

마이크로 프로세서를 이용한 PI 제어기 설계

정순현*, 권순걸*, 서기영*, 이수흥*, 김영문**
 경남대학교*, 마산대학**

An Auto-tuning of PI Controller using Microprocessor

Soon-Hyun Jeong*, Soon-Kul Kwon*, Ki-young Suh*, Soo-Heum Lee*, Young-Mun Kim**
 Kyungnam University*, Masan college**

Abstract - 본 논문은 마이크로 프로세스로 처리되는 여러 제어장치들 중에서 PI제어기의 최적 자동동조에 관한 개선된 방법을 제안하고자 한다.

이 방법은 Relay 자동동조 법으로서 이를 마이크로 프로세스에 응용하여 제어대상에 최적의 PI계수를 입력하게 된다. 이를 위해 먼저 Computer와 DSP사이에 통신이 가능하도록 RS-232를 설치하고, 컴퓨터의 제어신호에 따라 모터의 속도가 Relay와 PI제어기에 의해 목표값에 도달할 수 있도록 설계하였다. 내부적으로 사용된 Relay 동조방식은 Relay로 제어대상의 출력을 강제로 진동시켜서 출력의 진폭과 주기를 이용하여 PI 계수를 조정하고 제어기의 입력값으로 선택된다. Relay동조 법은 동조과정이 간단하여 동조 방식의 구현이 쉽다. 또 위상여유를 고려하여 제어기의 계수를 조정하기 때문에 시스템의 견실성을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라, 비례 제어만으로 임계 진동을 하지 않는 시스템의 경우에도 사용할 수 있고, 원점에 극점이 있는 경우에도 적용할 수 있어서 기존의 제어방식이 가지는 제약성의 한계를 극복할 수 있어서 적용성이 우수하다.

1. 서 론

현대 산업현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 제어기 대부분은 PID제어기며, 이는 구조가 간단하고 제어성능이 우수하며, 또 넓은 적응성의 장점으로 제어이득 조정이 비교적 쉽기 때문에 산업현장에서 80%이상을 차지할 정도로 많이 사용되고 있다.¹⁾ 지난 수 십년간 산업현장에서 기술자들은 제어대상에 대한 PID제어 계수를 경험적인 방법인 수동으로 동조하여 왔다. 하지만 최근 몇 년간에는 마이크로 프로세스(마이크로 콘트롤러, DSP)의 등장으로 PID제어기 계수를 자동으로 동조하는 연구가 활발히 진행되고 있다.²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾

본 논문에서는 이러한 점을 착안하여 PID제어기의 최적 자동동조에 관한 설계방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 Relay를 이용한 방법이며, 이를 마이크로 프로세스(DSP : TMS-32)에 적용하여 소프트웨어적으로 Relay의 기능이 동작하게끔 설계를 하였다. Relay동조방식은 기존의 Ziegler-Nichols의 방식인 제어대상의 계단응답으로부터 모델링 된 1차 지연계를 Padé⁶⁾⁷⁾ 근사화 하고, 한계감도법과 과도응답 법으로 초기계수를 정하는 방법보다는 더욱더 유연성이 있고, 적용성이 높은 방식이다. 이는 Ziegler-Nichols⁸⁾⁹⁾ 계수조정법이 상승시간과 최대 초과를 고려한 조정법이고 적용대상이 상당히 한정되는 제약성을 지니고 있으며, 안정한 복소 극점을 주 극점으로 갖지만 비례제어만으로는 임계진동을 하지 않는 시스템의 경우에는 적용할 수 없다는 것이다. 즉 이런 적용대상의 제약성을 극복하기 위해 제시된 Relay 동조 방법은 Relay에 의해 출력을 강제로 진동시키면서 출력의 진폭과 주기를 이용하여 PID 계수를 조정하고, 또 상대안정성의 척도인 위상여유를 고려하여 PID제어기의 계수를 조정하기 때문에 시스템의 상대안정성과 견실성을 향상시킬 수 있다. 그러나 이 방법은 극점이 우 반면에 있는

불안정한 시스템에는 적용할 수 없는 단점이 있다

2.1 제안된 제어장치의 구성도

본 논문에서 제안된 Relay 동조 방식¹⁰⁾과 DSP(Digital to Signal Processor)를 사용한 블록도는 그림1 과 같으며, 우선 선택된 제어대상의 시스템에 사용되는 제어기를 구성하기 위하여 PI제어기를 Digital 제어기로 변환을 하고, C Program으로 작성한 후 DSP에 제어동작을 주기 위하여 컴퓨터와 DSP가 통신을 할 수 있게 RS-232를 사용하였다. 아래 그림은 제안된 제어장치의 개략도를 나타낸 것이다.

