

RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델기반 동조규칙

Model-based Tuning Rules of the PID Controller Using Real-coded Genetic Algorithms

김도응, 진강규
(Do-Eung Kim and Gang-Gyoo Jin)

Abstract : Model-based tuning rules of the PID controller are proposed incorporating with real-coded genetic algorithms. The optimal parameter sets of the PID controller for step set-point tracking are obtained based on the first-order time delay model and a real-coded genetic algorithm as an optimization tool. As for assessing the performance of the controllers, performance indices(ISE, IAE and ITAE) are adopted. Then tuning rules are derived using the tuned parameter sets, potential rule models and another real-coded genetic algorithm. A set of simulation works is carried out to verify the effectiveness of the proposed rules.

Keywords : model-based tuning rule, PID controller, genetic algorithm, performance indices

I. 서론

근래 제어분야에서 비약적인 기술 발전이 있어왔음에도 불구하고 아직도 산업현장에는 PID 제어기가 주류를 이루고 있다[1]. 그 이유는 구조가 단순하여 하드웨어적으로 구현이 쉽고, 동조할 계수가 적어서 다루기가 용이하고, 대부분의 산업공정에서 강인함을 보이기 때문이다. PID 제어기의 성능은 비례이득, 적분시간, 미분시간에 따라 결정되는데, 주어진 설계사양을 만족하도록 이들을 적절히 선택하는 것을 동조(Tuning)라 한다.

PID 제어기를 동조하는 방식에는 여러 가지가 있으나 경험적이고 실험적인 방법들이 대부분이다. 대표적인 것으로는 Ziegler와 Nichols(Z-N)의 개루프법과 폐루프법[2]이 있고, Cohen-Coon(C-C)법[3]이 있다. 이와 같은 고전적인 방법들은 실제 시스템응답이 외란이나 잡음에 대해 민감하여 정확한 매개변수를 결정하기가 어렵고, Z-N의 폐루프법은 시스템의 안정성이 중시되는 한 적용하기가 어려운 문제점이 있다. 이런 문제점을 보완하면서 PID제어기의 파라미터를 결정하는 방법으로는 릴레이 궤환을 이용하는 방법[4]이 있고, 실시간 적응동조 방법[5], 패턴을 이용한 전문가 동조법[6], 모델기반 동조[7-10] 등이 있다. 최근에는 모델과 유전 알고리즘(Genetic algorithm: GA)을 기반으로 최적의 계수 구하고자 하는 연구가 진행되고 있다[11]. GA는 유전학과 자연도태 현상을 알고리즘으로 구현한 것으로, 구배(Gradient)에 기초한 탐색 알고리즘과는 달리 연속성, 미분가능성, 단봉성과 같은 탐색공간에 대한 부가정보를 요구하지 않기 때문에 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 모델과 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm: RCGA)을 이용하여 PID성능을 주는 제어기의 계수를 얻는다. 계수들은 세 성능지수(ISE, IAE, ITAE)

를 최소화하는 관점에서 결정되고, 여기서 발생하는 최적화 문제는 RCGA로 해결한다. 다음 동조된 계수, 동조규칙 모델 및 RCGA를 이용하여 세 동조규칙이 유도된다. 제안한 규칙의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 실시한다.

II. PID 제어기의 최적 동조

그림 1과 같은 PID 제어시스템을 고려하자. 비례, 적분, 미분 동작의 병렬결합으로 구현되는 PID 제어기는 (1)과 같은 전달함수로 표시된다.

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

여기서 K_p 는 비례이득, τ_i 는 적분시간, τ_d 는 미분시간을 의미한다. 비례동작은 기본 동작으로서 도달시간을 줄여주지만 정상오차를 제거하는 기능이 없으며, 적분동작은 정상오차를 제거해주나 계수를 잘못 조정하면 과도응답이 나빠진다. 이 때 미분동작을 잘 활용함으로써 오버슈트를 줄이고 과도응답을 개선할 수 있다.

