

제지공정 내 건조 실린더의 동적 모사

Dynamic modeling of a drying cylinder in Paper Plants

곽기영¹⁾ · 여영구¹⁾ · 김영곤²⁾ · 최경석²⁾ · 강홍³⁾

1) 한양대학교, 2) 한국제지 3) J-J건설팅

Abstract

This paper presents a linear model for heat transfer processes in the drying cylinders and the web in paper mill. The PDE model, functions include steam temperatures, wet temperatures, moisture contents, reel speed and basis weight were derived from operation data.

The changes of wet temperatures and moisture contents in the drying cylinders and wets could be described. The Transfer function can be obtained through the state space model derived from the linearized PDE model.

Stability of the drying cylinder model for paper plants and analysis of characteristics of process responses for changes in input variables are investigated.

1. 서론

제지 공장의 건조공정은 전형적인 비선형 공정으로 다각적인 연구가 이루어져 오고 있다. Magnus¹⁾는 건조공정에서 다중실린더에 대한 스팀공급시스템의 원리를 적용하여 동적 모사를 시도하였고 M.Gardner²⁾는 실제 공정과 유사한 조건하에서 스팀압과 속도의 변화량에 대한 건조율과의 관계를 모사하였으며

Karlsson³⁾는 건조공정 내 각 계에 발생하는 화학반응과 물질 및 에너지수지식을 수학적인 모델로 나타내었으며 Berrada⁴⁾등은 스팀, 지펠, 실린더열벽 그리고 수분함량의 관계를 6개의 비선형공정 모델로 표현하고 이를 선형화하여 상태공간모델로 변형 후 동적 모델을 표현하였다. 현재까지 제지공정에 적용되는 모델들은 스팀압(스팀온도 및 실린더 표면온도)과 수분함량의 관계식으로 표현되었으며 지펠의 온도와 평량의 변화량을 출력변수로 하였다.

위의 변수들은 실제 공정에서 측정 가능한 변수로서 제어에 이용될 수 있는 변수들이다. 실제 입력변수로 선정된 스팀온도, 속도는 조업데이터를 통해 얻을 수가 있으며 실제 건조 공정 출력에서 얻을 수 있고 속도의 경우는 각 실린더의 회전속도가 동일하다는 가정하에 reel에서 측정된 데이터를 이용하였다. 그리고 입력수분함량의 경우 후드로 들어가기 전의 수분함량은 일정한 55~56%사이의 일정한 값을 가진다고 가정하였다. 평량의 경우 bone-dry는 건조 공정 내에서 변화량을 무시할 수 있으며 단지 수분함량의 변화에만 영향을 미친다고 가정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 건조 공정의 동적 모델링

2.2.1 에너지 수지식

2.2.1.1 Unfelt-dryer

(가) 실린더

$$D_c \cdot C_c \cdot x_c^2 \frac{\partial T_c}{\partial t} = k_c \cdot \frac{\partial T_c^2}{\partial x^2}$$

D_c : 실린더밀도(kg/m^3)

C_c : 실린더 열용량($kcal/kg/^\circ C$)

X_c : 실린더 두께(m)

T_c : 실린더온도($^\circ C$)

k_c : 실린더 열전도도($kcal/m/kg/^\circ C$)

(나) 지필

$$m_p \cdot C_v \cdot (1 + H_f) \cdot x_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_{cp} \cdot U \cdot x_p \cdot (T_c - T_p) + h_a \cdot U \cdot x_p \cdot (T_a - T_p) \\ - \frac{\partial}{\partial x} (V \cdot C_{fb} \cdot m_p \cdot T_f + V \cdot C_w \cdot m_p \cdot H_f \cdot T_f) \\ - \lambda \cdot \beta_a \cdot x_p \cdot (P_f - P_a)$$

m_p : bone-dry (g/m^2)

h_{cp} : 실린더~지필 열전달계수 ($kcal/m^2/kg/^\circ C$)

h_a : 지필~공기 열전달계수 ($kcal/m^2/kg/^\circ C$)

