

피드포워드 제어와 안티와인드업 기법을 결합한 셀-튜브 열교환기 시스템의 PID 제어

PID Control of a Shell and Tube Heat Exchanger System Incorporating Feedforward Control and Anti-windup Techniques

안종갑, 소건백, 이주연, 이윤형, 소명옥, 진강규*
(Jong-Kap Ahn¹, Gun-Baek So², Ju-Yeon Lee³, Yun-Hyung Lee⁴, Myong-Ok So⁵, and Gang-Gyoo Jin^{6,*})

¹MAN Diesel & Turbo Korea

²Dept. of Control and Instrumentation Eng., Korea Maritime and Ocean University (KMOU)

³Dept. of Convergence Study on the Ocean Science and Tech., OST School, KMOU

⁴Korea Port Training Institute, Busan

⁵Division of Marine Engineering, KMOU

⁶Division of IT, KMOU

Abstract: In many industrial processes and operations, such as power plants, petrochemical industries and ships, shell and tube heat exchangers are widely used and probably applicable for a wide range of operating temperatures. The main purpose of a heat exchanger is to transfer heat between two or more medium with temperature differences. Heat exchangers are highly nonlinear, time-varying and show time lag behavior during operation. The temperature control of such processes has been challenging for control engineers and a variety of forms of PID controllers have been proposed to guarantee better performance. In this paper, a scheme to control the outlet temperature of a shell and tube heat exchanger system that combines the PID controller with feedforward control and anti-windup techniques is presented. A genetic algorithm is used to tune the parameters of the PID controller with anti-windup and the feedforward controller by minimizing the IAE (Integral of Absolute Error). Simulation works are performed to study the performance of the proposed method when applied to the process.

Keywords: heat exchanger, PID controller, feedforward controller, anti-windup, genetic algorithm

I. 서론

발전소, 석유화학공장, 선박 등 산업공정 전 분야에 걸쳐 열교환기가 광범위하게 사용되고 있다. 열교환기란 고체의 전열벽을 사이에 두고 흐르는 저·고온 유체들 간에 열을 교환해주는 장치이며, 산업현장에는 셀-튜브형(shell-tube type), 판형(plate type), 핀-튜브(pin-tube type)형 등을 찾아볼 수 있지만 그 중에서도 셀-튜브형이 가장 폭넓게 이용되고 있다[8].

열교환기는 비선형성과 시변 특성을 가지고 있어 정확한 모델을 얻는 것이 쉽지 않고 또 대형의 경우에는 열전달 시간이 많이 걸려 안정된 성능이 보장되는 온도 제어가 어려워 이를 개선하고자 많은 연구들이 수행되어 왔다[1-7].

특히 셀-튜브형 열교환기와 관련된 연구로서는 Vinaya

등[3]은 이산형 모델예측제어(model predictive control) 알고리즘을 제안하였고, Pandey 등[4]은 PI형의 퍼지 제어기를, Sivakumar 등[5]은 뉴로퍼지 제어와 PID 제어기법을 결합하는 방법을, Padhee 등[6]은 내부모델에 기초한 PID 제어기를 사용하는 문제를 다루었다. 한편 Ahmad 등[7]은 하이브리드 기준모델 적응 퍼지관리 제어기를 제안하였다.

이들은 나름대로 만족스러운 성과를 제시하고 있으나 모두 비선형 포화로 인해 일어날 수 있는 적분기 와인드업(integrator windup) 문제를 고려하지 못하고 있고 또 비선형 포화를 다루는 기존의 방법들이 선형구간(포화를 고려하지 않은 제어대상)에서 제어기를 동조한 다음 적분기 와인드업을 보상하는 부가적인 기능을 적용함으로써 성능개선의 여지를 남기고 있다. 또한 열교환기는 대형일수록 열전달 시간이 길어져 제어가 어렵고 또 외란변화가 심한 환경에서 운전될 때 이로 인해 일어날 수 있는 성능 저하에 대한 대책이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 안티와인드업(anti-windup)과 피드포워드제어(feedforward control) 기법을 결합한 열교환기 온도제어용 PID 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 포화로 인해 발생하는 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 안티와인드업 피드백 루프가 구성되며, 외란이 출력에 영향을

* Corresponding Author

Manuscript received January 29, 2014 / revised February 13, 2014 / accepted February 24, 2014

안종갑: MAN Diesel & Turbo Korea(jongkap.ahn@kr.man.eu)

소건백: 한국해양대학교 제어계측공학과(superior3608@naver.com)

이주연: 한국해양대학교 해양과학기술융합학과(ahddl71@naver.com)

이윤형: 한국항만연수원(domse54@hanmail.net)

소명옥: 한국해양대학교 기관공학부(smo@kmou.ac.kr)

진강규: 한국해양대학교 IT공학부(ggjin@kmou.ac.kr)

주기 전에 이를 예측하여 제어입력에 반영하는 피드포워드 제어를 적용한다. 설계된 PID 제어기와 피드포워드 제어기의 파라미터는 전체 제어시스템의 설정치 추종 성능과 외란 억제 성능이 개선되도록 유전알고리즘(GA)에 의해 동조된다.

제안하는 방법은 모의실험을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 확인한다.

II. 열교환기의 모델링

1. 열교환기

산업현장에서 사용되고 있는 열교환기의 약 60%는 셸-튜브형(Shell and tube type)이고, 이 형은 크게 동체(Shell), 경관튜브(Channel tube), 튜브시트(Tube sheet)로 구성되며 구조가 간단해서 유지 보수가 간편하고 또 넓은 온도 범위에서 운용 가능한 장점이 있다[8]. 다음 그림은 셸-튜브형 열교환기의 한 예를 보여준다.

