

2자유도 PID 제어기의 RCGA기반 동조

RCGA-Based Tuning of the 2DOF PID Controller

황 승 욱, 송 세 훈, 김 정 근, 이 윤 형, 이 현 식, 진 강 규*

(Seung-Wook Hwang, Se-Hoon Song, Jung-Keun Kim, Yun-Hyung Lee, Hyun-Shik Lee, and Gang-Gyoo Jin)

Abstract : The conventional PID controller has been widely employed in industry. However, the PID controller with one degree of freedom(DOF) can not optimize both set-point tracking response and disturbance rejection response at the same time. In order to solve this problem, a few types of 2DOF PID controllers have been suggested. In this paper, a tuning formula for a 2DOF PID controller is presented. The optimal parameter sets of the 2DOF PID controller are determined based on the first-order plus time delay process and a real-coded genetic algorithm(RCGA) such that the ITAE performance criterion is minimized. The tuning rule is then addressed using calculated parameter sets and another RCGA. A set of simulation works are carried out on three processes with time delay to verify the effectiveness of the proposed rule.

Keywords : 2DOF PID controller, tuning rules, real-coded genetic algorithm

I 서론

지난 수십 년 동안 다양한 제어이론이 제안되고 정교한 제어기를 설계하려는 많은 노력이 있어왔음에도 불구하고, 석유화학 플랜트, 발전설비 등 산업현장에서 사용되고 있는 제어방식의 95%가 아직도 PID 제어이다[1]. PID 제어방식이 이렇게 많이 사용되는 이유는 P/PI/PID 형과 같이 제어기 구조를 자유롭게 선택할 수 있고, 동조할 계수의 수가 적고, 시스템의 물리적 한계가 고려될 경우에 안티 와인드업(Anti-windup) 보상기의 설계가 쉽고 또 제어 알고리즘의 수동/자동 전환 시 범퍼리스(Bumpless) 기법의 사용이 용이하기 때문이다.

특히 마이크로프로세서 기술의 발달로 그 처리속도가 빨라지고 또 PID 제어기의 성능도 개선되어 여러 생산현장에 적용되면서 지난 60여 년간 다양한 동조 규칙들이 제안되어 왔다. 특히 산업현장의 대부분 공정 프로세스들이 시간 지연을 포함하는 1차 과감쇠 시스템(Overdamped system)의 특성을 나타내고 있어 이를 대상으로 한 동조가 활발히 연구되어 왔다[1-5].

일반적으로 제어기는 설정치 변동에 잘 추종할 수 있어야 할 뿐만 아니라 또한 예측할 수 없는 외란에도 적절히 대응할 수 있어야 한다. 그러나 기존의 1DOF PID 제어기는 설정치 응답이 최적이 되도록 동조되면 외란 응답이 좋지 못하고, 반대로 외란 응답이 최적이 되도록 동조되면 설정치 응답이 좋지 못하는 상반된 특성 때문에 두 가지의 목적을 동시에 달성시키지 못하는 한계점을 지니고 있다. 이러한 한계 때문에 어떤 경우에는 두 종류의 계수 목록을

저장하고 있다가 제어 환경에 따라 적절히 전환하는 방법을 채택하기도 한다. 그러나 설정치 변경이 수시로 일어나고 외란 또한 예측할 수 없을 경우에는 이 방법 또한 효과적이지 못하다.

이러한 PID 제어기의 한계를 극복하기 위해 1963년 Horowitz에 의해 처음으로 2DOF PID 제어기가 제안되었다[6]. 2DOF PID 제어기는 1DOF PID 제어기 보다 동조할 계수가 더 많아 그 당시 경험에 의존하던 방법으로는 동조가 용이치 못해 70년대까지 큰 관심을 끌지 못하다, 실효성이 새롭게 인식되고 또 계수들 중에 상호 의존적이지 않은 쌍이 존재하여 복잡도가 현격하게 증가하지는 않는다는 사실이 알려지면서 많은 연구가 진행되어 왔다[7-11].

Araki와 Taguchi[7]는 고주파 영역의 이득을 줄여 잡음으로 인해 응답이 진동하지 않도록 주파수 영역의 성능지수를 최소화하도록 동조하였고, Zhang[8] 등은 2DOF PID 제어기에 퍼지보상기를 결합시키는 문제를 다루었고, Miklosovic과 Gao[9]는 능동 외란억제 제어(Active Disturbance Rejection Control)와 PID 제어 개념을 확대하여 강인한 2DOF PID 제어기 설계 문제를 다루었다. 한편 최적화 도구로서의 유전 알고리즘을 2DOF PID 제어기 동조에 응용하면서, Kawabe와 Tagami[10]는 행렬 부등식(Matrix inequality) 형태의 목적함수를 최적화하였고, Lagunas-Jimenez 등[11]은 설정치 추종성능과 외란 억제성능과 모델링 오차에 대한 강인성을 동시에 개선하도록 다목적함수를 최적화하였다.

