

## RCGA를 이용한 외란제거용 PID 제어기의 동조규칙

김민정\* · 이윤형\*\* · 소명옥\*\*\* · 하윤수 · 황승욱\*\*\*\* · 진강규†

(원고접수일 : 2006년 10월 17일, 심사완료일 : 2007년 5월 24일)

### Tuning Rules of the PID Controller Using RCGAs

Min-Jung Kim\* · Yun-Hyung Lee\*\* · Myung-Ok So\*\*\* · Yun-Soo Ha\*\*\*\* ·  
Sung-Wook Hwang · Gang-Gyoo Jin†

**Abstract :** The new tuning rules of the PID controller for the rejection of load disturbance are proposed incorporating with real-coded genetic algorithms(RCGAs). The optimal gain parameters of the PID controller for a first-order plus time delay model are obtained based on a RCGA. Then tuning formula are derived using the tuned parameters sets, potential tuning rule models and another RCGA. The performance criteria of the controller are adopted as ISE, IAE and ITAE. A series of simulation are carried out to verify the effectiveness of the proposed tuning rules.

**Key words :** PID controller(PID 제어기), tuning rule(동조규칙), real-coded genetic algorithm(실수코딩유전알고리즘), performance criteria(성능지수).

### 1. 서 론

근래 제어이론의 급속한 발전에도 불구하고 아직도 대부분의 산업현장에서는 PID 제어가 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. 이는 PID 제어가 현장에서 요구되는 제어목적을 충분히 만족시키면서 구조가 단순하여 하드웨어적으로 실현하기가 쉽고 조정해야 할 계수의 수가 적어 현장 기술자에게 친숙하기 때문이다. PID 제어기는 사용 환경에 따라 설정치 추종성능 또는 외란억제 성능을 개선하도록 구분되어 동조된다. 지금까지 많은 동조규칙들<sup>[2]</sup>이 제안되어 왔으

나 아직도 대부분의 제어시스템 설계 시 경험과 실험을 바탕으로 하는 동조법이 기본적으로 이용되고 있다. 대표적인 것으로는 Ziegler와 Nichols (Z-N)<sup>[3]</sup>의 개루프 동조법(과도응답법)과 페루프 동조법(한계감도법)이 있고, Cohen-Coon(C-C) 동조법 등이 있다. 이와 같은 고전적인 방법들은 실제 시스템 응답이 외란이나 잡음에 대해 민감하여 정확한 매개변수를 결정하기 어렵고, Z-N의 한계감도법은 시스템의 안전성이 중시되는 한 적용하기 어려운 문제점이 있다. 그리하여 최근에는 유전 알고리즘(Genetic algorithm: GA)을 이용하여

† 교신저자(한국해양대학교 IT공학부), E-mail:ggjin@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4341

\* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

\*\* 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과

\*\*\* 한국해양대학교 선박전자기계공학과

\*\*\*\* 한국해양대학교 IT공학부

체계적인 동조방법을 얻기 위한 연구가 진행되고 있다. Potter와 Jones<sup>(4)</sup>는 복잡한 다변수 시스템을 대상으로 디지털 PID 제어기의 동조 문제에 GA를 적용하였고, Wu<sup>(5)</sup>는 신경회로망으로 학습한 제어대상과 GA를 기반으로 PID 제어기를 동조하는 문제를 다루었고, 김<sup>(6)</sup> 등은 RCGA를 이용하여 설정치 추종용 PID 제어기의 동조규칙을 제안하였고, 신<sup>(7)</sup> 등은 의사병렬유전알고리즘을 이용하여 시스템의 파라미터를 추정하고 디지털 PID 제어기를 동조하는 일련의 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 설정치는 고정되고 부하외란만 변동되는 환경에서 운전되는 PID 제어기의 외란제거 성능을 개선해주는 동조규칙을 얻는 문제를 다룬다. 이를 위해 먼저 RCGA를 이용하여 주어진 성능지수(ISE, IAE, ITAE)를 최소로 하는 관점에서 최적계수를 구하고, 여기서 발생하는 최적화 문제는 RCGA로 해결한다. 구한 최적계수와 동조규칙 모델 그리고 또 다른 RCGA를 이용하여 최종적으로 일반화된 동조규칙을 얻는다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 효용성을 입증한다.

