

퍼지 개인 스케줄링을 이용한 CSTR의 온도 제어

Temperature Control of a CSTR using Fuzzy Gain Scheduling

김 종 화, 고 강 영, 진 강 규*

(Jong-Hwa Kim¹, Kang-Young Ko², and Gang-Gyoo Jin¹)

¹Division of IT, Korea Maritime University

²Graduate School, Korea Maritime University

Abstract: A CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) is a highly nonlinear process with varying parameters during operation. Therefore, tuning of the controller and determining the transition policy of controller parameters are required to guarantee the best performance of the CSTR for overall operating regions. In this paper, a methodology employing the 2DOF (Two-Degree-of-Freedom) PID controller, the anti-windup technique and a fuzzy gain scheduler is presented for the temperature control of the CSTR. First, both a local model and an EA (Evolutionary Algorithm) are used to tune the optimal controller parameters at each operating region by minimizing the IAE (Integral of Absolute Error). Then, a set of controller parameters are expressed as functions of the gain scheduling variable. Those functions are implemented using a set of “if-then” fuzzy rules, which is of Sugeno's form. Simulation works for reference tracking, disturbance rejecting and noise rejecting performances show the feasibility of using the proposed method.

Keywords: CSTR, fuzzy gain scheduling, 2DOF PID controller, evolutionary algorithm

I. 서론

지난 수십 년 동안 유화공, 우주항공, 군수, 발전, 조선을 포함한 여러 분야에서 보다 정밀하고 안정된 성능을 주는 제어기를 설계하려는 많은 노력들이 있어 왔다. 특히 화학공정에서 많이 사용되는 연속교반탱크반응기(CSTR)는 열의 저장과 방출과 관련하여 매우 비선형적이고 또 동작 영역에 따라 파라미터 변동이 심한 프로세스이어서 전 동작영역에서 만족스러운 성능을 제공하는 제어기를 설계하는 것이 쉽지 않다[1,2,16,17]. 이 때문에 CSTR 프로세스 제어와 관련된 기존의 연구들은 적응제어 기법을 사용하거나 아니면 동작 영역에 맞는 제어기 파라미터를 미리 계산해 놓고 이를 온라인 스케줄링하는 방법에 주로 초점을 맞추고 있다.

적응제어와 관련하여 Pan 등[3]은 하위 계층에 PID 제어기를, 상위 계층에 입출력 데이터를 기반으로 선형화 모델을 식별하고 이로부터 제어기의 파라미터를 동조하는 2계 층 구조의 CSTR 제어 알고리즘을 제안하였고, Nikravesh 등[4]은 CSTR 프로세스와 그 수학적 역동력학을 신경회로망(neural network)으로 학습하여 제어하였고, Vinodha 등[5]은 다변수 CSTR 프로세스를 제어하기 위해 두 가지 Multiple Model Adaptive-PID 제어와 NN에 기초한 multi-loop PID 제어 알고리즘을 제안하였다.

스케줄링과 관련하여 Engell와 Klatt [6]는 선형 주파수영역 설계기법과 개인 스케줄링을 결합하는 방법을 제안하였고, Banu와 UMA [7]는 CSTR의 농도를 PID 제어하는 화학공정 프로세스에서 유전알고리즘(genetic algorithm)로 PID 제어기를 동조하고 퍼지 개인 스케줄링하는 방법을 제안하였고, Rahmat 등[8]은 Imperialist Competitive 알고리즘을 사용하여 PI 제어기의 파라미터를 동조하고 퍼지기법으로 온라인 스케줄링하는 방법을 제안하였다. 이들은 나름대로 만족스러운 성과를 제시하고 있으나 모두 표준형 1자유도 PID 제어기를 근간으로 하고 있고 또 적분기 와인드업을 고려 못하고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존 연구에서 다루지 못한 점을 보완하여 CSTR 프로세스의 온도제어를 위해 퍼지 개인 스케줄링에 기초한 2DOF PID 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 이를 위해 1DOF PID 제어기의 한계성을 보완해 설정치 추종성능(tracking performance)과 외란 억제성능(rejection performance)을 동시에 개선하도록 2DOF PID 제어기를 사용하고, 포화기로 인해 일어날 수 있는 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 적분기 안티와인드업 기법을 채용한다.

한편 CSTR는 동작영역에 따라 파라미터가 심하게 변동하므로 고정 파라미터 제어기로 전 동작영역(operating region)에 운전하면 성능이 좋지 못할 뿐 아니라 경우에 따라서는 불안정해질 수도 있기 때문에, 각 동작영역에서 얻은 지역모델과 진화알고리즘을 기반으로 지역 2DOF PID 제어기를 최적 동조하고 이를 퍼지기법으로 개인 스케줄링 한다.

제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 확인한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received February 18, 2013 / revised June 23, 2013 / accepted July 24, 2013

김종화, 진강규: 한국해양대학교 IT공학부

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

고강영: 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과(kky1101@nate.com)

II. CSTR 모델링

1. CSTR 온도제어 프로세스

그림 1은 본 논문에서 다루게 될 CSTR 온도제어 프로세스의 구조를 보여주고 있다. 여기서 반응기는 입력되는 원료를 수용하고 반응이 일어나는 용기이고, 교반기는 반응기 내의 유체가 공간적으로 균일하도록 교반해주며, 히터는 유체를 가열해주며, 제어기는 유량 및 온도센서로부터 계측한 신호를 바탕으로 반응기의 출구 온도가 설정치에 유지되도록 제어하게 된다.