이를 포함한 관련 문헌들의 연구 초점은 대부분 동조 방법론에 국한하고 있으므로, 본 연구에서는 실수코딩 유전 알고리즘(RCGA)을 이용하여 시간지연을 갖는 1차 시스템용 2DOF PID 제어기의 새로운 동조규칙을 얻는 문제를 다룬다. 이를 위해 ITAE(Integral time-absolute error) 성능지수를 최소로 하는 관점에서 2DOF PID 제어기의 계수를 RCGA를 이용하여 탐색하고, 탐색된 최적 계수는 또 다른 RCGA와 동조규칙 모델을 이용하여 ISE(Integral square error) 성능지수를 최소로 하는 관점에서 일반화된 최적 동조규칙을

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 4. 8., 채택확정 : 2008. 7. 17.

황승욱, 진강규 : 컴퓨터 · 제어 · 전자통신공학부

(hsw@hhu.ac.kr/ggjin@hhu.ac.kr)

송세훈, 김정근 : 극동일렉트릭(주) 기술연구소

(shsong@kukdongelec.com/jkkim@kukdongelec.com)

이윤형 : 한국항공연수원 부산연수원(domse54@naver.com)

이현식 : 국방기술품질원 기동화력센터(tino29@empal.com)

$$\text{제어기: } C_1(s') = KK_p \left(1 + \frac{1}{\frac{\tau_i s'}{\tau} + 1 + \frac{\tau_d s'}{\tau}} \right) \quad (7b)$$

$$C_2(s') = -KK_p \left(\alpha + \beta \frac{\tau_d s'}{1 + \frac{\tau_f s'}{\tau}} \right) \quad (7c)$$

III. 2DOF PID 제어기의 동조규칙 유도

1. 2DOF PID 제어기의 최적 계수 탐색

(3)으로 기술되는 제어대상용 동조규칙을 얻기 위해서는 먼저 L/τ 에 대응되는 최적의 계수를 얻는 작업이 요구된다. 이를 위해 $r = 0$ 으로 고정하고 L/τ 에 대해 단위계단 외란을 인가하면서 성능지수(목적함수)를 최소로 하는 최적의 계수 $\{KK_p, \hat{\tau}_i/\tau, \hat{\tau}_d/\tau\}$ 를 찾고, 같은 방법으로 $d = 0$ 을 고정하고 단위계단입력을 인가하며 성능지수를 최소로 하는 계수 $\{\hat{\alpha}, \hat{\beta}\}$ 를 찾는다. 이 때 제어대상의 시간지연이 시정수의 3배를 넘지 않는 것으로 간주하여 L/τ 를 0과 3사이에서 변경하였고 또 목적함수로는 (8)의 ITAE를 사용하였다.

$$J_1(\phi) = \int_0^{t_r} |e(t)| dt \quad (8)$$

여기서 $\phi = [KK_p, \tau_i/\tau, \tau_d/\tau]^T$ 또는 $\phi = [\alpha, \beta]^T$ 이고, $e(t) = r(t) - y(t)$ 이며, t_r 는 이후의 적분값을 무시해도 좋을 정도로 충분히 큰 시간이다. 한편 최대미분이득 N 은 10으로 하였다.

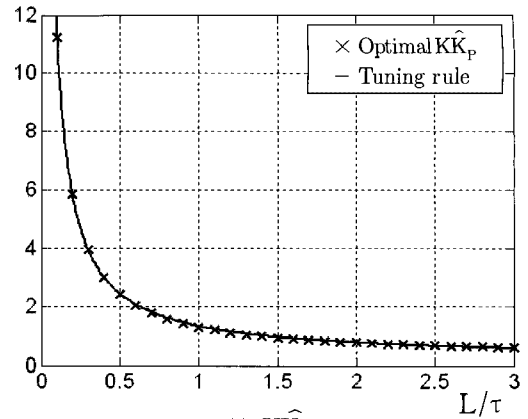
계수를 동조하는 과정에서 일어나는 다변수 최적화 문제는 RCGA를 사용하여 해결하며 실수코딩을 채용함으로써 염색체(Chromosome)는 벡터 ϕ 를 유전자로 가지게 된다. 집단 내 염색체들의 성능이 좋고 나쁨은 적합도(Fitness) 평가를 통해 계량되며, 적합도는 목적함수로부터 계산된다. 한편 RCGA의 제어변수로는 집단의 크기 20, 재생산 계수 1.7, 교배확률 0.9, 돌연변이 확률 0.05를 사용하였다[12].