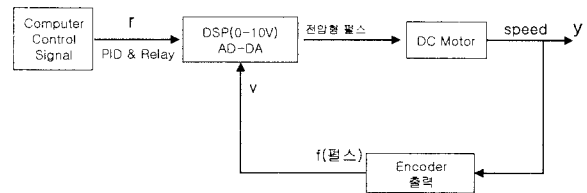


그림 1. 제어장치의 블록선도
 Fig. 1 PID Control of plant

제안된 구성 도에서 볼 수 있는 것처럼 컴퓨터에서 제어신호와 제어대상의 동작을 제어하기 하기 위해서 DSP Down 프로그램과 통신 프로그램을 작성을 했다. DSP에 던져지는 프로그램에 Relay와 PI제어기를 설계를 하였다. 또 DSP에서는 인터럽트가 컴퓨터에서 던져주는 신호에 따라 발생하게끔 해서 DC모터를 구동 할 수 있는 전압형 펄스로 출력하게 하였다. DC 모터에는 Encoder가 부착되어 있고, 출력된 펄스의 신호가 DSP의 ADC로 입력되어서 발생된 인터럽트 주기와 입력된 펄스를 단순 비교에 의해서 목표값을 찾아가게 한다. 이때 제안된 Relay와 PI제어기에 의해 계수를 추종하고 목표값에 도달할 수 있도록 설계하였다.

2.2 Relay동조 방식의 구성도

다음으로 제어시스템에 사용되는 Relay 동조 PID제어기의 블록선도를 그림 2에 나타내었다. 이 블록선도에서 나타낸바와 같이 목표치로 계단응답을 가하게 되면 제어기와 병렬로 Relay를 폐 루프로 추가하여 Relay 되 먹임에 의해 출력을 강제로 진동시켜서 출력이 발진할 때 한계이득과 한계주기를 결정한다. 다음, 이 값들로부터 PID 계수를 선정한다. 즉, PID 제어기를 동조하기 위해 먼저 Relay를 동작시키면서 오차신호가 양이면 Relay 출력을 +로, 음이면 -로 제어하는 방식으로 출력을 발진시킨다. 이 때 기준입력은 $r(t) = 0$ 으로 하거나 어떤 상수 값을 갖도록 한다. 그리고 이 진동 출력의 계수들로부터 PID 계수가 결정되기 전까지는 PID 제어기를 폐로에 연결하지 않는다. 즉, 동조 방식에서는

플랜트가 Relay 되먹임에 먼저 연결이 되고, 동조 방식이 끝난 후의 제어 방식에서는 PID 제어가 플랜트에 연결된다.

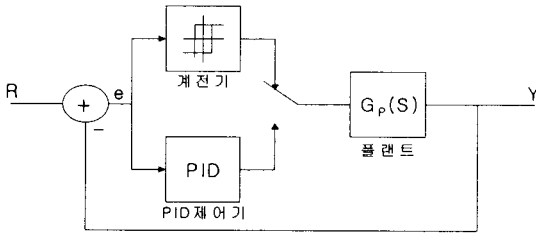


그림 2. Relay 부가 PID 제어기의 블록선도
Fig 2. block diagram of PID control system using relay inference

2.3 제어기 및 제어대상의 정식화

제어대상을 수학적 모델로 유도할 수 있는 경우, 페루프 시스템의 과도 및 정상상태의 조건을 만족하는 제어기의 파라미터를 결정하는데 여러 가지 설계 방식의 적용이 가능하지만 제어대상이 너무 복잡하여 수학적 모델을 쉽게 얻을 수 없을 때에는 PID제어기 설계의 해석적 접근이 불가능하므로 제어기 설계에 실험적 접근이 필요하다.

따라서, 시물레이션에 사용한 PID 제어기의 전달함수는 다음과 같이 정의한다.

$$G_C(S) = K_P(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S) \quad (2.1)$$

여기서 K_P 는 제어기의 비례이득, T_I 는 적분시간, T_D 는 미분시간이다.