## 2. PID 제어시스템의 구성

현장에서 운전되고 있는 많은 복잡한 공정제어 시스템들은 동작점 부근에서 1차 시간지연 시스템과 유사한 응답특성을 가지므로 본 연구에서는 제어대상으로는 (1)의 1차 시간지연 시스템이, PID 제어기로는 (2)의 표준형이 채택된다. 전체 제어시스템은 Fig. 1로 표시된다.

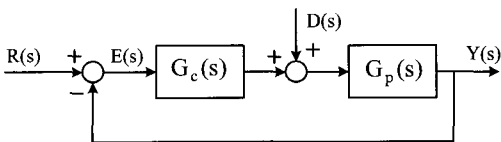


Fig. 1 Unit feedback PID control system

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + \tau_s} \quad (1)$$

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2)$$

여기서  $R(s)$ ,  $Y(s)$  및  $D(s)$ 는 각각 설정치, 출력, 외란을 나타내고,  $K$ ,  $\tau$ ,  $L$ 은 제어대상의 정상이득, 시정수, 시간지연이며  $K_p$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_d$ 는 제어기의 비례이득, 적분시간, 미분시간을 의미한다. 우수한 제어성능을 보장하기 위해서는 제어기의 세 계수가 제어대상의 통특성에 따라 적절히 조정되어야 한다. 본 연구에서는 외란제거용 PID 제어기의 동조규칙을 얻는 것이 목적이므로 설정치는 제어시간 동안 고정되고, 외란은 단위 계단상으로 변동하는 것으로 간주한다.

오차  $E(s)$ 를  $R(s)$ 와  $D(s)$ 의 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E(s) &= \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} R(s) - \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} D(s) \\ &= \frac{T_i \tau_s^2 + \tau_i s}{A(s)} R(s) - \frac{KT_i \tau_s^2 + K\tau_i s}{B(s)} D(s) \end{aligned} \quad (3a)$$

단,

$$A(s) = (KK_p \tau_i \tau_d + \tau_i) s^2 + KK_p \tau_i s + KK_p \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} B(s) &= (KK_p \tau_i \tau_d \tau + \tau_i \tau^2) s^3 + (KK_p \tau_i \tau + KK_p \tau_i \tau_d + 2\tau_i \tau) s^2 \\ &\quad + (KK_p \tau_i + \tau_i + KK_p \tau) s + KK_p \end{aligned} \quad (3c)$$

한편, 주어진 설정치와 외란에 대하여서 PID 제어시스템은 정상편차가 발생되지 않음을 알 수 있다.

## 3. RCGA를 이용한 동조규칙의 유도

### 3.1 최적계수탐색

먼저 제어대상의 매개변수를 변경해가며 성능지수를 최소로 하는 외란억제용 PID 제어기의 최적계수를 얻고, 이를 일반화하여 새로운 동조규칙을 얻는다. 편의상 제어기와 제어대상의 이득을 함께 묶어 표시하고, 매개변수들을 무차원화하기 위해  $t' = t/\tau$  라 하면 주파수 영역에서는  $s' = \tau s$  인 관계가 성립되어 (1)과 (2)는 다음과 같게 된다.

$$G_p'(s') = \frac{e^{-Ls'}}{1 + s'} \quad (4)$$

$$G'_c(s') = KK_p \left( 1 + \frac{1}{\frac{\tau_i}{\tau} s'} + \frac{\tau_d}{\tau} s' \right) \quad (5)$$

이렇게 함으로써 제어대상은 매개변수  $L/\tau$ 만의 함수로 간단히 표시되고, 이를 변경해가며 최적의 계수 집합  $\{KK_p, \hat{\tau}_i/\tau, \hat{\tau}_d/\tau\}$ 을 찾는다. Fig. 2는 PID 제어를 최적 동조하는 블록선도를 보여준다.

