

Van de Vusse 반응기 동특성을 구현하는 액위시스템 및 제어 실험

이지태[†]

경북대학교 화학공학과
41566 대구광역시 대학로 80
(2019년 9월 18일 접수, 2020년 3월 6일 채택)

Liquid Level System Realizing Van de Vusse Reactor Dynamics and its Control Experiments

Jietae Lee[†]

Department of Chemical Engineering, Kyungpook National University, 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, 41566, Korea
(Received 18 September 2019; accepted 6 March 2020)

요 약

Van de Vusse 반응기는 정상상태 입출력 관계에서 최대값을 그리고 이 최대값을 기준으로 동특성의 형태가 크게 바뀌는 특성을 보인다. 운전영역에 따라 정상상태 이득의 부호가 바뀌고, non-minimum phase 동특성 등의 제어를 매우 어렵게 하는 특성들이 나타난다. 매우 많은 비선형제어 방법들과 새로이 고안되고 있는 방법들이 이 Van de Vusse 반응기 공정에 적용되어 그 성능 검증이 이루어지고 있다. 이 반응기의 실제 예가 보고되어 있으나, 화학반응 특성상 제어 실험에 일상적으로 사용되기에는 어려움이 많아 대부분 모사연구에 그치고 있다. 여기서는 이 Van de Vusse 반응기의 특성을 모두 구현하는 액위시스템을 제작하고, 새로이 고안되는 비선형 제어기의 성능을 밝히는 기준이 될 수 있는 간단한 두 제어 방법의 실험 결과를 제안하고자 한다. 액위시스템 실험장치와 제안된 제어 방법들은 매우 간단하며, 비선형 제어기의 성능과 현장 적용 가능성을 검증하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

Abstract – Van de Vusse reactors show the maximum points in input-output steady state maps and dramatic changes in their dynamic characteristics around those maximum points. According to their operating regions, there appear sign changes in steady state gains and nonlinear characteristics such as non-minimum phase dynamics which cause difficulties in applying controllers. Many nonlinear controllers that are available and newly designed are applied to these Van de Vusse reactor processes and their performances are tested. Reactor examples with real reactions have been reported. However, due to difficulties in constructing and operating chemical reactor systems, they are not adequate to be used for real applications of control experiments and hence most of results are based on simulations studies. Here, we propose a liquid level system that realizes most of the steady state and dynamic characteristics of Van de Vusse reactor, and two nonlinear control methods that can be used as base methods to compare nonlinear controllers newly designed. Liquid level experimental system and two nonlinear control methods are very simple and can be used to test performances of nonlinear controllers in practice.

Key words: Van de Vusse reactor, Input multiplicity, Global stability, PI control, Parallel compensator, Extremum seeking control

1. 서 론

화학반응기는 강한 비선형성, non-minimum phase 동특성, 불안정성, 정상상태 다중성 등 다양한 제어를 어렵게 하는 모든 특성이 나타날 수 있다. 이를 보여주는 유명한 공정 중 하나로 Van de

Vusse 반응기 공정을 들 수 있다[1]. 이는 series 반응과 parallel 부반응이 연속교반반응기에서 일어나는 공정으로 정상상태 입력다중성과 non-minimum phase 동특성을 보여준다. 실제 반응 예로 cyclopentadiene로부터 산촉매를 갖는 수용액 상태에서 cyclopentenol을 생산하는 공정에서 찾을 수 있다[2]. Cyclopentenol의 series 반응으로 인한 cyclopentanediol과 parallel 부반응에 의한 dicyclopentadiene이 부산물로 생산된다.

정상상태 입력다중성은 한 공정 출력에 입력이 여럿 있는 공정의 특성을 말하는 것으로, 이 공정은 정상상태 입출력 관계에서 최대값을 보인다[3]. 최대값을 보이는 지점을 기준으로 공정의 정상상

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jtleee@knu.ac.kr

‡이 논문은 POSTECH 이인범 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

태 이득의 부호가 바뀐다. 따라서 이를 감안할 수 없는 적분기능을 갖는 선형제어기는 전역 안정성(global stability)를 보장할 수 없다 [4]. 또한, 최대값 이상의 설정치 선정은 물리적으로 불가능한데, 최대값이 알려져 있지 않은 공정에서는 이런 물리적으로 불가능한 설정치를 줄 수 있는 문제를 가질 수 있다. 제어가 가장 어려운 특성 중의 하나로 꼽히고 있다[3]. Van de Vusse 반응기 공정은 이 특성을 가지고 있어, 이 특성을 극복하고자 하는 비선형제어기의 목표 공정공정 중 하나가 되었다. 이를 위한 많은 제어기가 설계되어 오고 있으며, 이들은 모두 이 Van de Vusse 반응기 공정을 예로 들고 있다[3-6].

