

안티와인드업 기법을 가지는 PID 제어기의 EA 기반 동조

EA-based Tuning of a PID Controller with an Anti-windup Scheme

진강규*, 박동진

(Gang-Gyoo Jin¹ and Dong-Jin Park²)

¹Division of IT, Korea Maritime and Ocean University

²Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Korea Maritime and Ocean University

Abstract: Many practical processes in industry have nonlinearities of some forms. One commonly encountered form is actuator saturation which can cause a detrimental effect known as *integrator windup*. Therefore, a strategy of attenuating the effects of integrator windup is required to guarantee the stability and performance of the overall control system. In this paper, optimal tuning of a PID (Proportional-Integral-Derivative) controller with an anti-windup scheme is presented to enhance the tracking performance of the PID control system in the presence of the actuator saturation. First, we investigate effective anti-windup schemes. Then, the parameters of both the PID controller and the anti-windup scheme are optimally tuned by an EA (Evolutionary Algorithm) such as the IAE (Integral of Absolute Error) is minimized. A set of simulation works on two high-order processes demonstrates the benefit of the proposed method.

Keywords: PID controller, optimal design, actuator saturation, anti-windup, evolutionary algorithm

I. 서론

자동화 추세에 발맞추어 PID 제어기는 기계, 전기, 화공 분야를 포함한 모든 산업분야에서 가장 많이 사용되어온 대표적인 제어기로서 설정치 추종과 외란제거 성능 개선에 성공적으로 대처해 왔다. PID 제어기가 이처럼 광범위하게 인정받게 된 것은 현장 기술자들이 쉽게 이해할 정도로 그 구조가 단순하고 또 동조과정이 간단하기 때문이다.

이런 범용성에 힘입어 현재까지 많은 동조법들이 문헌을 통해 제안되어 왔다[1-4]. 그러나 이들의 대부분은 한정된 종류의 프로세스 모델에 기초하고 있어 프로세스가 복잡할 수록 그 안정성이 결여되고, 적용도 제한될 수밖에 없다. 특히 산업현장에서 운전되고 있는 제어시스템들은 어떤 형태로든 비선형요소를 내포하고 있고, 그 중 가장 흔히 접하는 요소가 액츄에이터(Actuator)이다.

PID 제어시스템에 액츄에이터 포화가 내재된 경우에 설정치를 과도하게 변경하면 액츄에이터 동작의 물리적인 한계로 인해 제어입력이 포화되면서 적분기 와인드업(Integrator windup)으로 알려진 바람직스럽지 못한 영향이 일어나게 된다. 이런 영향으로 인해 응답의 오버슈트가 커지고, 도달시간 및 정착시간이 더 길어질 뿐만 아니라 경우에 따라서는 전체 시스템이 불안정해지기도 한다.

이런 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 다수의 연구들이 수행되어 왔다[1,5-9,13,14]. Krikelis [5]는 적분기의 출력값을 액츄에이터의 선형구간 내에 유지하도록 데드존

(Dead zone)이 있는 Hard limiter를 사용하는 방법을 제안하였고, Rundqwist [6]는 특정한 조건에 따라 적분동작을 ON/OFF 스위칭하는 4가지 형태의 조건부 적분(Conditional integration)법을 제안하면서, 그 중에서 제어오차와 제어입력의 부호가 같고 제어입력에 포화가 일어날 때 적분동작을 OFF시키는 것이 가장 좋은 결과를 준다고 보고하고 있다. Åström과 Hägglund [1]는 포화기의 입력력 차이를 적분기의 입력단에 연속적으로 피드백하여 적분동작을 수정하는 문제를 다루었다. 한편 Hodel과 Hall [7]은 제어입력이 포화속으로 들어가면 제어입력이 포화기의 가장자리에 놓이도록 특정 조건에 따라 적분기의 입력을 스위칭하는 가변구조 PID 안티와인드업 기법을 제안하였다.

그러나 이들은 액츄에이터 포화를 무시한 제어대상을 대상으로 제어기를 동조한 후, 적분 와인드업을 보상하는 부가적인 기능을 적용함으로써 성능개선의 여지를 남기고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구의 단점을 개선하도록 안티와인드업 기법을 가지는 PID 제어기와 액츄에이터와 제어대상으로 구성되는 전체 제어시스템의 설정치 추종 성능을 개선하는 문제를 다룬다. 이를 위해 먼저 본 방법에 채용할 안티와인드업 기법을 선정하기 위해 기존의 방법을 분석하며, 최적화 알고리즘인 EA를 이용하여 추종성능이 개선되도록 PID 제어기와 안티와인드업의 파라미터를 동시에 최적 동조한다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 검토한다.

