

제지공장 가열 실린더의 모델링

곽기영^{*1}, 여영구^{*1}, 김영곤^{*2}, 최경석^{*2}, 강홍^{*3}

(2003년 8월 1일 접수; 2003년 10월 15일 채택)

Modeling of Drying Cylinders in Paper Plants

Ki-Young Kwak^{*1}, Yeong-Koo Yeo^{*1}, Young-Gon Kim^{*2},

Kyung-Seok Choi^{*2} and Hong Kang^{*3}

(Received on August 1, 2003; Accepted on October 15, 2003)

ABSTRACT

The purpose of the present study is to identify the drying cylinder model in paper plants and to analyze characteristics of process responses for changes in input variables. The model developed in this work is based on actual plant operation data and the steam pressure applied to the cylinder behaves as one the main variables. It is found that heat transfer coefficients from the condensate to the canvas could be represented as empirical relations based on heat conductivities and operation date. The effectiveness of the cylinder model is demonstrated by the measured moisture contents and web temperature. Using transfer functions derived from the cylinder model stability of the drying process is analyzed.

1. 서론

제지 공장의 건조공정은 전형적인 비선형 공정으로서 지금까지 건조 실린더의 모델링에 대한 연구가 다각적으로 이루어져 오고 있다. 30년전에 Depoy¹⁾는 건조공정에서의 실린더, 지필, 펄트에 대한 계를 세부적으로 나누어 선형적인 식으로 아날로그 컴퓨터 모사를 시도하였으며 Mori등²⁾은 각 계 내 열전달 계수 및 두께를 일정하게 두고 지필의 온도와 수분함량의 변화에 따른 증발율의 변화량을 Iron model³⁾로 모사하였다. Karlsson⁴⁾ 역시 수분함량과 지필의 온도에 따른

증발율의 변화량과 건조 실린더 공정의 상을 세부적으로 나눠 모사하였다. Magnus⁵⁾는 건조공정 내 다중실린더에 대한 동적 모델링을 수증기 공급 시스템의 원리를 적용하여 수행하였다. 현재까지 제지공정에서 이루어지고 있는 주요 분석 대상으로는 실린더 내 응축수와 수증기에 대한 분석과 지필 내 수분 증발량의 변화량, 그리고 열전달 계수가 주류를 이루고 있다. 건조 공정에서는 건조 실린더 내로 공급되는 수증기의 압력이 가장 중요한 변수의 하나이다.

건조 실린더의 모델링에서 중요한 수증기압과 응축수, 그리고 실린더 사이의 열전달 계수는 정확한 측정

^{*1} Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

^{*2} Hankuk Paper co., Ltd., Ulsan 689-890, Korea

^{*3} J.J. Engineering, Seoul 143-200, Korea

^{*} Correspondence concerning this article should be addressed to Y.K. Yeo [E-mail address: ykyeo@hanyang.ac.kr]

이 불가능하므로 경험적인 식을 통해 나타내는 것이 일반적이다. 아울러 건조공정의 모델링에 있어서는 지필의 온도에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자들과 이들이 미치는 영향을 규명하는 것이 중요하다. 지필의 온도에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자들로는 수증기, 실린더, 외부 온도, 평량, 속도 등을 들 수 있다. 수증기압에 의한 실린더 표면온도가 지필의 온도에 가장 크게 영향을 미치는데 수증기압과 실린더 표면온도와의 관계는 함수로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 다중 실린더에서의 응축수 열전달 계수를 구하기 위하여 측정된 응축수 두께를 이용하였다. 이는 응축수 두께의 변화에 따라 실린더 표면까지 이르는 열량이 상당한 변화를 보이기 때문이다. 건조 실린더의 외부온도는 수분함량과 함께 공기중의 상대습도의 함수이며 지필의 온도에 영향을 미치는 주요 인자의 하나이다. 제지공정에서 평량과 속도는 지종교체시 주요한 변수가 되는데 정상상태에서의 평량의 변화량은 수분량과 bone-dry(ash)의 변화량에 따라 좌우되지만 여기에서는 수분량의 변화량, 즉 수분의 증발량만을 고려하였다. 아울러 정상상태 모델로부터 도출된 상태공간 모델식을 유도하고 입력변수가 출력변수에 미치는 영향을 나타내는 전달함수를 찾아내어 대상 공정의 운전에 필요한 정보를 획득하고 나아가 그 공정의 수렴성 여부 및 안정성을 판별해 낼 수 있도록 하였다. 본 연구의 주된

목적은 건조 실린더 내부의 측정하기 힘든 계면의 온도변화를 규명하는 데에 있다. 열전달 계수는 대상공정에서 닫힌 계 내의 최종 수분함량 및 측정된 지필온도를 이용하여 조정하였으며 열전달 계수는 열전도도, 두께, 속도의 함수로서 경험적인 수치를 적용하여 수치해석적인 방법을 동원하여 나타내었다.

2. 건조 실린더의 열전달 특성

2.1 건조 실린더의 개요

건조 실린더 공정의 구조는 크게 single-tier 및 double-tier로 나눌 수 있다. 이번 연구에 적용되는 공정의 pre-dry에는 single-tier와 double-tier가 공존하며 after-dry에는 double-tier만 존재하였으며 single-tier의 경우 실린더, open-run(web+canvas), vaccum roll, 그리고 open-run로, 또한 double-tier의 경우 실린더, Free-run(web)의 형태로 결합되어 있어서 각각을 유형(Fig.1~Fig.5)으로 나타내었다.