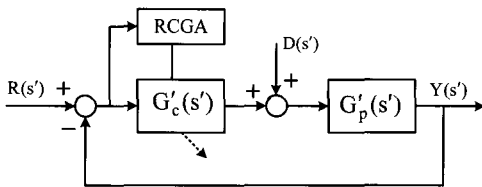


Fig. 2 Optimal tuning of the PID controller

여기서 발생하는 다변수 최적화 문제는 RCGA를 이용하여 해결한다. 실수코딩을 채용함으로써 RCGA의 염색체(Chromosome)는 PID 제어기의 세 계수를 유전자로 가지게 된다. 집단 내 염색체들의 성능이 좋고 나쁨은 적합도 평가를 통해 계량되며, 적합도는 성능지수(목적함수)로부터 계산되어 진다. 본 연구에서는 제어환경에 따라 적절히 선택해서 사용할 수 있도록 제곱오차적분(ISE), 절대오차적분(IAE), 시간곱절대오차적분(ITAE) 세 가지 성능지수를 고려하였다.

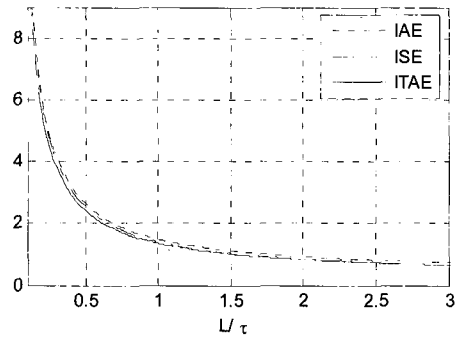
$$ISE : J_1 = \int_0^{t_f} e^2(t) dt \quad (6)$$

$$IAE : J_2 = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (7)$$

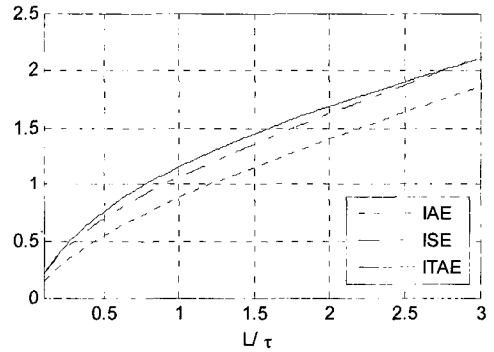
$$ITAE : J_3 = \int_0^{t_f} t|e(t)| dt \quad (8)$$

$L/\tau$ 를 0 ~ 3 사이에서 변화시키는 동안 설정치를 0으로 고정하고 단위계단 외란을 투입하여 (6)-(8)의 성능지수를 계산하였다. 한편 RCGA의 제어변수(Control variable)로 집단의 크기

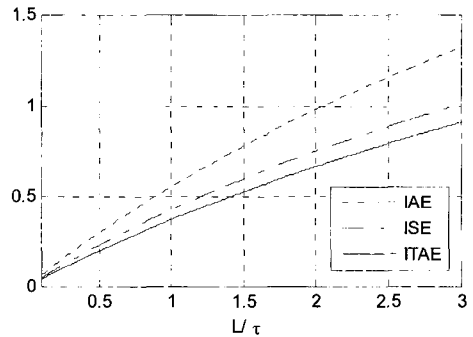
$N = 20$ , 재생산 계수  $\eta = 1.7$ , 교배확률  $P_c = 0.9$ , 돌연변이 확률  $P_m = 0.05$ 로 하였다[6]. Fig. 3은 세 가지 성능지수에 대해 최적 계수를 구해 그린 것이다.