Van de Vusse 반응기 공정에서 정상상태 최대값을 보이는 지점이 최적의 운전점이 되는 경우가 있다. 고전적인 출력 설정치 값에 공정을 유지하는 제어 대신에 공정 출력 최대점을 찾고 유지하고자 하는 extremum seeking control (ESC) 방법이 제안되어 활발히 응용 연구가 진행되고 있다[7]. Van de Vusse 반응기 공정은 최근의 이 ESC 방법의 목표 공정 중의 하나로 자리잡고 있다[7-9].

Van de Vusse 반응기 공정에서 정상상태 최대값을 보이는 지점을 기준으로 공정 동특성이 변한다. 이 중 한 영역에서는 non-minimum phase의 동특성을 보인다. 이는 선형 공정에서는 right-half-plane zero를 갖는 것을 의미하며, 계단응답에서 역응답(inverse response)를 보인다. 이런 동특성을 보이는 공정에는 공정 inversion을 기반으로 하는 model predictive control 같은 최적의 제어성능을 추구하는 제어 전략을 적용하는데 어려움을 준다[10]. 공정 inversion에서 non-minimum phase 부분을 제외시킬 필요가 있는데, 이런 비선형 제어기의 검증에도 이 Van de Vusse 반응기 예가 효과적으로 이용되고 있다[10-11].

위에 예로 든 것들 외에도 다양한 제어 방법들이 Van de Vusse 반응기 공정에서 나타나는 문제들을 해결하기 위해 제안되었고 아직도 활발히 연구되고 있다[13-19].

이 Van de Vusse 반응기 공정의 넓은 인용에도 불구하고, 화학반응의 특성상 실제 공정을 제작하고 제어 실험을 수행하는 데는 많은 어려움이 따른다[2]. 몇몇을 제외하고 거의 대부분의 연구가 모사 연구에 한정되어 있다. 여기에 실제 실험 연구를 위하여 Van de Vusse 반응기 공정의 제반 특성을 구현하는 액위시스템을 제작하고, 다른 정교한 비선형제어의 성능을 밝히는 기준이 될 수 있는 간단한 두가지 제어방법의 [6,9] 실험 결과를 보여 주고자 한다. 제안한 액위시스템은 매우 간단하여 저가격으로 단시간에 만들 수 있으며, 비선형 제어기의 현장 적용성을 검증하는데 이용할 수 있다. 주어진 제어기들은 실제 적용 가능성이 높은 간단한 제어기들로 그 자체로도 의미가 있고, 또한 새로이 개발되는 비선형제어기의 성능 비교에 긴요하게 이용될 수 있는 것들이다.

2. Van de Vusse 반응기

Van de Vusse 반응기 공정은 다음 반응이 연속교반반응기에서 일어나는 반응시스템이다.



등온을 가정하기도 하고 그렇지 않은 경우도 고려되고 있다. 여기서는 등온 반응 시스템을 가정한다. 이의 동특성 모델은

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_A}{dt} &= -k_1 C_A - k_3 C_A^2 + (C_{A0} - C_A) \frac{f(t)}{V} \\
 \frac{dC_B}{dt} &= k_1 C_A - k_2 C_B - C_B \frac{f(t)}{V}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 V는 반응기 부피, C_A와 C_B는 각각 물질 A와 B의 농도이고, C_{A0}는 물질 A의 공급 농도이고, f(t)는 제어에 사용되는 입력 유량이고, k₁, k₂ 그리고 k₃는 반응 속도 상수들이다[1-2].

실제 반응 예로 cyclopentadiene로부터 산촉매를 갖는 수용액 상태에서 cyclopentenol을 생산하는 공정에서 찾을 수 있다[2]. Cyclopentenol의 series 반응으로 인한 cyclopentanediol과 parallel 부반응에 의한 dicyclopentadiene이 부산물로 생산된다.