다음은 동조과정을 요약한 것이다.

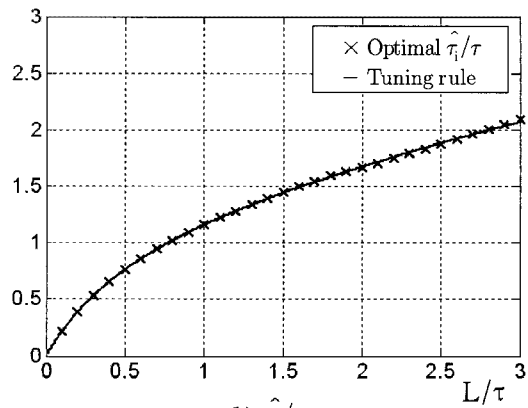
```

Set  $L/\tau = 0$ ;
While ( $L/\tau \leq 3$ )
    Find the optimal parameters  $\{KK_p, \hat{\tau}_i/\tau, \hat{\tau}_d/\tau\}$  of  $C_1(s')$  using the model and a RCGA to optimize the disturbance response;
    With fixing  $\{KK_p, \hat{\tau}_i/\tau, \hat{\tau}_d/\tau\}$ , find the optimal parameters  $\{\hat{\alpha}, \hat{\beta}\}$  of  $C_2(s')$  using the model and another RCGA to optimize the set-point response;
    Set  $L/\tau = L/\tau + \Delta L/\tau$ ;
End while
    
```

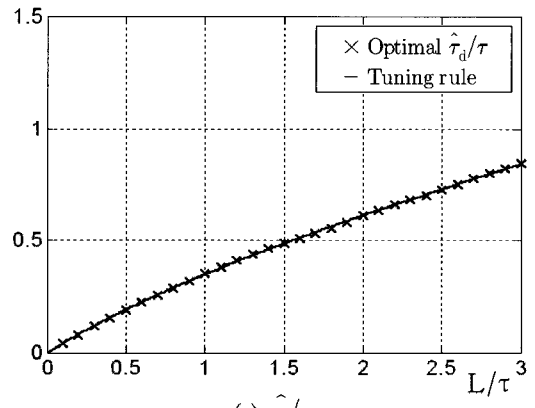
그림 3과 그림 4는 L/τ 에 대해 계산된 $\{KK_p, \hat{\tau}_i/\tau, \hat{\tau}_d/\tau\}$ 와 $\{\hat{\alpha}, \hat{\beta}\}$ 값을 문자 'x'로 표기한 것이며, 실선은 다음 절에서 제안될 동조규칙으로부터 계산된 값을 그린 것이다.



(a) KK_p



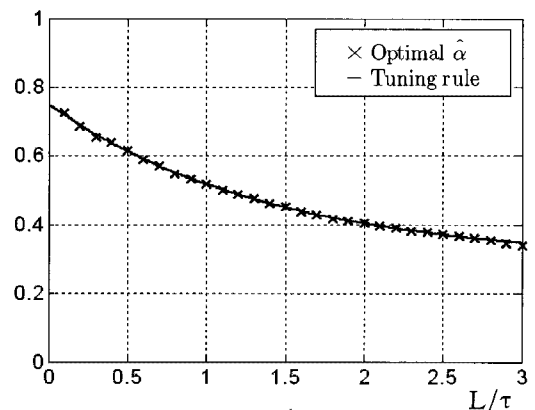
(b) $\hat{\tau}_i/\tau$



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

그림 3. $C_1(s')$ 의 최적 계수 집합.

Fig. 3. Optimal parameter sets of $C_1(s')$.