II. PID 제어기

본 논문에서 다루게 될 PID 제어시스템은 그림 1과 같다. 제어시스템은 크게 PID 제어기 $C(s)$, 제어대상 $P(s)$ 와 비선형 포화기로 구성되고, 센서는 제어대상에 포함된 것으로 간주한다. 통상 $C(s)$ 는 피드백 제어를 통해 설정

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received February 7, 2013 / revised May 31, 2013 / accepted July 22, 2013

진강규: 한국해양대학교 IT공학부(ggjin@kmou.ac.kr)

박동진: 한국해양대학교 제어계측공학과(puredongjin@hotmail.com)

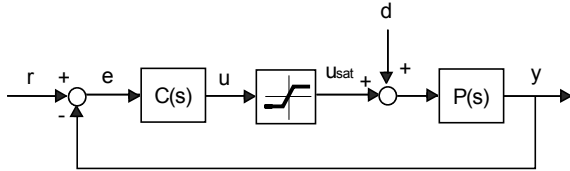


그림 1. PID 제어 시스템.

Fig. 1. PID control system.

치가 변경되거나 외란이 들어와도 비례, 미분, 적분 동작을 적절히 조합하여 설정치를 잘 추종하고 또 외란을 억제해 주는 역할을 하게 된다.

그림에서 r, y, d는 각각 설정치, 출력과 외란을, u는 제어 입력(포화기 입력)을, u_{sat}는 포화기의 출력을 의미한다.

제어기로 표준형 PID 제어기를 사용할 경우에는 그 전달 함수는 식 (1)로 주어진다.

$$C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \tag{1}$$

여기서 K_p, T_i, T_d는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간을 의미한다.

그러나 식 (1)의 이상적인 미분동작은 물리적으로 구현이 어렵고 또 센서를 통해 유입되는 잡음이 큰 경우에는 미분폭주(Derivative kick) 현상을 일으키는 원인이 되므로 현장에서는 주로 식 (2)의 수정식을 사용하고 있다. 본 논문에서도 이 식을 사용한다.

$$C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_f s}) \tag{2}$$

여기서 T_f = T_d/N는 필터 시정수이고, N은 최대 미분이득(Maximum derivative gain)으로서 대개 5~20 사이에서 경험적으로 정해지는 상수이다[1]. 여러 문헌에는 N=10을 사용하고 있으므로 본 논문에서도 이 값을 사용한다.

한편 포화기는 다음 식으로 정의된다.

$$u_{sat} = \max[u_{min}, \min(u, u_{max})] \tag{3}$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 u가 최댓값 u_{max} 보다 크면 u_{sat} = u_{max}가 되고, 반대로 최솟값 u_{min} 보다 작으면 u_{sat} = u_{min}가 된다.

III. 적분기 안티와인드업 기법

1. 적분기 와인드업

일반적으로 액추에이터 포화가 있는 제어시스템에서 설정치를 크게 변경하면 제어기의 출력이 포화기의 한계치(u_{max} 또는 u_{min})에 도달하여 일정한 값으로 제한되고 이로 인해 출력에는 변동이 일어나지 않고 적분기에는 오차가 계속 누적되어 크지는 현상을 적분기 와인드업이라 한다. 이로 인해, 정작 출력이 설정치에 가까워졌을 때에는 제어 입력이 작아져야 함에도 불구하고 포화 동안에 누적된 적분값으로 인해 포화에서 벗어나는 데 상당한 시간이 소요되고, 결과적으로 오버슈트(M_p), 도달시간(t_r), 정착시간(t_s)이 커지게 된다.

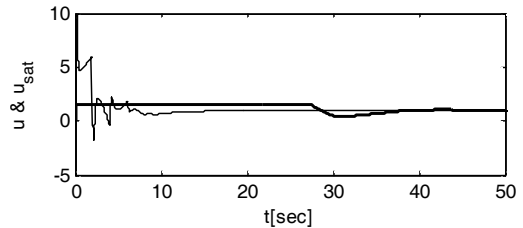
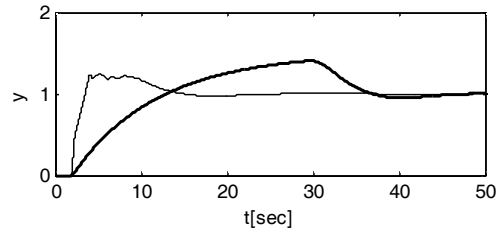


그림 2. 포화가 있는 또는 없는 시스템의 계단 응답.