건조 실린더 공정에서의 열전달은 Fig.1~Fig.4에 간단히 나타내었다. Fig.1에 보인 바와 같이 실린더

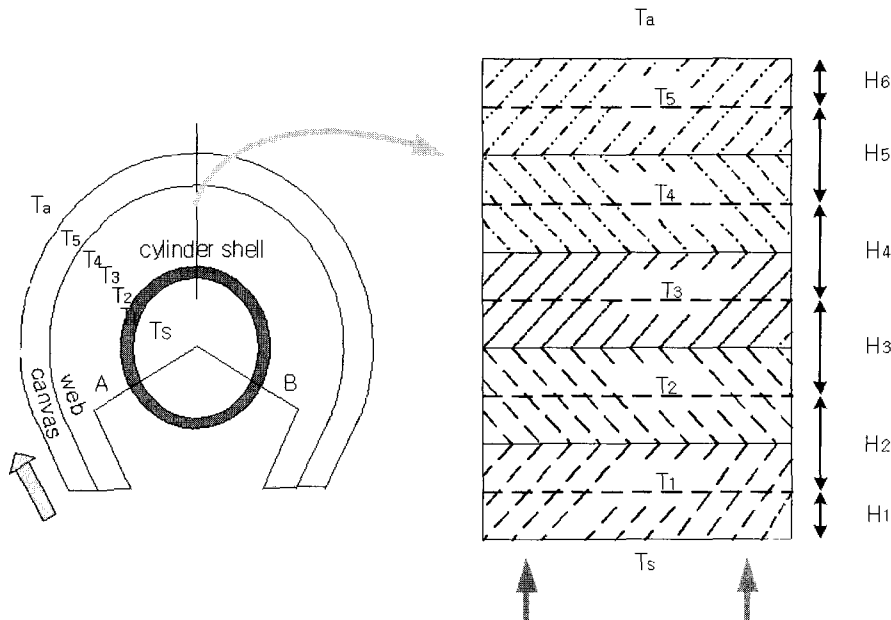


Fig. 1. Drying configuration A.

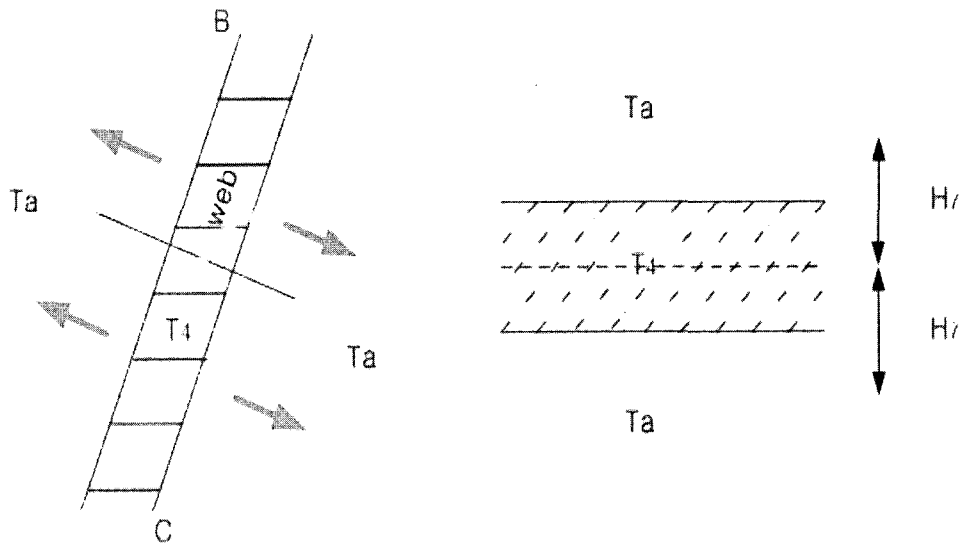


Fig. 2. Drying configuration B (free-run).

내로 수증기를 통해 주입된 열은 응축수, 실린더, 지필, 캔버스를 거쳐 실린더 외부로 빠져 나간다. Fig.2는 건조 실린더가 없는 free-run 구간을 나타낸 것이며 Fig.3은 지필과 건조실린더가 접촉하지 않는 부분을, 그리고 Fig.4는 canvas가 아닌 지필이 공기와 접촉되는 경우의 건조 실린더를 보인 것이다. 모델링에

있어서는 Fig.1~Fig.4에 설정한 각각의 계면 사이의 열전달 계수의 규명이 가장 중요하다. 본 연구에서는 열전달 계수를 경험적인 관계식으로 나타내었는데 이를 위하여 다음과 같은 가정들이 사용되었다:

가) 각 계면 사이에서의 온도는 동일하고 온도 기준선은 중앙을 기준으로 한다.

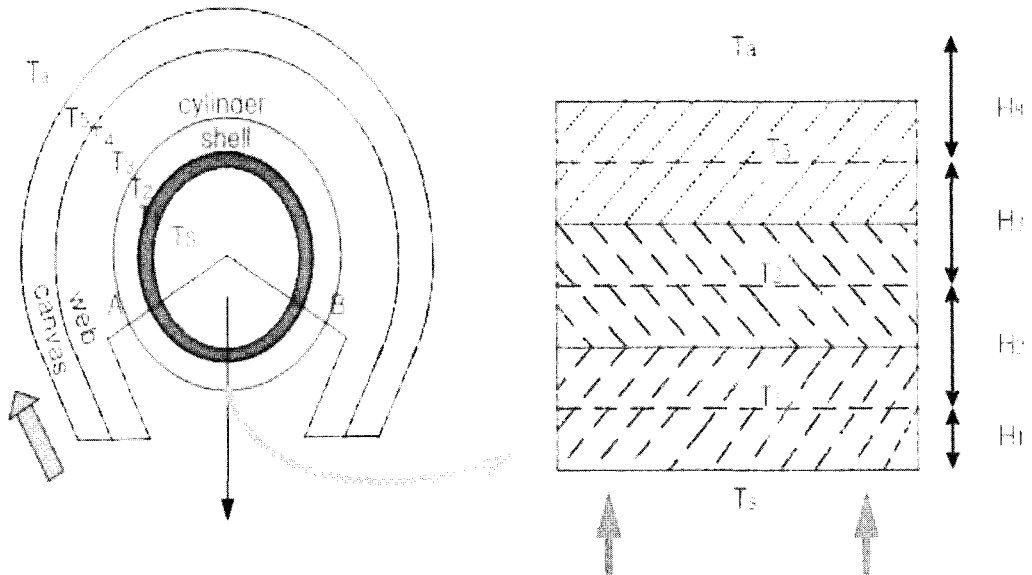


Fig.3. A drying configuration C.