(a) $\hat{\alpha}$

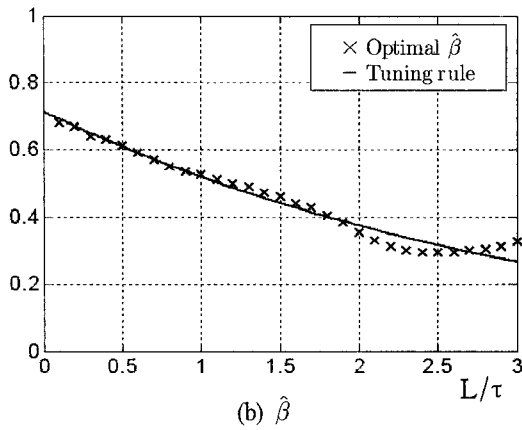


그림 4. $C_2(s')$ 의 최적 계수 집합.

Fig. 4. Optimal parameter sets of $C_2(s')$.

2. 동조규칙의 유도

앞 절에서 모델과 RCGA를 기반으로 L/τ 값에 대응되는 2DOF PID 제어기의 최적 계수를 구하는 문제를 다루었고, 여기서는 앞서 계산된 결과와 또 다른 RCGA를 이용하여 그림 5와 같이 동조규칙을 얻는 문제를 다룬다.

L/τ 이 입력되는 동안 RCGA는 동조규칙 모델의 출력과 미리 계산된 최적 계수 값 사이에 오차가 적도록 모델의 계수를 연속적으로 조정하게 된다. 이 때 사용된 동조규칙 모델은 문헌의 제 동조규칙들[1-5,13]을 참고하여 경험적으로 선택하였고 표 1은 이를 보여준다.

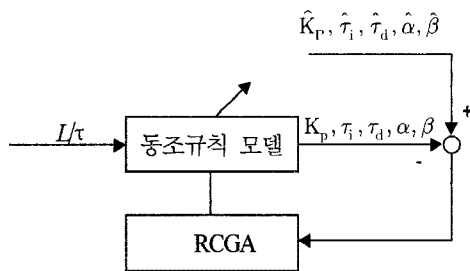


그림 5. RCGA를 이용한 동조규칙의 계수 추정.

Fig. 5. Parameter estimation of tuning rules using a RCGA.

표 1. 동조규칙 모델.

Table 1. Tuning rule models.

Parameters	Tuning rule models
KK_p	$a_0 + a_1 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{a_2}$
$\frac{\tau_i}{\tau}$	$(b_0 + b_1 \frac{L}{\tau}) / (1 + b_2 \frac{\tau}{L})$
$\frac{\tau_d}{\tau}$	$(c_0 + c_1 \frac{L}{\tau}) / (1 + c_2 \frac{\tau}{L})$
α	$d_0 + d_1 \exp\left(-d_2 \frac{L}{\tau}\right)$
β	$f_0 + f_1 \exp\left(-f_2 \frac{L}{\tau}\right)$

표 2. 2DOF PID 제어기용 동조규칙.

Table 2. Tuning rules for the 2DOF PID controller.

Parameters	Tuning rules
KK_p	$0.217 + 1.125 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.992}$
$\frac{\tau_i}{\tau}$	$(1.620 + 0.303 \frac{L}{\tau}) / (1 + 0.659 \frac{\tau}{L})$
$\frac{\tau_d}{\tau}$	$(0.903 + 0.173 \frac{L}{\tau}) / (1 + 2.084 \frac{\tau}{L})$
α	$0.293 + 0.457 \exp\left(-0.713 \frac{L}{\tau}\right)$
β	$0.718 \exp\left(-0.326 \frac{L}{\tau}\right)$

각 계수에 대응되는 최적의 동조규칙을 찾기 위해 아래의 ISE 성능지수를 이용하였다.

$$J_2(K_p) = \sum_M (KK_p - \widehat{KK_p})^2 \tag{9a}$$

$$J_3(\tau_i) = \sum_M \left(\frac{\hat{\tau}_i}{\tau} - \frac{\tau_i}{\tau}\right)^2 \tag{9b}$$

$$J_4(\tau_d) = \sum_M \left(\frac{\hat{\tau}_d}{\tau} - \frac{\tau_d}{\tau}\right)^2 \tag{9c}$$

$$J_5(\alpha) = \sum_M (\hat{\alpha} - \alpha)^2 \tag{9d}$$

$$J_6(\beta) = \sum_M (\hat{\beta} - \beta)^2 \tag{9e}$$

여기서 M은 사용된 데이터의 개수를 의미한다.

성능지수로 ISE를 선택함으로써 큰 폭의 오차에 대해 보다 더 큰 벌점 부여하여 비교적 변동 폭이 적은 근사곡선을 구할 수 있다. 앞의 과정을 통해 구한 최적의 동조규칙 모델은 표 2와 같다.