Fig. 2. Step responses of a system with and without a saturation.

그림 2는 적분기 와인드업 현상의 한 예를 보여주고 있다. 가는 실선과 같이 M_p = 24.42[%], t_r = 1.24[sec], t_s = 20.65[sec]의 성능을 가지는 시스템에 포화기(0 ≤ u_{sat} ≤ 1.5)를 추가하면 M_p = 40.53[%], t_r = 8.47[sec], t_s = 44.69[sec]와 같이 응답(굵은 실선) 성능이 나빠지게 된다.

2. 기존의 적분기 안티와인드업 기법

적분기 와인드업을 피할 수 있는 가장 직관적인 방법은 제어기 출력(포화기 입력)에 포화가 일어나지 않도록 해주는 것이며, 크게 두 가지 방법이 제안되고 있다[6].

하나는 비선형 제어기법으로 제어기를 설계하는 방법이고, 다른 하나는 적분 와인드업을 보상할 수 있는 부가적인 기능을 사용하는 방법이다. 전자는 효과적인 설계 방법 중 하나이지만 실제 문제에 적용하는 것이 쉽지 않다는 단점이 있고, 후자는 표준형 PID 제어기를 사용할 때 기존의 동조규칙을 그대로 적용할 수 있는 장점이 있어 선호되는 방법이다.

여기서는 후자의 방법 중 대표적인 몇 가지 방법들에 대해 살펴본다.

2.1 조건부 적분 안티와인드업법

조건부 적분 안티와인드업(CI-AW: Conditional Integration Anti-Windup)법은 적분기 와인드업 영향을 경감시킬 수 있는 간단한 방법 중 하나이며, 제어기가 포화기의 선형영역 내에서 동작할 때에는 정상적인 적분동작을 하다가(ON 상태), 포화상태로 들어가게 되면 특정 조건에 따라 적분기를 멈추게(OFF 상태) 된다.

Rundqwist [6]는 4가지의 CI-AW법을 제안하면서 다음 방법이 더 효과적임을 밝히고 있다.

$$u_i = \begin{cases} 0 & , u_{sat} \neq u \text{ and } e(u - \bar{u}) > 0 \\ \frac{K_p}{T_i} e & , \text{ otherwise} \end{cases} \tag{4}$$

여기서 \bar{u} 는 포화기의 최솟값과 최댓값의 평균, 즉 $\bar{u} = (u_{max} + u_{min})/2$ 를 의미한다.

2.2 추종 안티와인드업법

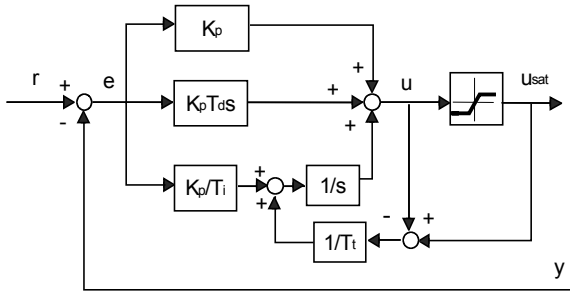


그림 3. Tracking 안티와인드업법.
Fig. 3. Tracking anti-windup method.

일명 Back calculation 으로도 알려진 추종 안티와인드업 (Tracking-AW: Tracking Anti-Windup) [1]은 제어입력이 포화될 때 적분값이 커지지 않도록 적분 동작을 적절히 제어하게 된다. 구체적으로는 그림 3과 같이 포화기의 입출력 차이 ($u_{sat} - u$), 즉 포화오차(Saturation error)를 적분기의 입력단에 피드백하여 적분 동작을 수정하게 된다. 이렇게 함으로써 적분값이 감소되거나 증가하게 된다.

이 방법에서 적분기의 입력은 다음 식으로 주어진다.

$$u_i = \frac{K_p}{T_i} e + \frac{1}{T_i} (u_{sat} - u) \quad (5)$$

여기서 T_i 는 추종시간상수(Tracking time constant)로서 포화기의 시정수를 의미하며, 대개 경험적으로 정해지는 상수이다. Åström과 Hägglund [1]는 $T_i = \sqrt{T_i T_d}$ 를, Bohn과 Atherton [8]은 $T_i = T_i$ 를 제안하고 있다.

