

제지공정 건조 실린더의 모델링 및 모사

이은호 · 박기영 · 여영구[†]

한양대학교 화학공학과
139-791 서울시 성동구 행당동 17
(2006년 11월 7일 접수, 2006년 12월 13일 채택)

Modeling and Simulation of Drying Cylinders in Paper Processes

Eun Ho Lee, Ki-Young Kwak and Yeong-Koo Yeo[†]

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea
(Received 7 November 2006; accepted 13 December 2006)

요 약

본 연구의 목적은 제지공정에서 건조 실린더의 모델을 규명하고 입력변수들에 대한 공정의 응답 특성을 분석하는 것이다. 모델의 규명은 실제 공장의 운전 데이터에 근거하였는데 건조공정에서는 실린더로 공급되는 수증기의 압력이 주요 변수가 된다. 수증기 응축액으로부터 캔버스로의 열전달 계수는 실린더 및 웹과 펄프의 열 전도도와 운전 데이터에 근거하는 실험식으로 나타낼 수 있음이 밝혀졌다. 실린더 모델은 측정되는 수분 함량과 웹 온도를 이용하여 검증하였으며 건조 공정의 안정성은 실린더 모델로부터 얻은 전달함수로부터 확인하였다.

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 where the steam pressure applied to the cylinder behaves as the major variable. 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 data. The effectiveness of the cylinder model is demonstrated by the measured moisture contents and web temperature. Stability of the drying process is analyzed based on the transfer functions derived from the cylinder model.

Key words: Paper Process, Drying Cylinder, Heat Transfer Coefficient, Simulation, Stability

1. 서 론

제지공정에서 건조공정은 전형적인 비선형 공정으로서 건조를 위한 가열 실린더의 효과적인 모델링은 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 제지공정의 건조 과정에서는 실린더 내 응축수, 수증기에 대한 분석, 지필 내 수분 증발량의 변화량, 그리고 열전달 계수가 주요 분석 대상이 된다. 건조공정에서는 건조 실린더 내로 공급되는 수증기의 압력이 가장 중요한 변수의 하나이다. Depoy[1]는 건조공정에서 가열 실린더, 지필, 그리고 펄프 부분을 세부적으로 나누어 선형화된 식을 구한 다음 모사를 시도하였으며 Mori 등[2]은 각 부분 내의 열전달 계수 및 두께를 일정하게 두고 지필의 온도와 수분함량의 변화에 따른 증발율의 변화량을 Iron 모델[3]로 모사하였다. Karlsson 등[4]은 수분함량과 지필의 온도에 따른 증발율의 변화량과 건조 실린더 공정에서의 상 변화를 세부적으로 나누어 모사하였다. Karlsson 등[5]은 수증기 공급 시스템의 원리를 적용하

여 건조공정 내 다중 실린더에 대한 동적 모델링을 수행하였다.

건조 실린더의 모델링에서 실린더 내 수증기압과 응축수, 그리고 실린더 사이의 열전달 계수는 정확한 측정이 불가능하므로 경험적인 식을 이용하여 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 측정된 응축수 두께를 이용하여 다중 실린더에서의 응축수 열전달 계수를 구하였다. 이는 응축수 두께의 변화에 따라 실린더 표면까지 이르는 열량이 상당한 변화를 보이기 때문이다. 건조 실린더의 외부 온도는 수분함량과 함께 공기중의 상대습도의 함수이며 지필의 온도에 영향을 미치는 주요 인자의 하나이다. 제지공정에서 평량과 속도는 지종교체시 주요한 변수가 되는데 정상 상태에서의 평량의 변화량은 수분량과 bone-dry(ash)의 변화량에 따라 좌우되지만 여기에서는 수

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ykyeo@hanyang.ac.kr

분량의 변화량, 즉 수분의 증발량만을 고려하였다. 아울러 정상 상태 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 측정하기 힘든 건조 실린더 내부의 계면의 온도 변화를 규명하는 데에 있다. 열전달 계수는 대상공정에서 닫힌 계 내의 최종 수분 함량 및 측정된 지필 온도를 이용하여 조정하였으며 열전도도, 두께, 속도의 함수로서 경험적인 수치를 적용하여 수치 해석적인 방법을 동원하여 나타내었다.