바람직한 PID 제어기 설계는 설정치 변경에 대하여 출력이 잘 추종하도록 제어기의 계수를 최적으로 조정하는 문제로 귀착된다.

1. 기존의 동조규칙

1942년 Ziegler와 Nichols는 PID 제어기의 동조문제를 연구하면서 개루프법과 폐루프법[2]을 제안하였다. 개루프법

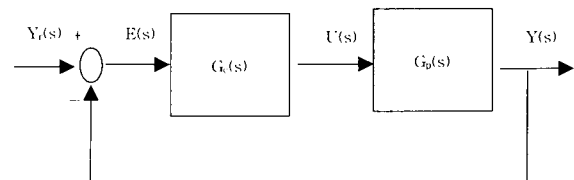


그림 1. PID 제어시스템.

Fig. 1. PID control system.

은 고차의 플랜트를 (2)와 같이 시간지연을 갖는 1차 시스템으로 가정하면서 시작된다. 실험적으로 플랜트의 단위계단 응답곡선을 얻고, 정상이득 K , 시정수 τ , 시간지연 L 을 구한 후 동조하는 방법이다.

$$G_p(s) = \frac{K \exp(-Ls)}{1 + \tau s} \quad (2)$$

한편 페루프법은 비례제어만으로 페루프 시스템을 구성하고 출력신호에서 한계진동이 발생할 때까지 비례계수를 증가시켜, 이 때 얻는 한계이득과 한계주기로 동조하는 방법이다. C-C법[3]은 Cohen과 Coon에 의해 제시된 방법으로 Z-N 개루프법과 같이 1차 시간지연 모델의 파라미터를 찾는 과정은 동일하지만 동조규칙이 다르다. 내부모델제어 (Internal model control: IMC)[9]는 페루프 내에 공칭모델을 포함하여 플랜트와 모델간의 오차를 제거하여 새로운 제어 입력을 만드는 방법으로서, 플랜트와 모델간의 모델링 오차를 보상할 수 있지만, 사용되는 모델은 일반적으로 플랜트보다 저차이며 플랜트의 불안정한 성분을 포함해야 한다는 제한조건이 있다. 한편 Lopez 등[8]은 (2)의 1차 시간지연 모델에 대해 "시간곱 절대오차 적분"의 성능지수를 최소로 하도록 제어기의 계수를 결정하는 방법을 제안하였다. 그들은 설정치 추종과 외란제거 목적의 두 계수 집합을 제안하였다.

2. GA를 이용한 최적동조

여기서는 플랜트 모델을 기반으로 계단상의 설정치 변화에 최적의 추종성능을 주는 PID 계수를 결정한다. 제어대상으로 (2)의 모델을 가정하였고, 고차 시스템의 근사 모델은 저자에 의해 제안된 기법[13]으로 얻는다.

제어시스템의 매개변수들을 무차원화하기 위해 시간영역에서 시간 t 를 플랜트의 시정수로 나눈 것을 $t' = t/\tau$ 라 하면, 주파수 영역에서 $s' = \tau s$ 의 관계가 성립되므로 (1)과 (2)는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$G_r(s') = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s'} + \frac{\tau_d s'}{\tau} \right) \quad (3)$$

$$G_p(s') = \frac{K \exp(-\frac{L}{\tau} s')}{1 + s'} \quad (4)$$

그림 2는 무차원 제어시스템으로부터 PID 제어기를 최적으로 동조하는 블록선도를 보여주고 있다.

여기서 발생하는 최적화 문제를 해결하기 위하여 RCGA를 이용하며, RCGA는 주어진 성능지수 값이 최소가 되도록 제어기의 계수를 조정하게 된다. 실수코딩을 채용함으로써 염색체는 $s = (K_p, \tau_i, \tau_d)$ 로 표현된다.