그림 2는 본 연구에서 다루게 될 셸-튜브형 열교환기의 온도제어시스템의 개략도를 보여준다. 전체 제어시스템은 크게 열교환기, 제어기, 전류/공기압(I/P) 변환기, 3-Way 밸브로 이루어지고, 입력은 I/P 변환기의 입력신호로, 출력은 셸측 출구 온도로 하였다. F_t , T_{in} 과 T_s 는 각각 튜브측의 입구 유량과 온도, 출구 온도를, F_s , T_{sin} 과 T_s 는 각각 셸측의 입구 유량과 온도, 출구 온도를 의미한다.

열전대에서 측정된 유체의 입구/출구 온도는 4-20 mA의 신호로 변환된 후 제어기로 입력되고, 제어기는 이를 설정치와 비교하여 제어신호를 만들게 된다. 제어신호는 I/P 변환기를 거치면서 5-6psi의 공기압으로 변환되어 3-Way

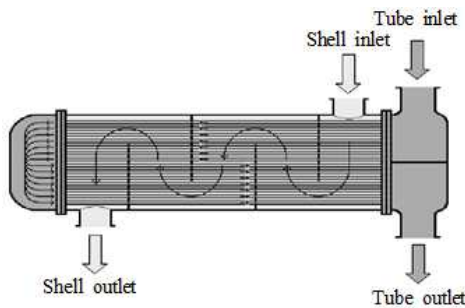


그림 1. 셸-튜브형 열교환기.

Fig. 1. Shell and tube type heat exchanger.

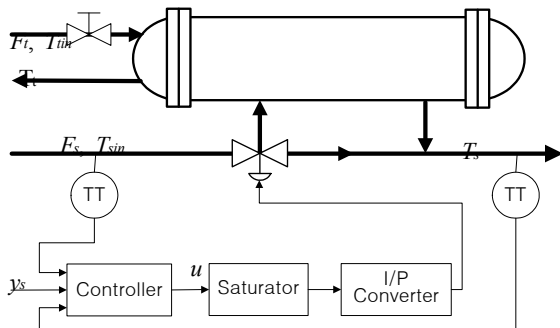


그림 2. 열교환기 온도제어시스템.

Fig. 2. Temperature control system of a heat exchanger.

밸브의 다이어프램을 밀게 되어 열교환기측으로 들어가는 유량과 바이패스되는 유량을 조절하여 궁극적으로 온도를 제어하게 된다.

2. 제어대상의 모델

3-Way 밸브로 유량을 조절하여 셸측 출구온도를 조절할 때 이 밸브의 동작은 물리적으로 한계가 있을 수밖에 없으므로 제어기와 I/P 변환기 사이에는 가상의 포화기가 존재하는 것으로 간주되며, 이는 다음 비선형식으로 표시된다.

$$u_{sat} = \begin{cases} u_{min}, & u < u_{min} \\ u, & u_{min} \leq u \leq u_{max} \\ u_{max}, & u > u_{max} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 u 는 제어기의 출력이고, u_{min} 와 u_{max} 는 각각 u 가 포화기의 한계치를 벗어날 때 제한되는 최소값과 최대값을 의미한다.

제어기로부터 전기신호를 받아 공기압으로 변환해주는 I/P 변환기와 이 공기압을 받아 셸측 유량을 조절해주는 3-Way 밸브는 다음과 같이 근사 1차 시스템으로 쓸 수 있다.

$$U_a(s) = \frac{K_a}{1 + T_a s} U_{sat}(s) \quad (2)$$

여기서 $U_{sat}(s)$ 와 $U_a(s)$ 는 각각 포화기와 3-Way 밸브의 출력이며, K_a 와 T_a 는 각각 I/P 변환기가 결합된 3-Way 밸브의 이득과 시정수를 의미한다.

한편 저·고온 유체 간에 열교환이 이루어지는 열교환기는 비선형성과 시변 특성을 가지고 있고 또 분포정수계이어서 정확한 모델을 얻는 것은 대단히 어렵다. 따라서 문제를 단순화하기 위해 열교환기 내의 유체 온도는 공간적으로 균일하며, 입출력 유량은 같고, 파라미터들은 일정하고 또 온도와는 무관하며, 단열이 잘 되어 있다는 가정 하에 집중정수(Lumped-parameter)계로 모델링한다. 물질과 에너지 보존 법칙을 적용하면 다음 근사 방정식을 얻을 수 있다[9].

$$Y(s) = \frac{1}{1 + T_x s} [-K_x e^{-Ls} U_a(s) + K_t T_{sin}(s)] \quad (3)$$

여기서 $T_{sin}(s)$ 과 $Y(s)(=T_s)$ 는 각각 셸측 유체의 입구 및 출구 온도이며, K_x , T_x 와 L 는 각각 열교환기의 이득, 시정수, 시간 지연이고, K_t 는 외란 모델의 이득이다. 특히 우측의 음의 부호는 3-Way 밸브가 Air-to-Close (Normal open)형이기 때문이고, 이로 인해 제어기의 출력이 커지면 반대로 온도가 내려가게 된다.

위의 방정식들을 결합한 제어대상을 블록선도로 표시하면 다음 그림과 같다.