(a)  $KK_p$



(b)  $\hat{\tau}_i/\tau$



(c)  $\hat{\tau}_d/\tau$

Fig. 3 Optimal PID parameters for disturbance rejection

3.2 동조규칙의 유도

여기서는 앞 절에서 구한 최적 계수 값과 Fig. 4의 블록선도로부터 새로운 동조규칙을 얻는다.

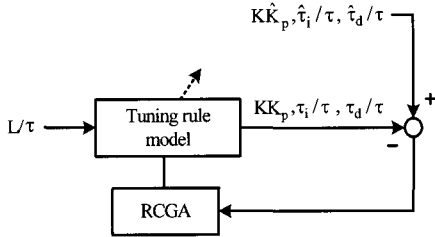


Fig. 4 PID parameter tuning using a RCGA

$L/\tau$ 이 입력되는 동안 RCGA는 동조규칙 모델의 출력  $K_p, \tau_i, \tau_d$ 와 최적 계수 값이 일치하도록 모델의 파라미터를 연속적으로 조정하게 된다. Table 1은 문헌에 발표된 동조규칙들<sup>(2)-(4)</sup>을 참고하여 경험적으로 선택된 동조규칙 모델이다.

Table 1 Tuning rules for load disturbance rejection

PID parameter	Tuning rule model
$KK_p$	$a_0 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{a_1}$
$\tau_i/\tau$	$\frac{b_1 + b_2 \frac{L}{\tau}}{1 + b_0 \frac{\tau}{L}}$
$\tau_d/\tau$	$\frac{c_2}{c_0 + c_1 \frac{\tau}{L}}$

Table 2 Tuning rules for load disturbance rejection

Type	PID controller parameters		
	$KK_p$	$\tau_i/\tau$	$\tau_d/\tau$
ISE	$1.544 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.847}$	$\frac{1.033 + 0.406 \left(\frac{L}{\tau}\right)}{1 + 0.624 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$\frac{9.263}{2.122 + 14.676 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
IAE	$1.454 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.857}$	$\frac{1.092 + 0.446 \left(\frac{L}{\tau}\right)}{1 + 0.438 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$\frac{7.392}{2.293 + 15.157 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
ITAE	$1.396 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.846}$	$\frac{1.619 + 0.316 \left(\frac{L}{\tau}\right)}{1 + 0.664 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$\frac{6.503}{1.903 + 15.796 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$

여기서 발생하는 최적화 문제에도 RCGA를 적용하며, RCGA는 아래 성능지수가 최소가 되도록 모델의 파라미터를 조정한다.

$$J_0 = \sum_j |K\hat{K}_p - KK_p| \tag{9}$$

$$J_1 = \sum_j |\hat{\tau}_i/\tau - \tau_i/\tau| \tag{10}$$

$$J_2 = \sum_j |\hat{\tau}_d/\tau - \tau_d/\tau| \tag{11}$$

Table 2는 각각의 성능지수에 대해 최종적으로 얻은 동조규칙이다.

4. 시뮬레이션 및 검토

제안하는 동조규칙의 효용성을 입증하기 위해 세 개의 제어대상 시스템에 대해 시뮬레이션을 실시하였고, Z-N 과도응답법, Lopez 등이 제안한 외란 제거용 동조법(L-ITAE법)<sup>(8)</sup>과 함께 응답을 비교하였다. 제어대상 시스템으로부터 1차 시간지연 모델의 매개변수를 얻는 작업에는 연속시스템의 온라인 파라미터 추정법<sup>(9)</sup>을 적용하였다. 이때  $K, \tau, L$ 은 각각 구간  $0 \leq K \leq 50, 0 \leq \tau \leq 10, 0 \leq L \leq 50$ 에서 탐색되었고, 샘플링 시간은  $h = 0.01$ 초로 하였다. 각 방법의 응답을 정량적으로 비교하기 위하여 단위계단 외란이 투입될 때 교란된 응답의 첨두값(Perturbation peak)을  $M_{pk}$ , 이 첨두값에 도달하는 데 걸리는 시간을  $t_{pk}$ , 교란된

응답이 설정치의 2% 내의 범위로 회복되는 시간을  $t_{ry}$ 로 정의하고 사용하였다.