2. 건조공정의 열전달 특성

건조 실린더 공정의 구조는 크게 single-tier와 double-tier로 나눌 수 있다. 건조공정에서 pre-dry 부분에서는 single-tier와 double-tier가 공존하며 after-dry 부분은 double-tier만 존재한다. 건조 유형은 Fig. 1~4와 같이 나누어 볼 수 있다. Fig. 1은 열이 실린더-웹-캔버스 층을 차례로 통과하는 건조 유형을 보인 것이며, Fig. 2는 실린더와 실린더 사이에서 웹이 단독으로 이동하는 경우를 보인 것이다. Fig. 3은 웹이나 캔버스와 접촉되지 않는 실린더 부분을 보인 것이며, Fig. 4는 열이 실린더-캔버스-웹 층을 차례로 통과하는 유형을 나타낸 것이다. Fig. 1~4에 보인 바와 같이 single-tier는 실린더,

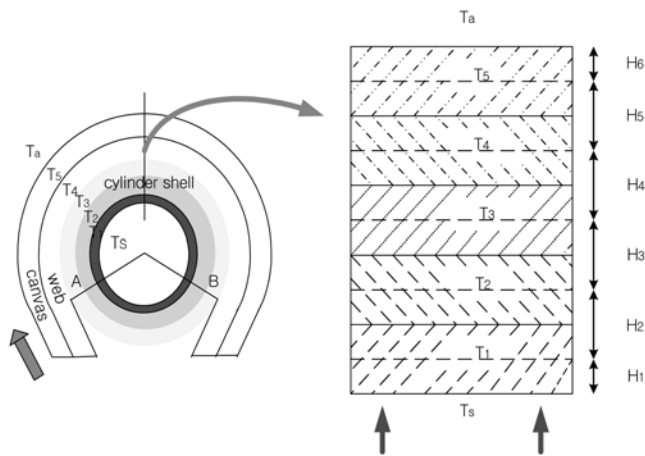


Fig. 1. Drying configuration A.

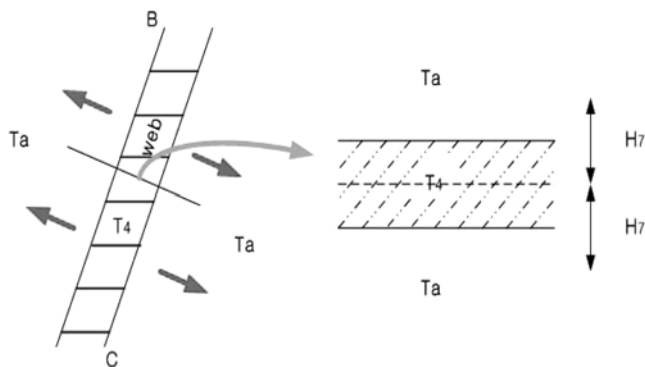


Fig. 2. Drying configuration B(free-run).

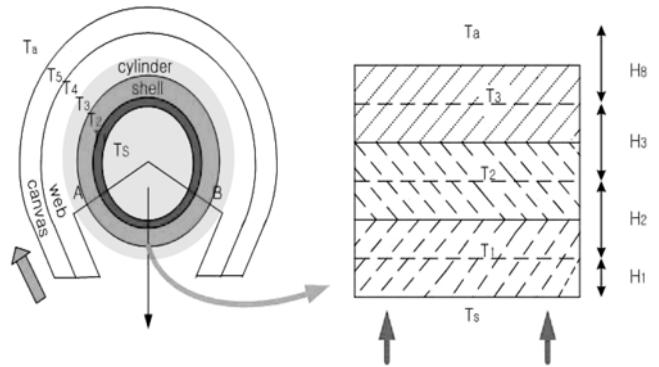


Fig. 3. Drying configuration C.

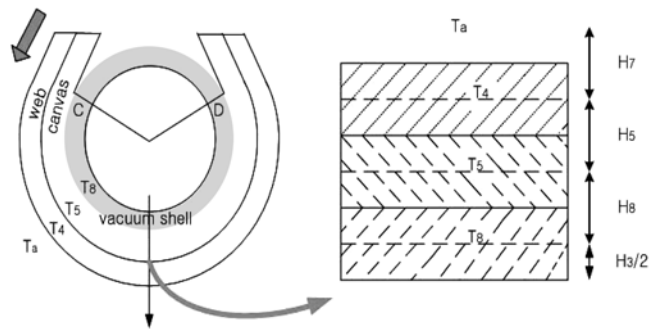


Fig. 4. Drying configuration D.

open-run(web + canvas), vacuum roll, open-run 구간, 그리고 double-tier는 실린더, free-run(web) 구간으로 구분되어 있다.

실린더 내로 수증기를 통해 주입된 열은 응축수, 실린더, 지필, 그리고 캔버스를 거쳐 실린더 외부로 빠져 나간다. 열전달 계수들은 경험적인 관계식으로 나타내었는데 이에 적용된 가정들은 다음과 같다.

