

지종교체 공정의 Bilinear 모델 예측제어

추연욱 · 여영구[†] · 강홍*¹

(2004년 10월 22일 접수: 2005년 1월 26일 채택)

Bilinear Model Predictive Control for Grade Change Operations in Paper Mills

Yeon-Uk Choo, Yeong-Koo Yeo[†], and Hong Kang*¹

(Received on October 22, 2004: Accepted on January 26, 2005)

ABSTRACT

The grade change operations in paper mills exhibit inherent nonlinear dynamic characteristics. For this reason, the conventional model predictive control techniques based on linear process models are not adequate for the grade change operations. In this paper, a bilinear model for the nonlinear grade change processes was presented first and optimal input variables were calculated by using one-step-ahead predictive control method. Numerical simulations showed that the control performance lied within acceptable range and that the bilinear model predictive control scheme was highly promising control strategy for the grade change operations.

Keywords : grade change, bilinear systems, one-step-ahead predictive control

1. 서론

제지공정은 공정의 입력과 출력이 다수인 복잡한 비선형 다변수 공정이다. 일반적인 화학공장과 마찬가지로 제지공정도 대부분 feedback 제어에 의하여 운전된다. 그러나 시간지연이 존재하고 변수들간에 강한 상호 간섭관계가 있기 때문에 지종

교체 시에는 효율적인 제어가 어려워서 숙련된 운전자에 의한 수동 제어에 의존하고 있다. 지종교체 공정의 효율적인 자동제어를 위해서는 공정을 정확히 표현하는 모델의 확보가 필수적이다.

지종교체에서 중요한 제어변수는 평량, 회분함량, 수분함량의 세 가지이며, 조절변수로서 stock flow, filler flow, 수증기 압력, speed의 네 가지가

• 본 연구는 한국생산기술연구원의 청정생산기술사업의 지원에 의해 수행되었음.
• Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
*1 J. J. Engineering, Seoul 143-200, Korea
[†] 주저자(Corresponding author): E-mail: ykyeo@hanyang.ac.kr

output에 영향을 미치는 주요 입력변수로 간주된다. 지중교체 운전에서 있어서는 Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 DCS에서 네 가지 조절변수를 조절하여 QCS에서 측정되는 평량, 회분함량, 그리고 수분함량을 조절한다.

화학공정이나 자연현상에 대한 수학적인 모델은 동특성에 관련하여 대개 미분 방정식이나 연립 미분 방정식의 형태로 구성되며 물리적 혹은 화학적인 현상에 따라 미분 방정식의 차수나 규모가 달라진다. 따라서 나타내고자 하는 현상이 복잡할수록 수학적 모델의 형태는 보다 복잡하게 되며 복잡한 모델식일수록 실제 산업현장에 응용하기 위해서는 여러 가지 제약을 받게 된다.

근래 들어 비선형 특성을 나타내기 위한 모델로서 bilinear 모델이 널리 연구되고 있다. Bilinear 모델은 입력 변수와 출력 변수에 대해서는 비선형적이거나 그 구조적 특성은 선형모델의 경우와 유사하다. 특히 입력의 이차항을 제거함으로써 여타의 비선형 모델에 비하여 수학적 조작성이 간편하면서도 비선형 특성을 잘 표현할 수 있는 장점을 지니고 있다. 특히 제지공정과 같이 비선형적인 공정에서는 선형모델을 이용하는 것보다 공정을 명확하게 표현할 수 있다. 이러한 bilinear 모델과 관련하여 Ruberti¹⁾와 Mohler²⁾는 다양한 적용사례 및 유용성을 정리 요약하였다.