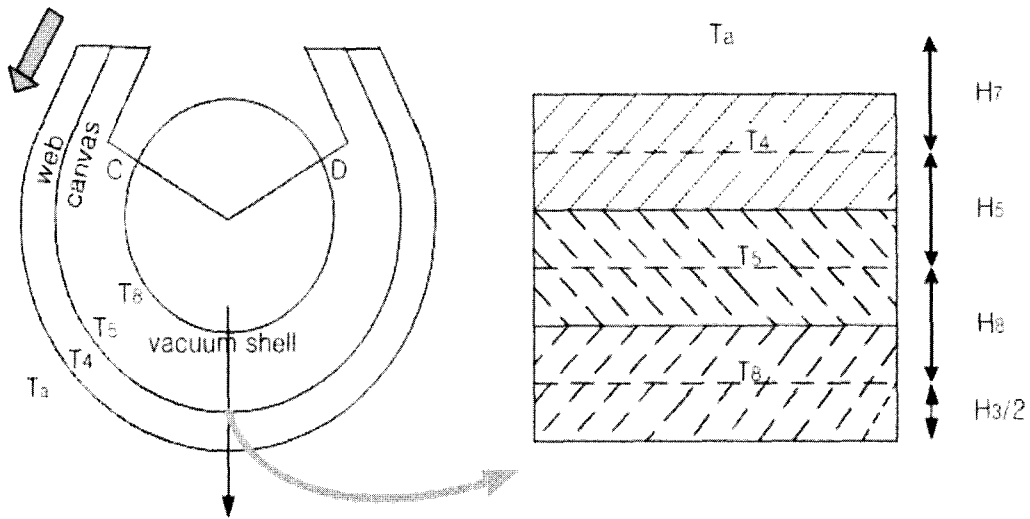


Figure.4. A drying configuration D.

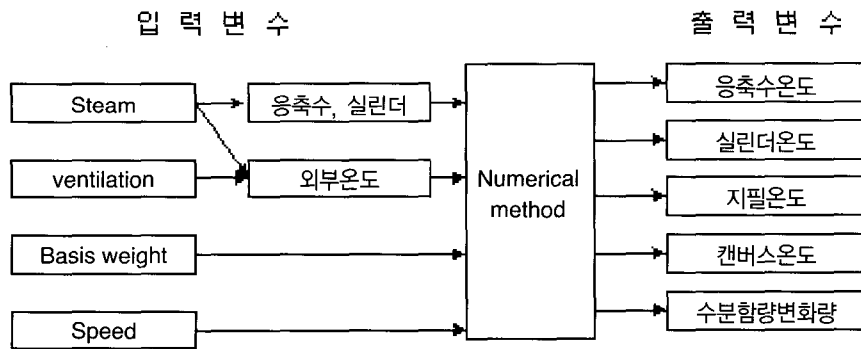


Figure. 5. Input and output variables in drying process.

나) 계면과 계면 사이의 열전달 계수는 열 전도도 및 두께의 함수이며 계의 중앙선과 인접된 다른 계의 중앙선까지 열이 전달된다.

다) 응축수의 두께는 항상 일정하게 유지된다.

라) 후드 내 bone-dry는 항상 일정하다.

마) 실린더 내에 공급되는 수증기의 압력은 일정하다 그러나 전체 건조공정 부분은 몇 개의 그룹으로 나뉘어지며 각 그룹에서의 수증기 압력은 서로 다르게 제어된다.

모델링에 있어서는 지필이 실린더와 접촉하고 떨어지는데 소요되는 시간만큼 실린더를 수증기로 가열시키는 과정을 대상으로 하였다.

2.2 열전달 계수

건조 실린더의 모델링에 이용된 열전달 계수는 Table 1, Table 2 및 Table 3에

보인 바와 같다. Table 1에서 주어지지 않은 H_1 , H_2 , H_6 , 및 H_7 은 운전 데이터를 토대로 추정식을 유도하여 이용하였다. 본 연구에서 유도한 열전달 계수 추정식은 다음과 같다.

$$H_1 = \left[\frac{685}{L_1 \cdot 10^3} + \frac{10^6}{275 + 0.675 \cdot (V/60)^{2.79} + 0.0486 \cdot L_1 \cdot 10^3 \cdot (V/60)^{3.39}} \right] / 4186 / 2 \quad [1]$$

$$\begin{aligned}
 &H_1: \text{실린더 내부}\sim\text{응축수 계면 사이의 열전달 계수} & H_2 = \frac{1}{\frac{1}{H_3/2} + \frac{1}{H_1}} & [2] \\
 &[\text{kcal/m}^2\text{sec}^\circ\text{C}] & & \\
 &L_i: \text{응축수 두께 [m]} & & \\
 &V: \text{운전 속도 [m/min]} & H_2: \text{응축수}\sim\text{실린더 계면 사이의 열전달 계수} & \\
 &H_3: \text{실린더}\sim\text{실린더 계면 사이의 열전달 계수} & [\text{kcal/m}^2\text{sec}^\circ\text{C}] & \\
 &[\text{kcal/m}^2\text{sec}^\circ\text{C}] & H_7 = 0.0000742 \times V^{0.78} & [3]
 \end{aligned}$$

Table. 1 Heat transfer coefficients of configuration A

Description	Thick [mm]	Thermal conductivity [kcal/m/hr/°C]	Heat transfer coefficient [kcal/m²/sec/°C]	Specific heat capacity [kcal/kg/°C]	Density [kg/m³]
			H ₁ (web~air)		
Canvas	2.5	0.045	H ₆	0.326	0.8 × 10 ³
Web	0.1		H ₅ =0.0678	0.320	1.3 × 10 ³
Cylinder2	25/2	37.2	H ₄ =0.3380	0.113	7.8 × 10 ³
Cylinder1	25/2	37.2	H ₃ =0.8267	0.113	7.8 × 10 ³
Condensate	3		H ₂	1.012	1.0 × 10 ³
			H ₁		

