

회분식 PMMA 중합 반응기의 온도 제어를 위한 실험 연구

노형준, 정봉균, 이현구
서울대학교 화학공학과

An Experimental Study for the Temperature Control
of a Batch PMMA Polymerization Reactor

Hyong-Jun Rho, Boong-Goon Jeong, Hyun-Ku Rhee
Dept. of Chemical Engineering, Seoul National University

서론

회분식 PMMA 중합 반응기에 대한 온도 제어 실험을 실시하였다. 회분식 중합 반응 공정은 반응열이 많이 발생할 뿐만 아니라 급격한 열전달 효율의 감소로 인하여 비선형성이 심하게 나타난다. 따라서 열발생 속도와 열전달 계수에 대한 정보없이 회분식 중합 공정을 제어하는 데에는 무리가 따른다. 본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 열발생 속도와 열전달 계수를 extended Kalman filter 를 사용하여 실시간으로 추정하였다. 또한 이렇게 추정된 열발생 속도와 열전달 계수를 GLC(Globally Linearizing Control) 알고리즘에 적용하여 모델의 부정확성 및 외란에 견실한 제어를 설계하였다.

이론

1. 에너지 수지

본 연구의 대상이 되는 회분식 반응기 및 자켓의 에너지 수지식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{-\Delta H_p k_p}{\rho V C_{p, mix}} \frac{(MV)(GV)}{V} + \frac{UA}{\rho V C_{p, mix}} (T_j - T) - \frac{\dot{Q}_{loss}}{\rho V C_{p, mix}} \\ &= \frac{\dot{Q}}{W_{mix} C_{p, mix}} + \frac{UA}{W_{mix} C_{p, mix}} (T_j - T) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{F_c}{V_j} (T_j^{in} - T_j^{out}) + \frac{UA}{\rho_w V_j C_{p, w}} (T - T_j) + \frac{U_{\infty} A_{\infty}}{\rho_w V_j C_{p, w}} (T_{\infty} - T_j)$$

여기서 자켓 온도 T_j 는 자켓 입구 온도 T_j^{in} 과 자켓 출구 온도 T_j^{out} 의 산술평균으로 취하였다. 또 T 는 반응 온도, T_{∞} 는 실온을 의미한다. 이 에너지 수지식은 냉각기의 열손실 및 자켓 외부로의 열손실을 고려한 것이다.

2. Extended Kalman filter 의 구현

에너지 수지식을 이산화하여 행렬 형태로 나타내면 식(2)와 같으며 extended Kalman filter 알고리즘은 Table 1.과 같다.

$$f_k = \begin{bmatrix} \frac{2F_c}{V_j} (T_j^{mix} - x_k(1)) + \frac{x_k(3)}{\rho_w V_j C_{p,w}} (x_k(2) - x_k(1)) + \frac{U_\infty A_\infty}{\rho_w V_j C_{p,w}} (T_\infty - x_k(1)) \\ \frac{x_k(4)}{W_{mix} C_{p,mix}} + \frac{x_k(3)}{W_{mix} C_{p,mix}} (x_k(1) - x_k(2)) \\ x_k(3) \\ x_k(4) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$h_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad x_k = [T_j \quad T \quad UA \quad Q]^T, \quad z_k = [T_j \quad T]^T$$

Table 1. Discrete extended Kalman filter equations.

Nonlinear dynamic model:

$$x_k = f(x_{k-1}, k-1) + w_k$$

$$w_k \sim N(0, Q_k)$$

Nonlinear measurement model:

$$z_k = h(x_k, k) + v_k$$

$$v_k \sim N(0, R_k)$$

Nonlinear implementation equations:

$$\hat{x}_k(-) = f(\hat{x}_{k-1}(+), k-1)$$

$$\hat{z}_k = h(\hat{x}_k(-), k)$$

Linear approximation equations:

$$\Phi_{k-1} \equiv \left. \frac{\partial f(x, k-1)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{k-1}(+)}$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k(z_k - \hat{z}_k)$$

$$H_k \equiv \left. \frac{\partial h(x, k)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k(-)}$$

$$P_k(-) = \Phi_{k-1} P_{k-1}(+) \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}$$