변수들을 정규화하고, 식 (2)를 정리하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1(t) &= -k_1 x_1(t) - k_3 x_1^2(t) + (x_{1f} - x_1(t))u(t) \\
 \dot{x}_2(t) &= k_1 x_1(t) - k_2 x_2(t) - x_2(t)u(t)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서 u(t)는 제어 입력이다. 정상상태 입출력 관계식을 구하면

$$x_{2ss} = \frac{k_1}{k_2 + u_{ss}} \frac{2k_3 x_{1f} u_{ss}}{k_1 + u_{ss} + \sqrt{(k_1 + u_{ss})^2 + 4k_3 x_{1f} u_{ss}}}
 \tag{4}$$

을 얻을 수 있다. 여기서 아래 첨자 ss는 정상상태를 의미한다.

한 공정 예로 반응속도 상수로 k₁ = 50, k₂ = 100, k₃ = 10.1, 그리고 x_{1f} = 10.0로 정하면, 식 (4)는 u_{ss} = 77.567에서 x_{2ss} = 12.760의 최대값을 가진다. 즉 이 Van de Vusse 공정은 입력다중성을 보인다. 입력 u_{ss}가 0에서 300으로 바뀔 때, 공정의 정상상태 이득의 부호가 양에서 음으로 바뀌는 것을 확인할 수 있다.

3. Van de Vusse 반응기의 특성을 구현하는 액위시스템 및 동특성 실험

Van de Vusse 반응기 공정의 독특한 특성으로 여러 비선형제어기의 대상 공정이 되었다. 실제 반응 시스템이 있는 것으로 확인되어 있으나[2], 화학반응 시스템의 특성상 이를 제작하고 운전하는 데에는 어려움이 많다. 비선형제어기를 이 실제 반응기 실험을 통하여 검증하는 것은 쉽지 않다. 여기서는 이를 극복하기 위하여 이 Van de Vusse 반응기 동특성을 구현하는 액위시스템을 제안한다. 제안하는 액위시스템은 매우 간단한데, Fig. 1에 개략도가 나타나 있다. 내경 5 cm 높이 30 cm의 탱크 2개로 구성되어 있고, 하나의 신호로 조작되는 핀치밸브 2개로 탱크로 흘러 들어가고 나가는 물의 유량이 조절된다. 아래 탱크의 수위를 반도체 압력센서로 측정하고, 16bit A/D 변환기로 디지털신호로 변환하여 제어컴퓨터 PC로 보내진다. 따라서 음수의 값을 버리면 액위 신호는 0~32765사이의 값을 가질 수 있는데, 이 디지털 신호를 실제 액위로 변환하지 않고 바로 제어에 사용한다. 핀치밸브는 PWM (Pulse Width Modulation) 방법으로 조절되는데, PWM period는 약 5초이고 PWM duty는 0에서 5000의 값으로 조절된다. 핀치밸브 2개가 사용되지만 하나의 신호로 동시에 조절되기 때문에 SISO (Single-Input Single-Output) 공정이 된다. 이들 신호처리 시스템은 Arduino CPU를 이용하여 제작하였다. 각 탱크 사이를 이어주는 물의 통로는 one-touch fitting과 polyurethane tube를 이용하였다.

Fig. 1의 액위 동적 거동을 모사하는 모델 식을 구하며 다음과 같이 된다.

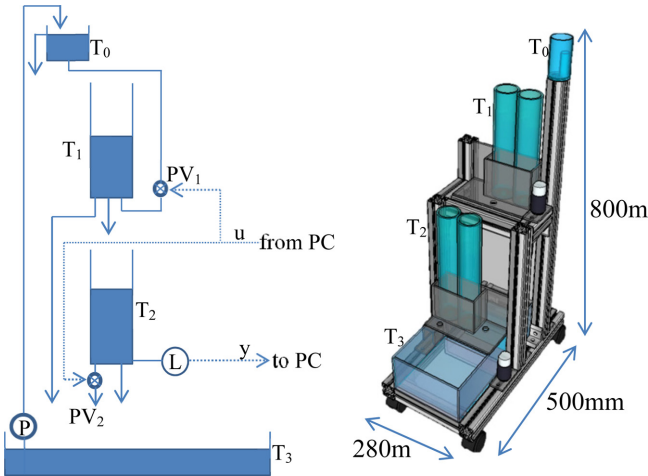


Fig. 1. A liquid level system realizing Van de Vusse reactor dynamics (P: Pump, T₀~T₃: Tanks, PV₁~PV₂: Pinch valves, L: Level sensor).