Table. 2 Heat transfer coefficients of configuration C

Description	Thick [mm]	Thermal conductivity [kcal/m/hr/°C]	Heat transfer coefficient [kcal/m²/sec/°C]	Specific heat capacity [kcal/kg/°C]	Density [kg/m³]
			H ₉		
Cylinder2	25/2	37.2	H ₃ =0.8267	0.113	7.8 × 10 ³
Cylinder1	25/2	37.2		0.113	7.8 × 10 ³
Condensate	3		H ₂	1.012	1.0 × 10 ³
			H ₁		

Table. 3 Heat transfer coefficients of configuration D

Description	Thick [mm]	Thermal conductivity [kcal/m/hr/°C]	Heat transfer coefficient [kcal/m²/sec/°C]	Specific heat capacity [kcal/kg/°C]	Density [kg/m³]
			H ₇		
Web	0.1		H ₅ =0.0678	0.320	0.3 × 10 ³
Canvas	2.5	0.045	H ₈ =0.2711	0.326	0.8 × 10 ³
vacuum	25	37.2	H ₃ /2	0.113	7.8 × 10 ³

H_7 : $0.0000742 \times V^{0.78}$

H_7 : 지필~공기 계면 사이의 열전달 계수
[kcal/m²sec°C]

$$H_6 = \frac{1}{\frac{1}{H_5} + \frac{1}{H_7} - \frac{2}{H_4} + \frac{1}{H_3}} \quad [4]$$

H_6 : 캔버스~공기 계면 사이의 열전달 계수
[kcal/m²sec°C]

3. 건조 실린더의 모델링

3.1 에너지 수지식

건조 실린더에서 에너지의 전달은 응축수, 실린더, 지필 및 캔버스를 통하여 이루어 진다. 이들 각각에 있어서의 에너지 수지는 다음과 같다(Fig.1~Fig.4참조).

(가) 응축수

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{L_1 \cdot D_1 \cdot C_1} \cdot (H_1 \cdot (T_s - T_1) - H_2 \cdot (T_1 - T_2)) \quad [5]$$

D_1 : 응축수 밀도[kg/m³]

C_1 : 응축수 열용량[kcal/kg°C]

T_s : 수증기 온도[°C]

T_1 : 응축수 온도[°C]

T_2 : 첫 번째 실린더 계면 온도[°C]

(나) 실린더

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{\frac{L_2}{2} \cdot D_2 \cdot C_2} \cdot (H_2 \cdot (T_1 - T_2) - H_3 \cdot (T_2 - T_3)) \quad [6]$$

D_2 : 실린더 밀도[kg/m³]

L_2 : 실린더의 두께 [m]

C_2 : 실린더의 열용량[kcal/kg°C]

T_3 : 두 번째 실린더 계면 온도[°C]

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{\frac{L_2}{2} \cdot D_2 \cdot C_2} \cdot (H_3 \cdot (T_2 - T_3) - H_4 \cdot (T_3 - T_4)) \quad [7]$$

T_4 : 지필의 온도[°C]

H_4 : 실린더~지필 계면 사이의 열전달 계수

[kcal/m²sec°C]

(다) 지필

$$\frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{\frac{m}{1000} \cdot (0.32 - 1.366 \times 0.2 + \frac{T_4}{100})} \cdot [(H_4 \cdot (T_1 - T_4) - H_5 \cdot (T_4 - T_5)) - m_w \cdot \Delta H] \quad [8]$$

T_5 : 캔버스의 온도[°C]

H_4 : 지필~캔버스 계면 사이의 열전달 계수
[kcal/m²sec°C]

$$\Delta H_{ev} = \Delta h_{vap} + \Delta h_s \quad [9]$$

Δh_s : 흡수열 [kcal/kg]

Δh_{vap} : 잠열 [kcal/kg]

ΔH_{ev} : 증발열 [kcal/kg]

Δm_{ev} : 증발율 [kg/m²sec]

$$\Delta h_{vap} = 505.3747(1 - T_r)^{0.354} + 269.6581(1 - T_r)^{0.456} \quad [10]$$

$$T_r = \frac{T_4}{T_c} = \frac{T_4}{373.95} (T_4 : ^\circ\text{C}) \quad [11]$$

$$\Delta h_s = -R \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right) \cdot 0.10085 \cdot T_6^{1.0585} \cdot T_4^2 \quad [12]$$

$$\Delta H_w = [505.3747 \cdot \left(1 - \frac{T_4}{373.95} \right)^{0.354} + 269.6581 \cdot \left(1 - \frac{T_4}{373.95} \right)^{0.456} + 0.011124 \cdot \left(1 - \frac{1}{R} \right) \cdot T_6^{1.0585} \cdot T_4 \cdot (T_4 + 273.15)] \quad [13]$$

m : 평량[kg/m²]

T_6 : 수분 함량[%]

(라) 캔버스

$$\frac{dT_5}{dt} = \frac{1}{L_3 \cdot D_3 \cdot C_3} \cdot (H_5 \cdot (T_4 - T_5) - H_6 \cdot (T_5 - T_a)) \quad [14]$$

D_3 : 캔버스의 밀도 [kg/m³]

L_3 : 캔버스의 두께 [m]

C_3 : 캔버스의 열용량 [kcal/kg°C]

(마) 실린더

공기와 접촉하지만 지필과 접촉하지 않는 부위 (Fig.3)

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{\frac{L_2}{2} \cdot D_2 \cdot C_2} \cdot (H_3 \cdot (T_2 - T_3) - H_9 \cdot (T_3 - T_4)) \quad [15]$$

H_9 : 실린더~공기 계면 사이의 열전달 계수
[kcal/m²sec°C]

$$\beta = \frac{\alpha_{a-p}}{\rho_a \cdot c_a \cdot Le^{2/3}} \quad [24]$$

(바) 진공 롤 : (Fig.4)

$$\frac{dT_7}{dt} = \frac{1}{L_2 \cdot D_2 \cdot C_2} \cdot (-H_3 \cdot (T_7 - T_3)) \quad [16]$$

