

Relay Feedback을 이용한 회분식 반응기제어

이용수, 이대욱, 이광순
서강대학교 화학공학과

Control of a Batch Reactor using Relay Feedback

Yongsoo Lee, Daewook Lee, Kwangsoon Lee
Dept. of Chem. Eng., Sogang Univ.

ABSTRACT

It is very difficult to control batch reactor with conventional linear controller due to its severe nonlinearity. To control the nonlinearity of batch reactor, we applied with relay feedback method and SOAS.

The SOAS can be designed to work quite well, but it requires engineering effort and some knowledge about the process in order to get a satisfactory performance of the closed loop system.

For the applications to more reliable, further studies on robustness in various situations and process noises and would be required.

I. 서론

회분식 반응기는 원료가 투입되고 일정시간 반응을 거친 후 생산물을 얻어내는 공정을 의미한다. 회분식 반응기는 정밀화학, 제약, 고분자 중합가공, 반도체, 식품, 염색 등의 제조산업 분야에서 중요한 단위공정으로, 고부가가치 제품의 다품종 소량생산을 추구하며 환경오염과 에너지 다소비형 공정을 지향하는 최근 산업구조 변화의 영향으로 중요성이 크게 점증되고 있다.

회분식 반응기는 넓은 조업범위에서 운전이 되고, 발열로 인한 계의 비선형성이 심하게 나

타나기 때문에, 반응기 모델구성에 필요한 파라미터를 알 수 없는 경우가 많고 이들 파라미터도 시간변이성을 갖는다.

그러므로 고정된 파라미터로 동조된 PID 제어기로는 제어하기 어려우며 보다 강인한 적응제어 방법이 필요하다.

본 연구에서는 비선형제어 방법인 relay feedback을 이용하여 시간지연을 포함한 비선형공정인 회분식 반응기에 적용하고, 공정의 비선형성을 describing function으로 해석하고, 공정 동특성을 PID 제어기로 gain scheduling하여 제어하였다.

또한 relay feedback방법 응용으로 SOAS (Self oscillating adaptive system)를 도입하여 대상공정을 제어하였다.

II. 본론

1. Relay feedback system

대부분의 공정은 relay feedback방법에 의해 한계주기와 한계이득을 나타내며, 이러한 특성으로부터 공정의 동특성을 결정할 수 있고 제어기의 파라미터를 동조할 수 있다.

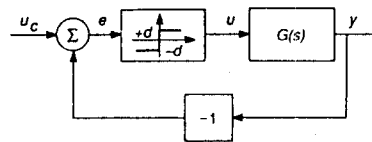


Fig.1 Linear system with relay control

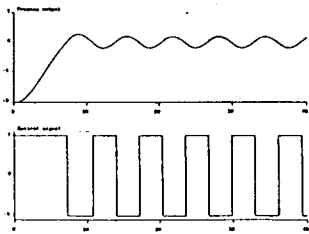


Fig.2 Relay output and Process output for system under relay feedback

비선형 블럭의 출력되는 신호는 describing function으로 해석하여 근사한다.

2. Describing function analysis

Describing function analysis은 제어루프내에 비선형함수를 선형함수로 근사하여 주파수 영역에서 해석하기 위한 방법이다.

공정은 선형부분의 전달함수 $G(s)$ 와 비선형 부분인 relay를 갖는 feedback으로 구성되었고 fig.1로부터 $u_c = 0$ 라 가정하자.

비선형블럭을 통한 relay출력을 fourier series로 전개하여 첫번째 항을 근사하면 진폭이 $4d/x$ 가 된다.

$$a = \frac{4d}{x} |G(j\omega)| \quad (1)$$

이때 공정이 진동하기 위한 조건은 식(2)와 같다.

$$\arg G(j\omega) = -\pi \quad (2)$$

$$Ku = \frac{4d}{\pi a} = \frac{1}{|G(j\omega)|} \quad (3)$$

공정의 전달함수의 진동 조건을 결정하기 위한 비선형블럭은 입력신호의 진폭에 따른 gain, $N(a)$ 으로 나타낼 수 있다. 공정의 전달함수가 $G(j\omega)$ 이라면 진동하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$N(a)G(j\omega) = -1 \quad (4)$$

식(4)로부터 선형블럭 G 는 진폭과 주파수의 함수이며 비선형 블럭인 N 는 진폭만의 함수이다. $-1/N(a)$ 를 nyquist plotting하여 fig.3에 보여준다.

