

## 지능형 PID제어기 개발에 관한 연구 (II)

°유연운, 이창구\*, 김성중\*  
국방과학연구소, \*전북대학교 제어계측공학과

### A Study on the Development of an Intelligent PID Controller(II)

°Yeon-Woon Yu, Chang-Goo Lee\*, Seung-Joong Kim\*  
ADD. \*Dept. of Control and Instrumentation Eng., Chonbuk Univ.

#### ABSTRACT

In this paper, we present a recursive algorithm for the auto-tuning of PID controllers by optimizing a GPC criterion. Also, we develop an intelligent PID controller by combination of a recursive algorithm together with a supervisor, that allows to adjust the main controller parameters (prediction horizon, control weighting, sample time, etc.) using some simple rules which is mainly built up through relay tuning experiments. The intelligent PID controller has been implemented successfully on an IBM PC/AT and some simulation results are presented.

#### 1. 서 론

현대 제어이론의 눈부신 발전에도 불구하고 산업현장에 이용되고 있는 제어투우프의 대부분이 PID제어기이다. 1991년도 일본산업계의 조사보고에 의하면 단위제어투우프의 90% 이상이 PID구조라는 사실이 알려졌다. PID제어기가 산업현장에 지속적으로 널리 이용되고 있는 이유는 특별한 강인성, 설비의 단순성, 범용의 응용성 등을 들 수 있다.

그러나, PID제어기를 이용하여 제어대상 공정이 요구하는 응답을 달성하도록 하기 위해서는 공정의 동특성에 따라 적절한 제어기 구조를 선정하고, 제어계수를 조절하는 과정이 필요하며 이를 동조라 칭한다. 실제 동조는 경험이 많은 운전자에 의하여 시행착오 과정과 임의의 규칙에 의하여 시행된다. 이러한 과정은 느린공정, 부분적으로 비선형인 공정, 왜란이 불규칙으로 인가되는 공정 등에서는 많은 시간과 경비가 소요되고 제어성능도 크게 저하되며, 공정변수가 가변되는 경우에는 재동조가 요구되는 등 많은 어려움이 있다.<sup>1)3)</sup> 지금까지 많은 동조법이 제시되었으며, 제시된 방법중 Ziegler-Nichols 방법이 가장 인기있고 기초적인 방법이었으나 자동화가 어려우며, 진동의 진폭을 어떤 한계내로 유지하기가 힘들다.<sup>4)</sup> 근래에 Astrom과 Hagglund는 릴레이 실험을 이용하여 이러한 단점을 해결하고, 위상여유 또는 이득여유를 보장하는 새로운 동조법을 제안하는 것 외에도 Cheung, Nishikawa 등에 의하여 많은 연구가 진행되어왔다.<sup>5)8)</sup>

이러한 동조방법은 초기동조로는 효과적이거나 공정이 변화하는

곳에서는 반복적으로 릴레이실험을 진행하여야 하는 문제점이 발생한다. 또한, 제어기를 이용하는데 있어서 성능과 함께 사용의 편리성이 크게 강조됨에 따라 단지 하나의 버전만 누르므로써 동조가 간단히 수행되는 자동동조기에 대한 연구의 필요성이 강하게 대두되고 있다. 이와같은 요구를 충족하기 위한 방법은 적응제어기법과 PID제어기의 장점을 상호보완하여 제어기 내부 매카니즘은 적응제어구조를 지니고 적응제어기 설계운영에 요구되는 초기정보들을 제공하는 선행동조 기능을 갖도록 하는 한편 정보의 전달형태나 외부적 기능은 기존의 PID형태로 운영되는 것이며 이에 대한 연구는 Vega, Gawthrop, Wittenmark등에 의하여 진행되었으나 주로 적응제어기의 구조를 PID형태로 바꾸는 데에 치우치고 있으며 근본적으로 적응제어기의 단점을 내포하고 있다. 최근 Clarke와 Mohtadi 등은 기존의 적응제어기법의 단점을 개선하여 범용성과 성능을 크게 향상시킨 GPC제어이론을 제시하여 그 우수성을 증명하였다. 그러나 이 방법 역시 제어설계변수의 선정에 따라 성능이 크게 좌우되고 그 근본 매카니즘이 적응제어구조를 지니 현장적용에는 많은 애로점이 있다.<sup>9)14)</sup>

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로 GPC제어기를 PID구조로 변형하여 현장운전자에게 친숙성을 가지게 한 후, 릴레이 동조실험에 의하여 제어기 설계에 필요한 지연시간, 샘플링주기, 모델차수, 대역폭과폭 등의 정보를 자동으로 제공하는 이론과 규칙을 개발하여 선행동조기능을 제공하고, PID제어기를 운영하는데 요구되는 운전자의 노하우를 규칙화하여 감독자층을 구성하고자 한다. 이를 위하여 각 단계에서의 이론을 유도하고 규칙을 생성하였으며 이를 제어기에 병합 구현하여 제어성능과 기능을 개선하였다.