2.3 가변구조 PID 안티와인드업법

가변구조 PID 안티와인드업(VSPID-AW: Variable Structure PID Anti-Windup)법[7]은 Tracking-AW법의 수정된 형태이며 u 가 포화에 들어가면 u 가 포화기의 가장자리에 놓이도록 다음 조건에 따라 적분기의 입력을 스위칭하게 된다. 스위칭 상태에 따라 PID 제어기의 구조가 가변되는 특징이 있어 VSPID-AW로 일컫는다.

$$u_i = \begin{cases} \frac{\alpha}{T_i} (u_{sat} - u), & u_{sat} \neq u \text{ and } e(u - \bar{u}) > 0 \\ \frac{K_p}{T_i} e & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 α 는 포화기의 응답속도를 결정짓는 양의 상수이다. 그림 4는 VSPID-AW법을 채용했을 때의 제어기 구조를 보여주고 있다.

앞서 살펴본 3가지 방법 중 본 논문에서 채용할 안티와인드업 기법을 선택하기 위해 식 (7)의 시간지연을 갖는 일차(First-order plus dead time: FOPDT) 형의 시스템 하나를 대상으로 성능평가를 실시하였다.

$$P(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (7)$$

여기서 K 는 이득, τ 는 시정수, L 은 시간지연을 의미한다. $K=1, \tau=10, L=8$ 의 제어대상에 대해 PID 제어기를 Z-N 개회로법으로 동조하였고, Tracking-AW법의 경우 $T_i = T_i$, VSPID-AW법의 경우 $T_i = T_i, \alpha = 1$ 로 하였다. 성능평가

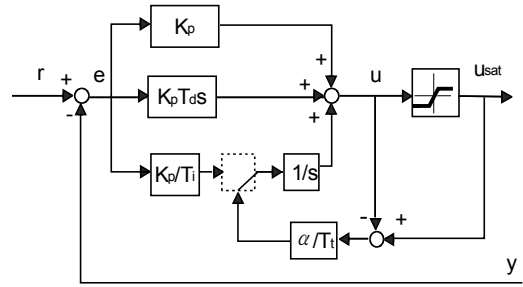


그림 4. 가변구조 PID 안티와인드업법.
Fig. 4. Variable structure PID anti-windup method.

표 1. 안티와인드업법의 성능 비교.

Table 1. Performance comparison of the anti-windup methods.

Anti-windup methods	Performances			Remarks
	M_p	t_r	t_s	
CI-AW	0.00	23.89	65.06	
Tracking-AW	5.02	10.09	56.53	
VSPID-AW	0.00	23.90	65.06	

를 위해 각 방법에 대해 $M_p, t_r, 2\% t_s$ 를 구하였다.

표 1에서 보면 CI-AW법과 VSPID-AW법은 오버슈트는 없지만 서서히 설정치에 도달하는 느린 응답특성을 보이며, Tracking-AW법은 오버슈트는 약간 발생하지만 응답이 상대적으로 빠르고 개선의 여지가 있었다. 따라서 Tracking-AW법을 본 연구에 채용한다.

IV. 안티와인드업을 갖는 PID 제어기의 동조

1. 기존의 방법

앞서 언급하였듯이 안티와인드업 기법을 채용하는 기존의 방법들은 PID 제어기가 포화기의 선형구간에서 동작하는 것으로 간주하고 기존의 동조규칙을 적용하게 된다. 그런 다음 적분 와인드업을 보상하도록 추가적인 피드백이나 스위칭 기능을 추가함으로써 성능을 개선하고 있다.

이를 요약하면 다음과 같다.

Step 1: Tune $\{K_p, T_i, T_d\}$ of $C(s)$ without actuator saturation

Step 2: With fixing $\{\hat{K}_p, \hat{T}_i, \hat{T}_d\}$, add an additional feedback loop or switching logic for anti-windup

이러한 방법들은 제어기가 선형구간 내에서 동작할 때에는 동조 당시의 성능이 유지되지만, 선형구간을 벗어나면 보상이 이루어지더라도 이전만큼 성능이 좋지 못하게 된다. 다시 말해 이들은 비선형 포화기와 안티와인드업 기법을 가진 전체 시스템에 대한 체계적인 최적화를 고려하지 않고 있다.

2. 수정된 안티와인드업을 갖는 PID 제어기

앞서 Tracking-AW법에는 개선의 여지가 있음을 확인하였기에 이 방법을 수정하여 사용한다. 식 (2)의 제어기 구조에 식 (8)의 피드백을 구성하여 적분기 와인드업에 대처하도록 하였다. 그림 5는 수정된 안티와인드업 기법이 결합된 PID 제어기를 보여준다.