Bilinear 모델은 선형모델과 마찬가지로 상태공간(state-space), 다항식(polynomial), 그리고 parametric의 세가지 형태로 분류할 수 있다. 다항식 모델과 parametric 모델은 모델 인식 알고리즘을 이용한 적응제어 방법의 유도에 주로 이용되며 이들 사이에 상호 변환이 가능하다. 상태공간 모델은 특수한 경우에 한하여 등가의 다항식, 혹은 parametric 모델로의 변환이 가능하다. 본 연구에서는 적응제어 방법에 주로 이용되는 parameter형 bilinear 모델을 이용하였다.^{3,4)}

Bilinear 모델을 이용한 제어법칙은 비선형적인 공정을 효과적으로 제어하기 위한 방법으로 사용되는 비선형 모델예측제어 중에서 가장 간단하고 효과적인 방법이다. 특히 화학공장에서 흔히 조작변수로 사용되는 유량 및 열량이 생성물과 반응물의 물질수지와 에너지 수지식에 포함되어 공정의 제어 변수인 온도 및 농도의 함수로 쉽게 표기됨으로써 전형적인 bilinear 모델임을 알 수 있다. 선형모델과 달리 비선형 모델이 예측제어에 이용되는 경우 다 구간 이후의 출력을 예측하는 것은 비선형 모델의 특성상 매우 어렵다. 따라서 비선형 모델을 대상으로 하는 예측제어 방법은 대부분이 단일 구간 예측자를 이용한 출력 예측치만을 목적함수의 계산에 이용한다.⁵⁾

2. 최소자승법을 이용한 bilinear 모델링

제지공정의 모델을 구하는데 있어서 본 연구에서 사용하는 bilinear 모델은 다음과 같은 형태라고 가정하고 이 모델의 parameter를 최소자승법(Least-squares(LS) method)을 이용하여 인식하였다.

$$\begin{aligned}
 y(k) = & a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \dots + a_n y(k-n) \\
 & + b_1 u(k-\tau-1) + b_2 u(k-\tau-1) + \dots + b_n u(k-\tau-n) \\
 & + c_1 y(k-1)u(k-\tau-1) + \dots + c_n y(k-n)u(k-\tau-n)
 \end{aligned}
 \quad [1]$$

여기에서 y 는 공정의 출력이고, u 는 공정입력

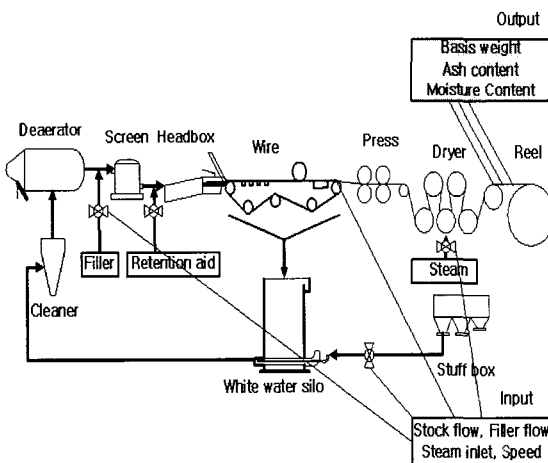


Fig. 1. Schematic diagram of paper machine.

이며, a, b, c 는 공정모델의 계수, n 과 τ 는 각각 공정의 차수와 시간지연을 나타낸다.

위의 모델식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$y(k) = \phi^T \theta \tag{2}$$

위에서 ϕ 와 θ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = [a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, c_n]^T \tag{3}$$

$$\theta = [y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-\tau-1), \dots, u(k-\tau-n), y(k-1)u(k-\tau-1), \dots, y(k-n)u(k-\tau-n)]^T \tag{4}$$

θ 는 regression vector, ϕ 는 adjustable parameter를 나타낸다.

공정의 차수가 2차이고 시간지연 τ 이 0인 경우에는

$$\phi = [a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2]^T \tag{5}$$

$$\theta = [y(k-1), y(k-2), u(k-1), u(k-2), y(k-1)u(k-1), y(k-2)u(k-2)]^T \tag{6}$$

로 된다.

LS 방법의 목적은 bilinear parameter $a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, c_n$ 을 조절하여 측정된 공정 output과 예측된 공정 output의 오차를 최소화하는 것으로서 목적함수를 다음과 같이 정의하였다.⁶⁾

$$\min \{V(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y(t) - \hat{y}(t))^2\} \tag{7}$$

위에서

$$\hat{y}(t) = \phi^T \theta \tag{8}$$

N 은 데이터 수를 나타낸다.