#### 2. 적용 PID제어기의 설계

본 논문에서는 제어기 설계를 위해 공정의 동특성과 잡음 환경을 식(2.1)과 같은 SISO CARIMA 모델로 가정하였다.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1})\xi(t)/\Delta \quad (2.1)$$

여기에서  $y(t)$ 는 시스템 출력,  $u(t)$ 는 제어입력,  $\xi(t)$ 는 평균이 제로이고 분산(vairance)이  $\sigma^2$ 인 백색잡음이며, A, B, C는 지연연산자  $q^{-1}$ 의 다항식이고  $\Delta$ 는 미분연산자이다. 유도과정을 간단히 하기 위해 식(2.1)에서  $C(q^{-1}) = 1$ 로 가정할 때 최대 출력

구간  $N_2$ 까지의 구간에 대하여 다단계 출력을 예측하기 위해서는 다음의 Diophantine 방정식을 해결해야 한다.

$$1 = E_j(q^{-1}) A \Delta + q^{-j} F_j(q^{-1}) \quad (2.2)$$

여기에서  $E_j$ 와  $F_j$ 는 주어진  $A(q^{-1})$ 와 출력 예측 구간  $j$ 에 의하여 유일하게 정의되는 다항식이며, 식(2.1)에  $E_j \Delta q^{-j}$ 를 곱하고 식(2.2)의 관계를 이용하여 정리하면 식(2.3)과 같은 최적의 출력 예측자를 얻을 수 있다.

$$\hat{y}(t+j) = G_j \Delta u(t+j-1) + F_j y(t) \quad (2.3)$$

단,  $G_j(q^{-1}) = E_j B(q^{-1})$

예측한 미래의 출력  $\hat{y}(t+j)$ 를 이용하고 적절한 비용함수를 최소화하여 그림 1과 같은 적응성이 있는 PID 제어를 설계하고자 한다.

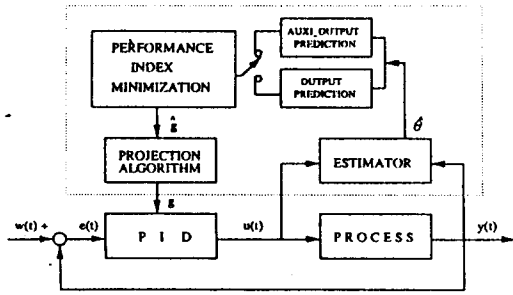


그림 1. 적응 PID제어의 구조

Fig. 1. The structure of an adaptive PID controller

적용 PID 제어기설계는 일반형 예측제어에서 사용한 (2.4)식과 같은 다단계 예측오차를 고려한 비용함수를 이용한다.

$$J(N_1, N_2) = E \left( \sum_{j=N_1}^{N_2} [\hat{y}(t+j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=N_1}^{N_2} \lambda (j) \Delta u(t+j-1)^2 \right) \quad (2.4)$$

단,  $N_1$ 은 최소,  $N_2$ 는 최대 출력구간,  $\lambda(j)$ 는 제어 가중치

PID 제어기는 단지  $\Delta u(t)$ 만을 결정하므로 제어구간  $N_1$ 는 1로 선택하고  $\lambda(j)$ 는  $\lambda$ 로 선정할 때 제어기 파라미터  $g$ 에 관한 함수로 표현되는 GPC 사양은 식(2.5)로 나타내며, 이를 최소화하는 계수  $g$ 는 식(2.6)과 같이 표현할 수 있다.

$$J(g) = \sum_{j=1}^{N_2} [y(t+j) - w(t+j) - g_{j-1} \Delta u(t) + g_{j-1} \Delta u(t)]^2 + \lambda \Delta u(t)^2 \quad (2.5)$$

$$g = \min [b_1^T g + 1/2 g^T C_1 g] = -b_1 / C_1 \quad (2.6)$$

식(2.6)에서  $b_1$ 와  $C_1$ 는 식(2.7)과 같이 주어진다.  $\pi_b$ 는 제어 오차를 반영하고  $\pi_c$ 는 제어신호의 가중치를 반영한다.

$$b_1 = \pi_b(t) e_1, \quad C_1 = \pi_c(t) e_1 e_1^T \quad (2.7)$$

$$\pi_b(t) = 2 \sum_{j=1}^{N_2} g_{j-1} [y(t+j) - g_{j-1} \Delta u(t) - w(t+j)] \quad (2.8)$$

$$\pi_c(t) = 2 \left( \sum_{j=1}^{N_2} g_{j-1}^2 + \lambda \right) \quad (2.9)$$

이렇게 구한 제어기 파라미터  $g$ 는 아래와 같다.