CSTR의 온도 설정치는 대부분의 운전시간 동안에는 일정하게 유지되고, 그날의 생산량의 결정에 따라 입구 측의 유량을 변경하는 방식으로 운전된다.

2. 제어대상의 수학적 모델

일반적으로 CSTR은 열의 저장과 방출과 관련하여 비선형적이어서 정확히 모델링하는 것이 쉽지 않다. 문제를 단순화하기 위해 반응기 내의 유체는 잘 교반되므로 동질성을 가지며, 입출력 유량은 같고, 가열기에서 공급된 열은 모두 유체에 전달되며, 외부로의 열손실이 작다는 가정 하에 모델링한다.

반응기 내의 열은 입력유량과 가열기로부터 유입되고, 출력유량을 통해 유출되므로, 에너지 평형법칙을 적용하면 다음 식과 같게 된다.

$$c\rho V \frac{dT(t)}{dt} = -cw(t)T(t) + K_h u(t) + cw(t)T_{in}(t) \quad (1)$$

식 (1)의 우측 $-cw(t)T(t)$ 은 출구 쪽으로 손실되는 열유량이고, $K_h u(t)$ 와 $cw(t)T_{in}(t)$ 는 각각 가열기와 입력유량으로부터 공급되는 열유량이다. 또한 $T(t)[^{\circ}\text{K}]$ 는 반응기 내의 유체 온도이고, $u(t)[\%]$ 는 제어변수로서 0~100 사이의 값을 가지며, $w(t)[\text{kg}]$ 와 $T_{in}(t)[^{\circ}\text{K}]$ 는 각각 입력유체의 온도와 질량유량으로서 동작영역 내에서 일정한 것으로 간주되며, $c[\text{J/kgK}]$ 는 열용량, $\rho[\text{kg/m}^3]$ 는 밀도, $V[\text{m}^3]$ 는 체적, $K_h[\text{W}/\%]$ 는 가열기의 이득이다.

한편 CSTR내 유체 온도는 교반기로 잘 교반하더라도 비동질성이 존재할 수 있다. 이러한 비동질성의 조건을 모델

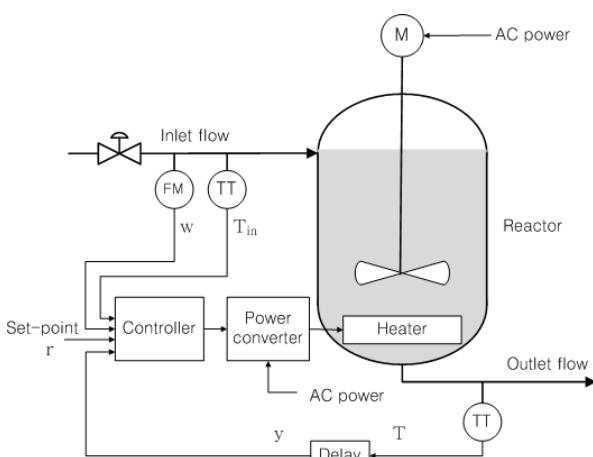


그림 1. CSTR의 온도제어 프로세스.

Fig. 1. Temperature control process of a CSTR.

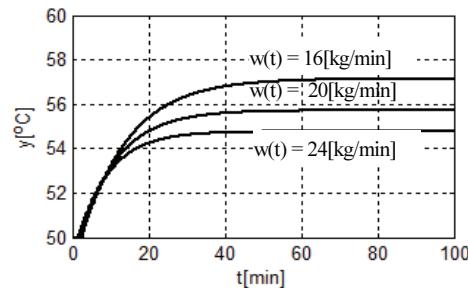


그림 2. $w(t) = 16, 20, 24[\text{kg}/\text{min}]$ 에서 제어대상의 개회로 응답.

Fig. 2. Open-loop responses of the controlled object at $w(t) = 16, 20, 24[\text{kg}/\text{min}]$.

에 반영하여 현실성을 높이기 위해 온도 측정 시 시간지연 $L[\text{s}]$ 이 있는 것으로 간주하며, 문제를 단순화하기 위해 L 은 질량유량 $w(t)$ 에 반비례하는 것으로 가정한다.

$$y(t) = T(t-L) = T[t - \frac{K_s}{w(t)}] \quad (2)$$

여기서 $L = K_s/w(t)$ 이고 $K_s[\text{kg}]$ 는 상수이다.

식 (1)에서 $d(t) = w(t)T_{in}(t)$ 를 결합 외란으로 간주하고 또한 제어기 출력단의 비선형 포화기를 생략한 $u(t)$ 와 $d(t)$ 에 대한 $y(t)$ 의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$Y(s) = P(s)U(s) + P'(s)D(s) \quad (3a)$$

$$\text{단, } P(s) = \frac{K}{1+\tau s} e^{-Ls} \quad (3b)$$

$$P'(s) = \frac{K'}{1+\tau s} e^{-Ls} \quad (3c)$$

$$K = \frac{K_h}{cw(t)}, K' = \frac{1}{w(t)}, \tau = \frac{\rho V}{w(t)}, L = \frac{K_s}{w(t)} \quad (3d)$$

여기서 K 와 K' 는 이득, τ 는 시정수, L 은 시간지연을 의미한다.