이로서 2DOF PID 제어기의 최적 계수는 제어대상의 매개변수 K, τ, L 이 주어지면 표 2의 동조규칙을 이용하여 손쉽게 구할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 검토

제안한 동조법의 성능을 검증하기 위해 문헌에 자주 인용되는 3가지 시스템에 대해 시뮬레이션을 실시하였다. 먼저 제안한 동조법(GA-ITAE)으로 응답을 얻고 이를 기존의 Ziegler-Nichols 개루프법(Z-N), Cohen-Coon법(C-C), Lopez-ITAE법(L-ITAE)과 비교하였다[1-4]. Lopez-ITAE법은 외란 억제성능이 최적이 되도록 동조되었다. 각 방법의 응답을 정량적으로 비교하기 위하여 설정치 추종성능의 경우에는 오버슈트 M_p , 2% 정착시간 t_s , 도달시간 t_r 를 구하였고, 외란 억제성능의 경우에는 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_r 로 정의하고 구하였다.

1. 시스템 I

먼저 시간지연을 갖는 1차 시스템을 고려하였다.

$$P(s) = \frac{1}{1+0.5s} e^{-0.1s} \quad (10)$$

(10)은 시간지연에 비해 시정수가 큰 시스템이고, $L/\tau = 0.2$ 이다.

제안한 동조법과 기존의 동조법을 적용하여 구한 계수는 표 3과 같다. 각각의 동조규칙에 따른 제어기의 설정치 추종성능과 외란 억제성능을 확인하기 위해 먼저 $d=0$ 으로 고정된 상태에서 단위계단입력을 인가하고 응답을 구한 것이 그림 6이고, 이어서 $r=0$ 으로 고정하고 단위계단외란을 인가한 결과는 그림 7과 같다. 이때, 정량적인 비교치는 표 4와 같다.

표 3. 시스템 I에 대한 동조 계수 목록.

Table 3. Parameter lists tuned for system I.

Methods	K_p	τ_i	τ_d	α	β
GA-ITAE	5.768	0.196	0.041	0.689	0.673
Z-N	6.000	0.200	0.050	×	×
C-C	6.917	0.227	0.035	×	×
L-ITAE	6.230	0.181	0.038	×	×

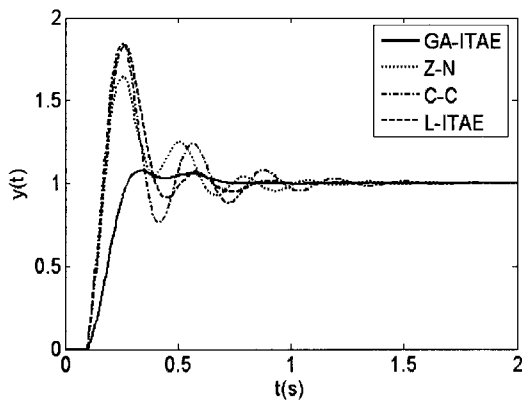


그림 6. 시스템 I에 대한 설정치 추종응답.

Fig. 6. Set-point tracking responses for system I.

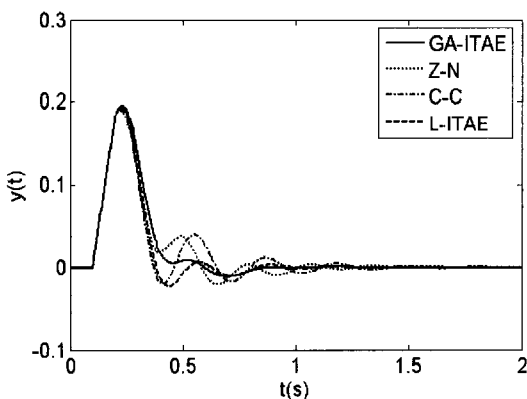


그림 7. 시스템 I에 대한 외란 억제응답.

Fig. 7. Disturbance rejection responses for system I.

표 4. 시스템 I에 대한 성능비교.

Table 4. Performance comparison for system I.

Methods	Set-point tracking			Disturbance rejection		
	M_p	t_r	t_s	M_{pk}	t_{pk}	t_{ry}
GA-ITAE	7.38	0.25	0.67	0.20	0.23	0.40
Z-N	64.31	0.17	0.99	0.19	0.22	0.67
C-C	84.30	0.16	1.23	0.19	0.22	0.61
L-ITAE	83.72	0.16	0.81	0.19	0.23	0.46

기존의 동조법은 설정치 추종성능과 외란 억제성능 양쪽 모두 좋지 못하며, 특히 설정치 추종응답에서 오버슈트가 다소 크게 나타났다. 이에 반해 제안한 동조법은 기존의 동조법에 비해 도달시간은 약간 길지만 설정치 추종성능과 외란 억제성능 모두 만족스러웠다.

