

지종교체 공정의 Bilinear 모델링

Bilinear Modeling of Grade Change Operation in Paper Mills

추연욱¹⁾ · 여영구¹⁾ · 강홍²⁾

1) 한양대학교 화학공학과, 2) j-j컨설팅

ABSTRACT

The paper making process itself is a typical nonlinear process with complicated dynamics. In the application of advanced control-methods especially for the grade change operations the nonlinear process is linearized to give suitable linear models to be used in the control strategies. However, the use of the linear model is limited within short range containing steady-state operating conditions for grade change operation.

In this paper a bilinear model for the nonlinear grade change processes is presented. We can see that the dynamic behavior for grade change operations can be effectively analyzed by using multivariable bilinear model.

Key words: Bilinear system, Grade change, Dynamic model, MIMO system

1. 서론

현재까지 제지공장의 지종교체 제어는 숙련된 작업자에 의한 수동 제어를 하고 있다. 제지공장은 평균적으로 1일 동안 3~4회의 지종교체를 실시하며, 지종교체를 하는 데

는 20~60분 정도가 소요된다. 이때 생산된 종이는 모두 파지르써 지중교체 시간이 길 수록 경제적으로 많은 손실이 발생한다. 이러한 지중교체의 효율적인 제어를 위해서는 공정을 정확히 표현하는 모델이 필수적이다.

지중교체에는 furnish changes와 color changes등 여러 가지 경우가 있지만, 여기에서는 Basis weight, Ash percentage change, Moisture content 변화만을 고려하였다. 조절변수로서 Stock flow, Filler flow, Steam pressure, Speed등 네 변수를 선택하였다. 실제 운전에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 DCS에서 Stock flow, Filler flow, Steam pressure, Speed를 조절하여 QCS에서 측정되는 Basis weight, Ash content, Moisture content를 조절한다.

현재까지 예측제어의 이론과 적용에는 선형 모델을 이용하는 것이 일반적이었다. 선형 모델을 이용한 제어기는 유도가 쉽고 사용이 편리하며, 비선형 모델에 비해 추정해야 할 parameter의 수가 현저히 적기 때문에 계산상의 문제점을 사전에 방지할 수 있다. 이러한 선형 모델의 장점에도 불구하고 제어의 대상이 되는 공정이 비선형일 경우 비선형성을 표현할 수 있는 비선형 모델이 존재한다면 선형 모델을 이용하는 것보다 우월한 제어성능을 보일 것이다.

Bilinear 모델은 입력의 이차항을 비선형 모델로부터 제거함으로써 다른 비선형 모델과 달리 수학적 조작이 간편하고 비선형 공정의 특성을 정확하게 표현할 수 있는 장점이 있다. 특히 제지공정과 같은 비선형 공정에서는 선형모델을 이용하는 것보다 공정을 명확하게 표현 할 수 있다. 이러한 bilinear 모델과 관련하여 Ruberti¹⁾와 Mohler²⁾는 다양한 적용사례 및 유용성을 정리 요약하였다.

Bilinear 모델과 선형 모델은 비슷한 구조를 갖는다. 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 이용된다. 다항식 모델과 parametric 모델은 상호 변환이 가능하며 상태공간 모델은 특수한 경우에 한하여 등가의 다항식 혹은 parametric 모델로의 변환이 가능하다. 본 연구에서는 적응제어 방법에 주로 이용되는 parameter

형 bilinear 모델을 이용하였다.³⁾

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 물질 수지와 에너지 수지식에 포함되어 공정의 제어변수인 온도 및 농도의 함수로 쉽게 표기됨으로서 전형적인 bilinear 모델임을 알 수 있다.⁴⁾

2 최소 자승법 (least square, LS)을 이용한 bilinear 모델링

제지 공정의 모델을 구하는데 있어서 본 연구에서 사용하는 bilinear 모델은 다음과 같이 표현된다. 이 모델의 parameter는 least square 방법을 이용하여 인식하였다.

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

여기에서 y 는 공정의 출력이고, u 는 공정입력이며, a, b, c 는 공정모델의 계수, n 과 τ 는 각각 공정의 차수와 시간지연을 나타낸다. 공정에 도입되는 교란 w 는 일정한 상수보다 작은 값으로서 랜덤하게 입력된다.

공정을 나타내는 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

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

위에서 ϕ 와 θ 는 다음과 같이 정의된다.

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

$$\begin{aligned}\theta = & [y(k-1), \dots, y(k-n), \\ & u(k-\tau-1), \dots, u(k-\tau-n), \\ & y(k-1)u(k-\tau-1), \dots, y(k-n)u(k-\tau-n)]^T\end{aligned}\quad [4]$$

공정의 차수 n 을 2차로 두고 시간지연 τ 가 없다고 가정하면

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

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

로 둘 수 있다. 교란 w 는 output값의 1%내에서 bound 된 값이라고 가정한다.