$$g = - \frac{\pi_b(t)}{\pi_c(t)} (e_1 e_1^T)^{-1} e_1 \quad (2.10)$$

$$\text{단, } g = [g_0 \ g_1 \ g_2]^T, \quad e_1 = [e(t) \ e(t-1) \ e(t-2)]$$

식(2.10)에서 역행렬을 구하는 과정을 피하기 위해 역행렬에 관한 명제(matrix inversion lemma)를 사용하면 각 스텝마다 제어기 파라미터를 순환적으로 계산할 수 있다.

$$g(t) = g(t-1) - \frac{\pi_c(t) P(t-1) e_1}{1 + \pi_c(t) e_1^T P(t-1) e_1} [e_1^T g(t-1) + \frac{\pi_b(t)}{\pi_c(t)}] \quad (2.11)$$

$$P(t) = P(t-1) - \frac{\pi_c(t) P(t-1) e_1 e_1^T P(t-1)}{1 + \pi_c(t) e_1^T P(t-1) e_1} \quad (2.12)$$

이와같이 구한 제어계수가 PID 제어기 구조를 유지하기 위해서는 유한한 양의 스칼라이어야 하므로 식(2.13)과 같은 구속 조건이 발생하게 된다.

$$\begin{aligned} g_2 &> \varepsilon_1 > 0 \\ g_1 + 2g_2 &< -\varepsilon_2 < 0 \\ g_0 + g_1 + g_2 &> \varepsilon_3 > 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

단,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 는 작은 양수

PID 동작을 보장하기 위해 식(2.13)의 조건을 만족해야 하는데 그렇지 못한 경우에는 최적의 파라미터를 결정하기 위해  $g(t)$ 는 식(2.13)을 만족하도록 투사(project)되어야 한다. 위 식의 부등식은 다음의 행렬 형태로 표현된다.

$$g^T h_i > \varepsilon_i \quad (2.14)$$

단,  $h_1 = (0 \ 0 \ 1)^T, h_2 = (0 \ -1 \ -2)^T, h_3 = (1 \ 1 \ 1)^T$

시간  $t$ 에서 최적의 이산 계수값을 결정하는 과정은 다음의 단계를 통해서 이루어진다.

1.  $g = \hat{g}(t)$
2.  $g^T h_i > \varepsilon_i$  이면 4로 가라. (2.15)
3.  $g = g + \frac{I(t-1) h_i}{h_i^T I(t-1) h_i} (\varepsilon_i - g^T h_i)$
4.  $g(t) = g$

$I(t-1)$  행렬은 단위 행렬을 사용하여 수정된  $\hat{g}(t)$ 가 가능한 영역에 포함되면서  $g(t)$ 의 원값에 매우 가깝다는 것을 보장한다. 이렇게 구한 제어계수  $g(t)$ 를 이용하여 식(2.16)에 의하여 제어신호를 발생한다.

$$\Delta u(t) = g(t)^T e_1 \quad (2.16)$$

제안된 적응 PID알고리즘을 요약하면 다음과 같다. 매 샘플링 순간마다,

- (1) 식(2.1)로 표현된 모델의  $A, B$ 계수를 추정한다.
- (2) 추정된 모델계수를 이용하여  $G_j, F_j$ 를 반복적으로 구하고 이로부터 출력예측자  $\hat{y}(t+j) = G_j \Delta u(t+j-1) + F_j y(t)$ 를 구한다.
- (3) 식(2.8), 식(2.9)를 계산한 후 식(2.11), 식(2.12)에 의하여  $g$ 를 구한다.
- (4) 식(2.15)에 의하여 구속조건에 적합한  $g$ 를 구한다.
- (5) 식(2.16)에 의거 제어신호  $u(t)$ 를 계산한다.

### 3. 지능형 PID제어기

미지의 공정모델을 CARIMA 모델로 가정하고 GPC 성능지수를 이용하여 적응 PID제어기를 설계하였다. 이 제어기는 설계변수가 적절히 선정되면 좋은 성능을 나타내나 실제 적용에 있어서는 일반 적응제어기처럼 샘플링주기, 최대예측구간, 제어신호의 가중치, 제어신호의 한계값 등이 제어성능에 중대한 영향을 미친다. 따라서 이 절에서는 릴레이 동조실험을 통하여 이러한 변수들을 자동으로 제공하고 이를 효율적으로 운영할 수 있는 방법을 제안한다.

