

쌍일차 모델을 이용한 스팀개질 플랜트의 적응예측제어에 관한 연구

A Study on the Adaptive Predictive Control of Steam-Reforming Plant Using Bilinear Model

°오 세 천, 여 영 구†

한양대학교 화학공학과 (Tel: 290-0488; Fax: 298-1615; E-mail:UHAAS023@hyunv2.hanyang.ac.kr)

Abstracts An adaptive predictive control for steam-reforming plant which consist of a steam-gas reformer and a waste heat steam-boiler was studied by using MIMO bilinear model. The simulation experiments of the process identification were performed by using linear and bilinear models. From the simulation results it was found that the bilinear model represented the dynamic behavior of a steam-reforming plant very well. ARMA model was used in the process identification and the adaptive predictive control. To verify the performance and effectiveness of the adaptive predictive controller proposed in this study the simulation results of steam-reforming plant control based on bilinear model were compared to those of linear model. The simulation results showed that the adaptive predictive controller based on bilinear model provides better performance than those of linear model

Keywords Steam-Reforming Plant, Adaptive Predictive Control, Bilinear Model, Process Identification

1. 서론

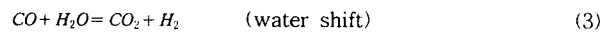
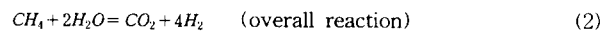
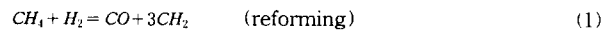
본 연구에서는 스팀개질 반응기와 스팀보일러로 이루어진 스팀개질 플랜트의 제어를 위하여 쌍일차 모델에 근거한 적응예측 제어 방법에 대한 연구를 하였다. 수소를 생산하기 위한 탄화수소 가스의 스팀개질공정은 정유공장 과 암모니아 및 메탄올 공장에서 이용되고 있는 주요 공정이다. 스팀개질 플랜트에서 스팀개질 반응기의 반응생성물의 온도와 전화를 그리고 스팀개질 반응기의 하부공정인 스팀보일러의 액위조절은 공정의 여러 가지 외란 에 의하여 많은 영향을 받으며 이로 인하여 조업조건에 많은 변화를 초래한다. 따라서 이러한 스팀개질 플랜트의 경우 큰 조업조건의 변화를 초래하지 않으며 제어를 수행할 수 있는 적절한 제어방법의 선택이 필요하다.

스팀개질 플랜트는 본질적으로 비선형공정이다. 그러나 대부분의 적응예측제어는 선형모델에 근거하여 개발되었다[1-3]. 쌍일차 모델은 비선형공정의 특성을 선형모델에 비하여 보다 정확히 표현할 수 있는 것으로 알려져 있으며 많은 성공적인 응용사례가 문헌상에 나타나 있다[4-5]. Yeo[5]는 쌍일차 ARMA모델을 이용하여 SISO시스템에 대한 적응예측제어 방법을 개발하였으며 계속되는 연구를 통하여 MIMO시스템에 대한 적응예측제어방법을 개발하였다[6].

그러므로 본 연구에서는 비선형공정의 특성을 보다 정확히 표현할 수 있는 쌍일차 모델을 이용하여 스팀개질 플랜트의 모델 인식 및 적응예측제어에 대한 모사실험을 하였으며 쌍일차 모델에 근거한 적응예측제어 방법의 성능 및 유용성을 확인하기 위하여 선형모델을 이용한 스팀개질 플랜트의 적응예측제어에 대한 모사실험 결과와 비교 평가하였다.

2. 스팀개질공정

그림 1. 은 본 연구의 대상공정인 스팀개질 플랜트의 개략도이다. 스팀개질 반응기에서는 다음과 같은 반응이 일어난다.