$$\begin{aligned}
 A_T \dot{h}_1(t) &= -a_{12} \sqrt{2gh_1(t)} - a_{13} \sqrt{2g(h_1(t) + \xi_2)} + a_{01u} \sqrt{2g(\xi_1 - h_1(t))} u(t) \\
 A_T \dot{h}_2(t) &= a_{12} \sqrt{2gh_1(t)} - a_{23} \sqrt{2gh_2(t)} - a_{23u} \sqrt{2gh_2(t)} u(t) \\
 y(t) &= c_s h_2(t)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서,

- $h_i(t)$: liquid levels of tanks (0-30 cm)
- ξ_i : liquid level offsets due to tank locations ($\xi_1=35$ cm, $\xi_2=0$ cm)
- A_T : cross-sectional tank area ($A_T=19.625$ cm²)
- a_{ij} : orifices of tubes between tanks ($a_{12}=0.0157$ cm², $a_{13}=0$ cm², $a_{23}=0.00785$ cm²)
- a_{iju} : orifices of tubes through pinch valves ($a_{01u}=0.0314$ cm², $a_{23u}=0.0157$ cm²)
- g : gravitational acceleration (980 cm/s²)
- $u(t)$: manipulated variable (0-5)
- c_s : sensor gain
- $y(t)$: process variable

이 식을 통하여 Van de Vusse 반응기 동특성이 구현될 수 있는지 확인할 수 있다. 탱크 1에서 탱크 3으로 바로 빠져 나가는 튜브는 사용하지 않았다. 엄밀한 동특성은 실제 실험 시스템과 차이가 날 수 있는데, 각 탱크를 이어주는 튜브의 길이, one-touch fitting에 의한 압력 손실 등 때문으로 판단된다.

Fig. 2는 입력신호 u 를 계단으로 증가시키면서 얻은 출력 y 의 계단응답을 보여주고 있다. 입력신호 u 가 작은 영역에서는 정상상태 이득이 양수이고 역응답을 보이는 것을 볼 수 있고, u 가 큰 영역에서는 정상상태 이득이 음수이고 overshoot를 보이는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 액위시스템의 정상상태 입력력 관계를 보여주고 있다. 두 그래프는 입력신호 u 를 증가시키면서 얻은 것과 내리면서 정상상태에서 얻은 것을 보여준다. 최대값이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 즉 입력다중성이 있음을 알 수 있다. 이 최대값이 나타나는 과정을 정성적으로 설명하면 다음과 같다. 먼저 입력신호 u 가 0에서 점차 커지면 탱크 1의 액위가 높아지고 탱크 2로 흘러 들어가는 물의 량의 증가가 커진다. 탱크 2의 액위는 낮은 상태로 탱크 2로부터 흘러 나가는 물의 량의 증가는 상대적으로 작아, 탱크 2의 액위

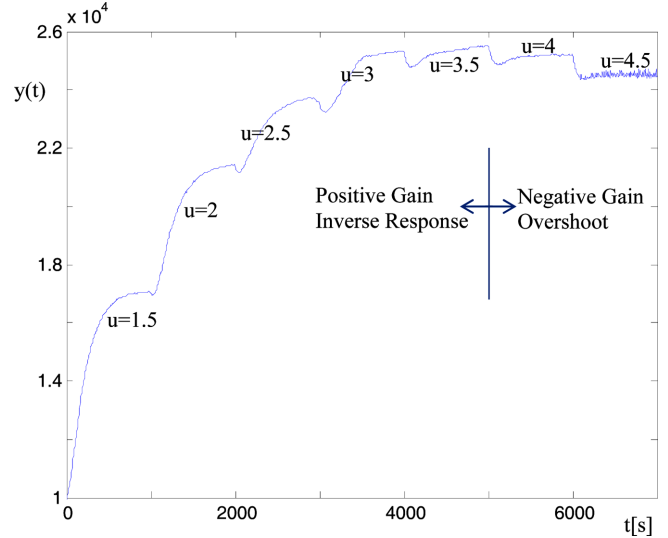


Fig. 2. Series of experimental step responses for the liquid level system of Fig. 1.