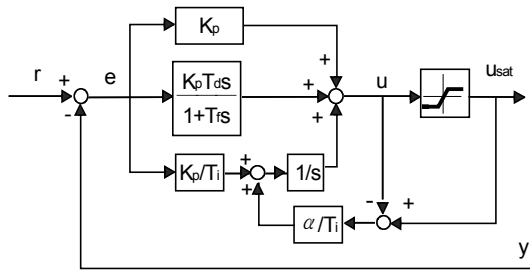


그림 5. 수정된 안티와인드업 기법이 결합된 PID 제어기.
Fig. 5. PID controller with a modified-AW method.

$$u_i = \frac{K_p}{T_i} e + \frac{\alpha}{T_i} (u_{sat} - u) \quad (8)$$

여기서 α 는 포화기의 응답속도를 결정하는 양의 상수로서 새로 도입된 설계변수이다.

3. EA에 기초한 파라미터 동조

따라서 본 논문에서는 비선형 포화기와 안티와인드업 기법을 결합한 전체 시스템에서 PID 제어기와 안티와인드업의 파라미터 $\{K_p, T_i, T_d, \alpha\}$ 를 동시에 최적화하는 문제를 다룬다.

최적화 도구로는 Jin 등[10]이 새롭게 제안한 EA를 사용한다. EA 또한 집단을 기반으로 하는 진화 알고리즘으로서 Attractor와 돌연변이를 기본 연산자로 취하고 있다. Attractor는 태풍, 토네이도, 은하 등의 나선운동을 동적모델로 흉내낸 선택자로서, 현 세대의 최적 개체와 나머지 개체 간의 적합도의 상대적인 차이에 따라 나머지 개체들에게 나선궤적 상에 새로운 벡터를 할당해준다. 한편 돌연변이는 전역탐색을 해주면서 또한 지역해로 빠지는 것을 막아주며 세대가 진행됨에 따라 탐색영역을 좁혀나가는 불균형 돌연변이(Non-uniform mutation) [11]를 사용하고 있다. 전체 알고리즘은 다음과 같이 요약된다.

본 논문에서는 집단의 크기로 $N=40$, Attractor의 매개변수로 $\omega_i=0.618$ (황금비), $\lambda_i=-0.3$, $m_{max}=20$ 을, 돌연변이의 매개변수로 $P_m=0.05$, $b=4$ 를 사용하였다.

한편, 시스템의 성능이 좋고 나쁨을 계량하기 위해 식 (9)의 절대오차적분(IAE: Integral of Absolute Error)을 평가함수로 사용하였다.

Overall procedure of the EA
Set $k=0$;
Initialize population $P(0)$ of size N randomly;
Evaluate fitness $f_i(k)(1 \leq i \leq N)$ and select the best $\{x_b(k), f_b(k)\}$;
While <termination conditions are not met>
Assign a new vector $x_i(k+1)(1 \leq i \leq N)$ to each individual using the attractor;
Apply non-uniform mutation;
Apply elitism if necessary;
Evaluate fitness $f_i(k+1)(1 \leq i \leq N)$ and select the best $\{x_b(k+1), f_b(k+1)\}$;
Set $k= k+1$;
End while

$$J(\phi) = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (9)$$

여기서 $\phi = [K_p, T_i, T_d, \alpha]^T \in \mathbb{R}^4$ 는 PID 제어기와 안티와인드업 파라미터로 구성된 벡터이고, $e(t)$ 는 설정치와 출력 간의 오차이며, 적분시각 t_f 는 이후의 적분값이 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다. ϕ 는 EA를 사용하여 식 (9)의 평가함수가 최소가 되도록 구해진다.

최적화 절차를 간단히 요약하면 다음과 같다.

Step 1: Add the feedback loop of (8) as an integrator anti-windup scheme to the PID controller

Step 2: Tune $\{K_p, T_i, T_d\}$ of (2) and α of (8) simultaneously using the EA such that (9) is minimized

V. 모의실험 및 검토

제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 두 고차 프로세스를 대상으로 모의실험을 실시하고 기존의 Z-N 개회로 동조법[2], IMC 동조법[3], Cvejn 동조법[4]과 비교하였다. 기존의 세 방법을 위해 각 프로세스는 FOPDT 모델로 근사화되고 그 파라미터들은 연속시스템의 온라인 파라미터 추정법[12]으로 추정된다.

FOPDT 모델이 얻어지면 세 방법들은 액추에이터 포화를 고려하지 않은 상태에서 동조되고, 비교의 공정성이 유지되도록 식 (5)의 피드백을 적용하되 $T_t = T_i$ 로 하였다.

모든 연산에 사용된 샘플링 시간은 0.01[sec]로 하였다.