본 연구에서는 스팀개질 반응기 모사를 위하여 메탄가스의 전화를 및 반응생성물의 온도에 대한 다음과 같은 식을 사용하였다[7-8].

$$\frac{\partial X}{\partial t} = v \left[\frac{A_1}{379[n_{CH_4}]}, \frac{k_2}{[(H_2)_0 + 1 + S/C_2X]^2} (K_2(1-X)(S/C-X-C_2))^2 - \frac{[(H_2)_0 + 3X + C_2X]^2 (C_2X)^2}{[(H_2)_0 + 1 + S/C + 2X]^2} P^2 \right] - \frac{\partial X}{\partial Z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = v \left[\frac{(-\Delta H_1)}{SC_p} \frac{\partial X}{\partial Z} + \frac{(-\Delta H_3)}{SC_p} (C_2 \frac{\partial X}{\partial Z} - (0.1/Z)T) - \frac{\pi D h (T_i - T) - \partial T}{[n_{CH_4}] SC_p} \frac{\partial T}{\partial Z} \right] \quad (5)$$

여기서 $C_2 = 0.666 - 0.1Z/Z_1$

또한 스팀보일러의 액위변화를 모사하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다[9].

$$d(\rho_L V_L)/dt = (\rho_w - F_w - W) + (V_L/l)(a_1 \Delta F_w + a_2 \Delta Q_H + a_3 \Delta T_F + a_4 \Delta P_0) \quad (6)$$

식(6)의 계수 a_1, a_2, a_3 및 a_4 는 실제의 조업자료로부터 결정되는 값이다.

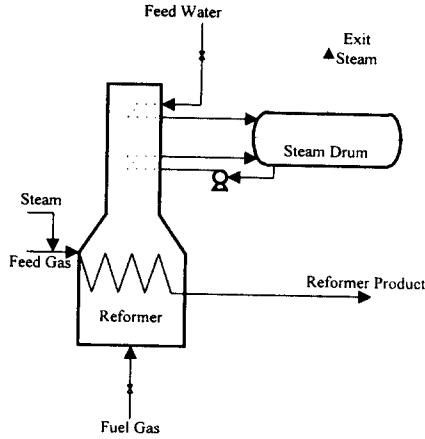


그림 1. 스팀개질 플랜트의 개략도
Fig. 1 Schematic diagram of steam-reforming plant

3. 모델인식

쌍일차 모델은 파라미터 벡터와 독립변수 벡터의 내적으로 표현될 수 있으며 따라서 파라미터 벡터에 대하여 선형모델의 특성을 지니고 있다. 이러한 구조적인 특성으로 인하여 쌍일차 모델의 파라미터 인식에는 선형모델의 파라미터 인식방법을 별다른 수정 없이 직접 적용할 수 있다. Yeo[5]는 기존의 방정식 오차법을 종합하여 쌍일차 모델의 인식에 일반적으로 적용될 수 있는 모델인식 방법을 발표하였다. 본 연구에서는 Yeo[5]가 발표한 다음과 같은 방정식 오차법을 이용하여 쌍일차 모델의 파라미터를 인식하였다. SISO공정은 ARMA모델을 이용하여 다음의 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(k) = p^T x(k-1) + d(k) \quad (7)$$

위에서 p , $x(k-1)$ 및 $d(k)$ 는 각각 파라미터 벡터와 과거의 입력 및 출력자료 벡터 그리고 외란을 나타낸다. 식(7)은 다음과 같은 모델식으로 표현된다.

$$y^*(k) = p^T(k) x(k-1) \quad (8)$$

$$y^*(k-1) = p^T(k-1) x(k-1) \quad (9)$$

공정 출력의 측정값으로부터 파라미터 벡터를 인식하기 위하여 사용된 방정식 오차법은 다음과 같다.

$$p^*(k) = p^*(k-1) + \xi(k-1) x(k-1) e^*(k) \quad (10)$$

$$e^*(k) = y(k) - y^*(k) \quad (11)$$

여기서 상첨자 *는 모델에 관련된 변수를 의미하며, 식(10)에서의 이득 $\xi(k-1)$ 는 식(12)을 이용하여 계산하였다.

$$\xi(k-1) = \begin{cases} \frac{2\lambda(k)[\xi(k)-1]}{\xi(k)\|x(k-1)\|^2 + \theta(k)} & : \xi(k) > 1 \\ 0 & : \xi(k) < 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{여기서 } \xi(k) = \frac{|e^*(k)|}{qD}$$

$$0 < \lambda(k) < 1$$

$$0 < \theta(k) < R_1 < \infty$$

$$1 < q < R_2 < \infty$$

식(12)에서의 D 는 외란의 한계값을 의미하며 q , R 은 상수이다.