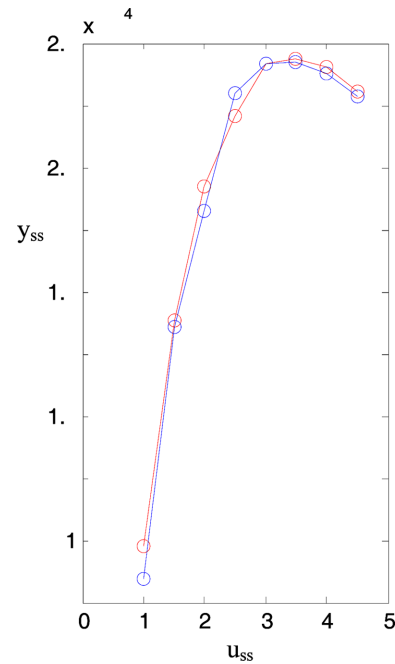


Fig. 3. Steady state input-output map for the liquid level system of Fig. 1 (u_{ss} and y_{ss} are steady state values of $u(t)$ and $y(t)$, respectively).

가 높아진다. 입력신호 u 가 어느 정도 커지면, 탱크 1의 액위가 높아져 탱크 1로 흘러 들어가는 물의 량의 증가는 작아지고, 따라서 탱크 2로 흘러가는 물의 량의 증가도 작아진다. 반면에 탱크 2의 액위가 큰 상태로 흘러 나가는 물의 량의 증가는 커진다. 따라서 탱크 2의 액위가 줄어 드는 현상을 보이게 된다. 즉 탱크 2의 액위가 최대값을 보이는 지점이 있게 된다. 최대값은 대략 25000 값을 가졌는데, 이 값은 공정 환경 변화에 민감하게 변화하여 각 실험에서 이 값에 고정되어 있다고 보장할 수 없었다.

Fig. 4는 앞의 정상상태 관계에서 최대값을 보이는 지점의 앞 쪽에서의 한 계단응답을 보여주고 있다. 역응답을 보여주는 것을 확인할 수 있다. 즉 이 액위시스템은 이 영역에서 non-minimum

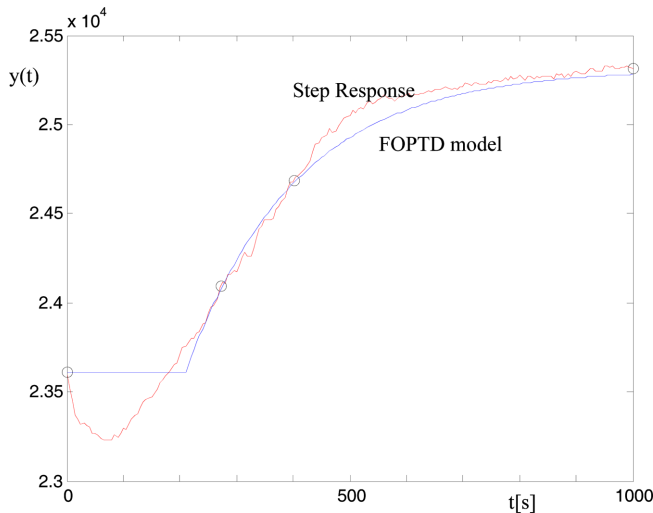


Fig. 4. An experimental step response and its first order plus time delay (FOPTD) model response of the liquid level system of Fig. 1.

phase 동특성을 가진다. 이는 탱크 2의 액위에 미치는 핀치밸브 2의 효과는 바로 나타나지만 핀치밸브 1의 효과는 탱크 1의 동적 시간 지연을 거쳐 나타나기 때문이다. 제어기 설계를 위하여 Fig. 4의 계단응답의 두 지점 측정으로부터 얻은 일차시간지연 모델은 다음과 같다 [20].

$$G_{FOPTD}(s) = \frac{3402.3e^{-207.5s}}{195s + 1} \quad (6)$$

여기서 시간상수와 시간지연은 초의 시간단위를 갖는다.