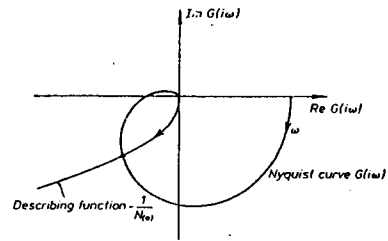


Fig.3 Determination of Possible Oscillations using the describing function method

Describing function은 음의 역으로 선형계의 nyquist curve와 교차하는 점에서 진폭과 진동주파수가 결정된다. 그러므로 진폭과 진동주기는 nyquist curve의 한점에서 결정된다.

$$N(a) = \frac{4d}{\pi a} \quad (5)$$

3. SOAS(Self Oscillating Adaptive System)

SOAS구조는 gain변화에 빠르게 적용할 수 있고 모든 실시간대에서 적응제어 형태로 표현이 가능하다.

또한 SOAS구조의 대표적인 특징은 다음과 같다.

1. 모델적용구조.
2. 신호의 자동동조.
3. Gain변화를 주는 dither신호를 가진 relay 사용
4. Loop gain의 amplitude margin이 2가 되도록 자동적으로 조절한다.

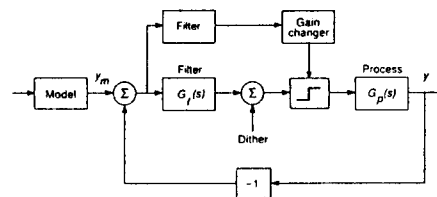


Fig.4 Block diagram of a self-oscillating adaptive system(SOAS)

SOAS구조를 설계할때 어려움점은 한계주기의 진폭과 응답 속도사이에서의 상호 절충이 필요하다. 작은 relay진폭이 비선형블럭에 입력되면 공정은 작은 진폭을 가진 한계주기를 갖지만 공정출력이 느린 응답속도를 보이고 큰 relay진폭의 입력은 큰 한계주기의 진폭을 갖고 빠른 응답속도를 준다.

Fig.4에서 설정값이 변하거나, 공정에 외란의 유입 및 다른 신호가 입력되면 한계진동 주기가 변하게된다. 이런 신호는 dual-input describing function으로 해석한다.

3.1 The Dual-input Describing Function

$$u(t) = a \sin \omega t + b(t) \quad (6)$$

식(6)에서 $b(t)$ 가 $\sin \omega t$ 보다 시간의 변화에 따라 느리게 변하고, 입력신호의 진폭 a 보다 크기가 작다면 $b(t)$ 는 일정한 상수로 가정할수 있다.

그러므로 relay에 입력되는 신호는 식(7)로 표현된다.

$$u(t) = a \sin \omega t + b \quad (7)$$

Relay입력과 출력에 대하여 fourier series expansion하면 다음과 같다.

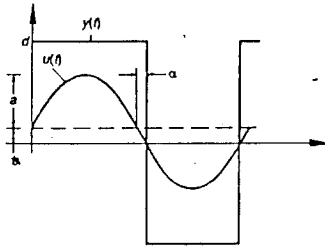


Fig.5 Relay inputs and outputs

$$y(t) = b N_B + a N_A \sin \omega t + a N_{A2} \sin 2\omega t + \dots \quad (8)$$

$$N_B = \frac{1}{2\pi b} \int_0^{2\pi} y(t) dt \quad (9)$$

$$= \frac{2d}{\pi b} \sin^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

$$N_A = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} y(t) \sin \omega t dt \quad (10)$$

$$= \frac{4d}{\pi a} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2}$$

식(9)과 식(10)에서 b/a 가 작다고 가정하면

$$N_A \approx \frac{4d}{\pi a}, \quad N_B \approx \frac{2d}{\pi a}$$

$$N_A \approx 2N_B \quad (11)$$

여기서 describing function N_B 는 입력신호의 진폭에 따른 함수이다.