4. 제어법칙

4.1 제어법칙의 유도

다변수공정은 식(1)과 같은 ARMA 모델을 이용한 쌍일차 모델로 표현된다.

$$Y^*(k) = \sum_{i=1}^n [A_i^* Y(k-i) + \sum_{j=1}^m B_{ij}^* Y(k-i) u_j(k-i-T) + C_i^* U(k-i-T)] \quad (13)$$

식(13)으로 부터 미래의 예측값 $Y^*(k+1), \dots, Y^*(k+T)$ 는 미래의 입력에 대한 정보를 필요로 하지 않으므로 식(14)으로 표현되는 현재의 모델오차 값을 이용하여 연속대입법으로부터 구할 수 있다.

$$E(k) = Y(k) - Y^*(k) \quad (14)$$

다구간 출력을 예측하여 제어기를 설계할 경우 많은 행렬의 반복계산을 필요로 하게 되므로 해석적인 해를 얻기가 어렵다. 그러므로 단일구간 예측값을 사용하여 제어기를 설계하였다. 제어법칙의 유도를 위한 목적함수는 다음과 같다.

$$J = [Y_d(k+T+1) - Y^*(k+T+1)]^T I [Y_d(k+T+1) - Y^*(k+T+1)] + U^T(k) B U(k) \quad (15)$$

$$\text{여기서 } I = \text{diag}\{\gamma_1^2, \dots, \gamma_n^2\}$$

$$B = \text{diag}\{\beta_1^2, \dots, \beta_m^2\}$$

식(15)의 목적함수를 최소화 시키는 제어입력은 식(16)과 같이 결정된다.

$$U(k) = W [Y_d(k+T+1) - A_1^* Y^*(k+T) - (Y(k) - Y^*(k)) - \sum_{i=2}^n (A_i^* Y^*(k+T+1-i) + \sum_{j=1}^m B_{ij}^* Y^*(k+T+1-i) u_j(k+1-i) + C_i^* U(k+1-i))] \quad (16)$$

$$\text{여기서 } W = [(R + C_1^T)(R + C_1^T) + B]^{-1} (R + C_1^T)^T I$$

$$R = [B_{11}^* Y^*(k+T) \dots B_{1m}^* Y^*(k+T)]$$

4.2 오프셋 보정기

정상상태에서 식(13)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$Y_s^* = \lim_{k \rightarrow \infty} Y^*(k) = A_s^* Y_s + (B_s^* + C_s^*) U_s \quad (19)$$

$$\text{여기서 } A_s^* = \sum_{i=1}^n A_i^*, B_s^* = \sum_{i=1}^n B_i^*, C_s^* = \sum_{i=1}^n C_i^*$$

$$B_i = [B_{i1}^* Y_s \dots B_{im}^* Y_s] ; 1 \leq i \leq n$$

식(19)에서 Y_s 와 U_s 는 각각 정상상태에서의 입력과 출력값이다. 식(16)을 식(19)에 대입하여 정리하면

$$((B_1 + C_1^T)^T I (B_1 + C_1^T) + B) U_s = (B_1 + C_1^T)^T I (Y_{ds} - Y_s) + (B_1 + C_1^T)^T I (B_1 + C_1^T) U_s \quad (20)$$

여기서 $B_1 = [B_{11}^* Y_s \dots B_{1m}^* Y_s]$ 이다. 식(20)로부터 $B=0$ 인 경우 오프셋이 존재하지 않으나 $B=0$ 이 아닌 경우 항상 오프셋이 발생함을 알 수 있다. 그러므로 오프셋을 보정하기 위하여 $K \in R^{m \times n}$ 을 다음과 같이 도입하였다.