Relay의 자동동조 법에서 정해지지 않는 플랜트나 여러 요인에 의해 시시각각 변화하는 대부분의 플랜트에 대해 Relay 되 먹임은 임계진동에 가까운 주기를 갖는 진동을 나타내게 한다. (그림. 2)의 시스템에서 이러한 진동이 나타날 때 Relay의 진폭을 A_r , 출력진폭을 A_o 라 하면, 한계주기 T_u 는 바로 진동출력의 주기와 같고, 한계이득 K_u 는 다음과 같은 관계식으로부터 구한다.

아래 그림은 비 감쇠 임계진동을 나타내는 응답곡선이다.

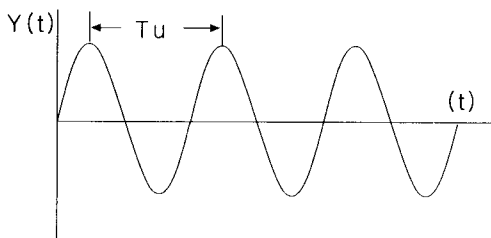


그림 3. 임계진동을 나타내는 응답곡선
Fig 3. Response of Critical vibration

$$K_u = \frac{4A_r}{\pi A_o} \quad (2.2)$$

Relay 동조법에서 이렇게 해서 얻어진 한계이득 K_u 와 한계주기 T_u 를 이용해서 다음의 간단한 설계공식에 의해 PID 계수를 선정한다.

$$K_p = K_u \cos \Phi_m \quad (2.3)$$

$$T_i = \frac{T_u}{4\pi} (\tan \Phi_m + \sqrt{1 + \tan^2 \Phi_m}) \quad (2.4)$$

여기서 Φ_m 은 설계자가 미리 정해주는 위상여유로서

보통 $\pi/6 \leq \Phi_m \leq \pi/3$ [rad] 범위의 값을 사용한다. 이렇게 설계한 PID 제어기를 적용하였을 때, 만일 오버슈트가 크게 나오는 경우에는 위상여유 Φ_m 을 증가시켜 PID계수를 조정하면 오버슈트를 상당히 줄일 수 있다. 그러나 Φ_m 이 커질수록 응답속도가 느려지므로 적절히 절충 시켜야 한다.

3. 제어 알고리즘

이 장에서는 Relay를 이용한 최적의 자동동조 알고리즘을 서술한다.¹¹⁾¹²⁾

본 논문에서 제안된 제어 알고리즘은 PI제어기인데 이는 설정된 모터의 특성이 DC 전압에 의해 선형적으로 변화하는 것으로 속응성은 우수하기 때문에 D제어기는 부가하지 않았다.

먼저 Digital 연산으로 PI제어기를 설계하기 위해서 위치형(Analog) PID 제어기 알고리즘을 보면 다음과 같다.

$$MV = K_p(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_D \frac{de}{dt}) + MV_0 \quad (2.5)$$

MV : 조작량, MV_0 : 조작량의 초기치 이다.

이에 대한 속도형 (Digital) PID제어기의 알고리즘은

$$\Delta MV_n = K_p [(en - en - 1) + \frac{\Delta t}{T_i} en + \frac{T_d}{\Delta t} (en - 2en - 1 + en - 2)] \quad (2.6)$$

이 되고 여기서 PI제어기의 알고리즘은

$$\Delta MV_n = K_p [(en - en - 1) + \frac{\Delta t}{T_i} en] \quad (2.7)$$

이 된다.

초기 입력 값에서 일정 오차를 주고 내부적으로 동작하게 되는 Relay에 의해서 Motor는 임계진동을 하게 된다. 그리고 이때 구해진 한계이득과 한계주기를 결정한 다음 PI의 계수를 결정하고, 위의 알고리즘에 입력 값으로 대입하게 된다. 이렇게 해서 결정된 PI제어기는 연산과정과 비교과정을 거쳐서 초기 목표 값으로 도달되게 되는 것이다.

4. 시물레이션

본 논문에서는 제안된 장치를 시물레이션하기 위해서 Visual C++을 이용하여 자동동조 프로그램을 구현하였다.

이런 Relay동조 법에 의해서 자동으로 동조된 PI의 계수를 비교 분석하면 다음과 같다.