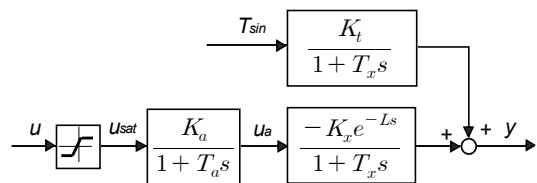


그림 3. 제어대상의 블록선도.

Fig. 3. Block diagram of the controlled object.

III. 안티와이드업을 갖는 PID 제어기

1. PID 제어기

PID 제어기는 구조가 간단하면서도 안정성이 높고 또 안티와이드업, 수동/자동 무충돌 전환(bumpless transfer) 등의 부가기능과의 결합이 용이하기 때문에 아직도 생산현장에는 PID 제어기가 폭넓게 이용되고 있으므로 본 논문에서도 이를 이용한다[10].

제어기는 조작변수(MV)의 동작 방향에 따라 역동작(reverse-acting) 제어기와 순동작(forward-acting) 제어기로 구분된다. 역동작 제어기는 제어변수 또는 프로세스 출력(PV)이 설정치(SV)보다 커지면 MV를 감소시키는 방향으로 동작하게 된다. 반대로 순동작 제어기는 PV가 SV보다 커질 때 같이 MV를 증가시키는 방향으로 동작하게 된다. 다시 말하면 시스템의 출구온도가 올라가면 제어동작이 커지고 제어밸브를 열어 온도를 떨어뜨리게 된다.

어떤 형의 제어기를 채용할 것인지는 전적으로 제어대상에 달렸으며, 본 연구에서 다루는 열교환기와 같이 음의 이득을 가질 경우에는 순동작의 제어기가 요구된다. 순동작 PID 제어기를 구현하는 방법으로는 비레이드의 부호를 음으로 하거나 아니면 오차 계산 시 $e = SV - PV$ 대신에 $e = PV - SV$ 를 사용하는 방법이 있으며 본 연구에서는 후자를 채용한다.

열교환기의 셀측 출구온도를 조절하기 위한 PID 제어기는 현장에서 주로 채용하는 식 (4)와 같이 표현된 수정된 PID 제어방법을 사용한다.

$$U_{PID}(s)/E(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1 + T_f s} \quad (4)$$

여기서 K_p , K_i , K_d 는 각각 비레이득, 적분이득, 미분이득을 의미한다. 또한 $T_f = T_d/N$ 는 필터 시정수이며, $T_d = K_d/K_p$ 는 미분시간을, N 은 최대미분이득(Maximum derivative gain)으로서 5~20 사이에서 경험적으로 정해지는 값이다[10]. 이 형은 표준형에서 일어날 수 있는 미분폭주(Derivative kick) 현상을 완화시킬 수 있다.

많은 산업용 프로세스와 같이 제안하는 열교환기 온도 제어시스템도 예열(Warming up) 과정을 거치는 동안 수동모드로 계획된 온도 부근까지 올린 다음 자동모드로 전환해서 정상운전하게 되며 조작변수, 즉 포화기 입력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u(t) = u_0(t) + u_{PID}(t) \quad (5)$$

여기서 u_0 는 수동제어로 도입된 바이어스 값, u_{PID} 는 PID 제어기의 출력이다.

2. 적분기 안티와이드업

앞서 언급하였듯이 3-Way 밸브의 동작에는 물리적으로 한계가 존재하는 관계로 설정치나 외란 등이 갑작스럽게 변하면 포화가 일어나게 된다. 포화로 인해 제어기의 출력이 포화기의 한계치에 도달되면 출력은 변하지 않고 적분기에는 오차가 계속 누적되는 적분기 와이드업 현상이 일어난다. 이 때문에 포화를 고려하지 않고 설계된 제어법칙을 포화가 존재하는 시스템에 적용하면 시스템 성능이

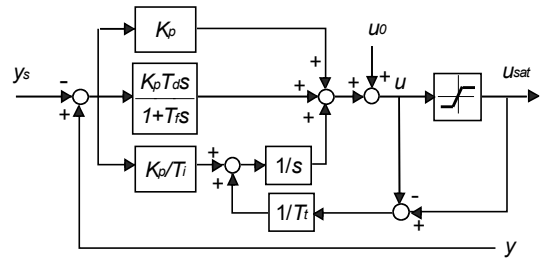


그림 4. 안티와이드업을 갖는 PID 제어기.

Fig. 4. PID controller with anti-windup.

심하게 왜곡될(일반적으로 오버슈트가 커지고 정정시간이 길어짐) 뿐만 아니라 경우에 따라서는 불안정하게 될 수도 있다.

적분기 와이드업을 완화시킬 수 있는 방법으로는 몇 가지가 있지만 그 중에서도 추종 안티와이드업(Tracking anti-windup)법[10]이 가장 폭넓게 이용되고 있으므로 본 연구에서도 이를 이용한다. 추종 안티와이드업을 갖는 PID 제어기의 구조는 그림 4와 같다.

포화가 일어나면 내부적으로 포화기의 출력과 제어기 출력 간의 차에 의한 피드백 루프가 형성된다. 적분기의 재설정(reset) 속도는 시정수 T_i 에 의해 좌우되며, T_i 가 너무 크면 오버슈트가 커지고, 너무 작으면 응답이 느려진다. T_i 값은 대개 경험적으로 정해지며 Bohn과 Atherton [11]은 $T_i = T_{pi}$ 를 제안하고 있으며, $T_i = K_p/K_i$ 는 적분시간을 의미한다.