Dual input describing function으로부터 신호가 느리게 변하는 입력신호를 근사할 수 있다.

3.2 Main result

$$|G(j\omega)| = N_B(a) |G(j\omega)| \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2} N_A |G(j\omega)| = 0.5$$

$$G_c(s) = \frac{kG(s)}{1+kG(s)} \quad (13)$$

여기서 이득 k 는 gain margin 2이며 설정값과 페루프 전달함수의 응답을 자동적으로 조절한다.

3.3 Design of an SOAS

SOAS 구조를 설계하는 방법은 다음과 같다.

단계 1 원하는 제어결과(tracking, force, speed)를 얻기위하여 relay 진폭을 결정한다.

단계2 Relay 진폭이 결정되면 원하는 한계 주파수를 추정한다.

$$d |G(j\omega)| = a \quad (14)$$

단계 3 선형보상기(linear compensator, G_I)의 전달함수를 결정한다.

$$\arg G(j\omega) + \arg G_I(j\omega) = -\pi \quad (15)$$

단계 4 loop gain의 gain margin이 2로 되는지 를 확인하고 선형보상기를 수정한다.

4. Simulation Result

4.1 Process model

* A ---> B 1차 비가역 발열반응

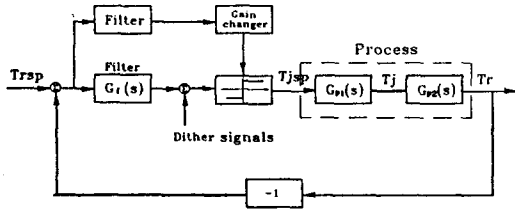


Fig.6 Schematic diagram of SOAS control system

도입된 가정은 다음과 같다.

1. 완전혼합반응
2. Jacket부분은 제어가 잘됨.

1차반응에 의한 반응물의 물질 수지식과 이때 발생하는 반응열은 다음과 같다.

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_0 \exp(-E_a/RT) C_A$$

$$Mr C_r \frac{dT_r}{dt} = UA(T_j - T_r)$$

$$- V \Delta H r k_0 \exp(-E_a/RT) C_A$$

- 여기서, C_A ; 반응물 A의 농도
 K_0 ; 반응속도 상수
 E_a ; 활성화 에너지
 R ; 기체상수
 T_r ; 반응물의 온도
 ΔH_r ; 반응에 의한 엔탈피 변화량
 Mr ; 반응물의 질량
 CPr ; 반응물의 열용량
 U ; 총괄열전달 계수
 A ; 열전달면적

공정이 진동할수 있도록 relay를 도입하고 relay에 의해 한계주파수를 찾고, 교차주파수가 -180° 가 되도록 선형보상기를 설계한다. 공정의 gain margin이 2로 자동적으로 조절될수 있도록 하고, 비선형블럭 gain에 dither신호를 준다. up-logic방법을 이용하여 공정의 gain변화를 주어 공정을 제어한다.

relay에 의해 공정의 동특성이 결정되면 구간에서의 진폭과 주기를 찾고, PID제어기 파라미터를 동조한다.

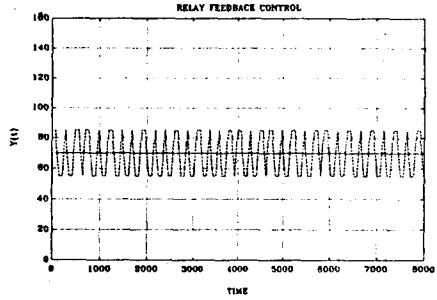
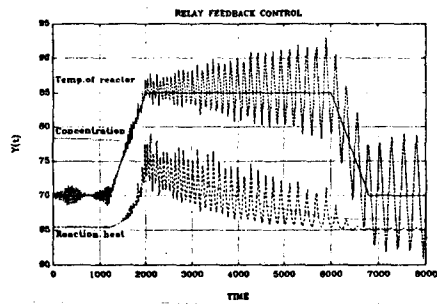