먼저, 입력값을 6V, 내부의 오차를 2V로 해서 K_p 가 0.7일 때 $K_i=10, 7, 4$ 일 때의 파형을 각각 그림 5, 6, 7일 때 나타내었다.

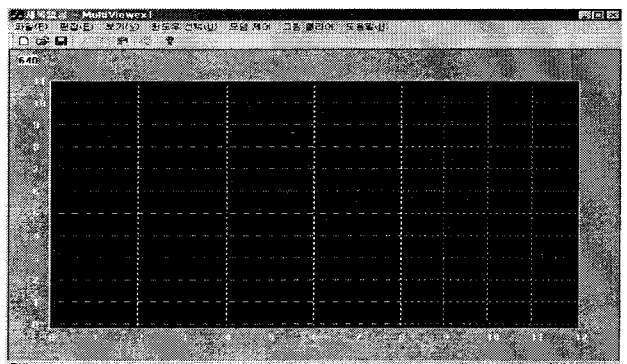


그림 5 입력 6V, 내부오차 2V, $K_p=0.7, K_i=10$ 의 파형
Fig. 5 Input=6v, Internal error 2v, $K_p=0.7, K_i=10$

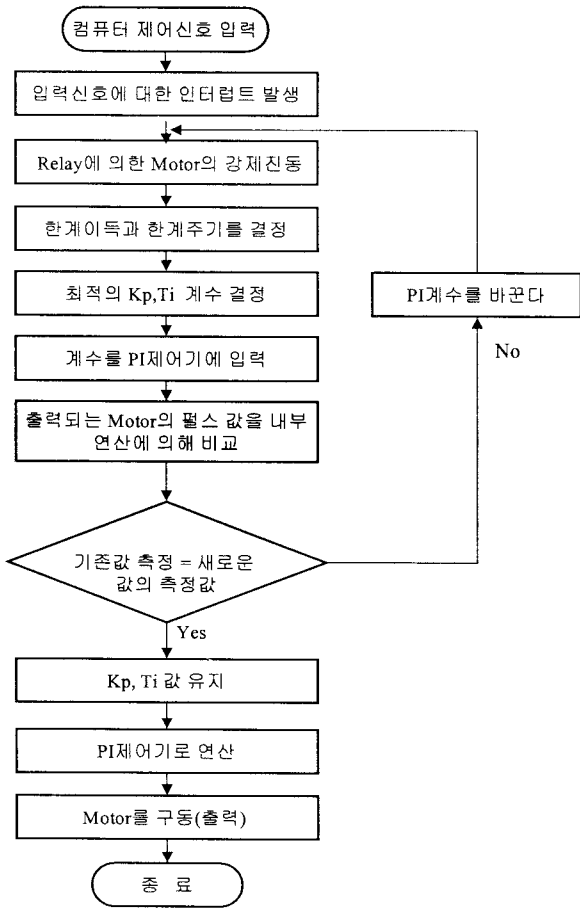


그림 4. 제안된 제어장치의 순서도
 Fig. 4. Flow chart of the proposed control system

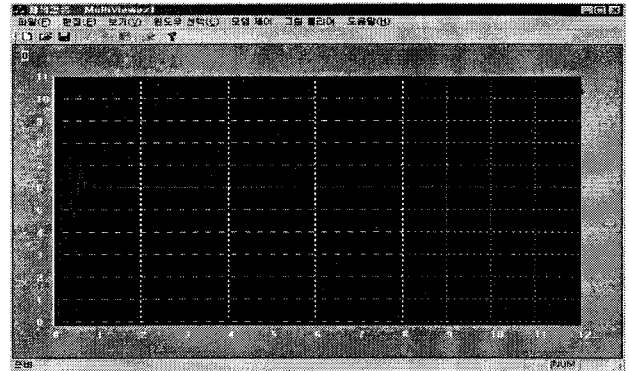


그림 7 입력 6V, 내부오차 2V, $K_p=0.7$, $K_i=4$ 의 파형
 Fig. 7 Input 6v, Internal error 2v, $K_p=0.7$, $K_i=4$

위의 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 Relay의 자동 동조 추정에서 K_i 를 점점 증가시키면서 파형의 오버슈트를 감소시킬 수 있다. 다음은 K_i 가 3일 때, $K_p=0.3, 0.5, 0.7, 1$ 일 때를 그림 8, 9, 10, 11에 나타내었다.