LS방법의 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.

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

위에서 $\hat{y}(t) = \phi^T \theta + w(k)$, N 은 데이터 수를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 지중교체시의 input 데이터를 연결시킨 그래프이고 Fig. 4는 지중교체시의 output 데이터를 연결시킨 그래프이다.

Fig. 5은 47→57→72→51→64g/m³로 지중이 변화할 때 simulation 데이터와 operation 데이터를 비교한 것이고, Fig. 6는 52→68→56→47→63 g/m³로 지중이 변화할 때의 output 데이터와 simulation 데이터를 validation 시킨 그림이다. 또한 Fig. 7와 8은 63→71→78→51→47→51g/m³과 63→61→56→71g/m³으로 지중이 변화하

는 데이터에 대해 validation 시킨 그림이다. Fig. 5, 6, 7, 8로 볼 때 bilinear 모델로부터 계산된 결과는 실제 공장의 output과 거의 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 실제 공장의 여러 가지 다른 데이터를 이용하여 validation을 수행하여도 마찬가지로 일치하는 경향을 볼 수 있다.

LS로 구한 식(5)의 parameter값은 다음과 같다.

$$a1 = \begin{bmatrix} 0.85413 & 0.4876 & 0.15187 \\ 0.1505 & 0.50455 & -0.034674 \\ 0.02596 & -0.0029165 & 0.33769 \end{bmatrix}$$

$$b1 = \begin{bmatrix} 0.14296 & 0.016245 & 0.00074652 & 0.045453 \\ -0.025498 & 0.0001838 & 0.0001863 & 0.10369 \\ -0.024453 & 0.0011781 & 0.00035296 & -0.0044426 \end{bmatrix}$$

$$c1 = \begin{bmatrix} 0.0017443 & 4.6167e-005 & 2.2278e-005 & -0.00083869 \\ 0.0024515 & 5.9887e-005 & -0.00012068 & -0.0053203 \\ -0.001188 & 3.7265e-005 & -1.6634e-005 & 0.0014425 \end{bmatrix}$$

$$c2 = \begin{bmatrix} 0.014321 & -0.00076042 & -0.000376 & -0.0023454 \\ -0.0055314 & -0.00019283 & 0.00037502 & 0.012187 \\ 0.0040859 & -7.6452e-005 & -1.6704e-005 & -0.0046998 \end{bmatrix}$$

$$c3 = \begin{bmatrix} -0.057992 & -0.0012283 & 0.00037595 & 0.086251 \\ -0.00496 & 0.00024122 & 5.9085e-005 & 0.0028995 \\ 0.025365 & -0.00081501 & 0.00029228 & -0.004228 \end{bmatrix}$$

4. 결론

본 연구에서는 parametric 비선형 Bilinear 모델을 이용하여 제지공장에서 지중교체 공정을 모델링 하였고 모델 변수로는 input(Stock flow, Filler flow, Steam pressure, Speed) 4개와 output(Basis weight, Ash content, Moisture content) 3개로 설정하였다.

본 연구를 통하여 bilinear 모델을 이용한 다중입력 다중출력(MIMO) 모델링이 비선형적인 제지공정에 적합함을 알 수 있었으며 수학적으로 해석이 용이한 parametric bilinear 모델을 이용하여 향후 예측제어기 설계에도 도움이 될 것이다.

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. Mohler, R., Natural bilinear control process, IEEE trans, Syst. Sci. Cybern., SSC-6, 192(1970)