특히 이 파라미터들은 질량유량 $w(t)$ 와 직접적으로 연관되어 그 크기에 반비례하므로, 제어대상은 동작영역에 따라 크게 영향을 받는 시변프로세스(Time-varying process)임을 알 수 있다. 그림 2는 $T_{in}(t) = 20[^{\circ}\text{C}]$ 이고, $w(t)$ 가 각각 16, 20, 24 [kg/min]에서 $y(t) = 50[^{\circ}\text{C}]$ 로 유지되고 있을 동안 $\Delta u(t)$ 를 계단형태로 10% 증가 시켰을 때의 개회로 응답을 나타낸 것으로써 이를 보여준다.

III. 안티와이드업 기법을 갖는 2DOF PID 제어기

1. 2DOF PID 제어기

2자유도(2DOF: Two-Degree-of-Freedom) PID 제어기는 설정치 추종성능과 외란 억제성능을 동시에 만족시키지 못하는 기존의 1자유도(1DOF: One-DEgree-of-Freedom) PID 제어기의 한계를 극복하기 위해 1963년 Horowitz [9]에 의해 제안되었으나 동조할 파라미터가 2개나 더 많은 관계로 동조가 어려워 큰 관심을 끌지 못하다. 효과적인 최적화 알고리즘이 개발되면서 그 실효성이 새롭게 인식되어 왔다. 2DOF PID 제어기의 구조는 그림 3과 같다. 주제어기 $C_1(s)$ 는 피드백 제어를 통해 외란을 억제하며, 이와 독립적으로 보조

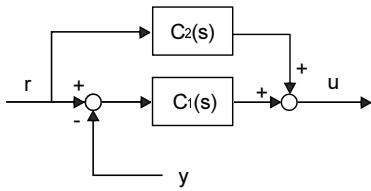


그림 3. 2자유도 PID 제어기의 구조.

Fig. 3. Structure of the 2DOF PID controller.

제어기 $C_2(s)$ 는 피드포워드 제어를 통해 설정치 변경 시 주제어기의 비례동작과 미분동작을 적절히 제어하며 r , y , u 는 각각 설정치, 출력과 제어입력을 의미한다.

주제어기로 표준형 1DOF PID 제어기를 사용할 수 있으나 이상적인 미분동작은 물리적으로 구현이 어렵고, 센서를 통해 들어오는 잡음이 크면 미분폭주(derivative kick) 현상을 일으키므로 식 (4)의 수정식을 사용한다. 전달함수 $C_1(s)$ 와 $C_2(s)$ 는 다음과 같다.

$$C_1(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_f s} \right) \quad (4a)$$

$$C_2(s) = -K_p (\alpha + \beta \frac{T_d s}{1 + T_f s}) \quad (4b)$$

여기서 K_p, T_i, T_d 는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간을 의미하고, α 와 β 는 0과 1사이의 값을 갖는 상수이고, $T_f = T_d/N$ 는 필터 시정수이며, N 은 최대미분이득(maximum derivative gain)으로서 8~20 사이에서 경험적으로 정해진다[1]. 많은 경우 $N=10$ 을 사용하고 있으므로 본 논문에서도 이 값을 사용한다.

한편 2DOF PID 제어기의 출력은 다음 식

$$U(s) = [C_1(s) + C_2(s)]R(s) - C_1(s)Y(s) \quad (5)$$

으로 표시되므로, 식 (3a)와 식 (5)로부터 전체 시스템은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y(s) = G_{yr}(s)R(s) + G_{yd}(s)D(s) \quad (6a)$$

$$\text{단, } G_{yr}(s) = \frac{P(s)[C_1(s) + C_2(s)]}{1 + P(s)C_1(s)} \quad (6b)$$

$$G_{yd}(s) = \frac{P'(s)}{1 + P(s)C_1(s)} \quad (6c)$$

식 (6)은 계단상의 설정치 변경과 계단상의 외란 변경에 대해 식 (7)의 조건이 만족하면 각각의 정상상태 오차는 0이 된다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} C_1(s) \rightarrow \infty, \quad \lim_{s \rightarrow 0} \frac{C_2(s)}{C_1(s)} \rightarrow 0 \quad (7a)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} P(s) \neq 0, \quad \lim_{s \rightarrow 0} \left| \frac{P'(s)}{P(s)} \right| < \infty \quad (7b)$$

식 (5)에 식 (4)를 대입하고 정리하면 $U(s)$ 는 하나의 미분요소를 갖도록 고쳐 쓸 수 있다.

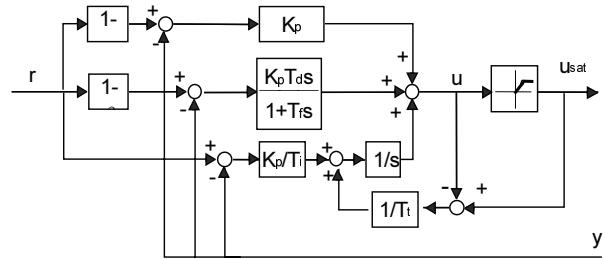


그림 4. 안티와인드업을 갖는 등가 2DOF PID 제어기.