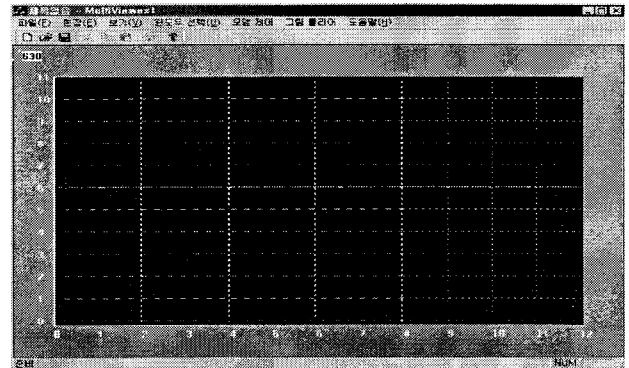


그림 8 입력 6V, 내부오차 3V, $K_p=0.3$, $K_i=3$ 의 파형
 Fig. 8 Input=6v, Internal error 3v, $K_p=0.3$, $K_i=3$

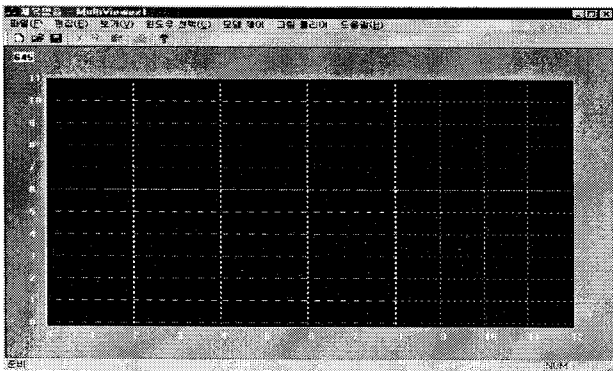


그림 6 입력 6V, 내부오차 2V, $K_p=0.7$, $K_i=7$ 의 파형
 Fig. 6 Input 6v, Internal error 2v, $K_p=0.7$, $K_i=7$

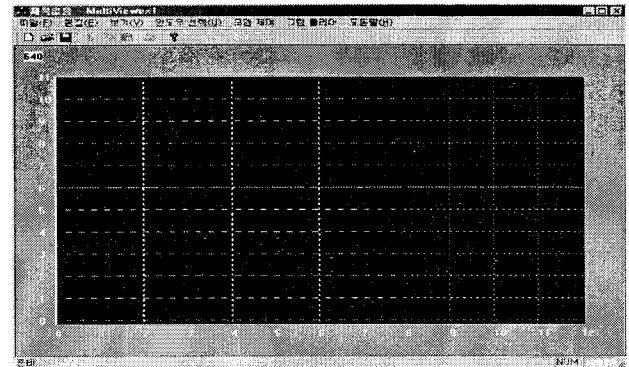


그림 9 입력 6V, 내부오차 3V, $K_p=0.5$, $K_i=3$ 의 파형
 Fig. 9 Input 6v, Internal error 3v, $K_p=0.5$, $K_i=3$

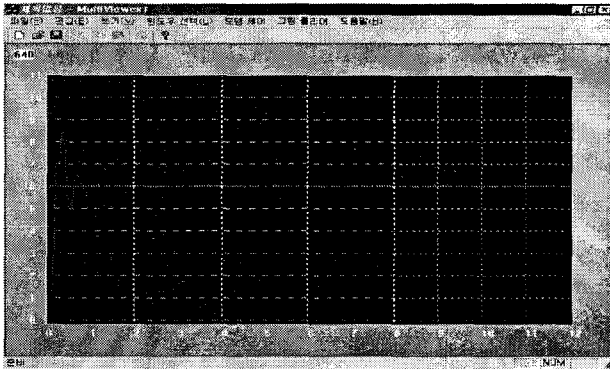


그림 10. 입력 6V, 내부오차 3V, $K_p=0.7$, $K_i=3$ 의 파형
 Fig. 10 Input 6v, Internal error 3v, $K_p=0.7$, $K_i=3$