- 1) 각 계면 사이에서의 온도는 동일하고 온도 기준선은 중앙을 기준으로 한다.
- 2) 계면과 계면 사이의 열전달 계수는 열 전도도 및 두께의 함수이며 계의 중앙선과 인접된 다른 계의 중앙선까지 열이 전달된다.
- 3) 응축수의 두께는 항상 일정하게 유지된다.
- 4) 후드 내 bone-dry는 항상 일정하다.
- 5) 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 분리되는데 소요되는 시간 동안 실린더를 수증기로 가열시키는 과정을 대상으로 하였다.

건조 실린더의 모델링에 이용된 열전달 계수는 Table 1, Table 2 및 Table 3에 보인 바와 같다. 열전달 계수는 대체로 $H = f(L, V^n)$ 의 형태로 적절하게 주어지는 것으로 밝혀졌다[4, 5]. Table 1에서 주어지지 않은 H_1 , H_2 , H_6 및 H_7 는 운전 데이터를 토대로 다음과 같은 추정식을 유도하여 이용하였다.

$$H_1 = \left[\frac{685}{L_1 \cdot 10^3} + \frac{10^6}{276 + 0.675 \cdot (V/60)^{2.79} + 0.0486 \cdot L_1 \cdot 10^3 \cdot (V/60)^{3.39}} \right] / (4186/2) \quad (1)$$

Table 1 Heat transfer coefficients of configuration A

Description	Thick [mm]	Thermal conductivity [Kcal/m/h ^o C]	Heat transfer coefficient [Kcal/m ² /sec ^o C]	Specific heat capacity [Kcal/kg ^o C]	Density [kg/m ³]
			H ₇ (web~air) H ₆		
Canvas	2.5	0.045	H ₅ = 0.0678	0.326	0.8×10 ³
Web	0.1		H ₄ = 0.3380	0.32	1.3×10 ³
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 H ₁	1.012	1×10 ³

Table 2 Heat transfer coefficients of configuration C

Description	Thick [mm]	Thermal conductivity [Kcal/m/h ^o C]	Heat transfer coefficient [Kcal/m ² /sec ^o C]	Specific heat capacity [Kcal/kg ^o C]	Density [kg/m ³]
			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 H ₁	1.012	1×10 ³

Table 3 Heat transfer coefficients of configuration D

Description	Thick [mm]	Thermal conductivity [Kcal/m/h ^o C]	Heat transfer coefficient [Kcal/m ² /sec ^o C]	Specific heat capacity [Kcal/kg ^o C]	Density [kg/m ³]
			H ₇		
Web	0.1		H ₅ = 0.0678	0.32	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

$$H_2 = \frac{1}{\frac{1}{H_3/2} + \frac{1}{H_1}} \quad (2)$$

$$H_7 = 0.0000742 \times V^{0.78} \quad (3)$$

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

3. 건조 실린더의 모델링

건조 실린더에서 에너지의 전달은 응축수, 실린더, 지펠 및 캔버스를 통하여 이루어진다. 이들 각 부분에서의 에너지 수지는 다음과 같다(Fig. 1~4참조).

1) 응축수

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

2) 실린더

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

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

3) 지필

$$\frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{\frac{m}{1000} \cdot (0.32 - 1.366 \times 0.2 + \frac{T_6}{100})} \cdot [(H_4 \cdot (T_3 - T_4) - H_5 \cdot (T_4 - T_5)) - m_{ev} \cdot \Delta H_{ev}] \quad (8)$$

$$\Delta H_{ev} = \Delta h_{vap} + \Delta h_s \quad (9)$$

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

$$T_r = \frac{T_4}{T_c} = \frac{T_4}{373.95} \quad (11)$$

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

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

4) 캔버스

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

5) 실린더: 공기와 접촉하지만 지필과 접촉하지 않는 부위(Fig. 3)

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

6) 진공 롤: (Fig. 4)

$$\frac{dT_7}{dt} = \frac{1}{L_2 \cdot D_2 \cdot C_2} \cdot (-H_3 \cdot (T_7 - T_5)) \quad (16)$$

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

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

여기서 상대습도(R)는 다음과 같은 보정식으로 표시할 수 있다[5].

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

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.