Fig. 4. Equivalent 2DOF PID controller with anti-windup.

$$U(s) = K_p [(1-\alpha)R(s) - Y(s)] + \frac{K_p T_d s}{1 + T_f s} [(1-\beta)R(s) - Y(s)] + \frac{K_p}{T_i s} [R(s) - Y(s)] \quad (8)$$

만약 $\alpha = \beta = 0$ 이면 이는 표준형 PID 제어기가 되므로 표준형 PID 제어기는 2DOF PID 제어기의 특별한 경우임을 알 수 있다.

2. 적분기 안티와인드업

일반적으로 포화기를 가지는 제어프로세스에서 설정치가 변경될 때 제어기의 출력이 포화기의 한계치(최대 또는 최소)에 도달하면 출력에는 변동이 일어나지 않고 적분기에는 오차가 계속 누적되어 크지는 현상을 적분기 와인드업(Integrator windup)이라 한다. 이로 인해, 정작 출력이 설정치에 가까워졌을 때에는 제어입력이 작아져야 함에도 불구하고 포화 동안에 누적된 값으로 말미암아 포화에서 벗어나는 데 상당한 시간이 소요되고, 결과적으로 오버슈트가 커지고 정정시간이 길어지게 된다.

적분기 와인드업을 대처할 수 있는 대표적인 방법으로는 추종 안티와인드업법[10]이 있으며, 이는 제어기 출력과 포화기의 출력 차이를 피드백해서 적분동작을 수정하게 된다.

본 논문에서 다루는 전력변환기는 제어기로부터 0~100[%] 사이의 입력을 받아 이에 비례하는 AC 전력을 공급하기 때문에 추종 안티와인드업법을 채용한다. 적분기 안티와인드업을 가지는 식 (8)의 등가 2DOF PID 제어기의 구조는 그림 4와 같다.

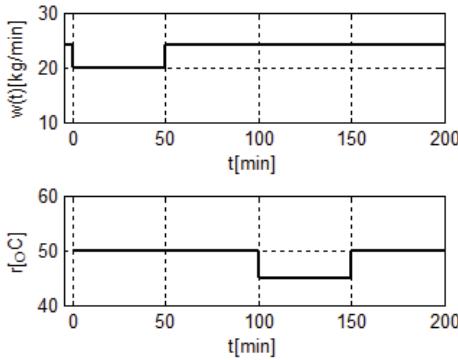
그림에서 적분기의 입력 단에 제어입력의 포화값과 제어입력간의 차이($u_{sat}-u$)를 피드백함으로써 적분값이 감소되거나 증가하게 된다. 한편 T_f 는 추종시간정수(Tracking time constant)이고 선행 연구에서는 $T_i = T_f$ 를 제안하고 있으므로 본 논문에서도 이 값을 사용한다.

IV. 2DOF PID 제어기의 동조와 퍼지 개인 스케줄링

1. 2DOF PID 제어기의 동조

2DOF PID 제어기의 동조와 관련하여 Araki와 Taguchi[11]는 출력이 설정치 응답과 외란 응답의 선형결합으로 되어 있고 또 $G_{yd}(s)$ 는 $C_1(s)$ 만의 함수이므로 먼저 $C_1(s)$ 를 동조한 다음 이 결과를 이용해서 $G_{yr}(s)$ 의 $C_2(s)$ 를 동조하는 다음과 같은 절차를 제안하고 있다.

Step 1: Tune $\{K_p, T_i, T_d\}$ of $C_1(s)$ such that the disturbance response is optimized

그림 5. 제어기 동조용 $r(t)$ 와 $w(t)$ 신호.Fig. 5. $r(t)$ and $w(t)$ signals for controller tuning.

Step 2: With fixing $\{\hat{K}_p, \hat{T}_i, \hat{T}_d\}$, tune $\{\alpha, \beta\}$ of $C_2(s)$ such that the set-point response is optimized

하지만 제안된 절차는 엄밀히 말해 $C_2(s)$ 의 최적화는 $C_1(s)$ 에 종속되기 때문에 전체 제어시스템의 관점에서 최적화라고 할 수 없고 또 현장에서 흔히 접할 수 있는 비선형 포화기와 적분기 와인드업 문제를 고려하지 않고 있다. 이점을 고려하여 본 논문에서는 2DOF PID 제어기의 파라미터 $\{K_p, T_i, T_d, \alpha, \beta\}$ 를 동시에 최적화하는 문제를 다룬다.

다루는 제어기는 대부분의 시간동안 외란억제 성능을 개선하도록 사용되나, 경우에 따라 설정치 변경 시 추종성능이 요구되므로 외란 억제성능과 설정치 추종성능을 동시에 개선되도록 동조한다. 이때 설정치와 외란을 그림 5와 같이 계단상으로 변경하며 운전하는 동안 최적화 알고리즘을 이용하여 최적의 계수 집합을 찾게 된다.

최적화 알고리즘으로는 EA [12]를 사용하였고 전체 알고리즘은 다음과 같이 요약된다.

