

PBL 반응기에 대한 페루프 인식과 유전자알고리즘을 이용한 튜닝

권태인, 여영구
한양대학교 화학공학과

Closed-loop Identification and GA Tuning of PBL Reactor

Tae-In Kwon, Yeong-Koo Yeo
Department of Chemical Engineering, Hanyang University

서론

근래에 많은 고급제어 기법들이 개발되었음에도 불구하고 PID 제어기는 산업계에서 널리 쓰이고 있다. Batch 반응기와 같은 비선형 공정일지라도 PID 제어기를 cascade 제어구조로 이용하여 제어를 하고 있는 실정이다. 하지만 산업계에서는 batch 를 거듭하여 공정의 동특성이 변하여 제어 성능이 좋지 않더라도 조업 중에 PID 제어기의 tuning parameter 를 거의 고정시켜 놓고 조업을 실시하는 실정이다. 이에 본 연구는 PBL(Poly-butadiene Latex) 반응기에 대해서 조업 데이터를 이용한 closed-loop identification 으로 공정 모델을 근사하고, 이 모델을 이용한 PID 제어기의 최적 tuning parameter 를 GA(Genetic Algorithm)로 구하는 방법에 대하여 연구하였다.

본론

1. PBL reactor

ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)의 원료 물질로 쓰이는 PBL 을 생산하기 위한 반응기의 구조는 Fig. 1 과 같은 batch reactor 이다. 원료 물질을 주입 후 반응을 시키고 이때 발생하는 열을 internal tube 에 냉매(NH₃)을 이용하여 냉각을 시키는 형태이다. 냉각 시에는 internal tube 의 level 을 조절하여 온도를 제어한다. 이 때에 batch 를 거듭하면 internal tube 의 표면 위에 polymer fouling 이 두꺼워 지면서 냉각 효율이 떨어지고 이에 따라 제어 성능이 떨어진다. 매번 45 batch 정도의 후에는 shutdown 하여 수작업으로 polymer fouling 을 없애 주어야 한다. PBL 반응기의 제어구조는 cascade 제어 구조로, master controller 는 setpoint 와 현재 반응기 온도를 비교하여 slave 제어기에 setpoint 를 지시하고, slave controller 는 valve 를 조작을 통해서 internal tube 안의 NH₃ 의 level 을 제어하여 반응기 온도를 제어하는 방식이다.

기존의 현장에서의 제어는 master/slave 제어기의 PID parameter 를 처음 batch 부터 마지막 batch 까지 고정 시키고 제어를 하는 방식이었기 때문에 polymer fouling 이 두꺼워지는 후반부 batch 에서는 온도 제어가 적절히 이루어지지 않아 제품의 spec 을 벗어나게 된다. Figure 2 에서는 cleaning 직후의 조업 결과를 보인 것으로 fouling 이 거의 없기 때문에 제어가 잘되고 있는 것을 보인 것이고, Fig. 3 은 후반 batch 의 조업 결과로 제어가 안되고 있는 것을 볼 수 있다.

2. Closed-loop Identification & Genetic tuning of PID controller

본 연구에 closed-loop identification 방법을 적용시킨 이유는 공정 모델을 얻으려는 목적으로 open-loop test 를 실시하기 위해 조업을 중단하지 않고, 기존의 조업 데이터를 그대로 이용하여 근사된 모델을 얻을 수 있다는 장점과, batch 반응기의 경우에는 조업을 하면서 반응기의 동특성이 변화하기 때문에 반응 시간에 따른 open-loop test 를 하기 어렵고, batch 마다 polymer fouling 이 지속적으로 쌓이기 때문에 각 batch 마다 open-loop test 를 할 수 없기 때문이다.

본 연구에서 사용한 인식 방법은 Ljung, McKelvey[1]이 연구한 closed-loop subspace identification 방법이다. 이는 기존의 N4SID 를 개량한 것으로 공정입력과 공정 noise 사이의 correlation 를 없앤

후에 선형상태공간 모델을 인식하는 방법이다. 선형 시스템 인식방법을 batch 반응기에 적용하기 위해서 반응이 진행되는 동안 개시제 주입 시, 반응물 온도 변화 시, setpoint profile 의 변화 시 등에 따라 구간을 현장 조업자의 조언을 바탕으로 나누어 각 구간 내에서 선형모델로 가정을 하여 closed-loop identification 을 실시하였다. 일반적인 상태공간 모델은 상태(state)의 초기값을 크기가 n 차인 zero vector 를 사용하지만 본 연구에서는 closed-loop subspace identification 으로 얻은 각 구간의 상태공간 모델이 연속해서 있기 때문에 구간이 변할 때의 초기 상태 값을 입력해 주어야 연속된 그래프를 얻을 수 있다.