4. 제어 실험

4-1. PID Controller with Parallel Compensator

위의 액위시스템을 제어하기 위해서는 Van de Vusse 반응기의 독특한 동특성을 극복하는 비선형제어기가 필수적이다. 이런 제어기를 개발하고 그 성능을 검증하기 위해서는 그 기준이 되는 기저 제어기가 있으면 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 이를 위한 매우 간단한 기존의 PID (Proportional-Integral-Derivative) 제어기를 약간 개조하는 수준의 제어기가 최근에 제안되어 있다 [6]. 이를 이 액위시스템에 적용하여 기저 제어기로써의 가능성을 살펴본다. Fig. 5에 제안하는 제어기의 구조가 나타나 있다. PID제어기에 평행보상기 (Parallel Compensator)가 첨가된 형태이다. 평행보상기는 폐환루프에서 공정 이득의 부호가 음이 되는 것을 막아주어 PID제어 시스템이 불안정해 지는 것을 막아주는 역할을 한다.

다음의 제어기를 사용하였다.

$$PI(s) = 1.3811 \times 10^{-4} \left(1 + \frac{1}{195s} \right) \quad (7)$$

$$\phi(u) = \begin{cases} 0, & u(t) < 3 \\ 2000(u(t) - 3), & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 PI제어기는 Fig. 4의 계단응답으로부터 얻은 모델 식 (6)을 감안하여 IMC-PI (internal model control - PI) 방법으로 구하였다[20]. 비선형 평행보상기 $f(u)$ 의 두 변수 3과 2000의 값은 Fig. 3의 음의 정상

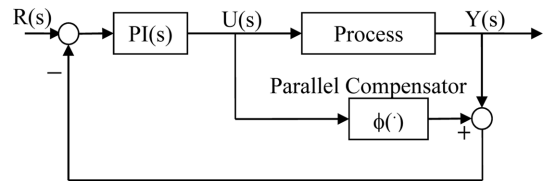


Fig. 5. PI control system with a parallel compensator for the process with input multiplicity.

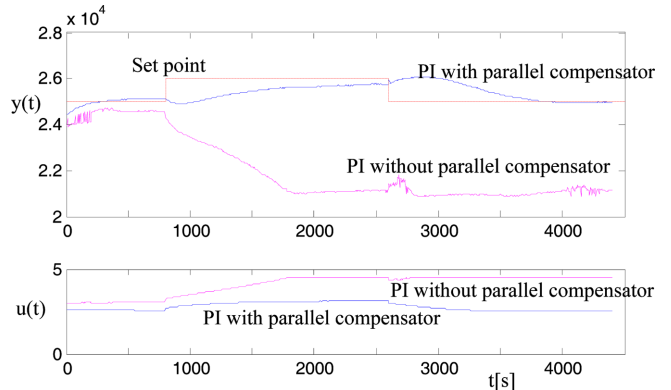


Fig. 6. Closed-loop responses of PI control systems with and without parallel compensator.

상태 이득 값이 양이 되도록 하는 것을 시행착오를 거쳐 정한 것이다.

Fig. 6는 실제 액위시스템에 적용한 제어 실험 결과를 보여주고 있다. 먼저 평행보상기가 없는 보통의 PI제어기는 제어 기능을 발휘하지 못하고 제어기 출력이 낼 수 있는 최대값으로 발산하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5에는 나와 있지 않지만 설정치가 액위시스템 공정의 최대값에서 훨씬 못 미치는 값에서는 이 PI제어기도 제어 기능을 어느 정도 발휘하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 설정치가 액위시스템 공정의 최대값에 가까이 가던가, 외란이 심하게 들어오던가 하면 불안정해 질 수 있다. 반면에 평행 보상기를 넣으면 Fig. 5에서 보여 주듯이 이런 불안정해지는 우려를 씻을 수 있다. 하나의 약점은 평행보상기가 작동하는 $u(t) > 3$ 영역의 설정치에서는 offset이 발생한다. 이를 극복하는 방법이 논문 [6]에 자세히 기술되어 있다.

4-2. Extremum Seeking Control

앞의 제어기는 공정을 설정치에 보내고 유지하는 역할을 한다. Van de Vusse 반응기 공정을 포함하여, 공정에 따라서는 정상상태 최대점이 최적의 공정 운전점이 되고 이 최대점을 찾고 유지하는 제어가 더 필요한 경우가 있다. 이 제어 목적을 달성하는 제어 방법이 extremum seeking control (ESC)이라는 이름으로 제안되어 있는데[7-9], 이를 본 액위시스템에 적용하여 제어 실험 결과를 얻었다. ESC 제어 방법은 다양한 유형의 것들이 제안되어 있지만 여기서는 가장 간단한 discrete-time의 방법을 시도하였다[9]. Fig. 7에 제안하는 제어기의 구조가 나타나 있다. 이 제어기는 출력의 정상상태 최대점, 즉 $dy/du=0$ 가 되는 점을 찾는다. 이를 위하여 먼저 dy/du 값을 얻기 위하여 입력 u 에 주기가 p 이고 크기가 a 인 사각파 ($S_p(t)$: Square Wave)를 perturbation 신호로 넣는다. 그런 후 다음의 적분 제어 계산을 하고 feedback 하여 최대점을 찾는 목적을 달성한다.