V : 속도 (m/min)

c_v : 지필 열용량 ($kcal/kg/^\circ C$)

H_f : 수분함량 (g/g)

x_p : 지필의 두께 (m)

T_p : 지필온도 ($^\circ C$)

T_a : 외부공기온도 ($^\circ C$)

C_{fb} : 지필 열용량 ($kcal/kg/^\circ C$)

C_w : 물 열용량 ($kcal/kg/^\circ C$)

λ : 잠열 ($kcal/kg$)

β_a : 물질전달계수 ($kg/m^2/sec$)

2.2.1.2 Free-run

(가) 지필

$$m_p \cdot C_v \cdot (1 + H_f) \cdot x_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = 2 \cdot h_a \cdot U \cdot x_p \cdot (T_a - T_p) \\ - \frac{\partial}{\partial x} (V \cdot C_{fb} \cdot m_p \cdot T_f + V \cdot C_w \cdot m_p \cdot H_f \cdot T_f) \\ - 2 \cdot \lambda \cdot \beta_a \cdot x_p \cdot (P_f - P_a)$$

2.2.1.3 Felt-dryer

(가) 지필

$$m_p \cdot C_v \cdot (1 + H_f) \cdot x_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_{cp} \cdot U \cdot x_p \cdot (T_c - T_p) + h_h \cdot U \cdot x_p \cdot (T_h - T_p) \\ - \frac{\partial}{\partial x} (V \cdot C_{\beta} \cdot m_p \cdot T_f + V \cdot C_w \cdot m_p \cdot H_f \cdot T_f) \\ - \lambda \cdot \beta_h \cdot x_p \cdot (P_h - P_a)$$

β_h : felt~지필간의 물질전달계수 ($kg/m^2/sec$)

T_h : felt온도 ($^{\circ}C$)

h_h : felt~sheet 열전달계수 ($kcal/m^2/kg/^{\circ}C$)

2.2.2 물질 수지식

2.2.2.1 Unfelt-dryer

(가) 수분함량

$$m_p \cdot x_p \cdot \frac{\partial H_f}{\partial t} = -v \cdot m_p \cdot \frac{\partial H_f}{\partial x} + m_v \cdot v \cdot x_p - \beta_a \cdot x_p \cdot (P_f - P_a)$$

항속건조부분: $P_f = P_s(T_f) = 50104 \times 10^6 \times \exp\left[-\frac{4892.5}{T_f}\right]$

$$\text{감속건조부분: } P_f = P_s(T_f) \times \exp\left[-K\left(\frac{1}{H_f} - \frac{1}{H_c}\right)\right]$$

H_c : 지필의 임계수분함량 (g/g)

m_v : 지필상의 vapor축적량 (g/m^2)

P_f : 지필내부압력 (pa)

P_a : 외부공기압력 (pa)

2.2.2.2 Free-run

(가) 수분함량

$$m_p \cdot x_p \cdot \frac{\partial H_f}{\partial t} = -v \cdot m_p \cdot \frac{\partial H_f}{\partial x} + 2 \cdot m_v \cdot v \cdot x_p - 2 \cdot \beta_a \cdot X_p \cdot (P_f - P_a)$$

2.2.2.3 Felt-dryer

(가) 수분함량

$$m_p \cdot x_p \cdot \frac{\partial H_f}{\partial t} = -v \cdot m_p \cdot \frac{\partial H_f}{\partial x} - \beta_a \cdot x_p \cdot (P_f - P_a)$$