Overall procedure of the EA

```

Set k = 0;
Initialize population P(0) of size N randomly;
Evaluate fitness f_i(k) (1 ≤ i ≤ 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 ≤ i ≤ N) to each
    individual using the attractor;
    Apply non-uniform mutation;
    Apply other strategies if necessary;
    Evaluate fitness f_i(k+1) (1 ≤ i ≤ N) and select the best
    {x_b(k+1), f_b(k+1)};
    Set k = k+1;
End while

```

이때 EA의 매개변수로는 집단의 크기 $N = 40$, 고유치 $\lambda = 0.618$, 소용돌이 정도(Degree of swirl) $\omega = -0.3$, 최대 레벨 수(Maximum level number) $n_{max} = 20$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.05$, 불균등 정도 $b = 4$ 를 사용하였고, PID 파라미터들은 구간 $0 < K_p \leq 20$, $0 < T_i, T_d \leq 1200$, $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ 에서

찾도록 하였다.

이 때 시스템의 성능의 좋고 나쁨을 계량할 수 있도록 절대오차적분(IAE)을 사용하였다.

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

여기서 $\phi = [K_p, T_i, T_d, \alpha, \beta]^T \in \mathbb{R}^5$ 는 제어기 파라미터로 구성된 벡터이고, $e(t)$ 는 설정치와 출력 간의 오차이며, 적분시각 t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 값이다. ϕ 는 EA를 사용하여 (9)의 성능지수가 최소가 되도록 구해진다.

2. 퍼지 개인 스케줄링

CSTR은 동작영역(제품의 생산량)에 따라 프로세스 파라미터의 변동이 크기 때문에 고정된 파라미터를 가지는 제어기로 전 동작영역에서 운전하면 성능이 떨어질 뿐 아니라, 경우에 따라서는 불안정하게 된다. 따라서 전 지역에서 효과적으로 CSTR을 운전하기 위해서는 개인 스케줄이 필요하며, 각 동작영역에서 구한 지역모델을 기초로 동조된 지역제어기 파라미터를 저장하고 있다가, 동작영역이 바뀌면 이를 절환해주는 스케줄링 방법을 사용한다.

단순한 스위칭 방법은 절환 시의 충격 때문에 성능저하가 불가피하므로 퍼지 스케줄링 기법을 이용한다. 스케줄링 변수는 $w(t)$ 이고, 퍼지분할에 사용된 퍼지집합은 F^1, F^2, F^3 이며 이들은 각각 $w(t)$ 의 저(Low region), 중(Middle region), 고(High region)를 의미한다. 퍼지집합은 그림 6과 같다.

따라서 2DOF PID 제어기의 파라미터들은 다음과 같이 Sugeno형[13]의 퍼지규칙들로부터 추론된다.

$$R^1 : \text{If } w(t) \text{ is } F^1, \text{ then } K_p = K_p^1 \quad (10a)$$

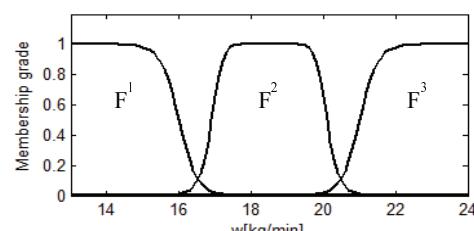
$$R^2 : \text{If } w(t) \text{ is } F^2, \text{ then } K_p = K_p^2 \quad (10b)$$

$$R^3 : \text{If } w(t) \text{ is } F^3, \text{ then } K_p = K_p^3 \quad (10c)$$

여기서 R^j 와 F^j 는 각각 j ($1 \leq j \leq 3$) 번째의 제어규칙과 퍼지집합, 결론부의 K_p^j 는 j 번째의 동작영역에서 최적 동조된 지역 제어기의 파라미터이다. 위 식을 퍼지추론하면 다음과 같은 최종 출력을 얻을 수 있다.

$$K_p = \sum_{j=1}^3 \rho^j K_p^j / \sum_{j=1}^3 \rho^j \quad (11)$$

여기서 $\rho^j = F^j[w(t)]$ 는 j 번째 규칙의 기여도를 나타낸다. 나머지 4개의 제어기 파라미터들도 같은 방법으로 추론이 가능하다.

그림 6. 스케줄링 변수 $w(t)$ 의 퍼지분할.Fig. 6. Fuzzy partition of the scheduling variable $w(t)$.

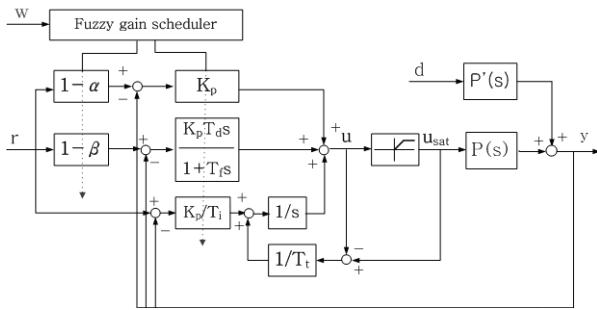


그림 7. 퍼지 게인 스케줄러를 갖는 전체 제어 프로세스.
Fig. 7. Overall control process with a fuzzy gain scheduler.

그림 7은 퍼지 게인 스케줄러를 갖는 전체 제어 프로세스를 보여준다.

V. 모의실험 및 검토

제안한 방법의 유효성을 검정하기 위하여 모의실험을 수행하고 Z-N, IMC 및 Cvejn의 방법과 비교하였다[1,14,15]. 비교의 공정성을 유지하기 위하여 다른 방법들도 각 동작 영역에서 표 3과 같이 1DOF PID 제어기의 파라미터를 얻고 본 방법에서 사용한 적분기 안티와인드업과 퍼지 게인 스케줄링을 같이 적용하였다.