IV. 외란 억제를 위한 피드포워드 제어

일반적으로 열교환기는 대형일수록 열전달 시간이 길어져 제어가 어렵고 또 외란변화가 심한 환경에서 운전될 때 일어날 수 있는 성능저하에 대한 대책이 필요하다. 입구측의 유체온도 T_{in} 은 열전대를 사용하면 쉽게 측정될 수 있고, 이 정보를 이용하면 외란에 기인한 오차를 보상하여 성능을 더욱 개선할 수 있다. 따라서 외란이 출력에 영향을 끼치기 전에 이를 예측하여 제어입력에 반영하는 피드포워드 제어를 사용한다.

액추에이터와 열교환기를 결합한 제어대상의 전달함수 $G_p(s)$, 외란의 전달함수 $G_d(s)$ 를 각각

$$G_p(s) = \frac{-K_u K_x e^{-Ls}}{(1 + T_u s)(1 + T_x s)} \quad (6a)$$

$$G_d(s) = \frac{K_l}{(1 + T_x s)} \quad (6b)$$

라 하면 피드포워드 제어기의 전달함수 $C_{ff}(s)$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$C_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} \quad (7)$$

특히 $G_p(s)$ 에는 시간지연 요소가 포함되어 있고 또 $C_{ff}(s)$ 는 분자의 차수가 분모보다 큰 다항식이어서 실현이 어려우므로 시간지연 요소를 무시하고 분모에 $(1 + \lambda s)^n$ 를 추가한다.

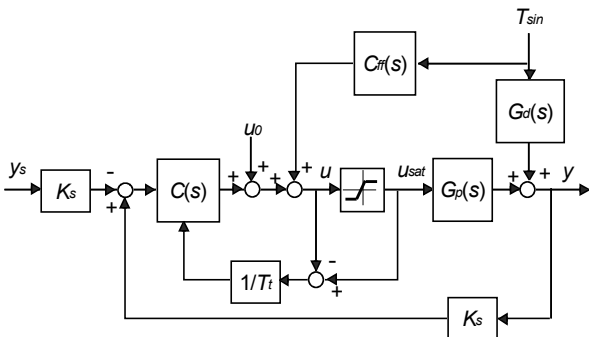


그림 5. 피드포워드 제어와 안티와인드업 루프를 갖는 PID 제어시스템.

Fig. 5. Overall PID control system with feedforward control and anti-windup loop.

$$C_{ff}(s) = \frac{K_i}{K_a K_x} \frac{(1 + T_a s)}{(1 + \lambda s)^n} \quad (8)$$

여기서 $\lambda (> 0)$ 는 필터 시정수, $n (\geq 1)$ 은 필터 차수를 의미하며 본 연구에서는 $n=1$ 을 사용한다.

그림 5는 피드백 제어기, 피드포워드 제어와 안티와인드업 루프가 결합된 전체 제어시스템을 보여준다.

V. PID 제어기의 동조

제어기 동조는 전체 제어시스템이 원하는 성능을 갖도록 적절한 방법으로 파라미터를 조정하는 것을 말하며, 식 (4)와 같은 1자유도 PID 제어기는 제어 환경에 따라 설정치 추종 성능 또는 외란 억제 성능이 최적화되도록 동조된다. 지금까지 잘 알려진 동조법으로는 Z-N 동조법, Cohen-Coon 동조법, IMC 동조법 등이 있으며, 이들은 산업현장에서 접하는 비선형 포화기를 고려하지 않고 있고, 포화기 문제를 다룰 경우에는 선형구간에서(포화기를 고려하지 않음) 제어기를 동조한 후 부가적으로 안티와인드업 루프를 적용하게 된다.

그러나 이것은 전체 제어시스템의 관점에서 최적화라고 말할 수 없기 때문에 본 연구에서는 안티와인드업 피드백 루프가 구성되어 있는 그림 5의 제어시스템에서 설정치 추종 성능과 외란 억제 성능이 동시에 개선되도록 PID 제어기와 피드포워드 제어기의 파라미터를 최적화하는 문제를 다룬다.

이를 위해 먼저 설정치 추종 성능이 개선되도록 $C(s)$ 의 $\{K_p, K_i, K_d, M\}$ 을 동조한 다음 이 결과를 이용해서 외란 억제 성능이 개선되도록 $C_{ff}(s)$ 의 λ 를 동조하는 다음과 같은 절차를 제안한다.

- 단계 1: 설정치 추종 성능이 개선되도록 $C(s)$ 의 $\{K_p, K_i, K_d, M\}$ 을 동조한다.
- 단계 2: 앞서 구한 $\{\hat{K}_p, \hat{T}_i, \hat{T}_d, \hat{M}\}$ 를 사용해 외란 억제 성능이 개선되도록 $C_{ff}(s)$ 의 λ 를 동조한다.

설정치 추종 성능을 개선할 경우에는 외란을 고정하고 설정치를 계단상으로 변경하는 동안 최적화 알고리즘으로

동조하고, 외란 억제 성능을 개선할 경우에는 설정치를 고정하고 외란을 계단상으로 변경하는 동안 동조하게 된다. 비선형 다변수 최적화 문제를 풀기 위해 성능의 좋고 나쁨을 계량할 수 있는 평가함수로 절대오차적분(IAE)을 사용하였다.

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

여기서 ϕ 는 $[K_p, K_i, K_d, M]^T \in \mathbf{R}^4$ 또는 $\lambda \in \mathbf{R}$ 이고, $e(t)$ 는 설정치와 출력 간의 오차이며, 적분시간 t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 값이다.