2.2.3 경계조건

2.2.3.1 Unfelt

$$\begin{aligned}
 -k_c \frac{\partial T_c}{\partial x/x_c} \Big|_{x_c=0} &= h_s(T_s - T_c) \cdot x_c, & -k_c \frac{\partial T_c}{\partial x/x_c} \Big|_{x_c=1} &= h_{sp}(T_c - T_p) \cdot x_c \\
 -k_p \frac{\partial T_p}{\partial x/x_p} \Big|_{x_p=0} &= h_{sp}(T_c - T_p) \cdot U \cdot x_p, & -k_p \frac{\partial T_p}{\partial x/x_p} \Big|_{x_p=1} &= h_a(T_p - T_a) \cdot U \cdot x_p \\
 -\frac{\partial H_f}{\partial x/x_p} \Big|_{x_p=0} &= -\beta_a \cdot (P_f - P_a) \cdot x_p, & -\frac{\partial H_f}{\partial x/x_p} \Big|_{x_p=1} &= \beta_a \cdot (P_{f1} - P_a) \cdot x_p
 \end{aligned}$$

2.2.3.1 Free-run

$$\begin{aligned}
 k_p \frac{\partial T_p}{\partial x/x_p} \Big|_{x_p=0} &= h_{sp}(T_p - T_a) \cdot U \cdot x_p, & k_p \frac{\partial T_p}{\partial x/x_p} \Big|_{x_p=1} &= h_a(T_p - T_a) \cdot U \cdot x_p \\
 -\frac{\partial H_f}{\partial x/x_p} \Big|_{x_p=0} &= \beta_a \cdot (P_f - P_a) \cdot x_p, & -\frac{\partial H_f}{\partial x/x_p} \Big|_{x_p=1} &= \beta_a \cdot (P_{f1} - P_a) \cdot x_p
 \end{aligned}$$

2.2 모델의 선형화

2.2.1 Unfelt-dryer부분의 선형화

$$\begin{aligned}
 \dot{T}'_p &= \frac{dT'_p}{dt} = a_1 H'_{fo} + a_2 T'_p + a_3 T'_s + a_4 V' + a_5 m' + a_6 H'_{fi} \\
 \dot{H}'_{fo} &= \frac{dH'_{fo}}{dt} = a_7 H'_{fo} + a_8 T'_p + a_9 T'_s + a_{10} V' + a_{11} m' + a_{12} H'_{fi}
 \end{aligned}$$

2.2.2 Free-run부분의 선형화

$$\begin{aligned}
 \dot{T}'_p &= \frac{dT'_p}{dt} = b_1 H'_{fo} + b_2 T'_p + b_3 V' + b_4 m' + b_5 H'_{fi} \\
 \dot{H}'_{fo} &= \frac{dH'_{fo}}{dt} = b_6 H'_{fo} + b_7 T'_p + b_8 V' + b_9 m' + b_{10} H'_{fi}
 \end{aligned}$$

2.3 Multivariable system

2.3.1 Unfelt-dryer

(가) V, H_{fi}, T_p 는 일정하고 T_s 만 변하는 경우

$$\dot{H}'_{fo} + G_1 \cdot H'_{fo} = G_2 \cdot \dot{T}'_s$$

$$G_3 \cdot \dot{m}' + G_4 \cdot m' = G_5 \cdot \dot{T}'_s + G_6 \cdot T'_s$$

(나) V, H_{fi}, T_s 는 일정하고 T_p 만 변하는 경우

$$\dot{H}'_{fo} + G_1 \cdot H'_{fo} = G_7 \cdot \dot{T}'_p + G_8 \cdot T'_p$$

$$G_3 \cdot \dot{m}' + G_4 \cdot m' = G_9 \cdot \ddot{T}'_p + G_{10} \cdot \dot{T}'_p + G_{11} \cdot T'_p$$

(다) V, T_s, T_p 는 일정하고 H_{fi} 만 변하는 경우

$$\dot{H}'_{fo} + G_1 \cdot H'_{fo} = G_2 \cdot H'_{fi}$$

$$G_3 \cdot \dot{m}' + G_4 \cdot m' = G_{13} \cdot \dot{H}'_{fi} + G_{14} \cdot H'_{fi}$$