RCGA는 PID 제어기의 성능이 좋고 나쁨을 정량적으로 평가할 수 있는 성능지수(Performance index)를 필요로 하기 때문에 아래와 같이 제곱오차적분(Integral square error: ISE), 절대오차적분(Integral absolute error: IAE), 시간곱 절대오차적분(Integral time absolute error: ITAE)의 세 가지 성능지수를 고려하였다.

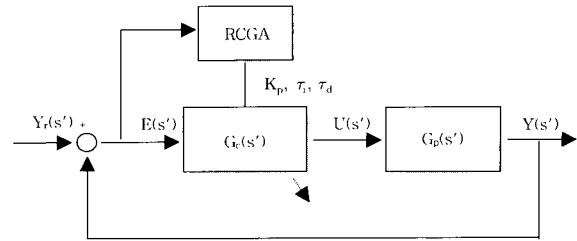


그림 2. RCGA를 이용한 PID 제어기의 최적동조.

Fig. 2. Optimal tuning of the PID controller using a RCGA.

$$\text{ISE: } J = \int_0^{t_f} e(t)^2 dt \quad (5)$$

$$\text{IAE: } J = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (6)$$

$$\text{ITAE: } J = \int_0^{t_f} t |e(t)| dt \quad (7)$$

여기서 시간 t_f 는 이 이후의 오차가 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다.

일반적으로 ISE는 해석이 용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하며, IAE는 오차의 절대크기를 그대로 사용함으로써 ISE보다 나은 감도를 나타내며, 반면 ITAE는 장시간의 과도현상에 대해 시각 벌점을 주어서 IAE나 ISE보다 훨씬 더 변별력이 있다.

한편 최소화 문제를 최대화 문제로 전환해주도록 다음 적합도 함수가 사용된다.

$$f = -J + \gamma \quad (f > 0) \quad (8)$$

여기서 γ 는 좋은 개체와 더 나은 개체의 구별이 용이하도록 세대마다 적절히 변경되는 매개 변수이다[14].

각각의 성능지수에 대해 최적의 동조 계수를 얻기 위해 RCGA의 제어 변수로는 집단의 크기 $N = 20$, 재생산 계수 $\eta_i = 1.7$, 교배확률 $P_c = 0.9$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.05$ 를 사용하였고[14], PID 계수들은 각각 구간 $0 \leq K_p \leq K_{pm}$, $0 \leq \tau_i \leq \tau_{im}$, $0 \leq \tau_d \leq \tau_{dm}$ 에서 탐색되었다. 여기서 K_{pm} , τ_{im} , τ_{dm} 은 계수들의 상한값을 의미한다. 그림 3은 L/τ 에 대한 PID 제어기의 KK_p , τ_i/τ , τ_d/τ 를 그린 것이다. 계산된 모든 값들은 독립된 씨드로 프로그램을 5번 실행하고 평균한 결과이다.

III. 제안한 동조규칙

앞 절에서는 L/τ 에 대하여 세 가지 성능지수를 최소로 하는 최적의 계수를 계산하였다. 계산된 데이터로부터 새로운 규칙을 얻기 위하여 표 1과 같이 KK_p , τ_i/τ , τ_d/τ 에 대해 각각 2, 3, 2개의 동조규칙 모델을 고려하였다. 이들은 기존의 규칙들을 일반화한 것으로 생각할 수 있다. 여기서 발생하는 최적화 문제에도 RCGA를 적용하며 RCGA는 아래 성능지수 값이 최소가 되도록 모델의 계수를 조정하게 된다.