#### 3.1 릴레이 동조실험

릴레이 동조실험은 제어루우프에 릴레이를 도입하여 플랜트가 인위적으로 안정된 진폭과 주기를 갖고 발전하도록 하는 것이다. 이를 자동화하기 위하여 릴레이 진폭의 자동조정, 운전점의 선정, 노이즈의 크기에 따른 히스테리시스 폭의 조절 등에 관한 운전자의 경험규칙, 출력파형을 분석하여 동특성을 분류하고 그에 따른 최적의 제어기를 분류하는 경험적 지식과 이론을 노이즈가 인가되었을 경우와 적분기를 삽입하였을 경우로 확대하여 이미 제안된 규칙을 수정보완하였다.<sup>15,16)</sup> 또한 이들 규칙중 모델 분류 규칙을 이용 모델에 따른 적절한 GPC설계변수를 선정하는 규칙과 온라인으로 가중치를 조절하는 규칙을 첨가하였다. 릴레이 동조실험을 위한 규칙은 다음과 같다.

- 릴레이 동조실험의 동작점 결정 규칙
- 릴레이 동조실험의 초기화 규칙
- 릴레이 계수결정 규칙
- 출력진폭 조절 규칙 및 임계값 결정 규칙
- Zero-crossing과 Peak-to-peak결정 규칙

#### 3.2 설계변수의 선정

##### 가) 샘플링주기

디지털 제어기의 설계에 있어서 샘플링 주기의 선정은 매우 중요하며, 일반적으로 1963년 User Conference에서 제시한 기준에 따르나 본 논문에서는 릴레이 동조실험에서 추정된 임계주기( $t_c$ )를 이용하여 다음과 같은 규칙을 형성하였다.

$$T_s = t_c/8$$

If (  $T_s >$  기준값 ) Then  $T_s =$  기준값 (3.1)

##### 나) 출력 예측구간과 제어구간의 선정

최소 출력예측 구간( $N_1$ )은 지연시간  $d$ 를 정확히 알면  $d$ 보다 큰 값으로 선정하나 일반적으로 지연시간이 변하거나 정확히 추정하기 어려우므로  $N_1=1$ 로 정한다. 최대 출력 예측구간( $N_2$ )은  $B(q^{-1})$ 의 차수보다 크게 선정하여 플랜트의 상승시간 만큼 충분히 예측하는 것이 필요하다. 그러나  $N_2$ 를 무한대로 증가시킬 수가 없고 계산시간이 증가하므로 신중한 선택이 요구된다.  $N_2$ 를 증가시키는 대신에 샘플링 시간을 증가시켜서 실제로 예측하는 구간을 더 크게 하는 것이 바람직하며, 시스템의 성능과 견실성을 고려하여  $N_2$ 와 샘플링 시간  $T_s$ 를 적절히 선정하여야 한다. 본 논문에서는  $N_2$ 를 10으로 고정하고 단지 샘플링 주기만을 조절하였다.

##### 다) 제어가중치( $\lambda$ )

설계단계에서는  $N_2$ 와  $T_s$ 를 적절히 선정하여 지연시간이 없는 많은 플랜트에 대해 만족할만한 성능을 얻을 수 있다. 그러나 지연시간을 포함한 동특성이 변화하는 공정에서는 제어성능이 급격히 저하되며 이러한 근본 원인은 제어신호의 가중치 선정에 있다. 본 절에서는 임계값과 가중치의 관계를 많은 실험을 통하여 규칙화 한 결과 좋은 성능을 얻을 수 있었다.

#### (1)초기동조구간에서의 가중치 선정 규칙

$$\text{If}((\text{model\_type}=0)||(\text{spec.delay\_time}=0)) \quad (3.2)$$

$$\lambda = t_c;$$

else

$$\lambda = k_c/t_c;$$

#### (2)온라인동조구간에서의 가중치 선정 규칙

$$\lambda = t_c/k_c; \quad (3.3)$$

$$\text{gain} = 100 * \text{tm}[0][0];$$

$$\text{if}(\text{gain} >= 0.1)$$

$$\text{weight} = -0.001 * \text{tml}[0][0];$$

else

$$\text{weight} = 0.001 * \text{tml}[0][0];$$

$$\text{if}(\text{gain} >= 1.0)\{$$

$$\text{if}(\text{gain} <= \lambda)$$

$$\lambda = \text{gain} + 2;$$

else

$$\lambda = (1 + \text{weight}) * \lambda;$$

$$\}$$

else

$$N_2 = N_2 + 2;$$

### 4. 지능형 PID제어기의 구현

지능형 PID제어기의 전반적인 흐름도는 그림 2와 같이 초기 동조 구간과 자동동조 구간으로 나뉜다. 먼저 초기동조 구간은 운전자에게 공정에 대한 개괄적인 정보와 제어목적 등을 입력하도록 한 후에, 릴레이 동조실험을 수행한다.