(라) H_{fi}, T_s, T_p 는 일정하고 V 만 변하는 경우

$$\dot{H}'_{fo} + G_1 \cdot H'_{fo} = G_{15} \cdot V'$$

$$G_3 \cdot \dot{m}' + G_4 \cdot m' = G_{16} \cdot \dot{V}' + G_{17} \cdot V'$$

2.3.2 Free-run

(가) V, H_{fi}, T_p 는 일정하고 T_s 만 변하는 경우

$$\dot{H}'_{fo} + G_{21} \cdot H'_{fo} = 0$$

$$G_{22} \cdot \dot{m}' + G_{23} \cdot m' = 0$$

(나) V, H_{fi}, T_s 는 일정하고 T_p 만 변하는 경우

$$\dot{H}'_{fo} + G_{21} \cdot H'_{fo} = G_{24} \cdot \dot{T}'_p + G_{25} \cdot T'_p$$

$$G_{22} \cdot \dot{m}' + G_{23} \cdot m' = G_{26} \cdot \ddot{T}'_p + G_{27} \cdot \dot{T}'_p + G_{28} \cdot T'_p$$

(다) V, T_s, T_p 는 일정하고 H_{fi} 만 변하는 경우

$$\dot{H}'_{fo} + G_{21} \cdot H'_{fo} = G_{29} \cdot H'_{fi}$$

$$G_{22} \cdot \dot{m}' + G_{23} \cdot m' = G_{210} \cdot \dot{H}'_{fi} + G_{211} \cdot H'_{fi}$$

(라) H_{fi}, T_s, T_p 는 일정하고 V 만 변하는 경우

$$\dot{H}'_{fo} + G_{21} \cdot H'_{fo} = G_{212} \cdot V'$$

$$G_{22} \cdot \dot{m}' + G_{23} \cdot m' = G_{213} \cdot \dot{V}' + G_{214} \cdot V'$$

2.3.3 상태공간모델

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 & 0 \\ B_{21} & B_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{31} & B_{32} \\ 0 & 0 & B_{41} & B_{42} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_s' \\ T_p' \\ V' \\ H_{ff}' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & G_7 \\ \frac{G_7}{G_3} & \frac{G_{16}}{G_3} & \frac{G_{13}}{G_3} & \frac{G_{10}}{G_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_s' \\ T_p' \\ V' \\ H_{ff}' \end{pmatrix}$$

4. 결과 및 고찰

Unfelt-dryer영역에서 실린더면과 접촉하는 지필은 Fig.1에서 상승하는 경향을 보였다. 하지만 지필 내부에 수분이 함유되어 있어서 내부지필 온도에 영향을 준다. 수분은 열이 이동하는 방향으로 이동하며 외부공기와 접촉하는 면은 외부로 수분이 빠져나가게 된다. Free-run영역에서는 Fig.2에서 보는 바와 같이 실린더와 접했던 지필의 온도가 시간에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 이것은 실린더에 의해 지필이 가열되고 실린더를 지나간 후 지필의 양면이 외부온도와 접촉하고 지필 내부의 잠열이 빠져나가면서 일시적으로 지필온도의 상승을 초래하기 때문이라 여겨진다.

State diagram을 상태공간모델로 전환 후 입력에 대한 경향성과 안정성을 판별하였다. Fig.3에서 T_s 와 T_p 의 unit step response을 알아보면 시간에 따라 약간 감소 경향을 보였으며 V 와 H_{ff} 에 관해 증가하는 경향성을 보였다. 특히 입력 H_{ff} 의 unit step에 대해서 출력 H_{fo} 의 1만큼의 증가를 보였다. 또한 zero는 좌측좌표에 있음을 확인 할 수 있었는데 이는 모델이 안정함을 의미하는 것이다.