1. 모의실험용 데이터와 제어기 파라미터

모의실험에 사용된 CSTR의 데이터는 표 1과 같다.

세 동작영역에서 구한 지역모델의 파라미터들은 (3)으로부터 계산되고 표 2에 주어진다. 이 모델을 기초로 동조된 지역제어기 파라미터들은 표 3에 나타내었다.

2. 성능 비교

2.1 외란억제 성능

CSTR의 설정치 r 은 대부분의 운전시간동안 일정한 값으

표 1. 모의실험용 데이터.

Table 1. Data for simulation.

Parameter	Unit	Value	Remarks
Density ρ	kg/m^3	1,000	
Specific heat capacity c	J/kgK	4,200	
Liquid volume V	m^3	0.2	
Inlet temperature T_{in}	K	293	20[°C]
Mass flow w	kg/s	12~24	
Constant K_h	$\text{w}/\%$	800	
Constant K_s	kg	40	
Saturation limits	%	0~100	

표 2. 세 동작영역에서 구한 지역모델의 파라미터.

Table 2. Local model parameters obtained at three operating regions.

w(t)	Plant parameters			Remarks
	K	τ	L	
16	0.714	750	150	
20	0.571	600	120	
24	0.476	500	100	$T_{in} = 20[\text{°C}]$ $y = 50[\text{°C}]$

표 3. 세 동작영역에서 동조한 지역제어기의 파라미터.

Table 3. Controller parameters tuned at three operating regions.

w(t)	Tuning method	Controller parameters				
		K_p^j	T_i^j	T_d^j	α^j	β^j
16	Proposed	7.210	393.017	70.480	0.266	0.228
	Z-N	8.400	300.000	75.000		
	IMC	5.133	825.000	68.182		
	Cvejn	5.600	800.000	46.875	tracking	
20	Proposed	9.427	295.770	55.263	0.310	0.156
	Z-N	10.500	240.000	60.000		
	IMC	6.417	660.000	54.545		
	Cvejn	7.000	640.000	37.500	tracking	
24	Proposed	11.604	247.262	44.122	0.332	0.090
	Z-N	12.600	200.000	50.000		
	IMC	7.700	550.000	45.455		
	Cvejn	8.400	533.333	31.250	tracking	
		9.083	252.434	28.902	disturbance	

로 설정(본 논문에서는 50[°C])되고, 그날의 생산량의 증가 또는 감소 결정에 따라 $w(t)$ 를 변경하는 방식으로 운전된다. 따라서 제어기의 역할은 외란의 변동에도 출구 유체의 온도를 일정하게 유지해주는 것이다. 외란억제 성능을 계량화 하기 위하여 $r = 50[\text{°C}]$ 로 고정하고, $w(t) = 24[\text{kg}/\text{min}]$ 에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 $t = 50, 100, 150[\text{min}]$ 에서 각각 $w(t) = 20, 16, 12[\text{kg}/\text{min}]$ 로 계단상으로 변경시키는 실험을 실시하였다.

그림 8은 이때의 y 의 응답을 그린 것이다.

전 동작구간에서 보면 제안한 방법의 성능이 기존의 방법보다 우수함을 알 수 있다. 다른 방법들은 응답의 최고치(Perturbation peak)도 클 뿐 아니라 외란의 영향이 소멸되는 회복시간(Recovery time)도 길다. 특히 Z-N법과 Cvejn법은 $w(t)$ 가 작을 때(K, τ, L 이 큼) 진동현상이 일어나는 것을 볼 수 있다.

한편 CSTR은 내재적인 비선형성으로 인해 $w(t)$ 가 감소할 때와 증가할 때의 응답특성이 서로 다를 수 있으므로, 그림 9는 반대로 $w(t) = 12[\text{kg}/\text{min}]$ 에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 앞과 유사한 패턴으로 $w(t) = 12, 16, 20[\text{kg}/\text{min}]$ 로 계단상으로 증가시키면서 응답실험을 실시하고 그린 그림이다.

이 경우에는 Z-N법의 성능이 다른 방법보다 좋지만, 본 방법의 성능도 만족스러웠다.

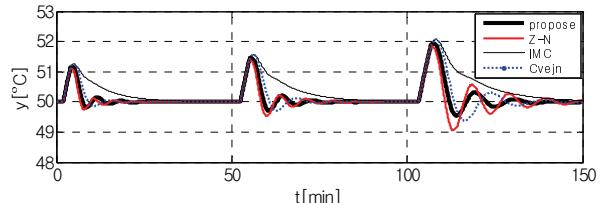


그림 8. $w(t)$ 를 계단상으로 감소시켰을 때의 외란 제거성능.

Fig. 8. Disturbance rejection responses when $w(t)$ is step-wisely decreased.

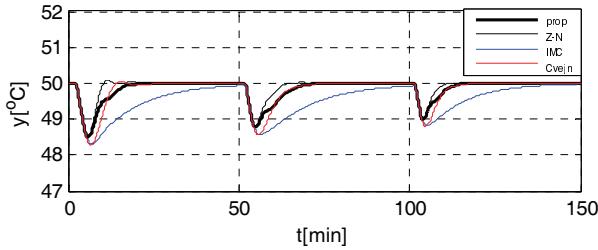
그림 9. $w(t)$ 를 계단상으로 증가시켰을 때의 외란 제거성능.