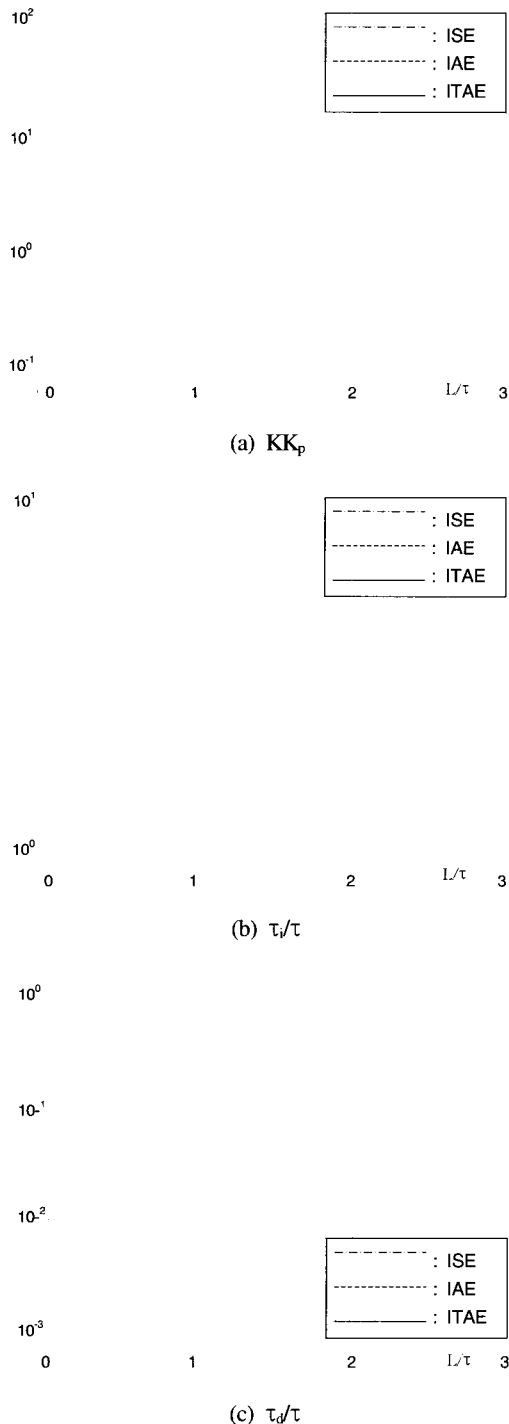


그림 3. 계단상의 설정치 추종에 대한 최적 PID 계수.
Fig. 3. Optimal PID parameters for step set-point tracking.

$$J = \sum_i |K_p - \hat{K}_p| \quad (9)$$

$$J = \sum_i |\tau_i - \hat{\tau}_i| \quad (10)$$

$$J = \sum_i |\tau_d - \hat{\tau}_d| \quad (11)$$

그림 4는 이를 보여준다.

표 1. 동조규칙 모델.

Table 1. Tuning rule models.

Type	Tuning rule models		
	KK_p	τ_i/τ	τ_d/τ
PID	$a_0 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{a_1}$	$a_0 + a_1 \frac{L}{\tau}$	$\frac{a_2}{a_0 + a_1 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
	$a_0 + a_1 \frac{\tau}{L}$	$\frac{a_1 + a_2 \frac{L}{\tau}}{1 + a_0 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$a_0 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{a_1}$
		$\frac{1}{a_0 - a_1 \frac{L}{\tau}}$	

표 2. 계단상의 설정치 추종에 대한 ISE, IAE, ITAE 동조 규칙.

Table 2. ISE, IAE and ITAE tuning rules for step set-point tracking.