T_7 : 진공 롤의 온도

P_a : 공기의 밀도 [kg/m³]
 C_a : 공기의 열용량 [kcal/kg°C]
 Le : Lewis 수

$$\frac{m_{ev}}{A} = \frac{\alpha}{\rho_a \cdot c_a \cdot Le^{2/3}} \cdot \frac{P_{tot}}{R_v \cdot T} \ln \left(\frac{P_{tot} - P_{va}}{P_{tot} - P_{vpo}} \right) \approx \alpha \cdot C \cdot \ln \left(\frac{P_{total} - P_{va}}{P_{total} - P_{vpo}} \right) \quad [25]$$

A : 증발 면적 [m²]
 R_v : 물 증기의 기체 상수 [461.5J/Kgwater/K]
 P_{tot} : 전체압력 [bar]
 P_{vpo} : 지필 표면에서의 부분 증기압 [bar]
 P_{va} : 대기에서의 증기압 [bar]
 a : 지필~공기 계면 사이의 열전달 계수[kcal/m²sec°C]

3.2 물질 수지식

지필의 표면과 내부의 부분 증기압은 다음과 같이 지필의 온도와 수분 함량의 함수로 나타낼 수 있다.

$$P_{vpo} = P_{sat}(T) \cdot R(T_4, T_6) \quad [17]$$

여기서 상대습도(R)는 다음과 같은 보정식으로 표시할 수 있다.

$$\phi = 1 - e^{-(47.58T_6^{1.877} + 0.10085/^\circ C \cdot T_4 \cdot T_6^{1.0585})} \quad [18]$$

이로부터 다음과 같은 최종식이 얻어진다.

$$P_{vpo} = 10197 \cdot 10^{5.124 - \frac{1690}{T_4 + 230}} \cdot \phi \quad [19]$$

수분 함량이 30%미만에서 상대습도와 수분 함량의 변화가 두드러지며 수분 함량이 30%이상일 경우에는 대체로 $\phi=1$ 이 된다. bone-dry가 전 구간에서 일정하다고 보고 지필의 수분량만 변한다고 가정했을 때 수분량의 변화량은 평량의 변화량과 같다고 간주하였다. 간단한 물질수지 관계로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$(Ms(y + \Delta y) - Ms(y))Bw \cdot L \cdot \Delta y = -g \cdot L \cdot \Delta y \cdot \Delta t \quad [20]$$

$$Ms(y + \Delta y) = Ms(y) - \frac{g}{Bw} \Delta t \quad [21]$$

$$\frac{dMs(y)}{dt} = -\frac{g}{Bw} = -\frac{m_{ev}}{m} \quad [22]$$

Bw : 평량 [kg/m²]

Ms : 수분함량 [kg/kg]

g : 증발율 [kg/m²]

한편 Stefan⁴⁾ 식으로부터

$$\frac{m_{ev}}{A} = \frac{\beta \cdot P_{tot}}{R_v \cdot T} \ln \left(\frac{P_{total} - P_{va}}{P_{total} - P_{vpo}} \right) \approx \frac{\beta}{R_v \cdot T} (P_{vpo} - P_{va}) \quad [23]$$

$$P_{va} = 10197 \cdot 10^{5.124 - \frac{1690}{T_{aw} + 230}} \quad [26]$$

T_{aw} : 습구온도[°C]

$$C = 7.03 \times 10^{-4} \text{ kg water } ^\circ C / Ws$$

$$P_{vpo} = 10197 \cdot 10^{5.124 - \frac{1690}{T_4 + 230}} \cdot \phi \quad [27]$$

$$m_{ev} = \frac{r \cdot \pi \cdot 223 / 360}{100} \cdot w \cdot H_7 \cdot C \cdot 4186 \cdot \log \frac{P_{tot} - P_{va}}{P_{tot} - P_{vpo}} \quad [28]$$

r : 실린더 반지름[m]

w : 지필의 폭[m]

$$\frac{dT_6}{dt} = -\frac{100}{m} \cdot m_{ev} \cdot 1000 \quad [29]$$

이상에서 유도된 모델식을 근간으로 건조 유형 A(Fig.1), B(Fig.2), C(Fig.3), 그리고 D(Fig.4)를 조합하여 건조 실린더 모델을 구성하였으며 이로부터 시간에 따른 각 계의 온도변화를 알아보고 각각의 유형을 재조합하였다.

열전달 계수 H_5 , H_7 은 후드 내 전 지필의 온도변화 및 최종 수분함량에 의해 결정되며 수증기압에 따른 표면온도를 나타내는 식을 회귀방법을 통해 얻을 수 있었다. 이로부터 각 실린더에 주입되는 지필의 온도와 수분함량의 초기값을 모사를 통해 확보한 다음 유형 C에서 각각의 기본적인 조건과 위에서 얻은 초기값으로부터 응축수, 실린더 간격, 그리고 H9의 최적값

을 얻을 수 있다. 이는 실린더와 지필이 접촉하는 실린더 한 지점에서 한 사이클 동안 정상상태에서의 실린더 온도는 같은 온도를 유지한다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 위에서 얻은 지필의 온도, 수분함량, 응축수, 실린더 간격의 값을 이용하여 A, B, C, D의 재조합으로 이루어진 건조공정을 모사하였다.

입출력 변수들은 Fig.5에서와 같이 요약해 볼 수 있다. 유도된 비선형 모델식을 선형화시킨 다음 Laplace 변환을 통하여 전달함수를 구할 수 있으며 선형화된 식은 상태공간 모델로 나타낼 수 있다.