최적화 도구로는 실수코딩 유전알고리즘[12,13]을 사용하였다. 이때 집단의 크기 $N=40$, 동적 돌연변이의 매개변수로는 $P_m = 0.05$, $b=5$ 를 사용하였고, ϕ 는 식 (9)의 성능지수가 최소가 되도록 구해진다.

VI. 모의실험 및 검토

앞에서 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 모의 실험을 실시하고 표준형 PID 제어기 기반의 세 동조법 [1,2,10,14], 즉 Z-N (Ziegler-Nichols)법, T-L (Tyreus-Luyben)법, Cvejn법과 비교하였다. 제어기 동조는 동작점이 80°C인 것으로 간주해 이 부근에서 수행되었다. Z-N법과 T-L법은 릴레이 피드백제어 회로를 구성하고 한계이득과 한계주기를 구한 후, Cvejn법은 제어대상을 FOPTD (First-Order Plus Time Delay), 즉 $Y(s)/U(s) = -K \exp(-Ls)/(1 + \tau s)$ 로 근사화하고 수행하였다. 이를 위해 이 등[15]이 제안한 방법을 사용하였다. 비교의 공정성이 유지되도록 다른 세 방법도 본 논문에서 사용하는 안티와인드업 기법을 적용하였다.

1. 모의실험용 데이터와 제어기 파라미터

모의실험에 사용된 열교환기의 데이터[6]는 표 1과 같고, 샘플링 시간 h 는 0.01[sec], 포화기의 최소값과 최대값은 각각 $u_{min} = -100$, $u_{max} = 0$ 으로 하였다.

주어진 시스템으로부터 한계이득과 한계주기를 구한 결과 각각 $K_u = 42.441$ 과 $T_u = 11.350$ [sec]이고, 설정치 $y_s = 80$ °C 부근에서 FOPTD의 파라미터를 추정된 결과 $K = -1.050$, $\tau = 30.527$, $L = 3.42$ 를 얻었다. 이때 파라미터들은 구간 $-30 \leq K < 0$, $0 < \tau \leq 50$, $0 < L \leq 10$ 에서 탐색되었다.

한편 제안된 방법으로 PID 제어기와 피드포워드 제어기를 동조하기 위해 파라미터들은 구간 $0 < K_p, K_i, K_d, \lambda \leq 60$, $5 \leq N \leq 20$ 에서 탐색되었고, 얻어지는 파라미터들의 정밀도는 초기집단의 선택에 따라 달라질 수 있어 독립된 씨드

표 1. 모의실험용 열교환기의 데이터.

Table 1. Heat exchanger data for simulation.

파라미터명	파라미터	값
액추에이터 이득	K_a	0.021
액추에이터 시정수	T_a	3
열교환기 이득	K_x	50
열교환기 시정수	T_x	30
열교환기 시간지연	L	1
외란 이득	K_f	0.286
센서 이득	K_s	0.160

표 2. PID 제어기와 피드포워드 제어기의 동조된 파라미터.
Table 2. Tuned parameters of the PID and feedforward controllers.

방법	PID 제어기				피드포워드 제어기
	K_p	K_i	K_d	N	λ
Proposed	53.329	1.696	57.884	15.684	0.146
Z-N	24.965	4.399	35.420	-	
T-L	19.099	0.765	32.515	-	
Cvejn(tracking)	6.614	0.209	7.267	-	
Cvejn(disturbance)	7.166	0.688	7.268	-	

(Seed)로 생성된 초기집단으로 20회 모의실험을 실시하고 그 결과를 평균하였다. 각 방법의 동조 결과는 표 2에 나타내었다.

2. 성능 비교

현장의 열교환기 시스템은 대부분 두 가지 모드, 즉 수동 모드와 자동모드로 운전된다. 시스템의 기동, 정지, 비상 또는 필요시에는 수동모드로 운전되고 나머지 대부분의 시간 동안에는 자동모드로 운전된다.

2.1 설정치 추종 성능

수동모드 운전시 열교환기의 출구온도를 증감하게 되는 경우를 고려해 설정치 추종 응답실험을 실시하였다. 그림 6은 T_{sin} 이 110[°C]이고 또 열교환기의 출력이 75[°C]에 유지될 때 설정치를 계단상으로 80[°C]로 변경하면서 출력 y 와 포화기 출력 u_{sat} 를 그린 것이다.

그림에서 보면 모든 응답들은 시간이 경과됨에 따라 설정치에 도달하지만, Z-N법은 큰 오버슈트를 보이며 과도하게 진동하고, Cvejn법은 타 방법에 비해 속응성이 느리고, T-L법은 앞의 두 방법 보다는 낮지만 제안한 방법보다 좋지 못한 것을 알 수 있다.

표 3은 각 방법의 성능을 정량적으로 비교하기 위해 오버

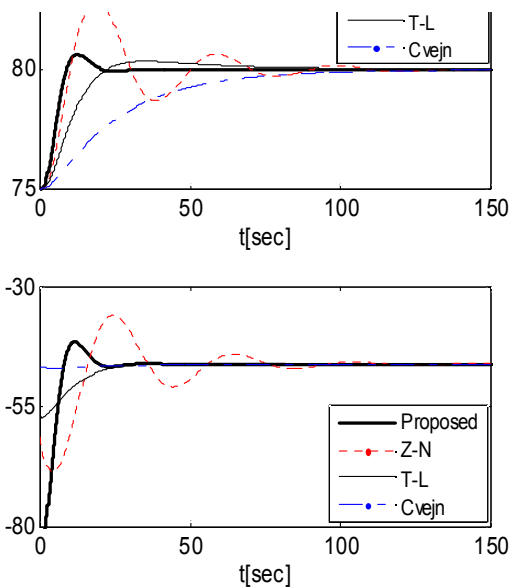


그림 6. y_s 가 75[°C]에서 80[°C]로 증가될 때 설정치 추종 응답.
Fig. 6. Set-point tracking responses when y_s is step-wisely increased from 75[°C] to 80[°C].