$$U(k) = W [K Y_d(k+T+1) - (A_1^* - A_1^* + K A_1^*) Y^*(k+T) - K(Y(k) - Y^*(k)) - \sum_{i=2}^n (A_i^* Y^*(k+T+1-i) + \sum_{j=1}^m B_{ij}^* Y^*(k+T+1-i) u_j(k+1-i) + C_i^* U(k+1-i))] \quad (21)$$

식(21)으로부터 정상상태에서 오프셋이 존재하지 않도록 하는 오프셋보정기 K 는 다음과 같다.

$$K = I + ((B_1 + C_1^T) \Gamma)^{-1} B (B_1^* + C_1^*)^{-1} \quad (22)$$

또한 공정과 모델의 차이로부터 발생할 수 있는 제어의 어려움을 해결하기 위하여 다음과 같은 필터를 사용하였다.

$$U(k) = (1-a)U^*(k) + aU(k-1) \quad (23)$$

여기서 $U^*(k)$ 는 식(21)로부터 구한 필터를 거치지 않은 제어입력이다.

5. 모사실험 및 결과

5.1 모델인식실험 및 결과

모델인식시 모델차수의 증가에 따른 파라미터수의 증가는 파라미터의 수렴을 어렵게 하는 경향이 있다. 그러므로 본 연구에서는 1차 선형 및 쌍일차 모델을 이용하여 모델인식 실험을 하였다. 샘플링 주기는 1분으로 하였으며 본 연구에 사용된 입력 및 출력 벡터, Y, U 는 다음과 같이 구성되어 있다.

$$Y = [T, X, V_L]^T \quad U = [F_G, S/C, F_W]^T$$

위에서 T와 X는 반응생성물의 온도 및 전환율을 각각 나타내며 V_L 은 보일러의 액위, F_G 는 스팀개질 반응기의 주입 연료 가스량, 그리고 S/C와 F_W 는 스팀과 탄화수소가스의 주입비 및 보일러 주입수량을 각각 의미한다. PRBS(pseudo-random binary sequences)에 의하여 변화된 입력값으로부터 식(24), (25)와 같은 모델인식 실험결과를 얻을 수 있었다.

$$\text{선형모델: } A^*(q^{-1})Y^*(k) = B^*(q^{-1})U(k) \quad (24)$$

$$\text{여기서 } A^*(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 1 - 1.008873q^{-1} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1 - 0.976891q^{-1} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1 - 0.992295q^{-1} \end{bmatrix}$$

$$B^*(q^{-1}) = \begin{bmatrix} -0.049170q^{-1} & 0.031913q^{-1} & 0.0 \\ 0.009944q^{-1} & 0.015901q^{-1} & 0.0 \\ 0.0 & -0.316794q^{-1} & 0.115692q^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\text{쌍일차모델: } A^*(q^{-1})Y^*(k) = B^*(q^{-1})U(k) + \sum_{i=1}^{T_{\max}} \Psi^i(q^{-1})[Y^*(k)U(k-i)] \quad (25)$$

$$\text{여기서 } \Psi^i(q^{-1}) = [C^{1i^T}(q^{-1}) \mid C^{2i^T}(q^{-1}) \mid \dots \mid C^{mi^T}(q^{-1})]$$

$$Y^*(k) = \begin{bmatrix} Y(k) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y(k) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y(k) \end{bmatrix}$$

$$A^*(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 1 - 0.99816265q^{-1} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1 - 0.94969740q^{-1} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1 - 0.6834496q^{-1} \end{bmatrix}$$

$$B^*(q^{-1}) = \begin{bmatrix} -8.166964 \times 10^{-10}q^{-1} & 0.06701028q^{-1} & 0.0 \\ 0.01049337q^{-1} & 0.04172844q^{-1} & 0.0 \\ 0.0 & -0.27376072q^{-1} & 0.10479009q^{-1} \end{bmatrix}$$

$$C^{31^T}(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.01471295q^{-1} \end{bmatrix}$$

$$C^{43^T}(q^{-1}) = \begin{bmatrix} -0.01445636q^{-1} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -0.10408222q^{-1} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$C^{23^T}(q^{-1}) = \begin{bmatrix} -0.02874639q^{-1} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.12011115q^{-1} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$C^{35^T}(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.39477536q^{-1} \end{bmatrix}$$