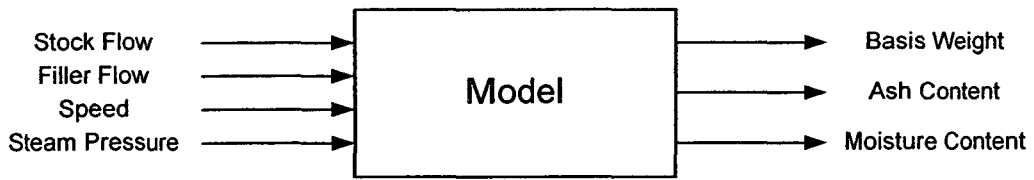


Fig. 1. Input / Output variables

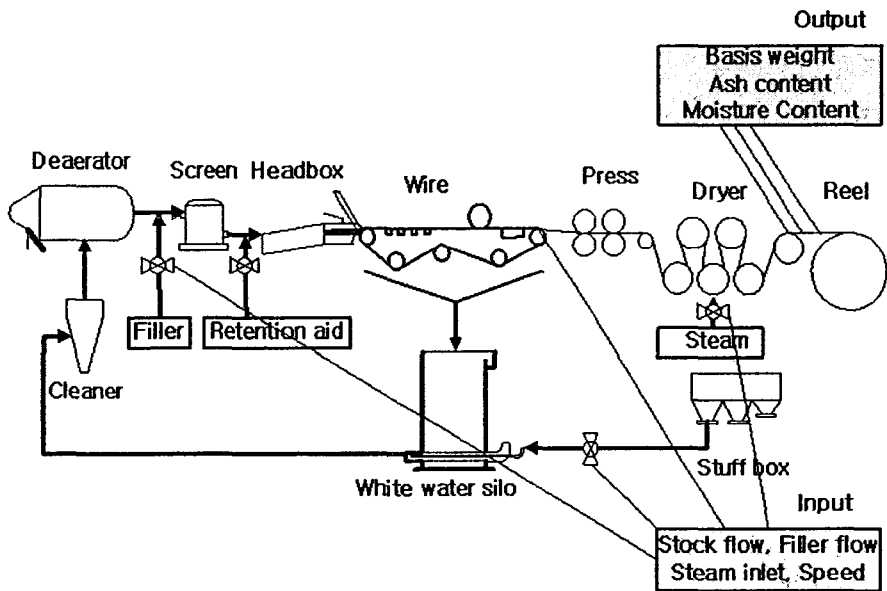


Fig. 2. Schematic diagram of paper machine

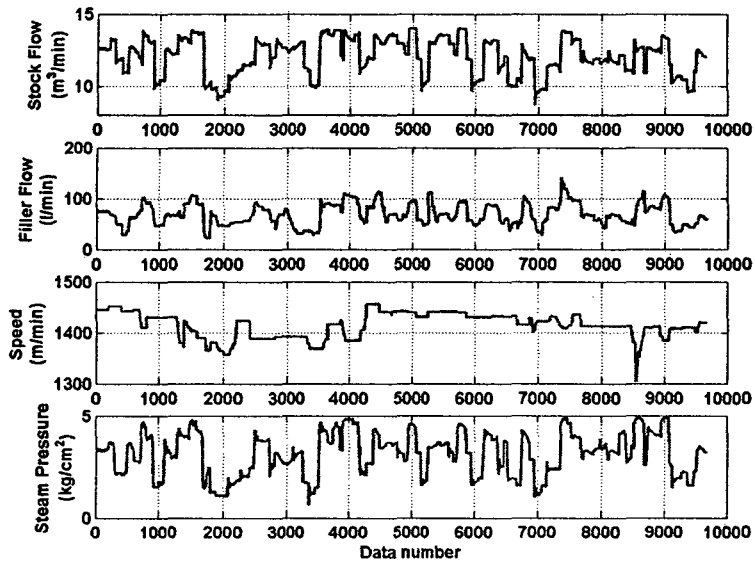


Fig. 3. input data

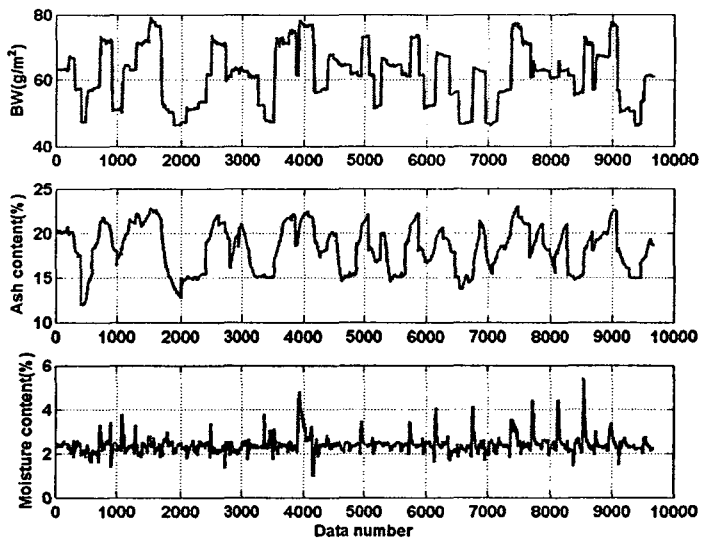


Fig. 4. output data

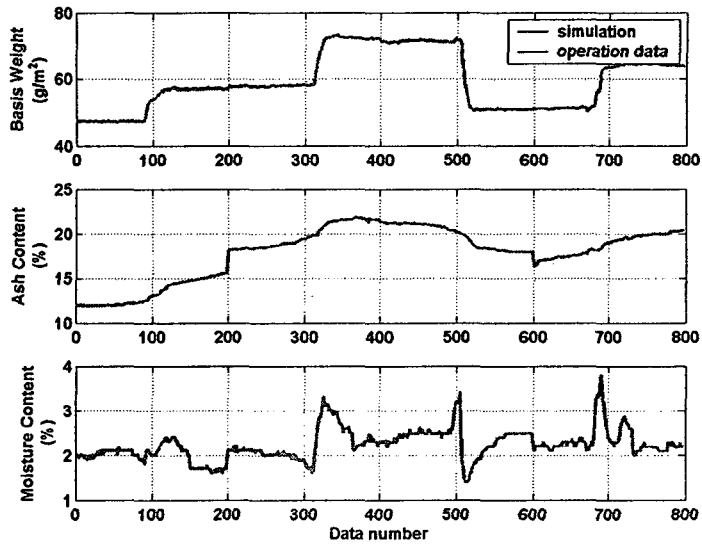


Fig. 5. Validation (47→57→72→51→64 g/m³)