Fig. 9. Disturbance rejection responses when $w(t)$ is step-wisely increased.

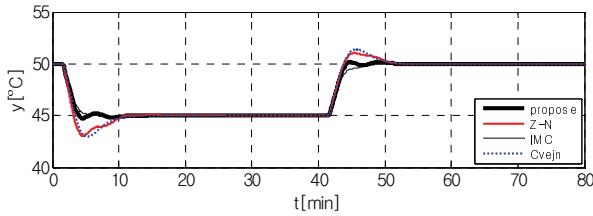
그림 10. $w(t) = 24[\text{kg}/\text{min}]$ 일 때의 설정치 추종성능.

Fig. 10. Set-point tracking responses when $w(t) = 24[\text{kg}/\text{min}]$.

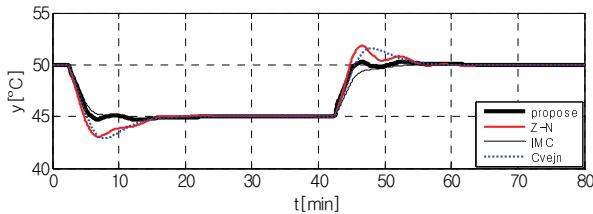
그림 11. $w(t) = 12[\text{kg}/\text{min}]$ 일 때의 설정치 추종성능.

Fig. 11. Set-point tracking responses when $w(t) = 12[\text{kg}/\text{min}]$.

2.2 설정치 추종 성능

다음은 CSTR의 출구온도를 변경하는 경우를 고려하여 설정치 추종성능을 얻는 실험을 실시하였다. $r = 50[\text{°C}]$, $w(t) = 24[\text{kg}/\text{min}]$ 에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 그림 10과 같이 $t = 0[\text{min}]$ 에서 r 을 $45[\text{°C}]$ 로 다시 $t = 50[\text{min}]$ 에서 $50[\text{°C}]$ 로 계단상으로 변경하였다.

그림에서 알 수 있듯이 모든 응답들이 시간이 진행됨에 따라 설정치에 접근하지만 제안한 방법이 IMC법과 같이 오버슈트, 상승시간, 정정시간 등에서 다른 두 방법보다 나은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

반대로 그림 11은 $r = 50[\text{°C}]$, $w(t) = 12[\text{kg}/\text{min}]$ 에서 시스템이 정상상태에 있을 때 $t = 0[\text{min}]$ 에서 r 을 $45[\text{°C}]$ 로 다시 $t = 50[\text{min}]$ 에서 $50[\text{°C}]$ 로 계단상으로 변경하였다.

$w(t)$ 가 감소하면 제어대상의 파라미터들이 증가하여 제어가 어려운 데도 불구하고 그림에서 확인할 수 있듯 제안한 방법이 다른 방법보다 나은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

2.3 잡음 억제성능

제안한 방법의 잡음 억제성을 알아보기 위해 출구쪽 온도측정 센서에 평균이 0이고 분산이 0.05^2 인 정규 백색잡음(White noise)이 유입되는 것으로 간주하고 시뮬레이션을

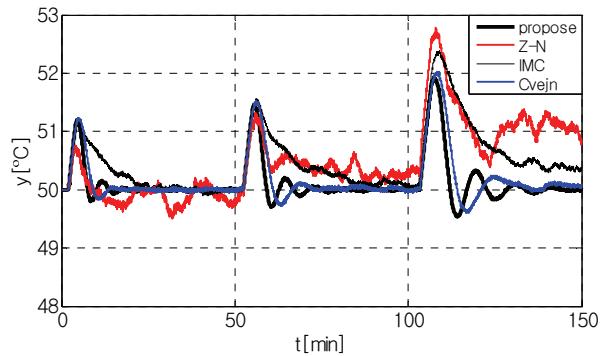
그림 12. 잡음환경 하에 $w(t)$ 를 계단상으로 감소시킬 때의 외란 억제응답.

Fig. 12. Disturbance rejection responses when $w(t)$ is step-wisely decreased under noise environment.

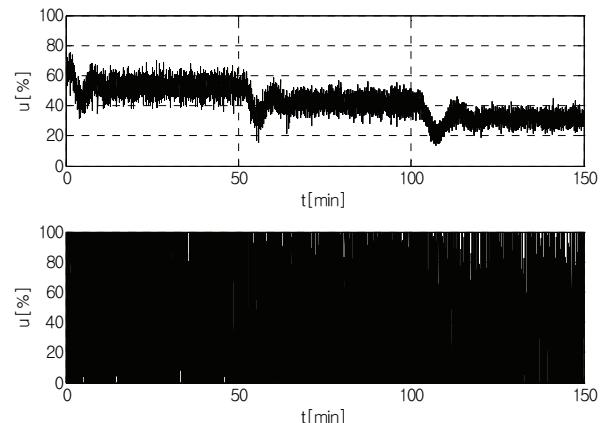
그림 13. 잡음환경 하에 $w(t)$ 를 계단상으로 감소시킬 때의 제어 입력.