위에서 계산한 각 구간의 상태공간 모델을 closed-loop 상태에서 검증하기 위해 PID 제어를 설치하였다. 현장에서 사용중인 제어기는 Fuji DCS PID 제어기로 조업 매뉴얼 상의 식은 다음과 같다.

$$E(k) = Y(k) - Set(k)$$

$$MV(k) = \frac{1}{P} \left[E(k) - E(k-1) + \frac{dT}{I} E(k) + \frac{D}{dT} \{Y(k) + Y(k-2) - 2Y(k-1)\} \right] \quad (1)$$

각 구간의 상태공간 모델과 Eq. (1)의 Fuji DCS PID(현장에서 사용중인 PID 제어기의 tuning 값을 적용, master 제어기: P=5%, I=1300sec, D=0.2sec, slave 제어기: P=200%, I=3sec, D=0.6sec)이 실제 거동을 잘 근사하고 있는지 확인하기 위해서 closed-loop 상태로 simulation 한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 실제 조업데이터(Fig. 3)와 비교하여 oscillation 이 줄어든 것을 볼 수 있는데 이는 load disturbance 가 simulation 시에는 도입 되지 않아 바로 setpoint 에 수렴하는 것이라 할 수 있을 것이다. 이 결과에서 PBL 반응기의 각 구간에 대한 closed-loop subspace identification 과 PID 제어기의 simulation 이 효과적으로 이루어졌음을 알 수 있다.

최적 PID 값을 계산하기 위해 GA 를 사용하였는데 이는 각 구간 별로 상태공간 모델이 변하기 때문에 공정이 비선형이고, 각 제어기 출력 값은 상한/하한 값으로 제한이 있어 일반적인 사용되는 QP/SQP 와 같은 비선형 최적화 방법을 이용하면 초기값에 따라서 local minimum 에 빠지는 확률이 커지기 때문이다[2]. Cascade 제어에서 slave 제어기는 일반적으로 P/PI 제어기만으로도 제어에 무리가 없기 때문에 본 연구에서는 master 제어기의 tuning 값만을 계산하기로 하였다. GA 최적화 시에 목적함수는 setpoint 와 공정출력 값의 오차 값의 ITAE 가 최소가 되도록 하였고, 제약조건은 아래와 같다(Eq. (2)).

$$\text{Min ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2)$$

$$\text{subject to } K_{c,low} < K_c < K_{c,upper}$$

$$\tau_{i,low} < \tau_i < \tau_{i,upper}$$

$$\tau_{d,low} < \tau_d < \tau_{d,upper}$$

GA 로 35th batch 의 조업데이터로 계산한 공정보 모델을 이용하여 master 제어를 tuning 한 값(P=5.9%, I=3048sec, D=1.1sec)을 적용하여 closed-loop 상태로 simulation 한 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. Figure 4 의 이전 tuning 값을 적용하였을 때와 비교하여, Fig. 5 의 제어결과가 좋게 나온 것을 알 수 있다. 1st, 26th, 35th batch 에 대하여 closed-loop identification 으로 각 batch 별 공정보 모델을 만들고, closed-loop 상태로 master 제어를 GA 로 최적화하여 찾아낸 값을 Table 1 에 나타내었다. 이 결과로 볼 때 각 batch 마다 최적의 tuning 값이 각각 다르다는 것과 이전에 사용하던 tuning 값은 적절하지 못하였다는 것을 알 수 있다. 실제 현장에 최적 tuning 값을 적용한 사례를 다음과 같다.

3. 현장적용사례

11 기의 PBL 반응기 중 RE_B 에 대하여 최적 tuning 값을 적용해 보았다. 최적 tuning 값을 10th batch 에 적용하기 위해서 1st batch 와 26th batch 에서 최적 tuning 값으로 계산한 값의 중간 값을 선택하여 master 제어기에 parameter 값으로 결정하였다(Table 1). Figure 6 은 9th batch 로 기존에 현장에서 사용하던 tuning 값을 적용하여 제어한 결과이고, Fig. 7 은 10th batch 에 대하여 위에서 결정한 tuning 값을 적용하여 제어한 결과이다. 9th batch 의 제어 결과에 비해서 oscillation 이 줄어들었으며, valve 의 움직임이 9th batch 에서 급격하던 것이 안정적으로 되었다는 것을 알 수

있다. Figure 8 은 11th batch 의 조업 결과로 최적 tuning 값이 아니고 이전에 사용하던 tuning 값을 사용하였을 때의 결과를 나타낸 것으로, 9th batch 때와 마찬가지로 oscillation 이 10th batch 에 비해서 커졌으며, valve 의 움직임도 다시 급격해 진 것을 알 수 있다.