Perf. Index	Parameters		
	KK_p	$\hat{\tau}_i/\tau$	$\hat{\tau}_d/\tau$
ISE	$1.4051 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{1.1213}$	$1.3721 + 0.4595 \frac{L}{\tau}$	$\frac{5.8475}{2.3258 + 12.1578 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
IAE	$1.1395 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{1.1254}$	$1.3170 + 0.3463 \frac{L}{\tau}$	$\frac{4.0555}{1.6935 + 10.0121 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
ITAE	$1.0433 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{1.1779}$	$1.2744 + 0.3193 \frac{L}{\tau}$	$\frac{4.7078}{2.4788 + 12.5015 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$

각각의 성능지수와 동조규칙 모델에 대해 독립된 씨드로 프로그램을 5번 실행하고 평균한 결과 성능지수 값이 최소가 되는 규칙을 얻을 수 있었다. 표 2는 각 성능지수에 대한 최적화된 동조규칙을 나타낸 것이다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 검토

앞에서 구한 세 가지 동조규칙의 유효성을 검토하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 제어대상으로는 여러 문헌에서 자주 인용되는 두 예제를 선택하였다[10].

1. 예제 1 : 다음과 같은 3차 시스템이 고려되었다.

$$G_p(s) = \frac{\exp(-s)}{(s+1)(2s+1)(0.5s+1)} \quad (12)$$

1차 시간지연 모델로의 근사화 작업에는 RCGA가 사용되었고, 파라미터들은 각각 $0 \leq K \leq 50$, $0 \leq \tau \leq 50$, $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 이 때 샘플링 시간은 $h = 0.01$ 초이었다. 시뮬레이션 결과 약 300세대에서 다음 근사 모델을 얻을 수 있었고, L/τ 이 약 1 인 시스템임을 알 수 있었다.

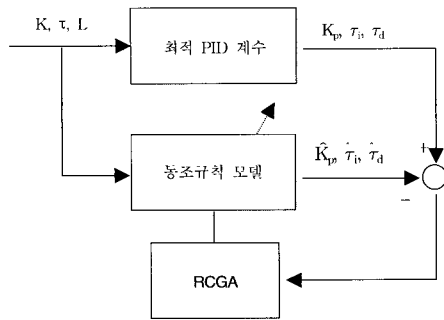


그림 4. RCGA를 이용한 동조규칙 모델의 최적화.

Fig. 4. Optimization of tuning rule models using a RCGA.

$$G_p(s) = \frac{1.001 \exp(-2.32s)}{1 + 2.306s} \quad (13)$$

제안한 방법과 Z-N 페루프법[2], IMC법[9], Yuwana-Seborg(Y-S)법[10], Lopez ITAE법[8]의 동조결과를 비교하도록 응답실험을 실시하고 최대 오버슈트(M_p), 도달시간(t_r), 5% 정착시간(t_s), 최대입력(u_{max})을 구해 표 3에 나타내었다. 그림 5는 비교 목적으로 30초간 단위 계단응답을 그린 것이다.

IMC의 경우 $ML = 0.25$ [9,12]를 사용하였고, L-ITAE는 Lopez 등의 결과이고, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE는 본 연구에서 다룬 세 가지 동조규칙의 결과이다. Z-N법과 IMC는 기대했듯이 L-ITAE, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE 보다 M_p 가 크고 t_s 가 긴 반면에 Y-S법은 t_r 과 t_s 모두 다른 방법보다 길었다. 한편 L-ITAE, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE 모두 만족스러운 성능을 확인할 수 있었다. 이 중에서 GA-ISE는 나머지보다 M_p 가 약간 크지만 대신 t_r 이 짧아지는 결과를 보여주었다.

2. 예제 2 : 다음은 시간지연이 비교적 큰 3차 시스템이 고려되었다.

$$G_p(s) = \frac{\exp(-5s)}{(s+1)^2(2s+1)} \quad (14)$$

표 3. 동조규칙과 성능 비교.

Table 3. Tuning rules and comparisons of performance.