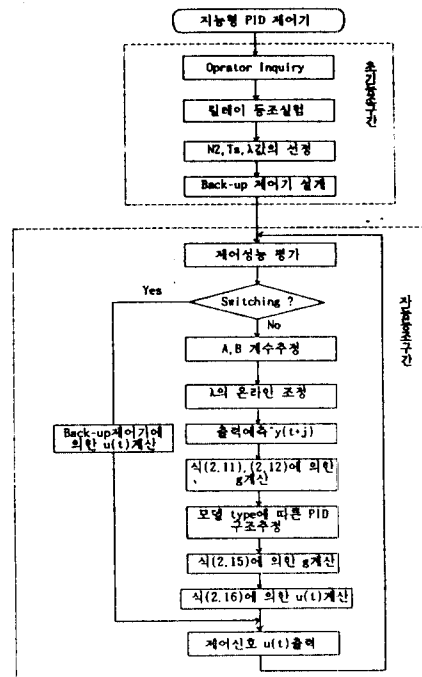


그림 2. 지능 PID제어기의 흐름도  
Fig. 2. The flowchart of an Intelligent PID control

릴레이 동조실험은 공정의 동특성이 정확히 표현되는 점을 운영 시점으로 정하고 출력이 이점에 도달한 후에 시행하며, 모든 공정에 대하여 자동으로 진폭을 조절하여 안정한 발진을 유지하도록 한다. 릴레이 동조실험에 의하여 공정모델을 분류하고 그에 따른 최적의 Back-up제어기를 설계한다. 또한, 적용 PID제어기 설계를 위한 설계변수들을 제공한다. 자동동조 구간은 제어가 이루어 지는 구간으로서 동작하여야 할 제어기는 Default로는 적용 PID제어기가 설계 동작하도록 하나 성능평가 부분에서 전체 페루우프 제어성능을 평가하여 불안정하다고 판명될 경우 Back-up제어기로 전환한다.

그림 3은 지능형 PID제어기의 구조로서 PID제어기와 공정으로 구성되는 페루우프가 기본 제어루프 형성하고 릴레이와 Back-up제어기, 적용 PID제어기가 그 상층을 형성하며 주로 수식과 고정된 규칙으로 이루어 진다. 감독자는 최 상층을 형성하고 하위 계층과 정보를 통하여 전체 제어시스템을 통괄한다. 감독자층은 제어성능 평가에 관한 규칙, 릴레이 정보를 이용한 시스템 판별과 적용 PID설계변수 제공 규칙, 제어전환 규칙으로 구성되었다.

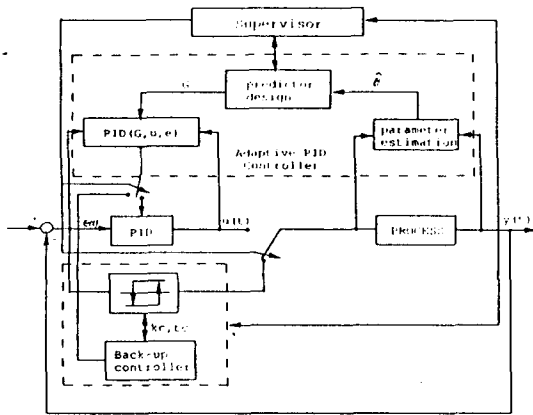


그림 3. 지능 PID제어기의 구조  
Fig. 3. The structure of an Intelligent PID controller

### 5. 시뮬레이션 및 결과

본 장에서는 적용 PID제어기의 성능을 실험하기 위한 방법의 하나로 이를 구성하는 릴레이 동조실험, 모델의 분류 및 Back-up제어기 설계와 그 성능, 적용 PID제어기의 성능을 각각 평가하여 전체 시스템의 장단점을 논하고자 한다.

#### 5.1 릴레이 동조실험

규칙을 이용하여 구현한 릴레이 동조실험의 기능을 평가하기 위하여 1차지연시스템( $e^{-5s}/(1+10s)$ ), 2차시스템( $1/(1+10s+40s^2)$ )에 대하여 적용한 결과 그림 4, 5에서 보듯이 모든 공정에서 운전점을 자동선정하고, 진폭을 자동조정하여 임계값을 계산하였다. 특히, 1차시스템과 2차시스템의 출력파형이 다름을 알 수 있었으며 공정분류를 정확히 하기 위한 적분기를 삽입한 동조실험이 1차 시스템을 제외한 모든 공정에서 자동동작함을 그림을 통하여 확인할 수 있다. 특히 노이즈가 5%인가된 시스템에서도 견실하게 동작함을 보였다.