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1}$$

$$P_k(+) = [I - K_k H_k] P_k(-)$$

3. Globally linearizing controller 의 구현

GLC 는 계의 모델에 근거하여 계의 비선형성을 소거하는 제어 출력을 낸다. 식(1)을 상태 공간 비선형 모델로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\dot{Q}}{W_{mix} C_{p, mix}} + \frac{UA}{W_{mix} C_{p, mix}}(x_2 - x_1) \\ \frac{UA}{\rho_w V_j C_{p, w}}(x_1 - x_2) + \frac{U_{\infty} A_{\infty}}{\rho_w V_j C_{p, w}}(T_{\infty} - x_2) \end{bmatrix}$$

$$g(x) = [0 \quad 2F_c/V_j]^T, \quad h(x) = x_1 \quad (4)$$

$$x = [x_1 \ x_2]^T = [T \ T_j]^T, \quad u = T_j^{in} - x_2 = T_j^{in} - T_j$$

선형도는 $L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0$ 을 만족하는 최소 정수 r 로 정의되며 $r=2$ 로 구해진다. 따라서 출력을 선형화하는 상태 되먹임은 다음과 같이 구해진다.

$$u = \frac{v - \beta_2 \sum_{i=1}^2 \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_i} f_1(x) - \beta_1 f_1(x) - x_1}{\beta_2 (2F_c \rho V C_{p, mix} / V_j)} \quad (5)$$

여기에서 β_1 및 β_2 는 제어기 조정 매개변수이다.

실험

회분식 고분자 중합 반응계의 개략도를 Fig.1.에 나타내었으며 그 규격은 Table 2.와 같다. Table 3.에는 본 연구의 반응 실험 조건을 나타내었다.

Table 2. Specifications of the polymerization reactor.

TYPE	Batch, Jacketed
VOLUME	2 liter(inner dia. 134 mm, depth 220 mm working volume 1074 ml)
MATERIAL	3 mm, SUS 316
MIXER	4 blades, 45° pitched-turbine type
TEMPERATURE DETECTOR	Pt 100 Ω RTD(reactor, inlet and outlet of jacket)

Table 3. Experimental condition.

MONOMER	MMA, inhibitor removed and distilled
SOLVENT	Ethyleacetate(99%), solvent fraction:0.4
INITIATOR	BPO recrystallized, conc.:5 g/l of feed
CONVERSION	Gravimetry
MOLECULAR WEIGHT	GPC(solvent:THF, standard:PS, detector:RI, temp.:40 °C)

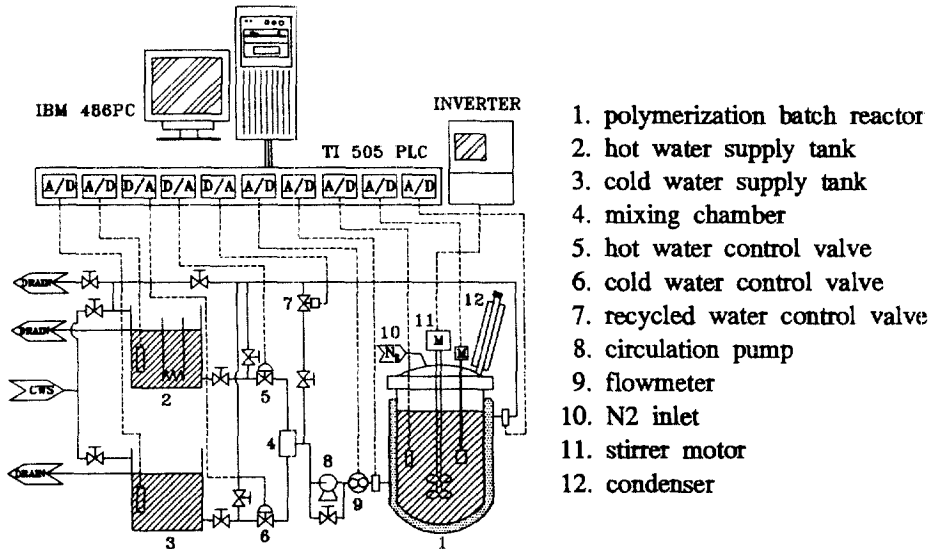


Fig.1. Schematic diagram of the polymerization reaction process.

결과 및 토론

GLC를 도입하여 회분식 PMMA 중합 반응기의 온도 제어 실험을 실시하였다. 그 결과 반응계의 심한 비선형성에도 불구하고 반응 전구간에서 만족할 만한 제어기 성능을 보였다. Kalman filter로 추정된 열발생 속도 및 열전달 계수는 모델과 비교하여 볼 때 합리적인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. C. Kravaris and C.B. Chung, "Nonlinear State Feedback Synthesis by Global Input/Output Linearization," *AICHE J.*, 33, 592(1987).
2. E.A. Collins, J. Bares and F.W. Bares, and F.W. Billmeyer, *Experiments in Polymer Science*, p.333, Wiley, New York(1973).