Fig.7 Relay feedback control

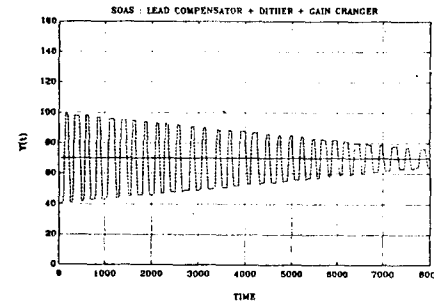
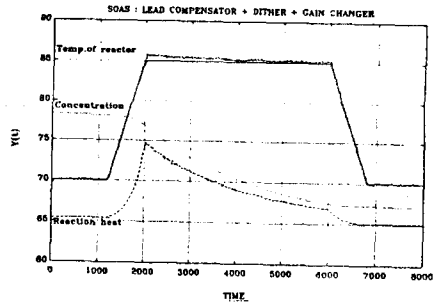


Fig.8 Self oscillating adaptive system

제어기 파라미터

	PART 1	PART 2	PART 3
kc	16.97	5.615	2.5
Ti	22.5	97.5	140.
Td	5.4	23.4	13.6

구간별 평균 진폭과 주기

	PART 1	PART 2	PART 3
Amplitude	0.45	2.9	6.12
Frequency	45	185	280

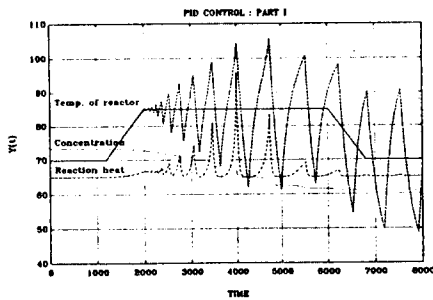


Fig.9 PID control : Part I

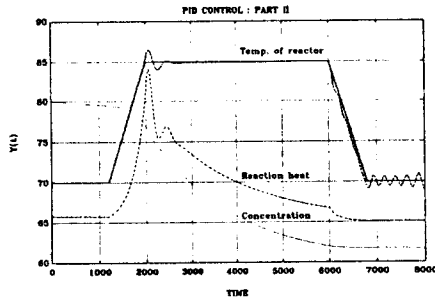


Fig.10 PID control : Part II

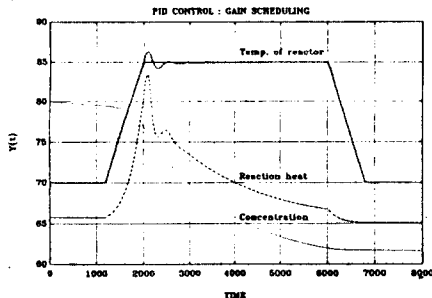


Fig.11 PID control : Gain scheduling

5. 결론

발열과 시간지연을 가진 회분식 반응기에 relay방법으로 제어한 후 각 구간에서의 주기와 주파수를 찾아 PID 제어기로 gain scheduling하여 전산기로 모사하였다. 또한 SOAS방법으로 제어하여 모사하였다.

그 결과 PID 제어기로 gain scheduling방법은 반응기의 발열로 인한 비선형성은 전체 온도 구간에 대해 잘 제어하였다. 또한 SOAS방법은 비선형구조로 인한 진동이 나타나지만, 제어기 파라미터의 동조가 필요하지 않으며, PID제어기

보다 overshoot의 발생이 적고, 잘 제어하는 것을 알 수 있었다.

SOAS방법을 응용하기 위해 noise가 있는 공정과 보다 다양한 모델에 대한 연구가 필요하다.

6. 참고문헌

- Astrom, K J(1979): Theory and applications of adaptive control. *Automania* 19, 471-486
- Astrom, K.J and T. Haggglud(1984a). Automatic tuning of simple regulators. Proc. IFAC 9th World Congress. Budapest.
- Astrom, K.J and T. Haggglud(1984b). Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins *Automania*, 20,645-651
- Schei, T,S(1991) A new method for automatic tuning of PID control parameter, *proc Europ Contr, Conf., Grenoble.*
- Tsympkin, Y,Z(1984) "Relay control systems." Cambridge, U.K. press
- Ziegler, J.G and N.B. Nichols(1943) Process lags in automatic control circuits. *Trans. ASME*, 65, 433-444.