Tuning rules	Parameters			Performance			
				M_p	t_r	t_s	u_{max}
Z-N	1.85	3.45	0.86	32.25	1.69	7.49	2.45
IMC	1.1949	3.4640	0.7709	10.72	2.54	8.75	1.61
Y-S	1.20	4.81	1.20	-	4.47	9.20	1.47
L-ITAE	0.9601	3.5565	0.7132	1.72	3.37	5.97	1.31
GA-ISE	1.3981	4.2281	0.9345	5.38	2.38	6.21	1.77
GA-IAE	1.1338	3.8389	0.8020	3.11	2.89	5.27	1.49
GA-ITAE	1.0380	3.6781	0.7274	2.73	3.10	5.58	1.39

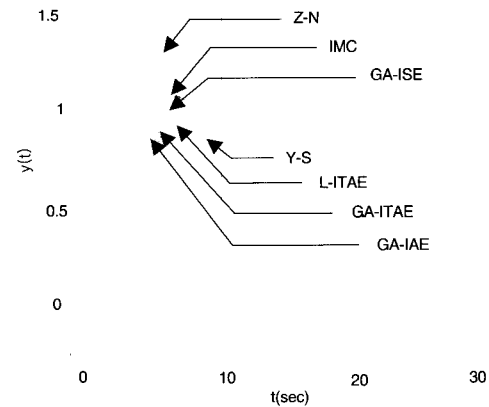


그림 5. PID 제어기의 응답비교.

Fig. 5. Response comparison of the PID controllers.

표 4. 동조규칙과 제어성능 비교.

Table 4. Tuning rules and comparisons of performance.

Tuning rules	Parameters			Performance			
	\hat{K}_p	$\hat{\tau}_i$	$\hat{\tau}_d$	M_p	t_r	t_s	u_{max}
Z-N	0.83	8.60	2.15	8.22	4.42	37.03	1.32
IMC	0.6992	5.8171	1.4251	17.55	4.66	26.31	1.33
Y-S	0.61	26.32	6.57	-	-	-	-
L-ITAE	0.4192	6.1643	1.9080	-	20.90	36.31	1.00
GA-ISE	0.6278	6.4773	2.1169	-	5.81	24.28	1.13
GA-IAE	0.5073	5.5880	1.8552	-	8.03	23.05	1.00
GA-ITAE	0.4587	5.3023	1.6373	-	9.59	23.41	1.00

예제 1과 같은 방법으로 근사 모델을 얻을 수 있었다. 이 시스템의 경우에 L/τ 는 약 2.7이었다.

$$G_p(s) = \frac{1.002 \exp(-6.64s)}{1 + 2.497s} \quad (15)$$

이 경우에도 응답실험을 실시하고 성능을 구해 표시한 것이 표 4이다. 그림 6은 60초간 단위 계단응답을 그린 것이다.

IMC의 경우 $ML = 0.25$ 를 사용하였다. Z-N법은 t_s 가 길고, IMC의 경우에는 M_p 와 t_s 둘 다 큰 경향을 보이며, Y-S법은 시간지연이 큰 시스템에 적용하기가 곤란함을 알 수 있다. 한편 L-ITAE법은 시간지연이 큰 시스템에서는 제안한 세 가지 동조법보다 성능이 뒤지며, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE는 다소 t_s 가 길지만 이와 같은 시스템에 잘 적용될 수 있었다. 특히 GA-ISE는 GA-IAE와 GA-ITAE 보다 도달시간 면에서는 나은 결과를 보여주었다.

V. 결론

본 논문에서는 세 가지 성능지수 ISE, IAE, ITAE를 사용하여 계단상의 설정치 변화에 추종성능이 개선되도록 모델과 RCGA를 이용하여 PID 제어기의 최적 동조규칙을 얻었

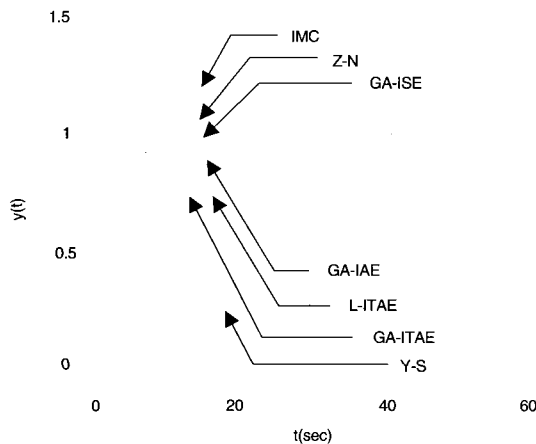


그림 6. PID 제어기의 응답비교.