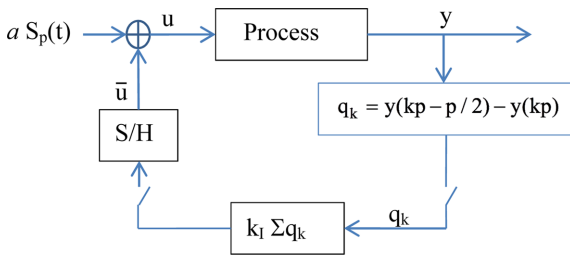


Fig. 7. Discrete-time extremum seeking control system.

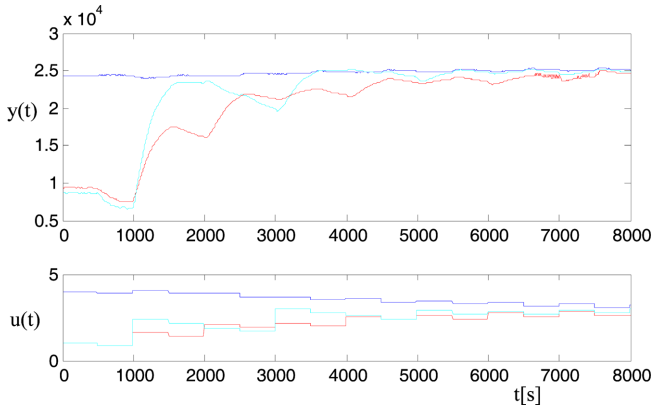


Fig. 8. Responses of the discrete-time extremum seeking control of Fig. 7.

$$u(t) = \bar{u} + aS_p(t)$$

$$S_p(t) = \begin{cases} 1, & kp - p < t < kp - p/2 \\ -1, & kp - p/2 < t < kp \end{cases}$$

$$q_k = y(kp - p/2) - y(kp) \quad (8)$$

$$\bar{u} = k_I \sum_k q_k$$

여기서 $q_k = y(kp - p/2) - y(kp)$ 는 dy/du 의 정보를 가지고 있고, 적분 제어기 $\bar{u} = k_I \sum_k q_k$ 는 정상상태에서 $dy/du = 0$ 가 되도록 만든다.

Fig. 8는 실제 액위시스템에 적용한 제어 실험 결과를 보여주고 있다. 실험에는 perturbation 신호의 주기는 공정의 시간상수와 비교하여 충분히 클 필요가 있는데[7-9], $p = 1000s$ 로 정하였고, $a = 0.1$ 로 하였다. 적분제어기 이득은 시행착오를 거쳐 $k_I = 6.2832E-7$ 로 결정하였다. 다양한 초기 공정 상태에 본 ESC 방법을 적용한 결과를 보여주고 있다. 모두 공정 출력 최대값인 25000 근처로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. ESC제어기 변수들을 조정하여 수렴 속도를 빠르게 할 수 있을 것이다.

5. 결 론

Van de Vusse 반응기 공정은 정상상태 입출력 관계에서 최대값이 있는 입력다중성을 보이고, 이 최대값을 기준으로 한 영역에서는 non-minimum phase의 동특성을 보이는 등 안정적 제어에 매우 큰 어려움을 주는 여러 특성들을 가지고 있다. 많은 비선형제어기들이 이들을 극복하기 위하여 제안되어 오고 있으며, 이들은 하나 같이 Van de Vusse 반응기 공정을 예제로 들고 있다. 실제 반응 예가 보고되어 있으나, 화학반응의 특성상 실제 반응기를 제작하고 제어 실험을 하는 것에는 어려움이 있어 비선형 제어기 적용 연구는 거의