#### 5.2 제어기의 성능비교

단순히  $-180^\circ$ 점에서의 임계값을 이용한 Ziegler-Nichols 등

조법에 의한 제어와 릴레이 출력파형과  $-90^\circ$ 점에서의 릴레이 동조실험 결과에 의하여 모델형태를 분류하고 그에 따른 규칙에 의하여 설계된 Back-up 제어기에 의한 제어, 릴레이 동조실험에 의하여 제공된 설계변수에 의하여 설계된 적용 PID제어기에 의한 제어를 비교하기 위하여 공정모델은 표 1과 같이 시간에 따라 변화하도록 하였다. 또한, 5% 크기의 화이트 노이즈를 인가하였다.

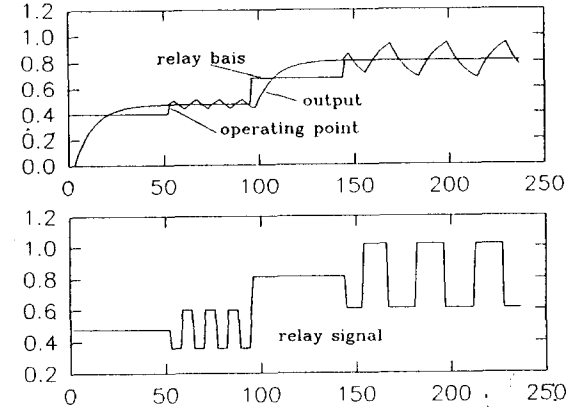


그림 4. 1차지연시스템의 릴레이 케환 응답

Fig. 4. Response of the 1st delay model by the relay experiment

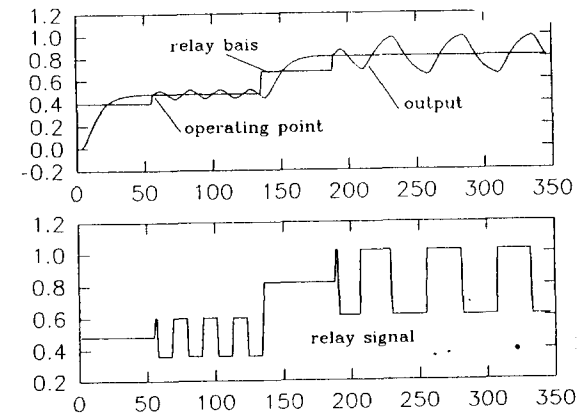


그림 5. 2차시스템의 릴레이 케환 응답

Fig. 5. Response of the 2nd model by the relay experiment

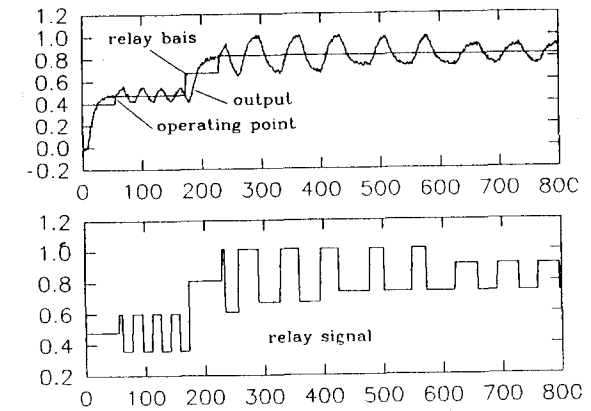


그림 6. 2차시스템의 릴레이 케환 응답(5% Noise)

- 850 - Fig. 6. Response of the 2nd model by the relay experiment

Table 1. The transfer function of the process model

스텝	공정 모델
1 - 80	$1 / (1 + 10s + 40s^2)$
81 - 160	$e^{-5s} / (1 + 10s + 40s^2)$
161 - 240	$e^{-5s} / (1 + 10s)$
241 - 320	$1 / (1 + 10s)$
321 - 500	$1 / (1 + 10s)(1 + 2.5s)$