4.1 예제1

먼저 시간지연을 갖는 3차 시스템을 고려하였다.

$$\text{시스템 I: } G_p(s) = \frac{\exp(-s)}{(s+1)(2s+1)(0.5s+1)} \quad (14)$$

1차 시간지연 모델로 근사화하면  $K=1.001$ ,  $\tau=2.306$ ,  $L=2.32$ 를 얻을 수 있고, 시스템 I은  $L/\tau=1.0$  이고 시간지연과 시정수가 비슷한 경우이다. 근사모델에 대해 Z-N법으로 계산한 제어기 계수는  $K_p=3.071$ ,  $\tau_i=3.500$ ,  $\tau_d=0.875$  이고 L-ITAE법에 의한 제어기 계수는  $K_p=1.349$ ,  $\tau_i=2.751$ ,  $\tau_d=0.383$ 이다. Fig. 5는 단위계단응답을 그린 것이고 Table 3은 각 방법의  $M_{pk}$ ,  $t_{pk}$ ,  $t_{ry}$ 를 구한 것이다.

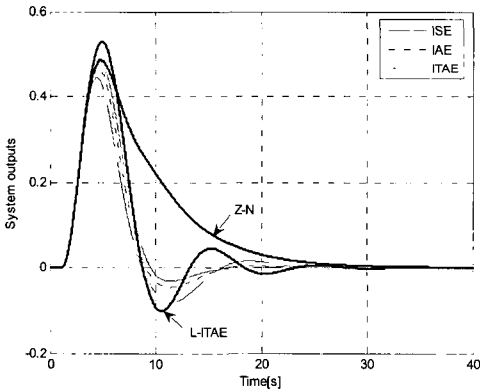


Fig. 5 Response comparison of the PID controllers for system I

Table 3 Performance comparison of the PID tuning methods for system I

	$M_{pk}$	$t_{pk}$	$t_{ry}$
ISE	0.445	4.44	15.11
IAE	0.468	4.58	14.47
ITAE	0.485	4.69	13.38
Z-N	0.489	4.80	20.06
L-ITAE	0.530	4.91	17.30

외란에 의해 교란된 응답들은 시간이 경과됨에 따라 모두 설정치 값에 접근해 가지만 제안한 방법의 응답이 기존의 방법보다 더 양호함을 알 수 있다. 이는 Table 3의 정량적인 비교치를 통해서도 확인할 수 있으며 제안한 방법 중에서  $M_{pk}$ ,  $t_{pk}$ 는 ISE, IAE, ITAE 순으로 작았고,  $t_{ry}$ 는 기대하듯이 ITAE, IAE, ISE 순으로 짧았다.

4.2 예제2

다음은 시간지연이 다소 큰 3차 시스템을 고려하였다.

$$\text{시스템 II: } G_p(s) = \frac{\exp(-5s)}{(s+1)^2(2s+1)} \quad (16)$$

앞의 방법과 같이 1차 시간지연 모델로 근사화하면  $K=1.002$ ,  $\tau=2.497$ ,  $L=6.64$ 를 얻을 수 있다. 시스템 II는  $L/\tau=2.7$ 이고, 시간지연이 시정수보다 큰 경우이다. Z-N법의 제어기 계수는  $K_p=0.537$ ,  $\tau_i=13.280$ ,  $\tau_d=0.1880$  이고 L-ITAE법의 제어기 계수는  $K_p=0.420$ ,  $\tau_i=6.103$ ,  $\tau_d=2.517$ 이며 동일한 방법으로 응답 실험을 실시하여 세 성능을 구한 것이 Fig. 6과 Table 4이다.