1. 프로세스 1

첫 번째 모의실험에 사용된 프로세스는 시간지연을 갖는 3차 시스템이다.

$$P(s) = \frac{1}{(1+0.5s)(1+s)(1+2s)} e^{-0.2s} \quad (10)$$

포화기의 최솟값과 최댓값은 각각 $u_{min}=0$, $u_{max}=1.5$ 로 간주하였다.

제안된 방법을 폐회로 제어 시스템에 적용하여 파라미터를 최적 동조하였고, 이때 각 파라미터의 탐색구간은 $0 < K_p, T_i, T_d, \alpha \leq 10$ 으로, $t_f=30$ [sec]로 하였다. 탐색과정을 그린 그림 6에서 보면 55 세대 부근에서 해를 찾는 것

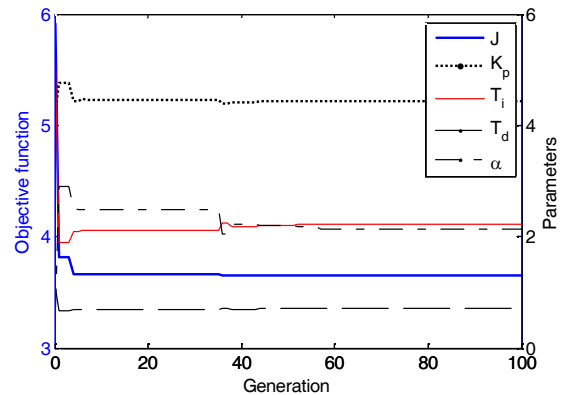


그림 6. EA를 이용한 파라미터 동조.
Fig. 6. Parameter tuning using the EA.

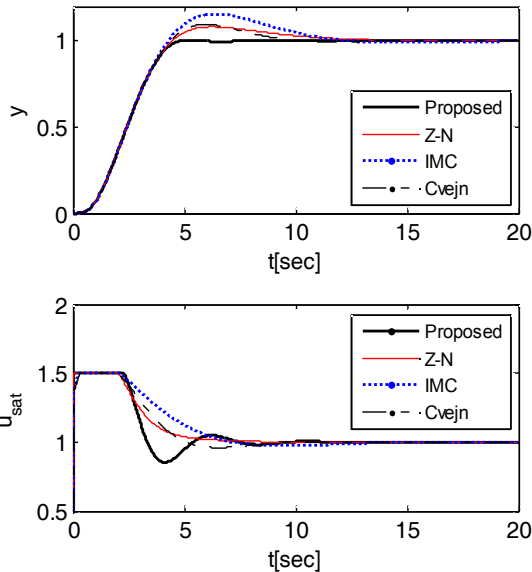


그림 7. 프로세스 I에 대한 설정치 추종응답 비교.
Fig. 7. Comparison of set-point tracking responses for Process I.

표 2. 프로세스 I에 대한 동조된 파라미터와 성능.

Table 2. Tuned parameters and performances for Process I.

Tuning method	Parameters				Performances		
	K_p	T_i	T_d	α	M_p	t_r	t_s
Proposed	4.43	2.23	0.71	2.13	0.65	2.67	4.45
Z-N	1.76	3.10	0.78	-	8.29	2.66	11.05
IMC	1.79	3.06	0.58	-	15.66	2.60	11.14
Cvejn	1.35	2.80	0.42	-	9.60	2.64	9.00

을 알 수 있다.

한편, 기존의 방법을 적용하기에 앞서 프로세스 I로부터 FOPDT 모델의 매개변수를 얻는 작업이 요구되며, 이들은 구간 $0 \leq K, \tau \leq 10, 0 \leq L \leq 5$ 에서 탐색되었다. 이때 $t_r = 30[\text{sec}]$ 로 하였고 탐색 결과 $K=1.00, \tau=2.28, L=1.55$ 의 해를 얻을 수 있었다. 이 프로세스는 시간지연에 비해 시정수가 다소 큰, 즉 $L/\tau = 0.68 (< 1)$ 임을 알 수 있다.

제안한 방법과 기존의 방법으로 동조한 결과는 표 2에 정리하였다. 각 방법에 따른 제어기의 설정치 추종성능을 확인하기 위해 외란 d를 0으로 한 상태에서 단위계단입력을 인가하였다. 그림 7은 이때의 출력 y와 포화입력 u_{sat} 를 그린 것이고 표 2는 정량적인 비교치를 요약한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 시간이 경과됨에 따라 모든 응답들은 설정치에 접근하지만 제안한 방법이 다른 세 방법보다 전반적으로 나은 것을 알 수 있다. 특히 IMC법의 M_p 가 크게 나왔다.