2. 시스템 II

다음은 시간지연을 갖는 3차 시스템을 고려하였다.

$$P(s) = \frac{1}{(1+0.5s)(1+s)(1+2s)} e^{-s} \quad (11)$$

동조규칙을 적용하기에 앞서 먼저 고차의 시스템 II로부터 FOLPD 모델의 매개변수를 얻는 작업이 필요하며, 여기에는 연속시스템의 온라인 파라미터 추정법[14]을 적용하였다. 매개변수들은 각각 $0 \leq K \leq 10$, $0 \leq \tau \leq 10$, $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 이 때 샘플링 시간을 0.01초, $t_f = 40$ 초로 하였고 탐색한 결과 $K = 1.001$, $\tau = 2.173$, $L = 2.473$ 을 얻을 수 있었다. 이 경우에 $L/\tau = 1.1$ 이고 시간지연과 시정수가 비슷한 시스템임을 알 수 있다.

추정된 모델을 대상으로 제안한 동조법과 기존의 동조법을 적용하여 구한 계수는 표 5와 같다.

표 5. 시스템 II에 대한 동조 계수 목록.

Table 5. Parameter lists tuned for system II.

Methods	K_p	τ_i	τ_d	α	β
GA-ITAE	1.206	2.704	0.844	0.496	0.495
Z-N	1.054	4.946	1.237	×	×
C-C	1.422	4.344	0.745	×	×
L-ITAE	1.201	2.839	0.942	×	×

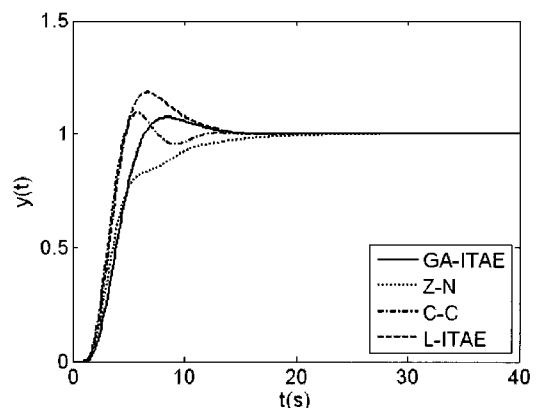


그림 8. 시스템 II에 대한 설정치 추종응답.

Fig. 8. Set-point tracking responses for system II.

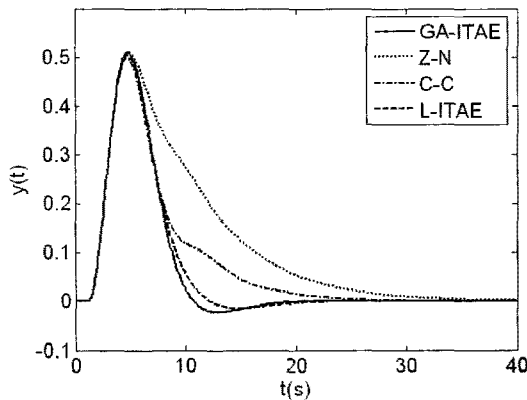


그림 9. 시스템 II에 대한 외란 억제응답.
Fig. 9. Disturbance rejection responses for system II.

표 6. 시스템 II에 대한 성능비교.
Table 6. Performance comparison for system II.

Methods	Set-point tracking			Disturbance rejection		
	M_p	t_r	t_s	M_{pk}	t_{pk}	t_{ry}
GA-ITAE	3.02	4.15	12.48	0.51	4.85	14.55
Z-N	-	6.72	16.63	0.51	4.97	25.88
C-C	9.41	2.29	11.09	0.50	4.78	18.81
L-ITAE	12.04	2.37	12.74	0.50	4.83	10.98

앞의 경우와 같이 먼저 단위계단입력을 인가한 결과는 그림 8과 같으며, 이어서 단위계단외란을 인가한 결과는 그림 9와 같다. 이때, 정량적인 비교치는 표 6과 같다.