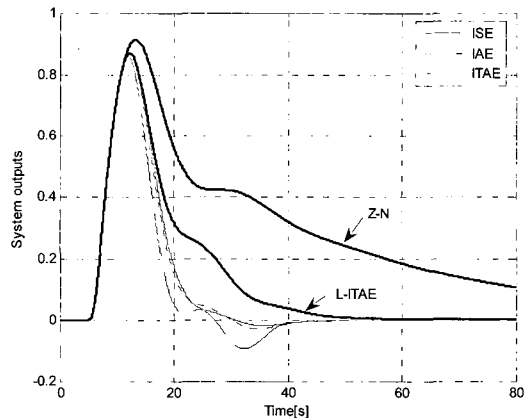


Fig. 6 Response comparison of the PID controllers for system II

**Table 4 Performance comparison of the PID tuning methods for system II**

	$M_{pk}$	$t_{pk}$	$t_{ry}$
ISE	0.859	11.98	38.52
IAE	0.867	12.18	38.43
ITAE	0.871	12.26	27.79
Z-N	0.913	13.27	138.11
L-ITAE	0.870	12.25	44.28

이 경우에도 제안한 방법들이 기존의 방법보다  $M_{pk}$ ,  $t_{pk}$ ,  $t_{ry}$  등에서 더 우수한 성능을 보임을 확연히 알 수 있다. Z-N법은  $M_{pk}$ 도 클 뿐 아니라 외란의 영향이 제거되는 회복시간  $t_{ry}$ 도 길다.

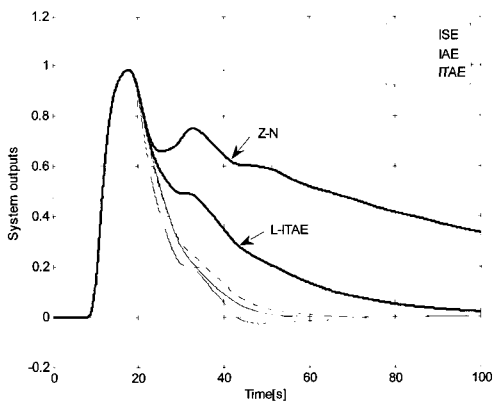
#### 4.3 예제3

다음은 동조규칙을 얻는데 사용한 데이터 범위 밖, 즉  $L/\tau > 3$ 의 시스템에 대해 적용 가능성을 살펴보기 위하여 4차 시스템을 고려하였다.

$$\text{시스템 III: } G_p(s) = \frac{\exp(-8s)}{(s+1)^4} \quad (18)$$

이 시스템의 경우  $K = 1.001$ ,  $\tau = 2.093$ ,  $L = 10.08$  을 얻었고  $L/\tau = 4.8$ 로서 3보다 큰 경우이다. 사용한 Z-N법의 제어기 계수는  $K_p = 0.249$ .

$\tau_i = 20.160$ ,  $\tau_d = 5.040$  이고 L-ITAE법은  $K_p = 0.306$ ,  $\tau_i = 7.930$ ,  $\tau_d = 3.810$ 이며 단위 계단응답은 Fig.7과 같고 성능은 Table 5와 같다.

**Fig. 7 Response comparison of the PID controllers for system III****Table 5 Performance comparisons of the PID tuning methods for system III**

	$M_{pk}$	$t_{pk}$	$t_{ry}$
ISE	0.984	17.76	56.24
IAE	0.985	17.88	54.32
ITAE	0.986	17.91	48.09
Z-N	0.985	17.84	353.20
L-ITAE	0.985	17.86	100.14