3. Bilinear 모델을 이용한 예측 제어

공정의 bilinear 모델을 2차 항으로 나타내면 다음과 같다. 여기에서 시간지연 τ 는 이미 알고 있다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} y(t+\tau) &= a_1 y(t+\tau) + a_2 y(t+\tau-1) \\ &\quad + b_1 u(t) + b_2 u(t-1) \\ &\quad + c_{11} y_1(t+\tau)u(t) + c_{12} y_2(t+\tau)u(t) + c_{13} y_3(t+\tau)u(t) \\ &\quad + c_{21} y_1(t+\tau-1)u(t-1) + c_{22} y_2(t+\tau-1)u(t-1) + c_{23} y_3(t+\tau-1)u(t-1) \\ &= Q + Hx u(t) \end{aligned} \tag{9}$$

이때, y_1, y_2, y_3, \dots 는 각각 벡터 y 의 원소들이며 Q 와 H 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Q &= [a_1 y(t+\tau) + a_2 y(t+\tau-1) + b_2 u(t-1) + c_{21} y_1(t+\tau-1)u(t-1) \\ &\quad + c_{22} y_2(t+\tau-1)u(t-1) + c_{23} y_3(t+\tau-1)u(t-1)] \end{aligned} \tag{10}$$

$$H = [b_1 + c_{11} y_1(t+\tau) + c_{12} y_2(t+\tau) + c_{13} y_3(t+\tau)] \tag{11}$$

제어에 있어서 목적함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J = [y_d(t+\tau+1) + y(t+\tau+1)]^T R [y_d(t+\tau+1) + y(t+\tau+1)] + u^T(t) W u(t) \tag{12}$$

식 [12]의 최적 해는 다음 식 [13]의 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{dJ}{du(t)} = 0 \quad [13]$$

이로부터

$$-2H^T R[y_d(t+\tau+1) - Q] + 2H^T R H u(t) + 2W u(t) = 0 \quad [14]$$

식 [14]로부터 다음과 같은 최적의 입력값을 얻는다.

$$u(t) = [H^T R H + W]^{-1} H^T R [y_d(t+\tau+1) - Q] \quad [15]$$

y_d 는 이상적인 output trajectory를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 지중교체시의 input 데이터를 연결시켜 나타낸 그래프이고 Fig. 3은 지중교체시의 output 데이터를 연결시킨 그래프이다.

Fig. 4는 58→72→51→63→72 g/m²으로 지중이 변화할 때 simulation 데이터와 operation 데이터를 비교한 것이며 Fig. 5는 72→76→51→47→51 g/m²으로 지중이 변화할 때의 output 데이터와 실

제 운전에서 이용된 input 데이터를 bilinear 모델에 적용하여 얻은 simulation 데이터를 보인 것이다. Fig. 4와 5로부터 bilinear 모델로부터 계산된 output은 실제 지중교체 공정의 운전으로부터 얻은 output과 거의 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 61→52g/m²로 지중이 변화할 때의 최적 입력값에 대한 simulation 결과와 operation 데이터를 비교한 결과이다.

지중교체 운전에서 가장 중요한 output 변수는 평량이다. 실제 지중교체 운전에서는 측정되는 평량값이 보이는 교란이 지중교체 전과 후의 평량 차이의 10% 이내로 줄어든다면 지중교체가 이루어진 것으로 간주한다. 수분함량과 ash 함량의 측정값은 측정 센서의 정확도에 따라 실제 값과는 다르게 상당한 교란을 보이기도 한다. 평량이 원하는 수준에 도달하기만 하면 수분 함량이나 ash 함량이 보이는 약간의 변동이나 진동현상은 보통 무시한다. 그러나 평량의 측정값이 진동이나 어떤 교란을 보인다면 이는 곧 제품의 품질이 균일하게 유지되지 못하고 있음을 의미하는 것으로서 품질관리에 심각한 문제가 야기된다.