Fig. 6. Response comparisons of the PID controller.

다. 먼저 1차 시간지연 모델에 대해서 RCGA는 각 성능지수를 최소화하도록 PID 계수들을 결정하고, 계산된 계수와 규칙모델, RCGA를 이용하여 PID 동조규칙을 유도하였다. 주어진 고차 시스템을 1차 시간지연 모델로 근사화하여 제안한 동조규칙을 적용하고 계단상의 설정치 변경에 대한 추종 성능을 비교하였다. 성능비교를 통하여 제안한 동조규칙들이 만족스러운 제어성능을 제공할함을 알 수 있다. 차후 연구로 외란제거 용 최적 동조규칙과 2차 시간지연 모델을 이용하는 것에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 본다.

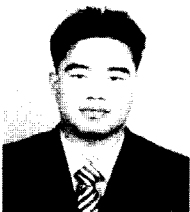
참고문헌

- [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] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers," *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.

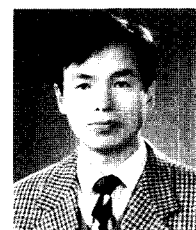
- [3] G. H. Cohen and G. A. Coon, "Theoretical considerations of retarded control," *Trans. ASME*, Vol. 75, pp. 827-834, 1953.
- [4] K. J. Åström and T. Hägglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins," *Automatica*, Vol. 20, pp. 645-651, 1984.
- [5] T. Yamamoto et al., "Intelligent tuning PID controllers," *Proc. IEEE Int. Conf. on SMC*, Vol. 5, pp. 2610-2615, 1995.
- [6] E. H. Bristol, "Pattern recognition: an alternative to parameter identification in adaptive control," *Automatica*, Vol. 13, pp. 197-202, 1977.
- [7] S. W. Sung, T. Y. Lee and S. W. Park, "Optimal PID controller tuning method for single-input/ single-output processes," *AIChE J.*, Vol. 48, No. 6, pp. 1358-1361, 2002.
- [8] A. M. Lopez, C. L. Miller and C. L. Murill, "Tuning controller with error-integral criteria," *Instrumentation Technology*, Vol. 14(2), 57-62, 1967.
- [9] M. Morari, E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [10] M. Yuwana and D. E. Seborg, "A new method for on-line controller tuning," *AIChE J.*, Vol. 28, No. 3, pp. 434-440, 1982.
- [11] P. Wang and D. P. Kwok, "Optimal design of PID process controller based on genetic algorithms," *Proc. 12th Triennial World Congress of IFAC, Sydney, Australia*, Vol. 4, pp. 193-197, 1993.
- [12] S. W. Sung and I. B. Lee, *PID Controllers and Automatic Tuning*, A-Jin Publishing co., Korea, 1999.
- [13] 이현식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 연속시스템의 온라인 퍼래미터 추정," 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제4권, 제1호, pp. 76-81, 1998.
- [14] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.

김도응

1975년 10월 6일생. 2001년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업 (공학사). 현재 한국해양대학교 제어계측공학과 석사과정. 관심분야 : 제어이론, 유전알고리즘.



진강규



1953년 10월 12일생. 1977년 한국해양대학교 기관학과(학사). 1985년 Florida Institute of Technology, 전기 · 전자 · 컴퓨터공학과(석사). 1996년 University of Wales Cardiff, 전기 · 전자 · 시스템공학과(박사). 현재 한국해양대학교 기계 · 정보공학부 정교수. 관심분야 : 유전알고리즘, 퍼지제어, 신경회로망, 최적제어, 지능제어.