Z-N 동조법의 경우 설정치 추종성능과 외란 억제성능 양쪽 모두 좋지 못하며, C-C 동조법은 설정치 추종성능은 좋지만 외란으로 인한 회복시간이 다소 길다. 반면 L-ITAE 동조법은 기대할 수 있듯이 외란 억제성능은 좋지만 설정치 추종응답에서 오버슈트가 다소 크게 나타났다. 이에 반해 제안한 동조법은 설정치 추종 성능과 외란 억제성능 모두 만족스러운 응답을 보여주었다.

3. 시스템 III

마지막으로 시간지연이 다소 큰 3차 시스템을 고려하였다.

$$P(s) = \frac{1}{(1+s)^2(1+2s)} e^{-5s} \quad (12)$$

이 경우에도 앞서 사용한 방법을 적용한 결과 FOLPD 모델의 매개변수로 $K=1.001$, $\tau=2.375$, $L=6.778$ 을 얻었고, $L/\tau=2.9$ 인 시스템임을 알 수 있었다.

추정된 모델을 대상으로 얻어진 각 동조법의 계수는 표 7과 같다.

표 7. 시스템 III에 대한 동조 계수 목록.

Table 7. Parameter lists tuned for system III.

Methods	K_p	τ_i	τ_d	α	β
GA-ITAE	0.614	4.795	1.917	0.353	0.283
Z-N	0.421	13.556	3.389	×	×
C-C	0.717	9.292	1.623	×	×
L-ITAE	0.503	6.116	2.569	×	×

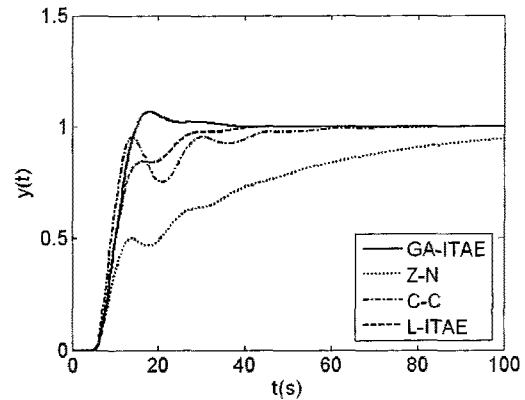


그림 10. 시스템 III에 대한 설정치 추종응답.
Fig. 10. Set-point tracking responses for system III.

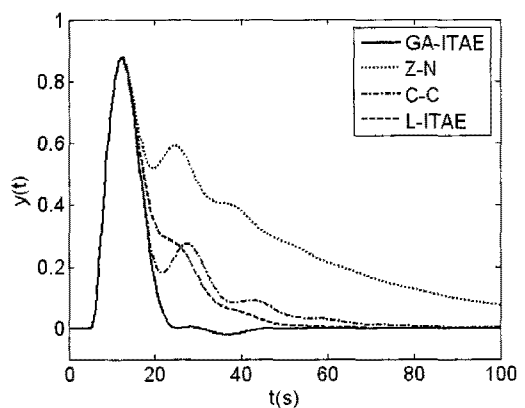


그림 11. 시스템 III에 대한 외란 억제응답.
Fig. 11. Disturbance rejection responses for system III.

표 8. 시스템 III에 대한 성능비교.

Table 8. Performance comparison for system III.

Methods	Set-point tracking			Disturbance rejection		
	M_p	t_r	t_s	M_{pk}	t_{pk}	t_{ry}
GA-ITAE	1.62	9.28	20.15	0.87	12.30	24.60
Z-N	-	70.94	138.58	0.87	12.26	149.51
C-C	-	5.79	54.50	0.87	12.28	64.43
L-ITAE	-	15.62	34.13	0.87	12.29	46.84

앞의 경우와 같이 단위계단입력과 단위계단외란을 각각 인가하여 응답을 구한 결과는 그림 10, 그림 11과 같다.

시간지연이 다소 큰 시스템 III에서 기존의 동조규칙들은 그 성능이 현격하게 낮아졌음을 알 수 있으며, 제안한 동조규칙의 경우 다른 동조규칙과 달리 설정치 추종성능과 외란 억제성능 모두 양호한 형태를 보여주었다.

V. 결론

본 연구에서는 RCGA를 이용하여 시간지연을 갖는 1차 시스템을 제어대상으로 2DOF PID 제어기의 새 동조규칙을 얻는 문제를 다루었다. 이를 위해 RCGA를 이용하여 ITAE 성능지수를 최소로 하는 관점에서 2DOF PID 제어기의 계수를 탐색하고, 탐색된 최적 계수와 RCGA와 동조규칙 모델을 이용하여 ISE 성능지수를 최소로 하는 관점에서 최적

의 동조 규칙을 얻었다. 이와 함께 제안된 동조규칙의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하여 그 효용성을 검증하였다. 제안된 동조규칙을 적용한 결과 설정치 응답과 외란 응답 모두 만족스러운 성능을 이루어낼 수 있었다.