식(25)에서 T_{\max} 는 최대 시간지연 상수를 나타낸다. 그림 2는

Fig. S/C 및 F_W 의 여러 계단변화에 대한 동적응답을 보여주고 있다. 그림 2로부터 선형모델에 비하여 쌍일차모델이 스팀개질 플랜트의 동적거동을 보다 정확히 나타내고 있음을 알 수 있다.

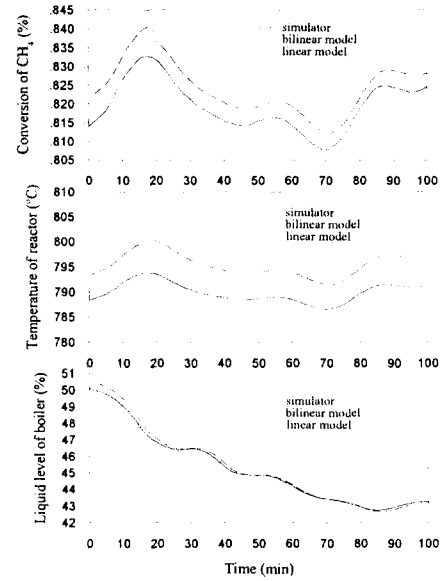


그림 2. 입력변수의 계단변화에 대한 스팀개질 플랜트의 선형 및 쌍일차 모델의 동적거동 비교

Fig. 2. Comparison of dynamic response of linear and bilinear model of steam-reforming plant with parameter estimation for various step changes manipulated variables

5.2 제어실험 및 결과

그림 3은 스팀개질 플랜트에 도입될 수 있는 공정외란의 변화를 나타내고 있다. 그림 3의 공정외란은 실제의 조업자료[7]로부터 얻은 값으로 제어실험시 모사기로 주입된다. 그림 5에 쌍일차 모델을 이용한 적응예측제어기의 스팀개질 플랜트대한 제어결과를 선형모델을 이용한 제어기의 제어결과와 비교하여 나타내었다. 제어실험시 모델의 시간지연 상수로는 스팀개질 플랜트의 시간지연을 충분히 반영할 수 있는 10분을 사용하였으며 모델인식은 매분마다 이루어지는 반면 제어기는 5분마다 작동하도록 하였다. 제어 모사 실험결과로부터 쌍일차 모델을 이용한 적응예측제어기는 공정외란의 주입에도 불구하고 안정적인 제어성능을 보여주었으며 선형모델을 이용한 제어기에 비하여 보다 우수한 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 스팀개질 플랜트에 대한 모델인식 및 제어의 모사실험을 통하여 쌍일차 모델에 근거한 적응예측제어기의 효용성을 검토하였다. 모사실험 결과로부터 선형모델에 비하여 쌍일차 모델이 스팀개질 플랜트의 동특성을 보다 정확히 묘사하

며 또한 쌍일차 모델을 이용한 적응예측제어기의 성능이 선형 모델을 이용한 적응예측제어기에 비하여 보다 우수함을 알 수 있었다.