결론

본 연구에서는 한 batch 의 구간을 개시제 주입 시, 반응물 온도 변화 시, setpoint profile 의 변화 시 등에 따라 나누고, 각각의 구간 안에서 동특성이 선형 일 것이라 가정하고 각 구간을 closed-loop data 를 이용하여 closed-loop identification 에 의해 선형모델로 계산하였다. 이 각각의 모델들을 연결하여 하나의 batch 에 대한 공정모델로 만들었다. 각 batch 마다 계산한 공정모델을 이용하여 GA 방법으로 최적의 PID tuning 값을 계산하여 제어하는 방법에 대해 연구하였다. Batch 마다 최적 tuning 값을 적용하여 제어하면 기존에 tuning 값을 고정하여 조업했을 때 보다 제어 성능이 좋아진다는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 앞으로의 계획은 현장에서 한 batch 의 조업을 마치고 반응물을 vent 시키고, 원료물질을 충전 시키는 동안 이전 조업자료를 이용하여 closed-loop identification 방법으로 이전 batch 의 공정모델을 계산하고, 이에 따른 최적 tuning 값을 계산 후에 다음 batch 에 적용한다면 기존에 tuning 값을 고정시키고 조업을 했을 때 보다 각각의 batch 에 대한 제어 결과를 향상시킬 수 있을 것이다. 그리고, 기존방법(tuning 값 고정)으로 현장에서 조업했을 때의 반응기 cleaning 으로 인한 손실은 11 기의 반응기가 한기당 연간 5 회 shutdown 하고, 1 회당 30 시간이 요소 되므로 연간 1,650 시간의 손실이 오며, 이를 생산물로 따지면 연간 약 500 톤의 손실이 있다고 한다. internal tube 위에 polymer fouling 이 후반 batch 에 많이 생기더라도 이를 고려한 공정모델을 이용하여 계산한 최적 tuning 값을 적용하여 조업한다면, 기존의 45 번마다의 shutdown 횟수를 크게 줄일 수 있어 생산성 향상에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Ljung, L., McKelvey, T.: Signal Processing, 52, 209 215 (1996).
 [2] Goldber, D. E.: "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Welsley (1989).

Table 1. 현장에 적용된 tuning parameter (master 제어기)

구분	이전 tuning 값	최적 tuning 값: simulation 결과			적용된 tuning 값 10 th batch 에 적용	
		1 st batch	26 th batch	35 th batch		
RE_B	P (%)	5.0	6.5	5.5	5.9	6.0
	I (sec)	1300	3219	3197	3048	3200
	D (sec)	0.2	1.7	0.7	1.1	1.2

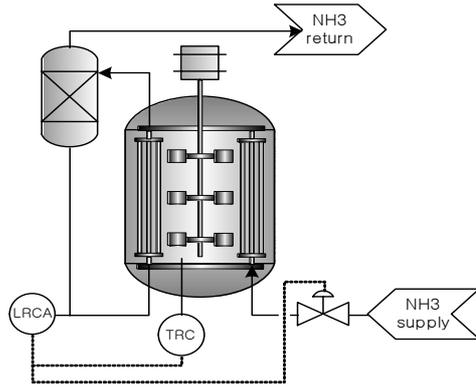


Fig. 1. PBL 반응기 구조

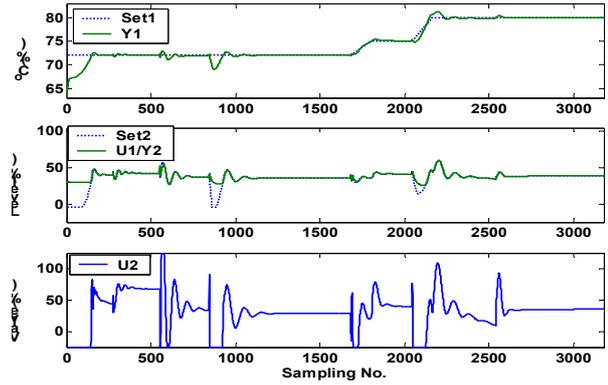


Fig. 5. Genetic tuning

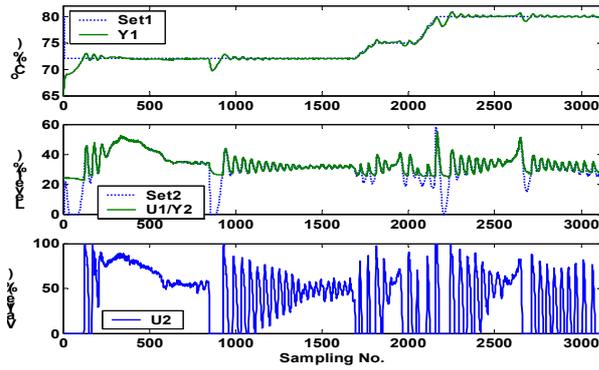


Fig. 2. 1st batch (조업데이터)