다음은 4개의 파라미터를 동시에 동조하는 본 방법과 기존의 접근법과 유사하게 포화기가 없는 폐회로 시스템에서 $\{K_p, T_i, T_d\}$ 를 먼저 동조한 후 이 값을 가지고 다시 α 를 동조하는 준최적(Suboptimal)의 경우와 성능비교를 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 $K_p=2.72, T_i=3.29, T_d=0.91, \alpha=1.16$ 을 얻었고 응답을 그린 것이 그림 8이며, $M_p=1.10, t_r=2.95, t_s=5.52$ 를 성능으로 얻었다. 성능비교와 응답

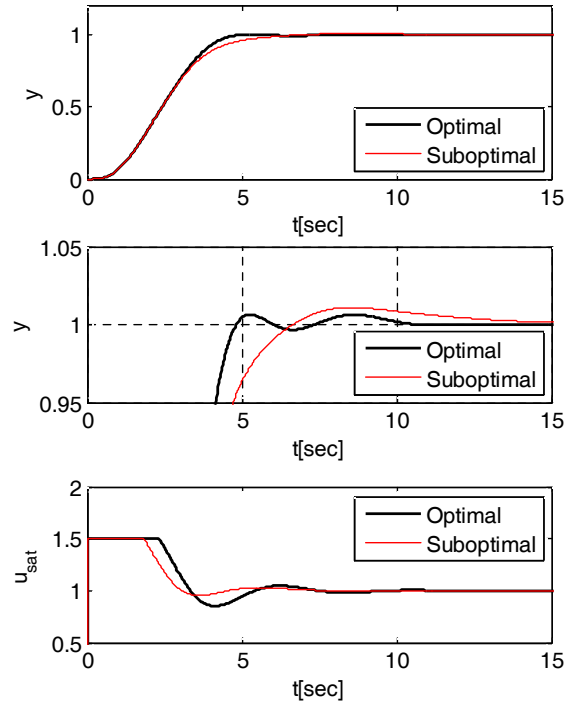


그림 8. 프로세스 I에 대한 최적 및 준최적 설정치 추종응답.
Fig. 8. Optimal and suboptimal set-point tracking responses for Process I.

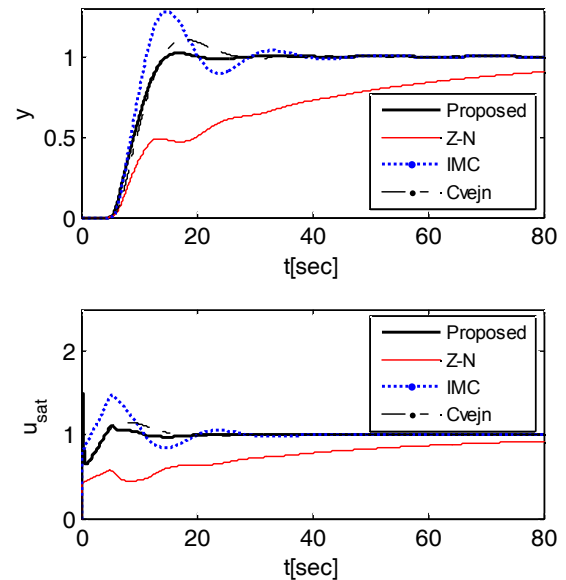


그림 9. 프로세스 II에 대한 설정치 추종응답 비교.
Fig. 9. Comparison of set-point tracking responses for Process II.

을 확대한 그림은 본 방법의 타당성을 설명해주고 있다.

2. 프로세스 II

두 번째 모의실험에 사용된 프로세스 역시 식 (11)로 기술되는 3차 시스템이다. 포화기의 최솟값과 최댓값은 앞서 사용한 값과 동일하다.

$$P(s) = \frac{1}{(1+s)^2(1+2s)} e^{-5s} \quad (11)$$

표 3. 프로세스 II에 대한 동조된 파라미터와 성능.

Table 3. Tuned parameters and performances for Process II.

Tuning method	Parameters				Performances		
	K_p	T_i	T_d	α	M_p	t_r	t_s
Proposed	0.58	5.12	1.59	0.61	2.29	6.39	17.86
Z-N	0.42	13.56	3.39	-	0.00	70.94	-
IMC	0.77	5.77	1.40	-	28.16	4.15	36.29
Cvejn	0.51	4.64	1.16	-	10.76	6.06	24.91

탐색구간을 $0 < K_p, T_i, T_d, \alpha \leq 10$ 으로, $t_r = 80[\text{sec}]$ 로 하여 앞의 경우와 같이 제안된 방법을 적용한 결과 얻어진 파라미터들은 표 3과 같다.