그림 7은 Ziegler-Nichols 동조규칙을 적용하여 설계한 제어기에 의하여 얻은 응답으로써 지연시간을 갖는 공정에서 제어 성능이 극히 떨어짐을 볼 수 있다. 그림 8는 릴레이 동조실험에 의한 모델분류와 그에따른 제어기 설계규칙에 의하여 설계한 Back-up제어기에 의하여 얻어진 응답으로 Ziegler-Nichols방법 보다 성능이 약간 개선됨을 알 수 있다. 즉, 지연시간이 변화하는 80스텝이후 구간에서는 성능이떨어지나 지연시간이 고정되고 단순 모델형태만 변화하는 160스텝 이후는 성능이 많이 개선됨을 알 수 있다. 그러나 이 두가지 방법 모두 제어입력 신호의 급격한 변화는 현장적용시 Actuator의 선정이나 특성에 의하여 좋은 제어결과를 얻기가 어렵다. 그림 9는 본 논문에서 제시한 지능형 PID 제어기에 의하여 얻어진 응답으로 지연시간이 변화하는 스텝 80이후 약간의 발진이 있었으나 전반적으로 매우 양호한 특성을 보여준다. 그림 10, 11은 노이즈가 인가되었을 경우의 Ziegler-Nichols방법과 제시된 방법으로 Ziegler-Nichols방법은 입력신호의 급격한 변화로 실제 현장적용이 불가능 함을 알 수 있었으며, 반면 제시된 방법은 제어입력의 완만한 변화와 함께 제어성능도 우수함을 보여주었다. 노이즈가 인가되었을 때의 입력신호의 변화는 필터링에 의하여 해결할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 우수한 특성을 보유하고 있는 것으로 증명된 일반예측제어기를 산업현장에 적용하기 위하여 PID구조로 변형하고 제어기 설계에 필요한 샘플링주기, 예측구간, 제어신호의 가중치등의 GPC설계변수를 릴레이 동조실험을 통하여 자동으로 제공하는 이론을 개발하였다. 또한 개발된 이론을 효율적으로 구현하고 제어성능을 향상시키기 위하여 일반수식과 규칙으로 분류하여 일반수식과 고정된 규칙은 단위 제어기가 수행하도록 하는 한편 가변규칙과 안전장치 기능으로 감독자층을 형성하여 현장에 기 설치된 PID제어기의 지능화를 도모할 수 있도록 하였다. 본 방법은 IBM PC에 구현하여 여러 공정모델에 적용 우수한 특성을 보였으며 차후 통신 가능한 단위제어기를 연결 현장에 적용하고자 한다.

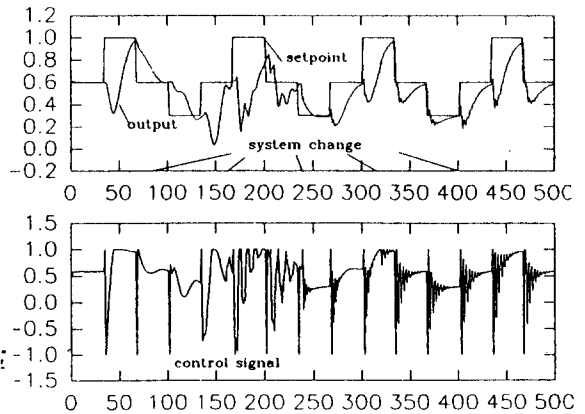


그림 7. Ziegler-Nichols동조에 의한 변환시스템의 응답  
Fig. 7. Response of the variable plant by the Ziegler-Nichols tuning method

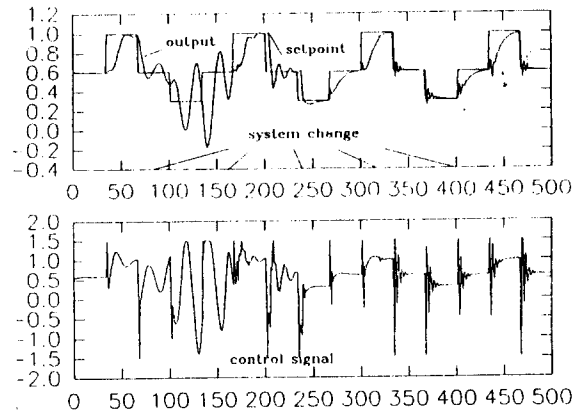


그림 8. Back-up제어기에 의한 변환시스템의 응답  
Fig. 8. Response of the variable plant by the Back-up controller

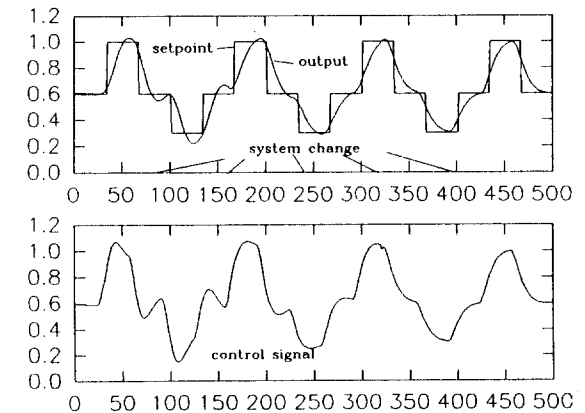


그림 9. 지능형 PID제어기에 의한 변환시스템의 응답  
Fig. 9. Response of the variable plant by the Intelligent PID controller