Fig.4에서는 pre-dryer 전 건조 공정을 입력으로 T_s 와 V 를 출력으로 m , H_{fo} 를 neural network를 이용하여 동적모델을 구하였으며 실제 출력 데이터과 neural

network model에서 찾은 값과 비교하였다. 위에서 입력변수 중 T_p 와 H_{fi} 의 경우를 제외한 이유는 후드 입구로 들어가는 초기값은 동일하다고 가정하였기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 물질과 에너지 수지식을 근간으로 건조 공정 동적 모델링을 통해 제어에 이용될 수 있는 안전한 모델을 규명 하였다. 가장 이상적인 방향은 40개 실린더를 연결한 경향과 pre-dryer실제 데이터를 비교 분석하는 것이지만 미지의 변수가 존재해 데이터 이용과 동시에 모사결과도 활용하여 하나의 실린더 시스템의 경향과 pre-dryer경향을 분석하는데 중점을 두었다. 실린더 시스템의 경향성 및 안정성은 변수들의 영향에 타당성이 분석되었으며 neural network 모델경우 역시 12set의 지종교체 데이터와 net model을 비교 분석한 결과 정확한 모델을 찾을 수 있었다.

Table. 1 Initial variable and parameter

수분함량	초기 입력값 : 45.3% , 출력값 : 45.29%(모사결과값적용)
외부공기	75℃(후드내부) 38℃(후드외부)
지필	초기 입력값 : 68.789℃ 지필의 폭 : 4.5m 실린더 지름 : 1.82m 실린더 개수 : 40(40중 10번째) Bone-dry : 53.2g 실린더와 접촉거리 : 2.3m Free-run : 1.5m Web-speed : 1209m/min 실린더에서 가열되는 시간 : 0.23s
실린더	초기 입력값 : 98.538℃
스팀	초기 입력값 : 102.48℃