Fig. 13. Control input when $w(t)$ is step-wisely decreased under noise environment.

실시하였다. 이를 위해 그림 7에서 사용하였던 것과 같은 제어 환경을 가정하였고 $w(t)$ 를 계단상으로 변경시키는 동안 잡음을 투입하였다. 그림 12는 출력응답을, 그림 13은 본 방법과 Z-N 방법의 제어입력을 구해 그린 것이다.

예견할 수 있었듯이 제안된 방법은 필터의 역할로 인해 잡음의 영향을 적게 받지만, 나머지 3 방법은 크게 영향을 받아 응답이 심하게 왜곡되고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 그림 13에서 보면 제안한 방법의 $u(t)$ 는 제한된 범위 내에서 동작하지만, Z-N 방법의 $u(t)$ 는 전력변환기의 최소, 최대치를 오가며 급격하게 변하고 있어 H/W에 부담을 주게 된다. 나머지 두 방법의 $u(t)$ 도 Z-N 방법과 유사한 결과를 보여주었다.

VI. 결론

본 논문에서는 2DOF PID 제어기와 퍼지 개인 스케줄링에 기초하여 CSTR 프로세스의 온도를 제어하는 문제를 다루었다. 기존의 1DOF PID 제어기의 한계성을 보완하기 위해 2DOF PID 제어기를 사용하였고, 포화기로부터 일어날 수 있는 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 적분기 안

티와인드업 기법을 채용하였다. 또한 CSTR는 동작영역에 따라 파라미터 변동이 심한 프로세스이어서 3 동작영역에서 얻은 지역모델과 EA를 기반으로 지역 2DOF PID 제어기를 최적 동조하고 퍼지 게인 스케줄러로 스위칭하였다.

제안된 방법으로 CSTR의 온도제어에 적용한 결과 다른 방법보다 제어 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

차후 불안정한 평형점을 가지는 CSTR 프로세스에 본 방법을 적용해보는 연구가 필요하다고 생각된다.

REFERENCES

- [1] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, ISA Press, 1995.
- [2] W. L. Luyben, *Chemical Reactor Design and Control*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007.
- [3] T. Pan, S. Li, and W.-J. Cai, "Lazy learning-based online identification and adaptive PID control: A case study for CSTR process," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 46, pp. 472-480, 2007.
- [4] M. Nikravesh, A. E. Farrell, and T. G. Stanford, "Control of nonisothermal CSTR with time varying parameters via DNNC (Dynamic Neural Network Control)," *Chemical Engineering Journal*, vol. 76, no. 1, pp. 1-16, 2000.
- [5] R. Vinodha, S. A. Lincoln, and J. Prakash, "Multiple model and neural based adaptive multi-loop PID controller for a CSTR process," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 68, pp. 505-510, 2010.
- [6] S. Engell and K. -U. Klatt, "Nonlinear control of a non-minimum-phase CSTR," *American Control Conference*, pp. 2941-2945, 1993.
- [7] U. S. Banu and G. Uma, "Fuzzy gain scheduled CSTR with GA-Based PID," *Chem. Eng. Comm.*, vol. 195, pp. 1213-1226, 2008.
- [8] M. F. Rahmat, A. M. Yazdani, M. A. Movahed, and S. Mahmoudzadeh, "Temperature control of a continuous stirred tank reactor by means of two different intelligent strategies," *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 244-267, 2011.
- [9] I. M. Horowitz, *Synthesis of Feedback Systems*, Academic Press, 1963.
- [10] 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.
- [11] M. Araki and H. Taguchi, "Two-degree-of-freedom PID controllers," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 401-411, 2003.
- [12] 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.
- [13] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Trans. on Sys., Man and Cyber.*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [14] D. E. Rivera, M. Morari, and S. Skogestad, "Internal model control: PID controller design," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 25, no. 1, pp. 252-265, 1986.
- [15] J. Cvejn, "PI/PID controller design for FOPDT plants based on the modulus optimum criterion," *Proc. of the 18th Int. Conf. on Process Control*, Tatranská Lomnica, Slovakia, pp. 301-306, 2011.
- [16] N. V. Truong, "Nonlinear identification of a continuous stirred-tank reactor using WSDP models," *Proc. of the 2011 Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, pp. 55-60, 2011.
- [17] Y. Yang and J. M. Lee, "Robust nonlinear model predictive control via approximate value function," *Proc. of the 2011 Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, pp. 1816-1821, 2011.

김 종 화



1981년 부산대학교 기계공학과 졸업.
1985년 동 대학교 대학원 기계공학과
공학석사. 1989년 동 대학교 대학원
기계공학과 공학박사. 2001년~현재 한
국해양대학교 IT공학부 교수. 관심분야
는 적응제어, 퍼지제어, 시스템 식별.

고 강 영



2010년 동명대학교 전기공학과 졸업.
2011년 한국해양대학교 대학원 제어계
측공학과 석사과정. 관심분야는 디지
털제어, 프로세스 제어.

진 강 규



1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업.
1985년 FIT 전기·전자·컴퓨터공학과
공학석사. 1996년 University of Wales,
Cardiff 전기·전자·시스템공학과 공학
박사. 1996년~현재 한국해양대학교 IT
공학부 교수. 관심분야는 지능제어, 진
화연산.