표 3. y_s 를 75[°C]에서 80[°C]로 증가시킬 때 설정치 추종 성능의 비교.

Table 3. Comparison of set-point tracking performances when y_s is increased from 75[°C] to 80[°C].

방법	설정치 추종 성능			
	M_p	t_r	t_s	IAE
Proposed	12.113	5.438	19.036	30.125
Z-N	59.195	6.256	103.454	100.571
T-L	6.314	14.076	67.389	61.950
Cvejn	0	53.916	99.909	141.951

슈트(M_p), 도달시간(t_r), 2% 정정시간(t_s), IAE를 계산한 결과이다. 이때 $t_r = t_{90} - t_{10}$ 이고, t_{10} 과 t_{90} 은 각각 출력이 설정치의 10%와 90%에 도달하는데 걸리는 시간을, $IAE = \int_0^{150} |e(t)|dt$ 를 의미한다. 표에서 보면 제안한 방법의 응답은 M_p 가 약 12%이지만 이는 현장에서 수용 가능한 수치이고, 약 19[sec] 후 설정치에 도달하며, 세 방법보다 IAE도 작을 뿐만 아니라 t_s 도 짧은 것을 확인할 수 있다.

2.2 외란 억제 성능

본 논문에서 다루는 열교환기는 자동모드 운전 시 설정치 y_s 는 80[°C]에 고정되는 것으로 간주되며, 이때 제어기는 외란으로 교란된 출력이 빨리 설정치로 회복되도록 조절하게 된다. 열교환기에서는 셀측 입구 온도 T_{sin} 의 변화가 다른 신호에 비해 클 가능성이 많아 외란으로 간주하였다.

따라서 열교환기 제어시스템의 출력이 80[°C]에 유지되고 있을 때 T_{sin} 을 110[°C]에서 계단상으로 120[°C] 변경하는 모의실험을 행하였다. 피드포워드 제어를 하지 않을 경우에도 제안한 방법의 우수성을 확인하도록 응답을 구해 그린 것이 그림 7이다.

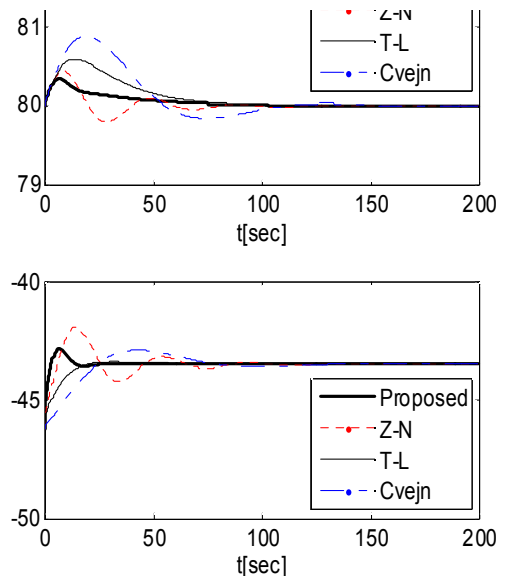


그림 7. T_{sin} 를 계단상으로 10[°C] 변경시켰을 때의 외란 억제 응답.

Fig. 7. Disturbance rejection responses when T_{sin} is step-wisely changed to 10[°C] while $y = 80$ [°C].

피드포워드 제어를 하지 않은 경우에도 제안한 방법의 응답이 세 방법보다 전반적으로 낮고, Cvejn법은 피크치가 크고, Z-N법은 피크치는 상대적으로 작지만 진동이 심한 것을 알 수 있다.

다음은 제안한 방법에서 피드포워드 제어를 사용함으로써 외란 억제 성능이 더욱 개선될 수 있음을 보이기 위해 앞의 경우와 같은 모의실험 환경에서 응답실험을 실시하고 피드포워드 제어가 없을 때와 비교하였다. 그림 8에서 보면 피크치도 작아졌고 또 회복시간도 짧아졌음을 확인할 수 있다.

각 방법의 외란 억제 성능을 정량적으로 계량하기 위하여 응답의 피크치(Perturbance peak) M_{peak} 와 외란의 영향이 소멸되는데 걸리는 회복시간(Recovery time) t_{rcy} 와 IAE를 구한 것이 표 4이다. 이때 M_{peak} 는 $|v_{max} - y_s|$ 또는 $|v_{min} - y_s|$ 를 의미하고, t_{rcy} 는 y 가 y_s 의 2% 이내로 회복되는데 걸리는 시간을 의미한다. 표에서 보면 제안한 방법이 M_{peak} , t_{rcy} , IAE가 작아 전반적으로 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

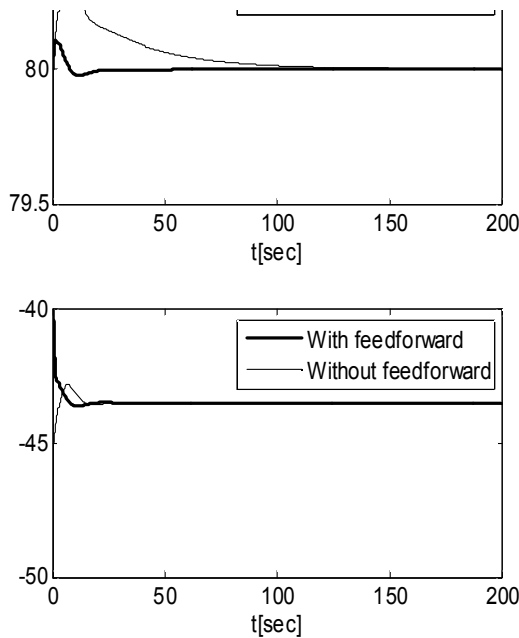


그림 8. 피드포워드 제어가 없을 때와 있을 때의 외란 억제 응답.
Fig. 8. Disturbance rejection responses without or with feedforward control.