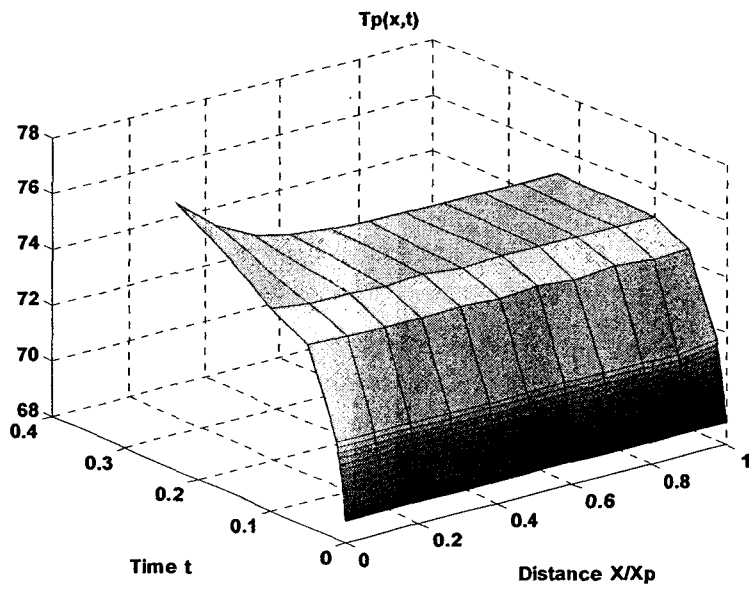


Figure. 1. Web temperature of unfelt-dryer

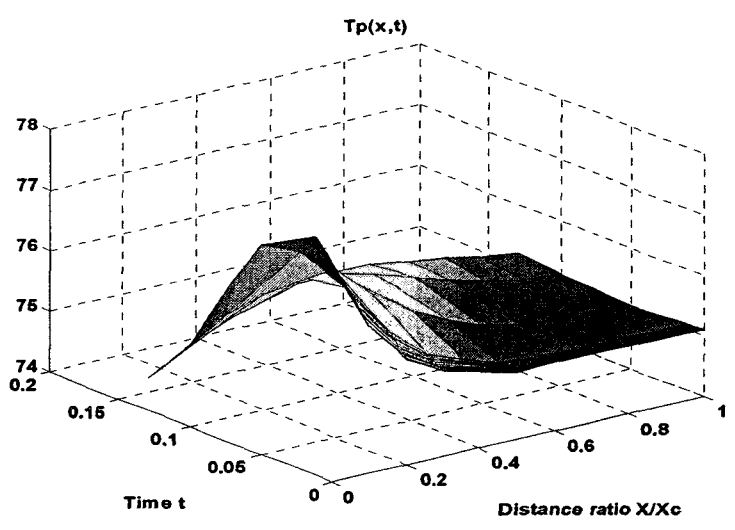


Figure. 2. Web temperature of free-run

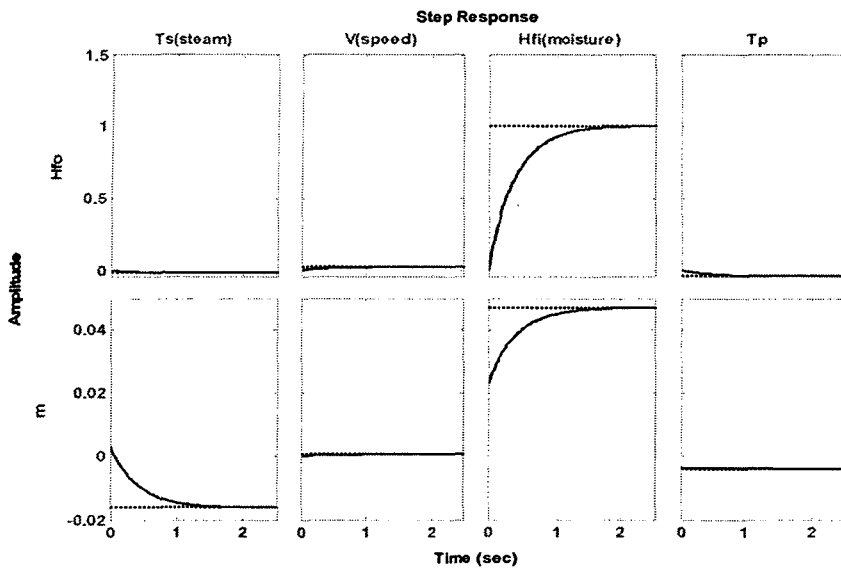


Figure. 3. Step response of unfelt-dryer

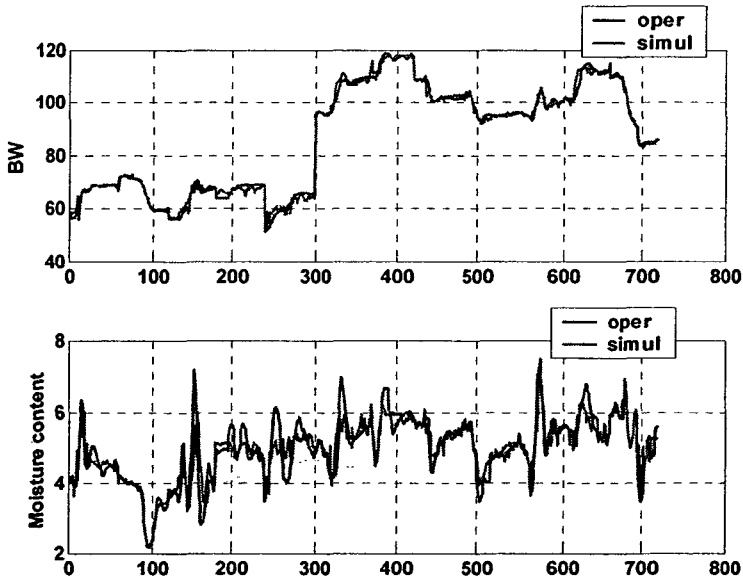


Figure. 4. Simulation of neural network using operation data in drying process