전체적으로 앞의 두 시스템과 유사한 경향을 보이지만,  $L/\tau$ 이 클수록 기존의 방법보다 더 양호한 응답특성을 보여줄 수 있음을 확인할 수 있다. 특히  $L/\tau$ 이 큰 경우에 Z-N법은 회복시간이 길어 적용이 쉽지 않다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 세 가지 성능지수(ISE, IAE, ITAE)에 대해 외란제거용 PID 제어기의 새로운 동조규칙을 얻는 문제를 다루었다. 먼저 1차 시간 지연 모델에 대해서 RCGA는 각 성능지수를 최소화 하도록 PID 계수들을 동조하고, 계산된 계수와 동조규칙 모델과 또 다른 RCGA를 이용하여 새로운 외란제거용 PID 제어기의 동조규칙을 유도하였다. 세 가지 시스템에서 대한 시뮬레이션을 실시하여 제안한 동조규칙들의 성능이 우수함을 보여주며 기존의 두 동조규칙보다 더 나은 결과를 확인할 수 있었다. 외란제거용 공정제어는 실제 현장에서 종종 찾아볼 수 있으므로 제안한 동조법은 유용한 방법이 될 것이다.

## 참고문헌

- [1] Y. Nozaka, "Trend of new control theory application in industrial process control(survey)", Proc. IFAC 12th Triennial World Cong., Vol. 4, pp. 215-218, 1993.
- [2] 김동화, 이은웅, "PID 제어기 튜닝 기술에 대한 연구현황과 전망", 대한전기학회논문지,

제44권, 제5호, pp. 13-23, 1995.

- [3] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers", Trans. ASME, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [4] B. Porter and A. H. Jones, "Genetic tuning of digital PID controllers", Electronic Letters, Vol. 28, No. 9, pp. 843-844, 1992.
- [5] Chia-Ju Wu, "Genetic Tuning of PID Controllers Using a Neural Network Model: A Seesaw Example", J. of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 25, pp.43-59, 1999.
- [6] 김도웅, 진강규, "RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델기반 동조규칙", 제어-자동화시스템공학회 논문지, 제8권, 제12호, pp. 1056-1060, 2002.
- [7] 신명호, 김민정, 이윤형, 소명옥, 진강규, "PPGA 기반의 시스템 파라미터 추정과 PID 제어기 동조", 제어-자동화시스템공학회 논문지, 제12권, 제7호, pp. 644-649, 2006.
- [8] A. M. Lopez, C. L. Miller and C. L. Murill, "Tuning controller with error-integral criteria", Instrumentation Technology, Vol.14(2), pp.57-62, 1967.
- [9] 이현식, 진강규, "연속시스템의 파라미터 추정", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제4권, 제1호, pp. 76-81, 1998.

**저 자 소 개**



**김민정(金玟廷)**

2005년 한국해양대학교 기계정보공학부(공학사), 2007년 한국해양대학교 제어계측공학과(석사). 관심분야 : 제어이론, 유전알고리즘 응용



**이윤형(李潤炯)**

2002년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사), 2004년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과(석사). 현재 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스 공학과 박사과정. 관심분야 : 제어이론, 유전알고리즘 응용



**소명옥(蘇明玉)**

1980년 한국해양대학교 기관학과(학사), 1989년 한국해양대학교 대학원 기관학과 석사, 1997년 동 대학원 박사. 한국항만·운송노동연구원 연구위원, 2005~2006년 University of Wales Cardiff 파견교수. 현재 한국해양대학교 선박전자기공학과 교수.



**하윤수(河潤秀)**

1962년 4월생. 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업(공학석사), 1996년 일본 쓰쿠바대학 대학원 졸업(공학박사), 1996~ 현재 한국해양대학교 IT공학부 부교수



**황승욱(黃勝郁)**

1984년 고려대학교 전자공학과(학사), 1986년 고려대학교 대학원 전자공학과 석사, 1992년 동 대학원 전자공학과 박사, 1986년~1987년 삼성전자 연구원 1987년~1992년 ETRI 선임연구원, 1992년~현재 한국해양대학교 IT공학부 부교수



**진강규(陳康奎)**

1977년 한국해양대학교 기관학과(학사), 1985년 Florida Institute of Technology, 전기·전자·컴퓨터공학과(석사), 1996년 University of Wales Cardiff, 전기·전자·시스템공학과 박사. 현재 한국해양대학교 IT 공학부 교수.