4. 결과 및 고찰

수분함량과 가장 밀접한 관계가 있는 열전달 계수 H7과 지필의 온도분포에 영향을 미치는 열전달 계수 H5는 pre-dryer 및 after-dryer의 출구 수분함량에서의 오차값을 이용하여 조정한 후 모사에 이용하였으며 실제 측정온도와 비교하여 최종값을 조정하였다. 이 때 이용된 pre-dryer 와 after-dryer 출구 수분함량은 각각 5%, 및 3%이다. 응축수와 실린더 내/외벽의 온도는 기본적으로 정상상태일 경우 실린더 한 사이클이 지나면 실린더의 외벽온도는 원점에서 같은 초기온도에서 시작한다고 가정하여 최적의 온도조건을 찾아내었다. 이 때 실린더와 응축수의 열용량은 0.1보다 크다고 간주하였다. 실린더의 회전속도가 빠르기 때문에 계(각 계면, 응축수)의 온도변화는 미세하고 거의 일정한 변화를 보였다.

Table 4에 보인 각 유형들의 조합에 대하여 모사를 수행하고 그 결과를 Fig.6~Fig.11에 나타내었다. Fig.6 와 Fig.7은 pre-dryer 와 after-dryer에서 하나의 건조 실린더에서 한 지점이 한 사이클 동안 한 지점에서의 각 부위의 온도변화를 나타내고 있다. 이들은 실린더와 지필이 접촉한 부분을 지필의 온도변화와 같이 살펴보고 실린더가 지필과 접촉하지 않는 부분인 실린더가 지필과 떨어지는 지점에서 다시 접촉하는 지점까지를 연결하여 모사한 결과를 보인 것이다. Fig.6은 pre-dryer 내 13번째 건조 실린더 부분의 온

도변화를, Fig.7은 after-dryer내 47번째 건조 실린더 부분의 온도변화를 도시한 것이다. Fig.8 과 Fig.9는 지필의 온도변화를, Fig.10 과 Fig.11은 실린더와 지필의 온도변화를 동시에 나타낸 것이다. Fig.8 와 Fig.9는 실린더와 접촉한 지점에서 시작한 지필이 open-run 및 free-run까지 이르는 동안의 온도변화를 살펴본 결과로서 pre-dryer의 경우 진공 롤까지의 지필의 온도변화까지, 실린더는 지필과 접촉하는 면의 온도변화만 나타낸 것이다. Fig.10 과 Fig.11은 실린더와 지필이 접촉하는 지점에서 시작하여 실린더가 한 사이클 순환하는 동안, 지필은 open-run 및 free-run까지를 동시에 모사한 결과이다. Fig.6~Fig.7에서는 실린더가 한번 순환하는 동안의 이동거리를 기준으로 하였으며 Fig.8~Fig.9에서는 지필이 실린더와 접촉하여 다음 번 실린더에 접촉하기까지의 이동거리를 기준으로 하였다. Fig.10~Fig.11에서는 위에서 실린더 이동거리와 지필의 이동거리(vacuum roll이전까지)를 기준으로 ratio를 나타내었다. 모사결과로부터 pre-dry에 비해 after-dry에서의 지필의 온도감소 폭이 급격히 변화됨을 알 수 있다. 이는 동일한 열전달 계수의 적용이 스팀압과 외부 공기온도에 의한 증발량 식에 서로 다른 영향을 미쳤기 때문인 것으로 여겨진다. 구체적으로 pre-dryer 내 지필은 free-water는 거의 증발하고 bond-water만 남게 된다. After-dryer 내 지필은 bond-water만 sizing에서 pick-up된 양과 결합되어 상대적으로 pre-dryer 내 지필보다 after-dryer내 지필의 열전달 계수가 높다는 것을 알 수 있다. 하지만 dryer 전 구간에 동일한 열전달 계수가 적용된다고 가정하여 최종 수분함량에 맞게 validation하여 조정해 주었기 때문에 after-dryer에서의 열전달 계수가 낮게 설정될 수도 있다. 또한 스팀압 및 건구온도가 높으며 습구온도가 낮게 주어져 있기 때문에 after-dryer 지필의 온도 모사결과가 급격한 변화를 보이는 것으로 나타나게 되었다.

앞에서 얻은 건조 실린더 모델은 다음과 같이 상태함수로 나타낼 수 있다. 아래식에서 A, B는 비선형을 선형화한 계수 행렬로서 A는 각각의 X행에 대해서 A

Table. 4 The combination of drying configurations

Description		Fig.6	Fig.7	Fig.8	Fig.9	Fig.10	Fig.11
		Pre-dryer	After-dryer	Pre-dryer	After-dryer	Pre-dryer	After-dryer
Ratio	Cylinder	A+C	A+C	A	A	A+C	A+C
	Web	A	A	A+B+D+B	A+B	A+B	A+B

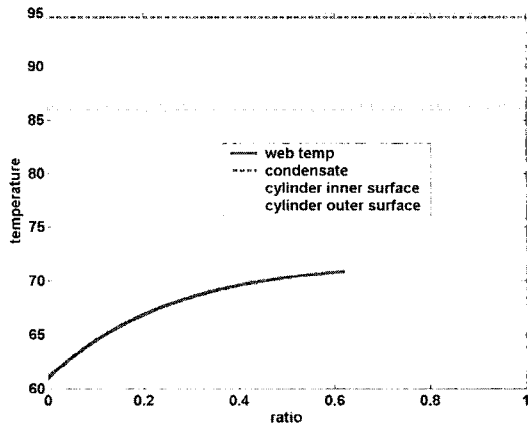


Fig. 6. Drying section of the cylinder on contacting with web (cylinder no.13).

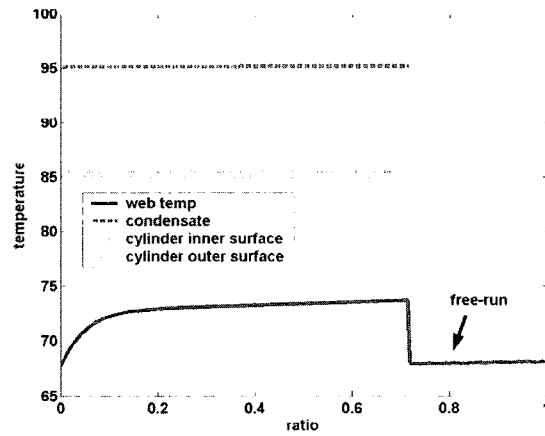


Fig. 9. Drying section of cylinder contacting with web (cylinder no.47).