표 4. T_{sin} 을 계단상으로 +10[°C] 변경시켰을 때의 외란 억제 성능의 비교.

Table 4. Comparison of disturbance rejection performances when T_{sin} is step-wisely changed to +10[°C].

방법	외란 억제 성능			비고
	M_{peak}	t_{rcy}	IAE	
Proposed	0.106 (0.347)	57.403 (117.659)	0.848 (10.024)	() : No feedforward
Z-N	0.449	96.204	10.381	
T-L	0.590	100.640	22.252	
Cvejn	0.890	145.953	35.432	

2.3 파라미터 변동

엄밀히 말하면 열교환기 시스템은 시변 시스템으로서 운전 중 파라미터 변동이 일어날 수 있기 때문에 제안한 방법의 파라미터 변동에 대한 강인성을 확인하기 위해 모의 실험을 실시하였다. 제어시스템이 표 1의 파라미터를 가지고 75[°C]에 도달해 있을 때 설정치를 80[°C]로 변경할 때 K_x 도 50에서 45로 변경하며 응답을 그린 것이 그림 9이다.

제안된 방법은 두 방법에 비해 파라미터 변동에 덜 민감한데 비해, Z-N법은 응답이 진동하고, T-L법과 Cvejn법은 전반적으로 속응성이 느려졌음을 알 수 있다.

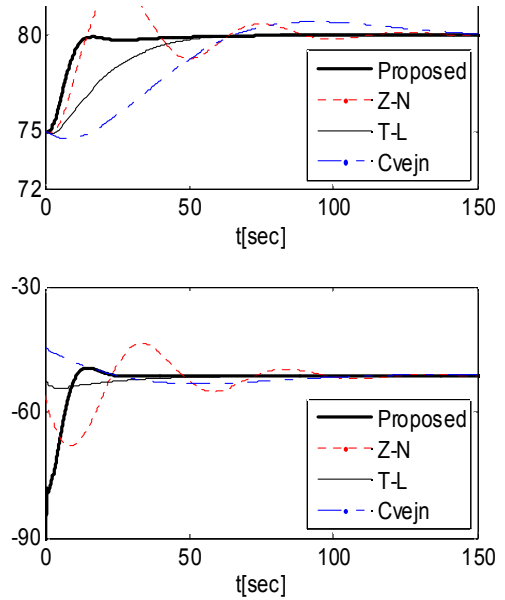


그림 9. 파라미터 K_x 의 변동에 대한 응답 비교.
Fig. 9. Response comparison to change of parameter K_x .

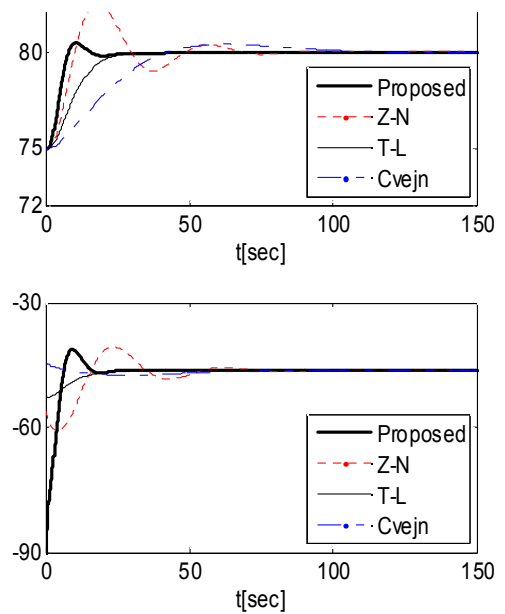


그림 10. 파라미터 T_x 의 변동에 대한 응답 비교.
Fig. 10. Response comparison to change of parameter T_x .

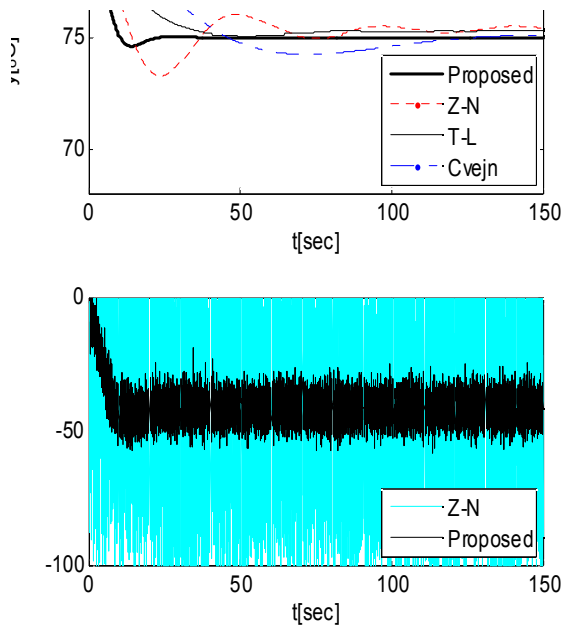


그림 11. 정규잡음 $N(0,0.015^2)$ 이 유입될 때의 설정치 추종 응답.
Fig. 11. Set-point tracking responses when noise $N(0,0.05^2)$ exist.