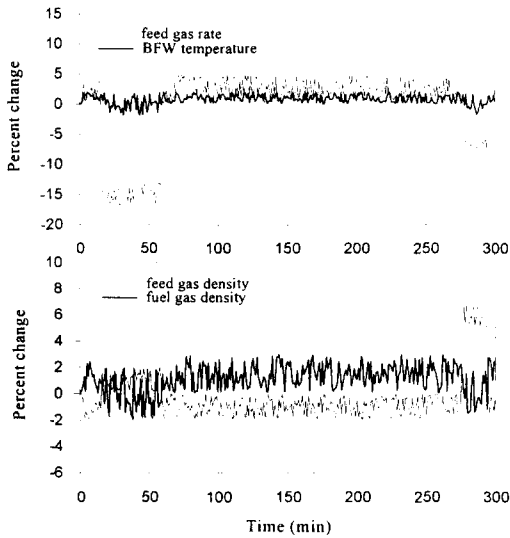


그림 4. 주입가스량, 보일러 주입수 온도, 주입가스 밀도 및 주입연료가스의 밀도변화

Fig. 4 Change of feed gas rate, BFW temperature, feed gas density and fuel gas density

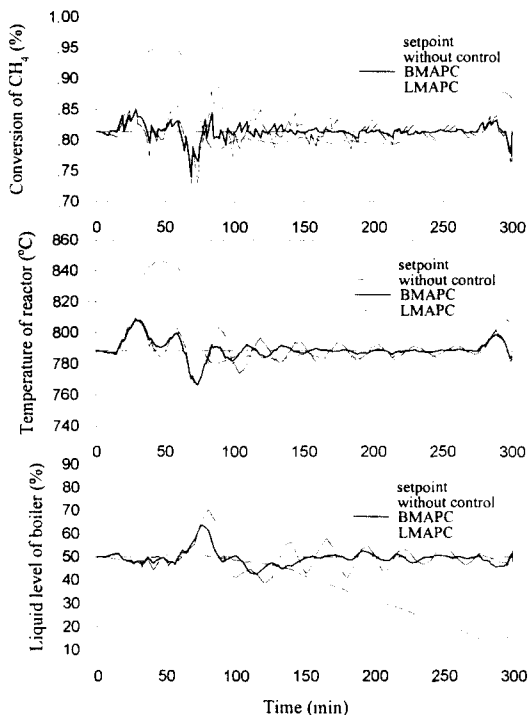


그림 5. 스팀개질 플랜트에 대한 선형 및 쌍일차모델을 이용한 적응예측제어기의 제어결과 비교

Fig. 5 Comparison of performance of linear and bilinear model based adaptive predictive control for steam-reforming plant

감사

본 연구는 한국과학재단지정 우수연구센터인 공정산업의 지능자동화 연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로, 연구비를 지원해 주신 연구센터에 감사드립니다.

참고문헌

1. Clarke, D. W., Mohyadi, C. and Tuffs, P. S., "Generalized Predictive Control-Part I. The Basic Algorithm", *Automatica*, **23**, 137 (1987a).
2. Clarke, D. W., Mohyadi, C. and Tuffs, P. S., "Generalized Predictive Control-Part II. Extensions and Interpretations", *Automatica*, **23**, 139 (1987b).
3. Kouvaritakis, B. and Rossiter, J. A., "Multivariable stable generalized predictive control", *IEE Proceedings-D*, **140**, 364 (1993b).
4. Mohler, R. P. and Kalodziez, W. J., "An Overview of Bilinear System Theory and Applications", *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern., SMC-10* 683 (1980).
5. Yeo Y. K. and Williams D. C., "Adaptive model predictive control for single input-single output bilinear systems with stable inverses", *Chem. Eng. Comm.*, **65**, 79 (1988)
6. Oh S. C and Yeo Y. K., "A study on the adaptive predictive control method for multivariable bilinear processes", *KJChE*, **12**, 472 (1995)
7. Meziou A. M. and Alatiqi I. M., "Identification and Control of an Industrial Steam-Reforming Plant", *The Canadian Journal of Chem. Eng.*, **72**, 321 (1994)
8. Alatiqi I. M. and Meziou A. M., "Dynamic simulation and adaptive control of an industrial steam gas reformer", *Computer chem. Engng.*, **15**, 147 (1991)
9. Alatiqi I. M. and Meziou A. M., "Simulation and parameter scheduling operation of waste heat steam-boilers", *Computer chem. Engng.*, **16**, 51 (1992)