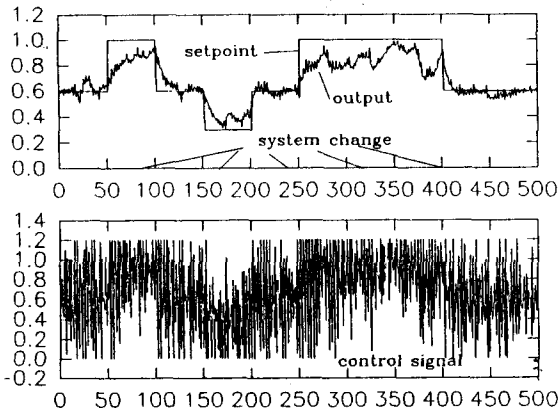


그림 10. Ziegler-Nichols동조에 의한 변환시스템의 응답(5%)  
Fig.10. Response of the variable plant by the Ziegler-Nichols tuning method(5% noise)

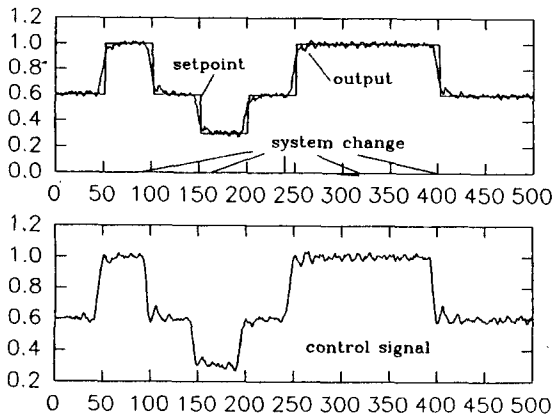


그림 11. 지능형 PID제어기에 의한 변환시스템의 응답(5%)  
Fig. 11. Response of the variable plant by the Intelligent PID controller(5% noise)

### 참 고 문 헌

- [1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers", Trans. ASME, pp. 759-768, 1942.
- [2] G.A. Dumont, C. Zervos and P.R. Belanger, "Automatic Tuning of Industrial PID Controllers", ACC, Vol. 1, pp. 1573-1578, 1985.
- [3] T. Hagglund and K.J. Astrom, "Automatic Tuning of PID Controllers Based on Dominant Pole Design", Proc. IFAC Conference on Adaptive Control of Chemical Process, Frankfurt, W. Germany, pp. 205-210, 1985.
- [4] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins", Automatica, Vol. 20, No. 5, pp. 645-651, 1984.
- [5] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators", Proc. 9th IFAC World Congress, Budapest, Hungary, pp. 267-272, 1984.
- [6] F. Radke and R. Isserman, "A parameter-adaptive PID controller with stepwise parameter optimization", Automatica, vol.23, pp.449-458, 1987.
- [7] L. S. Cheung, "A new automated optimal tuning strategy for a PID controller," ISA Trans. Vol. 5, No. 3, pp.3-10, 1986.
- [8] Y. Nishikawa, N. Sannomiya, T. Otha and M. Dkudara, "A method for auto-tuning of PID control parameters," Automatica, Vol.20, No. 3, pp. 321-332, 1984.
- [9] K. J. Astrom, et. all, "Expert control," Automatica, Vol. 22, No. 3, pp. 277-286, 1986.
- [10] F. Cameron and D.E. Seborg, "A self-tuning controller with a PID structure", Int. J.Control; 38, pp.401, 1983.
- [11] D.W. Clarke. and P.J. Gawthrop, "Self-tuning control", Proc. IEE, pp.633-640, 1979.
- [12] K.W. Clarke, C. Mohtadi and P.S. Tuffs, "Generalized Predictive Control", Automatica, Vol.23, No. 2, pp.137-148, 1987.
- [13] P. Vega, C. Prada and V. Alexandre, " Self-tuning predictive PID controller," IEE Proc.-D, Vol. 138, No. 3, pp. 303-311, 1991.
- [14] A. Henningsen, A. Christensen and O. Ravn, ". A PIDautotuner utilizing GPC and constraint optimization" Proc. of the 29th conference on decision and control, pp.1475-1480, 1990.
- [15] 이창구의 2인, "경험적 규칙을 이용한 자동동조 PID 제어기," 전기학회 논문지, Vol. 39, No. 5, pp. 485-493, 1990.
- [16] 이창구, 김성중, "규칙기반 자동동조 PID제어기에 관한 연구," 전기학회논문지, Vol. 40, No. 11, pp. 1161-1168, 1991.