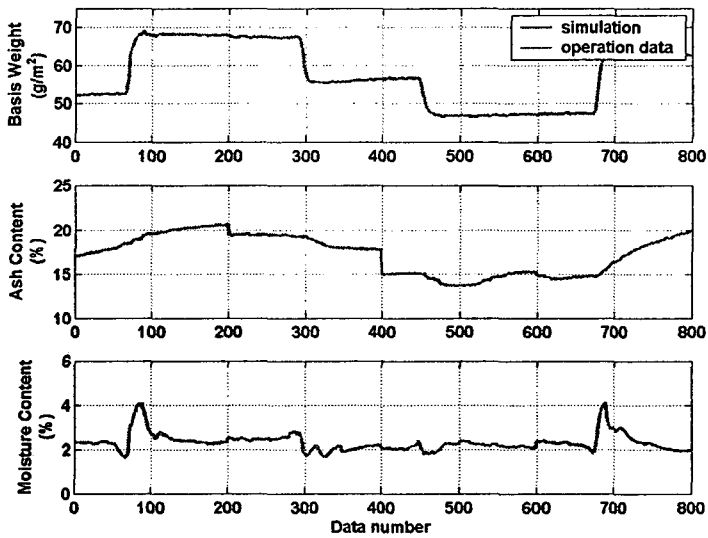


Fig. 6. Validation (52→68→56→47→63 g/m³)

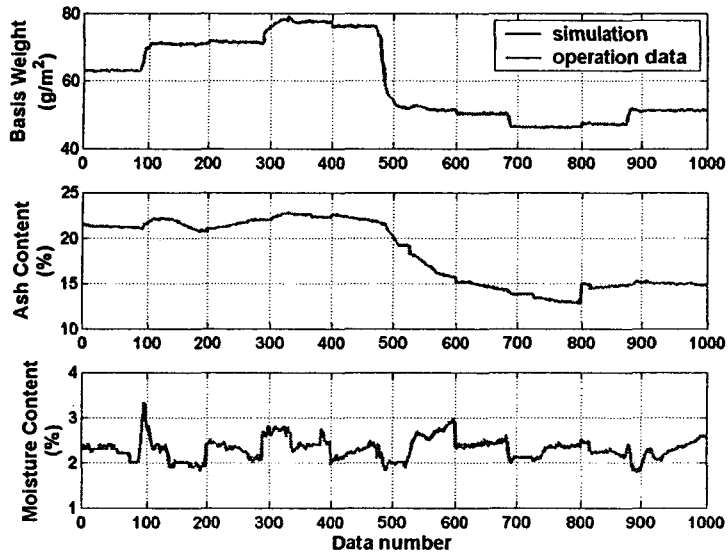


Fig. 7. Validation (63→71→78→51→47→51 g/m³)

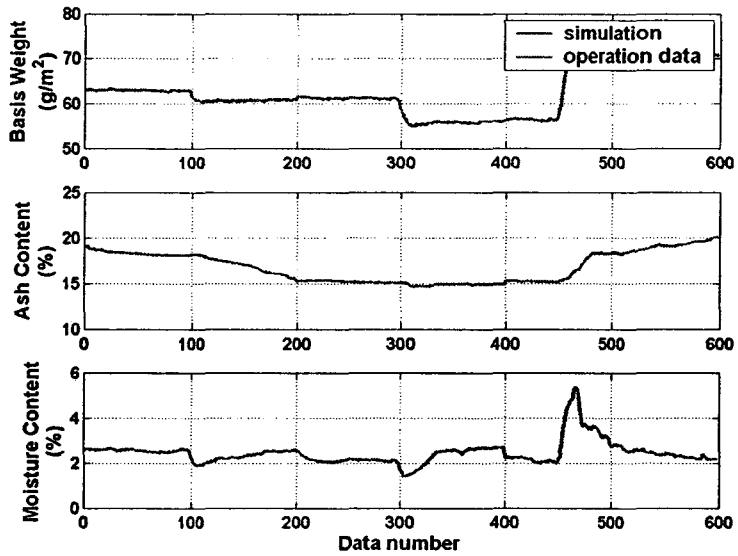


Fig. 8. Validation (63→61→56→71 g/m³)