한편 FOPDT 모델의 파라미터는 $K = 1.00$, $\tau = 2.38$, $L = 6.78$ 로 추정되었다. 이 프로세스는 시정수에 비해 시간지연이 다소 큰, 즉 $L/\tau = 2.85(>1)$ 이어서 제어하기가 까다로운 시스템 중 하나이다. FOPDT 모델을 대상으로 기존의 동조법을 적용한 결과는 표 3에 같이 주어진다.

단위계단상의 설정치 변경에 대한 응답을 그린 것이 그림 9이고, 정량적인 비교치는 표 3에 주어진다.

Z-N법은 제어에 어려움을 겪고, IMC법은 진동이 심한 반면, 제안한 방법은 다른 세 방법보다 우수함을 보이고 있다. 이 결과는 적분기 와인드업에 대처하는 기존의 방법들은 제어대상에 따라 전체 시스템의 성능이 좋지 못할 수도 있음을 보여준다.

VI. 결론

본 논문에서는 안티와인드업 기법을 가진 PID 제어기의 추종 성능을 개선하는 문제를 다루었다. 기존의 방법들이 비선형 포화기를 고려하지 않은 상태에서 제어기를 동조한 후 안티와인드업 기법을 적용함으로써 성능 개선의 여지가 있음을 확인하였다. 기존 설계방법의 단점을 보완하기 위해 먼저 기존의 안티와인드업 기법을 분석하여 Tracking-AW법을 택하였고, 추종성능이 개선되도록 EA를 이용하여 IAE를 최소로 하는 관점에서 PID 제어기와 Tracking-AW의 파라미터를 구하였다. L/τ 이 1보다 크고 작은 두 프로세스를 대상으로 시뮬레이션을 실시한 결과 기존의 방법보다 M_p , t_r , t_s 성능 면에서 양호함을 확인하였다.

차후 본 방법의 비선형 시스템에 적용, 최대 미분이득 N을 동시에 최적화하는 연구 등이 필요하다고 생각된다.

REFERENCES

- [1] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, ISA Press, 1995.
- [2] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [3] M. Morari and E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [4] J. Cvejn, "PI/PID controller design for FOPDT plants based on the modulus optimum criterion," *Proc. of the 18th International Conference on Process Control*, Tatranská Lomnica, Slovakia, pp. 301-306, 2011.
- [5] N. J. Krikelis, "State feedback integral control with

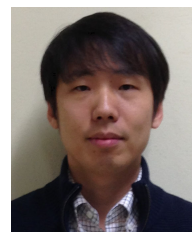
'intelligent' integrators," *International Journal of Control*, vol. 32, no. 3, pp. 465-473, 1980.

- [6] L. Rundqwist, "Anti-reset windup for PID controllers," *Ph.D. Thesis*, Department of Automatic Control, Lund Inst. of Technology, Sweden, 1991.
- [7] A. S. Hodel and C. E. Hall, "Variable-structure PID control to prevent integrator windup," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 442-451, 2001.
- [8] C. Bohn and D. P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies," *IEEE Systems Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 34-40, 1995.
- [9] S. Tarbouriech and M. Turner, "Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems," *Control Theory & Applications, IET*, vol. 3, no. 1, pp. 1-19, 2009.
- [10] G. Jin and T. Tran, "A nature-inspired evolutionary algorithm based on spiral movements," *Proc. of the SICE Annual Conference 2010*, Taiwan, pp. 1643-1647, 2010.
- [11] C. Z. Janikow and Z. Michalewicz, "An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithms," *Proc. of the 4th International Conference on Genetic Algorithms (ICGA 1991)*, San Diego, USA, pp. 31-36, 1991.
- [12] H. Lee and G. Jin, "On-line parameter estimation of continuous-time systems using a genetic algorithm," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 4, no. 1, pp. 76-81, 1998.
- [13] T. S. Kim, J. Yang, and O. Kwon, "A new anti-windup method using the linear quadratic observer," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 2, pp. 134-139, 2010.
- [14] T. S. Kim, and O. Kwon, "A new unified method for anti-windup and bumpless transfer," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 7, pp. 655-759, 2009.



진 강 규

1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1985년 FIT 전기·전자컴퓨터공학과 공학석사. 1996년 University of Wales, Cardiff 전기·전자시스템공학과 공학박사. 1996년~현재 한국해양대학교 IT공학부 교수. 관심분야는 지능제어, 진화연산.



박 동 진

2004년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업. 2008년 동 대학원. 관심분야는 디지털 제어, 프로세스 제어.