그림 10은 앞과 동일한 실험환경에서 K_r 대신 T_r 를 30에서 20으로 변경하며 응답을 그린 것이다. 이 경우에도 제안한 방법의 우수성을 확인할 수 있다.

2.4 잡음에 대한 영향

실제 제어 환경에서는 신호계측 시 항상 센서로부터 잡음이 유입될 가능성이 있으므로 제어기 설계 시 이 점을 유의할 필요가 있다. 제안한 방법의 잡음에 대한 영향을 알아보기 위해 그림 11은 센서에 정규잡음 $N(0,0.05^2)$ 이 유입되는 것으로 가정하고 출력이 80°C 에 있을 때 y_s 를 75°C 로 계단상으로 변경하면서 응답을 구해 그린 것이다.

Z-N법과 T-L법은 미분폭주 현상으로 응답들이 왜곡되고, Cvejn법은 K_p 값이 상대적으로 작아 미분폭주 현상은 일어나지 않지만 응답이 느리고, 제안한 방법은 만족스러운 성능을 주는 것을 알 수 있다. 특히 Z-N법과 제안한 방법의 u_{sar} 를 그린 그림에서 보면 Z-N법은 -100과 0사이에서 심하게 변동되는 것을 알 수 있고(T-L법도 유사), 본 방법의 경우 제한된 범위 내에서 진동하고 있다.

VII. 결론

본 연구에서는 GA에 기초하여 열교환기의 온도를 제어하기 위한 PID 제어기와 피드포워드 제어기를 최적 동조하는 문제를 다루었다. 포화기로부터 일어날 수 있는 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 적분기 안티와인드업과 외란 억제 성능을 보완하기 위해 피드포워드 제어를 사용하였고, 실수코딩 GA를 기반으로 전체 제어시스템의 설정치 추종 성능과 외란 억제 성능이 동시에 개선되도록 PID 제어기와 피드포워드 제어기를 최적 동조하였다. 제안된 방법으로 열교환기의 온도제어에 적용한 결과 제어 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 차후 시변시스템에 대한 지능기법의 적용에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

REFERENCES

- [1] W. H. Ray, *Advanced Process Control*, McGraw-Hill Book Co., N.Y., 1981.
- [2] J. P. Corriou, *Process Control: Theory and Applications*, Springer-Verlag, London, 2004.
- [3] V. Krishna Vinaya, K. Ramkumar, and V. Alagesan, "Control of heat exchangers using model predictive controller," *Proc. of the 2012 IEEE International Conference on Advances In Engineering, Science and Management*, pp. 242-246, Tamil Nadu, India, 2012.
- [4] M. Pandey, K. Ramkumar, and V. Alagesan, "Design of fuzzy logic controller for a cross flow shell and tube heat-exchanger," *Proc. of the 2012 IEEE International Conference on Advances In Engineering, Science and Management*, pp. 150-154, Tamil Nadu, India, 2012.
- [5] P. Sivakumar, D. Prabhakaran, and T. Kannadasan, "Temperature control of shell and tube heat exchanger by using intelligent controllers-case study," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 2, no. 8, pp. 285-291, 2012.
- [6] S. Padhee, Y. B. Khare, and Y. Singh, "Internal model based PID control of shell and tube heat exchanger system," *Proc. of the 2011 IEEE Students' Technology Symposium*, pp. 14-16, Kharagpur, 2011.
- [7] M. A. Ahmad, A. A. Ishak, and N. K. Ismail, "New hybrid model reference adaptive supervisory fuzzy logic controller for shell-and-tube heat exchanger temperature system," *Proc. of the 2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*, pp. 49-54, Shah Alam, Malaysia, 2012.
- [8] http://www.kamui.co.jp/english/products/shell_and_tube/
- [9] <https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/HeatExchangeModel>
- [10] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: theory, design and tuning*, ISA Press, 1995.
- [11] 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.
- [12] G. Jin and S. Ju, "A study on a real-coded genetic algorithm," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 268-275, 2000.
- [13] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- [14] J. Cvejn, "Simple PI/PID controller tuning rules for FOPDT plants with guaranteed closed-loop stability margin," *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 16, no. 1, pp. 17-25, 2011.
- [15] H. Lee and G. Jin, "On-line parameter estimation of continuous-time systems using a genetic algorithm," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 76-81, 1998.



안 종 갑

2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업. 2006년 동대학원 메카트로닉스공학과 공학석사. 2008년 동대학원 메카트로닉스공학과 박사수료. 현재 MAN Diesel & Turbo Korea. 관심분야는 디젤엔진 제어, 제어이론 및 응용.



소 건 백

2009년 한국해양대학교 선박전자기계공학부 졸업. 2010년 현대상선 주식회사. 2012년 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과. 관심분야는 지능 제어, 유전 알고리즘.



이 주 연

2012년 한국해양대학교 IT공학부 졸업. 2013년 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과. 관심분야는 지능제어, 수중운동체 제어.



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.



소 명 옥

1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1989년 동 대학원 기관학과 석사. 1997년 동 대학원 박사. 2005년~2006년 (영) University of Wales Cardiff 과건교수. 현재 한국해양대학교 기관공학부 교수. 관심분야는 퍼지제어, 최적제어, 항만하역장비 제어.



진 강 규

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