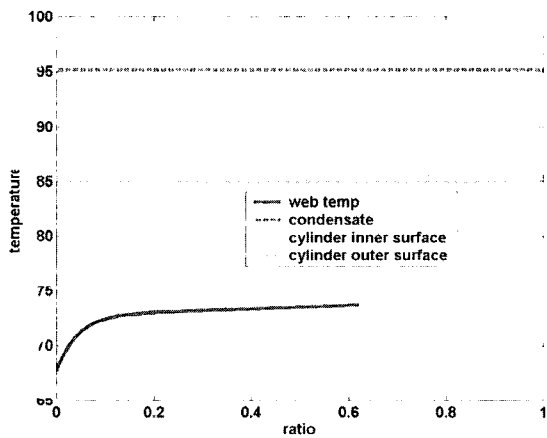


Fig. 7. Drying section of the cylinder contacting with web (cylinder no.47).

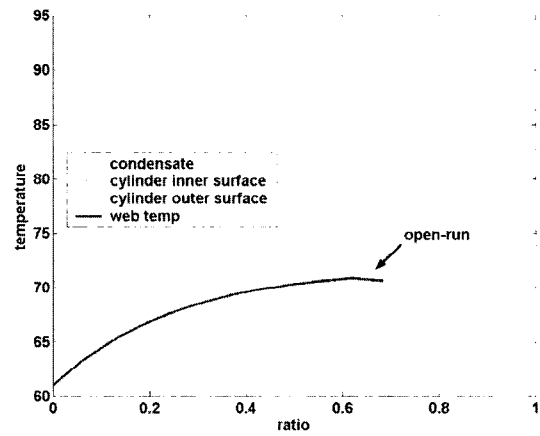


Fig. 10. The Drying cylinder contacting with web (cylinder no.13).

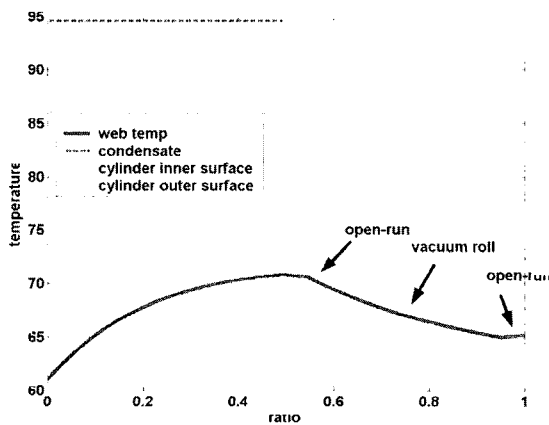


Fig. 8. Drying section of the cylinder and vacuum contacting with web (cylinder and vacuum roll no.13)

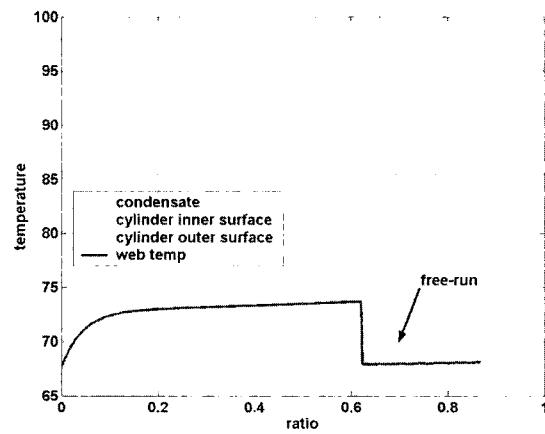


Fig. 11. The Drying cylinder contacting with web (cylinder no.47).

$$\begin{aligned} X &= AX + BU \\ Y &= CX + DU \\ Y &= GU \end{aligned} \quad [30]$$

$$X = Y = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} \\ G_{51} & G_{52} & G_{53} \\ G_{61} & G_{62} & G_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix}$$

의 열에 대한 선형화를, B의 경우 각각의 U(입력)행에 대해서 B의 열을 선형화 시킨 결과이다.

전달함수 G_{ij} 는 부록에 나타내었다. 실제 공장은 닫힌 루프내에서 입출력 신호가 이루어지기 때문에 D의 경우는 0이라고 간주할 수 있으며 C는 단순히 매개변수의 출력값을 나타내기 위해 항등 행렬이 된다.

각각의 입력변수가 출력변수에 어떤 영향을 줄 수 있는지 알아보기 위하여 각각의 입력변수 U에 계단변화가 도입되었을 때의 출력변수의 변화를 살펴보았다 (Fig.12). 아울러 위에서 얻은 건조공정의 모델에 대한 안정성 및 수렴성 여부를 판별하여 보았다. Fig.13로부터 pole들이 대부분 음수이므로 안정한 공정임을 알 수 있다. 그러나 일부 pole은 0이거나 0에 가까움으로 약간의 진동현상이 나타날 것임을 알 수 있다.

단일 실린더에 대한 모델링 방법을 전체 건조공정에 확대 적용한 결과는 Fig.14에 보인 바와 같다. 모사 결과와 실제 운전자료는 신뢰할 만한 일치율을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

제지공정 건조 실린더의 동특성을 규명하기 위하여 다양한 건조 유형들을 두루 감안한 실린더 모델을 규명하였다. 실린더 내의 수증기로부터 응축수, 실린더 자체에 이르는 열전달 계수는 회기식 과 경험에 의해

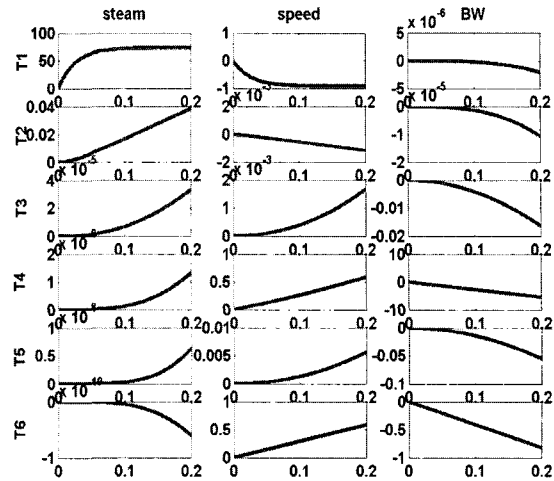


Fig. 12. Step responses.