진동이나 교란을 억제하여 주지 못한다면 진동이나 교란의 진폭이 증가하게 되어 궁극적으로는 지중교체 공정 자체가 불안정하게 된다. 현재 널리

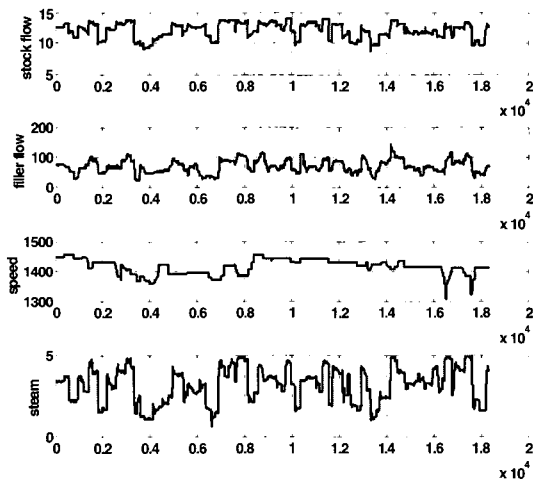


Fig. 2. 지중교체 운전 시의 input trend.

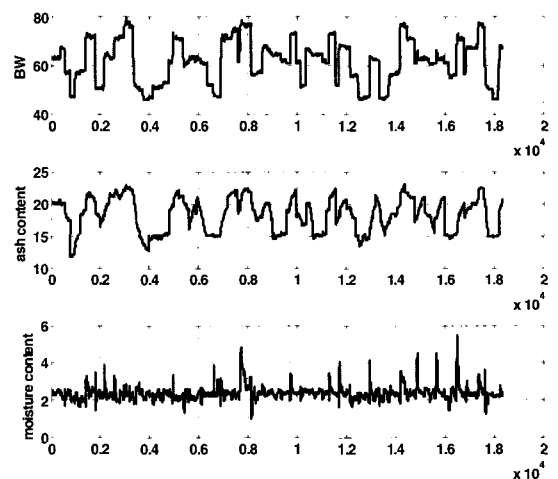


Fig. 3. 지중교체 운전 시의 output trend.

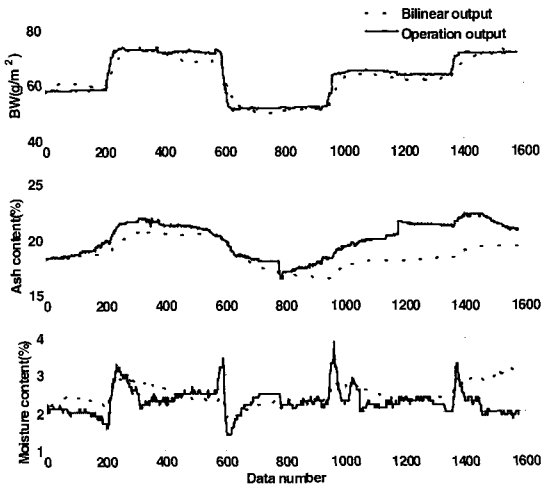


Fig. 4. Validation (58→72→51→63→72g/m²).

사용되고 있는 PID 제어기로는 진동이나 교란을 억제시키는 데에 많은 시간이 소요되는데 이는 곧 지중교체 시간이 길어짐을 의미하며 운전의 경제성이 저하되는 결과를 초래한다. 이러한 PID 제어방법의 한계는 기본적으로 PID 제어방법이 feedback 제어에 의존하고 있기 때문이다.

Feedback 제어가 보이는 위와 같은 한계성은 공정의 모델을 이용한 예측제어 기법의 도입에 의하여 극복될 수 있다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 bilinear 모델예측 제어기법의 적용에 의하여 실제 운전에서 나타나는 수분 및 ash 함량의 진동현상이 억제되고 있다. 이는 곧 bilinear 모델예측 제어에 의하여 진동현상으로 초래될 수 있는 지중교체 운전의 불안정한 현상을 방지할 수 있는 안정적 운전이 제공될 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 parametric 비선형 bilinear 모델을 이용하여 제지공장에서 지중교체 공정에 대한 모델을 구하였다. 모델 변수로서 4 개의 input (stock flow, filler flow, 수증기 압력, speed)과 3 개의 output(평량, ash content, 수분함량)을 취하였다.