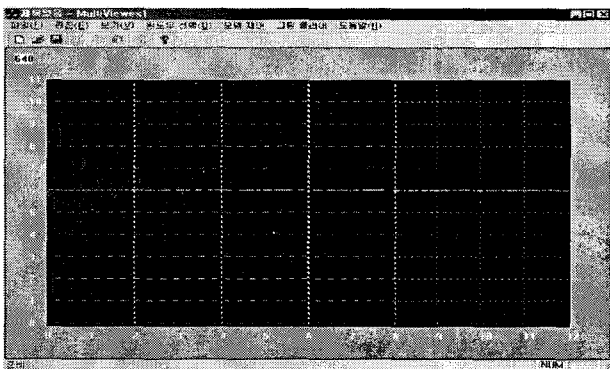


그림 11 입력 6V, 내부오차 3V, $K_p=1$, $K_i=3$ 의 파형
 Fig. 11 Input 6v, Internal error 3v, $K_p=1$, $K_i=3$

역시 시뮬레이션과정에서 알 수 있듯이 동조된 K_i 의 계수와 K_p 의 계수 중에서 K_i 는 3으로 하고, K_p 를 증가시킬 때의 파형을 분석해 보았다. K_p 는 오차신호에 비례하는 제어신호로 동작하기 때문에 K_p 를 증가시킴으로서 진동을 일으키려는 특성을 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 Relay동조법에 의한 자동동조 PI제어기 제안 하였고, 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

Relay동조방법은 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 안정하거나 극점이 원점에 있는 시스템에서는 Relay 되 먹임에 의해 임계진동이 나타나기 때문에 이 설계기법을 적용할 수 있다.
- 2) 제어대상이 정해져 있는 것이 아니라, 여러 가지 변화요인에 의해서 플랜트의 값이 변화더라도 제어기의 유연성이 뛰어나다.
- 3) 상대적으로 작은 시간지연을 가지고 있는 공정에 대해서 잘 동작한다.
- 4) 상대안정성의 척도인 위상여유를 고려하여 PID제어기의 계수를 조정하기 때문에 시스템의 상대안정성과 견실성을 향상시킬 수 있다.

5) 극점이 우 반면에 있는 불안정한 시스템에는 적용할 수 없다.

6) 안정한 경우라 하더라도 동작특성 가운데 시간지연이 클 경우에는 원하는 위상여유를 얻을 수 있더라도 이득여유가 나빠질 가능성이 있으므로 이 점에 유의해야 한다.

그러나 제어대상의 잦은 변화에 따른 스위칭의 응답특성과 목표치에 이르기 위한 상승시간이 너무 느려지는 것, 그리고 제어대상의 목표치 설정에 가장 적합한 최적의 임계진동 폭을 결정하는 것이 향후 과제로 남는다.

(참 고 문 헌)

1. GAWTHROP, P.J, "Automatic Tuning of Commercial PID Controllers computer control of real-Time processes.", IEEE control system magazine January pp. 37-57, 1990.
2. K.J Astrom et al. , "Automatic tuning and adaptation for PID Controllers - A survey", Control Eng, Practice Vol.1 No.4, pp. 699-714, 1993.
3. K.J. Astrom et al. , "Automatic tuning and adaptation for PID Controllers - A Survey", Adaptive systems in control and signal processing 1992, pp. 371-376, 1992.
4. Hong Hyeongpyo et al. , "A Design of Auto-Tuning PID Controller using Fuzzy Logic", proceeding of The 1992 International Conference on Industrial electronics control, Vol.2, pp. 971-976.
5. M.Zhuang, D.P Atherton, "Automatic tuning of optimum PID Controllers", IEEE Proceedings-D, Vol.140 No.3, pp. 216-224, 1993.
6. ING-RONG HORONG and JYH-HORONG CHOU, "Digital PID controller design via general discrete orthogonal polynomials" , INT.J.Control Vol.47 No.1, pp. 187-192, 1988.
7. 稔善 外 共譯, "動的 시스템의 피드백 制御", 大光文化社, 1990.
8. J.G Ziegler, N.B Nichols, "optimum settings for automatic controllers", Trans ASME Vol.65, pp. 433-444, 1942.
9. Hill, A.G : Venable, S.W. , "The Effect of model Error on optimum PID controller tuning", ISA/89, pp. 51-64, 1989.
10. 권옥현, 권오규 외 2명, "제어시스템공학" pp.291-357, 2001
11. Karl j. Astrom, Björn Wittenmark: "Computer-controlled System" pp.293-323
12. 오성권, "퍼지 모델 및 제어이론과 프로그램", pp.235-328, 1999