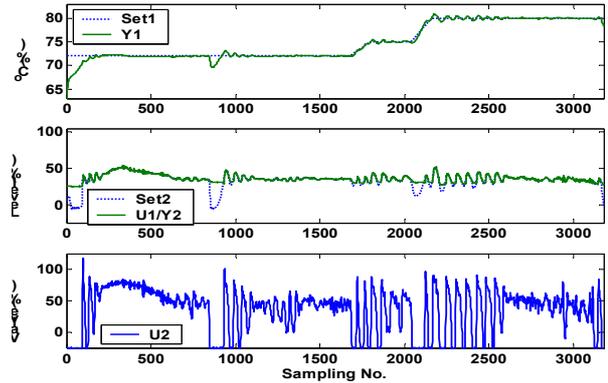


Fig. 6. 9th batch (기존 tuning 값 적용)

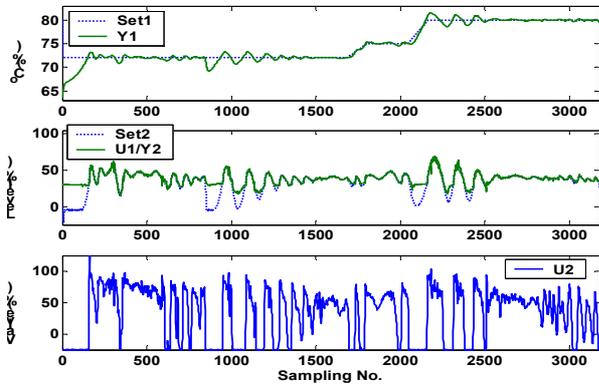


Fig. 3. 45th batch (조업데이터)

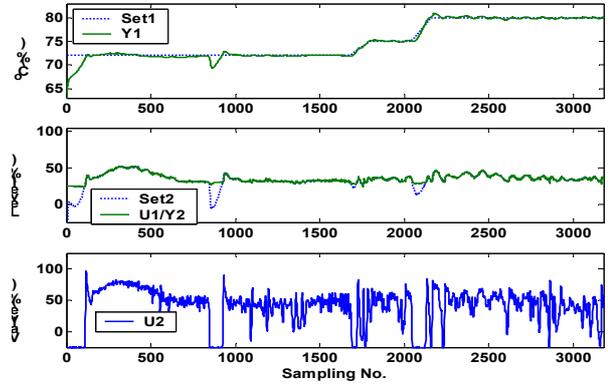


Fig. 7. 10th batch (최적 tuning 값 적용)

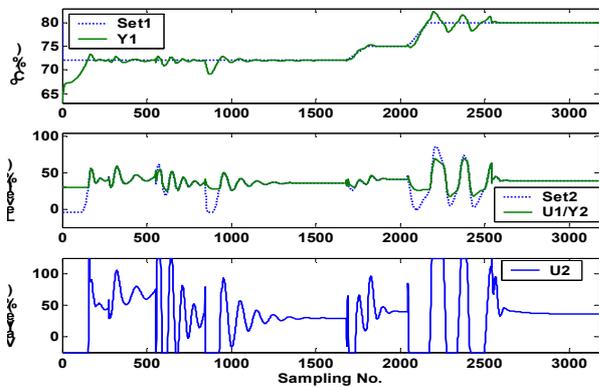


Fig. 4. Closed-loop simulation (35th Batch)

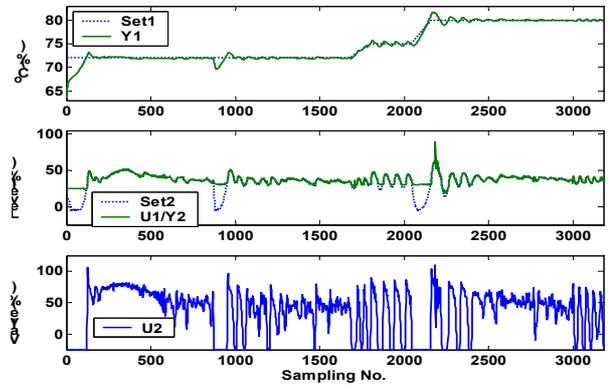


Fig. 8. 11th batch (기존 tuning 값 적용)