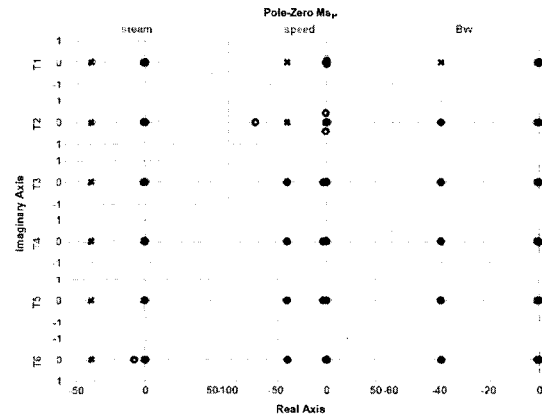


Fig. 13. Stability of the drying process.

얻어진 수치를 이용하였으며 일정한 수증기압에 의한 실린더 한 사이클 동안 실린더 내벽과 응축수의 온도는 일정하다고 보았다. 린과 사이징의 최종 수분함량 및 실제 지필의 온도를 이용하여 지필과 공기와의 열전달 계수를 조정하였다. 또한 평량에서 bone-dry는 일정하다고 가정하여 수분 증발량을 고려하였다. 실린더 표면의 초기 온도는 지필의 온도와 수분 함량에 민감하게 작용하였다. 수증기압에 의한 표면 온도를 예측할 수 있는 함수 값을 대입하고 실제 실린더의 표면 온도와 비교하여 수증기압과 실린더 온도와의 관계를 파악하여 보았다. 아울러 건조 유형에 따른 모사를 수행하여 각 계의 온도변화를 살펴보았으며 유도된 전달함수를 통하여 안정성 및 수렴성을 확인하였다.

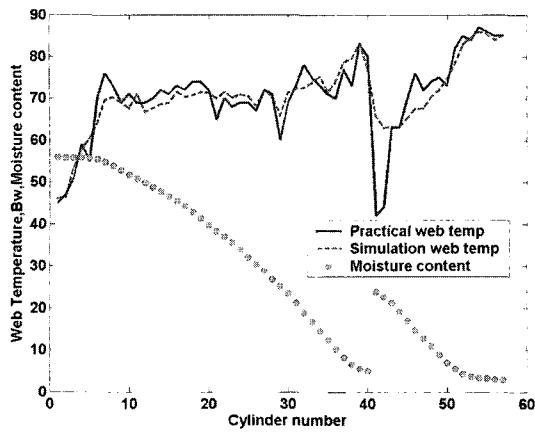


Fig. 14. Simulation of web temperature and moisture content in the dryer process (pre-dryer, after-dryer).

인용 문헌

1. Depoy, J. A., Pulp & Paper Magazine of Canada., 73: 67(1972).
2. Mori, Y., Shimizu, H., Takao, K., Ikari, T. and Nambu, T., 2000 Proceedings from Control Systems, Victoria.B.C, Canada, p.231.
3. Berrada, M., Tarasiewicz, S., Elkadiri, M. E. and Radziszewski, P. H., IEEE Trans. Indust. Electronics., 44(4):579(1997).
4. Karlsson, M., Papermaking Science and Technology., Vol.9, p.64, Tappi press, Helsinki, (2000).
5. Magnus, K , Nordic Pulp and Paper Research Journal, 17:66(2002).

부 록 : 전달함수 $G_{ij}(s)$

$$G_{11} = \frac{29.11s^5 + 28.09s^4 + 2.382s^3 + 0.0363s^2 + 1.678s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{21} = \frac{0.08793s^4 + 0.08375s^3 + 0.00614s^2}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{31} = \frac{0.0008522s^3 + 0.0007773s^2 + 0.0000461s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2 + 0.000008362s}$$

$$G_{41} = \frac{0.0005856s^2 + 0.0000483s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{51} = \frac{0.00006089s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{61} = \frac{-2.714 \cdot 10^{-17}s^2 - 2.312 \cdot 10^{-16}s - 1.85 \cdot 10^{-17}}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{12} = \frac{-0.03668s^5 - 0.03544s^4 - 0.003038s^3 - 0.00004068s^2 + 0.00002638s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{22} = \frac{-0.00003407s^5 - 0.0002506s^4 - 0.0002351s^3 + 0.00001317s^2 + 0.00009664 - 0.000007774}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2 + 0.000008362s}$$

$$G_{32} = \frac{0.0007.214s^4 + 0.003139s^3 + 0.01002s^2 + 0.0009207s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{42} = \frac{0.002352s^5 + 0.1025s^4 + 0.3308s^3 + 0.04319s^2 + 0.001492s - 0.00001009}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{52} = \frac{0.0002446s^4 + 0.01064s^3 + 0.03352s^2 + 0.001726s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{62} = \frac{0.002921s^5 + 0.1199s^4 + 0.1131s^3 + 0.00949s^2 + 0.0001392s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{13} = \frac{-0.001795s^2 - 0.0008719s - 0.00005971}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{23} = \frac{-0.0001637s^3 - 0.006639s^2 - 0.003192s - 0.0002182}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{33} = \frac{-0.01689s^4 - 0.6853s^3 - 0.3375s^2 - 0.02643s - 0.0002677}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{43} = \frac{-0.5506s^5 + 22.36s^4 - 11.9s^3 - 1.304s^2 - 0.0425s - 0.0002833}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{53} = \frac{-0.05725s^4 - 2.32s^3 - 1.046s^2 - 0.04925s - 0.0003571}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$

$$G_{63} = \frac{-0.08199s^5 - 3.365s^4 - 3.175s^3 - 0.2664s^2 - 0.003908s}{s^6 + 41.04s^5 + 38.72s^4 + 3.249s^3 + 0.04766s^2}$$