참고문헌

[1] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, Instrument of America, 2nd edition, 1995.

[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] A. M. Lopez, C. L. Miller, C. L. Smith, and P. W. Murrill, "Controller tuning relationships based on integral performance criteria," *Instrumentation Technology*, vol. 14, pp. 72-75, 1967.

[5] A. O'Dwyer, "PI and PID controller tuning rules for time delay processes: A summary," *Technical Report AOD-00-01*, Edition 1, Dublin Institute of Technology, Ireland.

[6] I. M. Horowitz, *Synthesis of Feedback Systems*, Academic Press, 1963.

[7] M. Araki and H. Taguchi, "Two-degree-of-freedom PID controllers," *Int. J. of Control, Automation, and Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 401-411, 2003.

[8] J.-G. Zhang, Z.-Y. Liu, and R. Pei, "Two-degree-of-freedom PID control with fuzzy logic compensation," *Proc. of 2002 Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 3, pp. 1498-1501, 2002.

[9] R. Miklosovic and Z. Gao, "A robust two-degree-of-freedom control design technique and its practical application," *IEEE Industrial Application Society 2004 Annual Meeting and World Conference*, 2004.

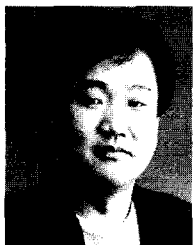
[10] T. Kawabe and T. Tagami, "A real coded genetic algorithm for matrix inequality design approach of robust PID controller with two degrees of freedom," *Proc. of the 12th IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*, pp. 119-124, Istanbul, Turkey, 1997.

[11] R. Lagunas-Jimenez, G. Fernandez-Anaya, and J. C. Martinez-Garcia, "Tuning of two-degrees-of-freedom PID controllers via the multiobjective genetic algorithm NSGA-II," *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, vol. 2, pp. 145-150, 2006.

[12] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.

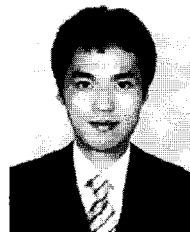
[13] 김도웅, 진강규, "RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델 기반 동조규칙," *제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지*, 제 8 권, 제 12 호, pp. 1056-1060, 2002.

[14] 이현식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 연속시스템의 온라인 파라미터 추정," *제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지*, 제 4 권, 제 1 호, pp. 76-81, 1998.



황 승 욱

1984년 고려대학교 전자공학과 졸업. 1986년 동 대학원 석사. 1992년 동 대학원 박사. 1992년~현재 한국해양대학교 컴퓨터 · 제어 · 전자통신공학부 교수. 2008년~현재 극동일렉콤(주) 기술연구소 소장. 관심분야는 통신이론, 병렬시스템설계, 디지털시스템설계.



송 세 훈

2006년 한국해양대학교 기계 정보공학부 졸업. 2008년 동 대학원 제어계측공학과 석사. 2007년~현재 극동일렉콤(주) 기술연구소 주임연구원. 관심분야는 모션제어, 임베디드 시스템.



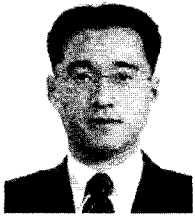
김 정 근

1999년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업. 2002년 동 대학원 석사. 2008년 동 대학원 박사. 2007년~현재 극동일렉콤(주) 기술연구소 책임연구원. 관심분야는 제어시스템설계, 지능제어, 통신이론.



이 윤 형

2002년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업. 2004년 동 대학원 기관시스템공학과 석사. 2007년 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사. 현재 한국항만연수원 교수. 관심분야는 제어이론, 유전알고리즘 응용, 항만하역장비 제어.



이 현 식

1996년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사. 2001년 동 대학원 박사. 2007년~현재 국방기술품질원 선임연구원. 관심분야는 지능제어, 실시간 임베디드 시스템.



진 강 규

1977년 한국해양대학 기관학과 졸업. 1985년 (미)Florida Institute of Technology 전기전자컴퓨터공학과 석사. 1996년 (영)University of Wales, Cardiff 전기전자시스템공학과 박사. 1996년~현재 한국해양대학교 컴퓨터·제어·전자통신공학부 교수. 관심분야는 지능제어, 유전알고리즘을 이용한 최적화.