. Åstrom and B. Wittenmark, *Computer Controlled Systems*, Prentice Hall, pp. 7379, 1984.
- [5] Kuo, *Digital Control Systems*, Holt, Rienhart and Winston Inc., pp. 23~39, 1980.
- [6] Jong-Hwan Kim and Keh-Kun Choi, "Self Tuning Discrete PID Controller", *IEEE Trans. on IE*, Vol. IE-34, No. 1987.