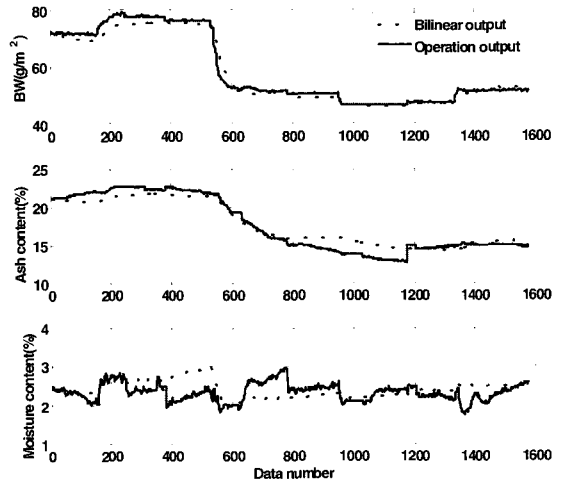


Fig. 5. Validation (72→76→51→47→51 g/m²).

수치모사 결과 bilinear 모델을 이용한 다중입력 다중출력(MIMO) 모델은 비선형 지중교체 공정을 잘 나타내어 줌을 알 수 있었다. 수학적으로 해석이 용이한 parametric bilinear 모델을 이용하여 one-step-ahead 예측제어방법을 구성하고 이를 지중교체 공정에 적용하였다. 여기에서 제안한 지중교체 공정의 bilinear 모델의 특징은 Fig. 4 및

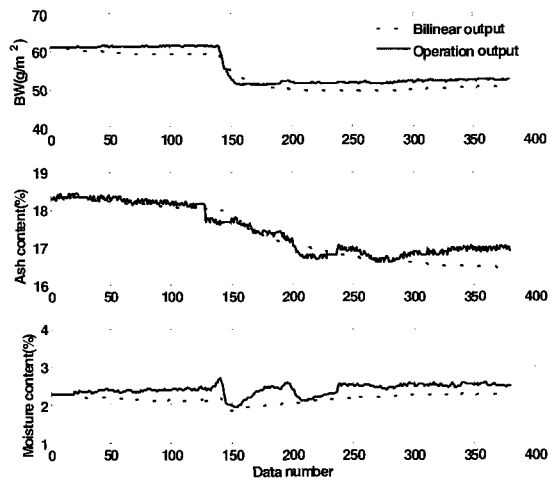


Fig. 6. Bilinear 모델예측 제어성능의 비교 (61→52 g/m²).

5에 보인 바와 같이 실제 지중교체 공정을 잘 나타내어 준다는 것과 Fig. 6에 보인 바와 같이 지중교체 운전시 output 변수들이 보이는 진동이나 교란 현상을 억제하여 준다는 점이다. 비록 지중교체 시간의 단축 효과는 두드러지게 나타나지 않았지만 bilinear 모델예측 제어에 의한 output 변수들에서의 진동의 억제는 기존의 feedback PID 제어로부터 비롯될 수 있는 교란현상의 방치에 따른 불안정한 조업을 사전에 예방하여 준다는 점에서 기존의 제어방법에 비해 우수한 성능을 지니고 있다.

인용문헌

1. Ruberti, A., A. Isidori, and P. D'Alessandro, Theory of Bilinear Dynamical Systems, Springer-Verlag, (1972).
2. Mohler, R. R., Bilinear Control Process, Academic Press, New York, (1973).
3. De La Sen, M.: "A model reference adaptive control system for discrete multivariable bilinear systems with interconnected subsystems", Proc. IEE, 133 D: 165 (1986).
4. Yeo, Y.K., Kwon, T.I. and Kim, K.S.: "Experimental Evaluation of Bilinear Model Predictive Control for pH Neutralization Processes", Journal of Chemical Engineering of Japan, 22(2): 285 (2000).
5. Jianbin Hao, Shaohua Tan and Joos Vandewalle: "One Step Ahead Predictive Control of Nonlinear Systems by Neural Networks", International Joint Conference on Neural Networks, (1993).
6. Oh, S.C. and Yeo, Y.K.: "An Adaptive Model Predictive Control Method Using Multivariable Bilinear Model", Journal of Chemical Engineering of Japan, 31(5): 828 (1998).0