대부분 모사 연구에 그치고 있다. 여기에서 Van de Vusse 반응기 공정의 특성을 모두 구현하는 액위시스템을 제안한다. 이는 2단의 아르킬 탱크, one-tough 피팅, 2개의 핀치 밸브, 반도체 압력 센서, 그리고 Arduino CPU로 구성되어 있는데, 저가격으로 최소한의 노력으로 제작할 수 있다. 또한 비선형 제어기 성능의 비교 연구를 위하여, 기준이 될 수 있는 간단한 구조의 2가지의 비선형 제어 방법을 소개하고 이 액위시스템에 실제 적용한 결과를 첨가하였다. 제안된 액위시스템과 기본 비선형 제어시스템은 여러 비선형 제어기 실제 적용 가능성과 성능을 밝히는데 크게 기여할 것으로 기대한다.

감 사

이 논문은 2018학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

References

1. Van de Vusse, J. G., "Plug-flow Type Reactor Versus Tank Reactor," *Chem. Eng. Sci.*, **19**, 994-997(1964).
2. Engeli, S. and Klatt, K. U., "Nonlinear Control of a Non-Minimum-Phase CSTR," American Control Conference, San Francisco, June 1993.
3. Koppel, L. B., "Input Multiplicities in Nonlinear, Multivariable Control Systems," *AIChE Journal*, **28**(6), 935(1982).
4. Dash, S. K. and Koppel, L. B., "Sudden Destabilisation of Controlled Chemical Processes," *Chem. Eng. Comm.*, **84**, 129-157(1989).
5. Sistu, P. B. and Bequette, B. W., "Model Predictive Control of Processes with Input Multiplicities," *Chem. Eng. Sci.*, **50**, 921-936(1995).
6. Lee, J. and Edgar, T. F., "Nonlinear Parallel Compensators for Controlling Processes with Input Multiplicities," *Korean J. Chem. Eng.*, **32**, 1-7(2015).
7. Krstic, M. and Wang, H. H., "Stability of Extremum Seeking Feedback for General Dynamic Systems," *Automatica*, **36**, 595-601 (2000).
8. Guay, M., "A Time-varying Extremum-seeking Control Approach for Discrete-time Systems," *J. Process Control*, **24**, 98-112(2014).
9. Lee, J. and Lee, K. S., "Extremum Seeking Control Using a Partial Sum of Input-Output Product," *Korean J. Chem. Eng.*, **33**, 3079-3084(2016).
10. Wright, R. A. and Kravaris, C., "Nonminimum Phase Compensation for Nonlinear Processes," *AIChE Journal*, **38**(1), 26-40(1992).
11. Kuhlmann, A. and Bogle, D., "Study on Nonminimum Phase Behaviour and Optimal Operation," *Comp. Chem. Engng*, **21**, 397-402(1997).
12. Wu, W., "Stable Inverse Control for Nonminimum-phase Nonlinear Processes," *J. Process Control*, **9**, 171-183(1999).
13. Doyle III, F. J., Ogunnaik, B. A. and Pearson, R. K., "Nonlinear Model-based Control Using Second-order Volterra Models," *Automatica*, **31**, 697-714(1995).
14. Klatt, K. U. and Engell, S., "Gain-scheduling Trajectory Control of a Continuous Stirred Tank Reactor," *Comp. Chem. Engng*, **22**, 491-502(1998).
15. Wu, W., "Adaptive Nonlinear Control of Nonminimum-phase Processes," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 3815-3829(1999).

16. Perez, H., Ogunnaike, B. and Devasia, S., "Output Tracking Between Operating Points for Nonlinear Processes: Van de Vusse Example;" *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **10**, 611-617(2002).
17. Ma, K., Valdes-Gonzalez, H., David, I. and Bogle, L., "Process Design in SISO Systems with Input Multiplicity Using Bifurcation Analysis and Optimization;" *J. Process Control*, **20**, 241-247(2010).
18. Tsai, S. H., "Robust H_∞ Control for Van de Vusse reactor via T-S Fuzzy Bilinear Scheme;" *Expert Systems with Applications*, **38**, 4935-4944(2011).
19. Kuntanapreeda, S. and Marusak, P. M., "Nonlinear Extended Output Feedback Control for CSTRs with Van de Vusse Reaction;" *Comp. Chem. Engng*, **41**, 10-23(2012).
20. Seborg, D. E., Mellichamp, D. A., Edgar, T. F. and Doyle III, F. J., *Process Dynamics and Control*, 3rd ed. New York, Wiley, 2010.