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

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

$$\frac{dMs(y)}{dt} = -\frac{g}{Bw} = -\frac{\dot{m}_{ev}}{m} \quad (22)$$

한편 Stefan 식 (4)으로부터

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \frac{\beta \cdot P_{tot}}{R_v \cdot T} \ln \left(\frac{P_{tot} - P_{va}}{P_{tot} - P_{vpo}} \right) \approx \frac{\beta}{R_v \cdot T} (P_{vpo} - P_{va}) \quad (23)$$

$$\beta = \frac{\alpha_{a-p}}{\rho_a \cdot c_a \cdot L e^{2/3}} \quad (24)$$

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \frac{\alpha}{\rho_a \cdot c_a \cdot L e^{2/3}} \cdot \frac{P_{tot}}{R_v \cdot T} \ln \left(\frac{P_{tot} - P_{va}}{P_{tot} - P_{vpo}} \right) \approx \alpha \cdot C \cdot \ln \left(\frac{P_{tot} - P_{va}}{P_{tot} - P_{vpo}} \right) \quad (25)$$

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

$$C = 7.03 \times 10^{-4} \text{ kg water } ^\circ\text{C/Ws} \quad (26)$$

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

$$\dot{m}_{ev} = \frac{r \cdot \pi \cdot 223/360}{100} \cdot w \cdot H_7 \cdot C \cdot 4186 \cdot \log \frac{P_{tot} - P_{va}}{P_{tot} - P_{vpo}} \quad (28)$$

$$\frac{dT_6}{dt} = -\frac{100}{m} \cdot \dot{m}_{ev} \cdot 1000 \quad (29)$$

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 온도 변화를 알아보고 각각의 유형을 재조합하였다.

열전달 계수 H_5 와 H_7 은 후드 내 전 지필의 온도 변화 및 최종 수분함량에 의해 결정되며 수증기압에 따른 표면 온도를 나타내는 식을 회귀 방법을 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 H_9 의 최적값을 얻을 수 있다. 이는 실린더와 지필이 접촉하는 실린더 한 지점에서 한 사이클 동안 정상 상태에서의 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. 5와 같이 요약해 볼 수 있다. 유도된 비선형 모델식을 선형화시킨 다음 Laplace 변환을 통하여 전달함수를 구할 수 있으며 선형화된 식은 상태공간 모델로 나타낼 수 있다.

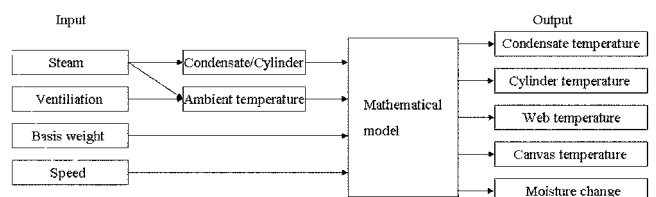


Fig. 5. Input and output variables in drying process.

Table 4 The combination of drying configurations

Description	Pre-dryer	After-dryer	Pre-dryer	After-dryer	Pre-dryer	After-dryer
Ratio	Cylinder	A+C	A+C	A	A	A+C
	Web	A	A	A+B+D+B	A+B	A+B

4. 결과 및 고찰

수분함량과 가장 밀접한 관계가 있는 열전달 계수 H_7 과 지필의 온도 분포에 영향을 미치는 열전달 계수 H_5 는 pre-dryer 및 after-dryer의 출구 수분함량에서의 오차값을 이용하여 조정 한 후 모사에 이용하였으며, 실제 측정 온도와 비교하여 최종값을 조정하였다. 이때 이용된 pre-dryer와 after-dryer 출구 수분함량은 각각 5%, 및 3%이다. 응축수와 실린더 내/외벽의 온도는 기본적으로 정상 상태일 경우 실린더 한 사이클이 지나면 실린더의 외벽 온도는 원점에서 같은 초기온도에서 시작한다고 가정하여 최적의 온도 조건을 찾아 내었다. 이때 실린더와 응축수의 열용량은 0.1보다 크다고 간주하였다. 실린더의 회전속도가 빠르기 때문에 계(각 계면, 응축수)의 온도 변화는 미세하고 거의 일정한 변화를 보였다.

Table 4에 보인 각 유형들의 조합에 대하여 모사를 수행하고 그 결과를 Fig. 6에서 Fig. 11까지에 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7은 pre-dryer와 after-dryer에서 하나의 건조 실린더에서 한 지점이 한 사이클 동안 한 지점에서의 각 부위의 온도 변화를 나타내고 있다. 이들은 실린더와 지필이 접촉한 부분을 지필의 온도 변화와 같이 살펴 보고 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 온도 변화를, Fig. 7은 after-dryer 내 47번째 건조 실린더 부분의 온도 변화를 도시한 것이다. Fig. 8과 Fig. 9는 지필의 온도 변화를, Fig. 10과 Fig. 11은 실린더와 지필의 온도 변화를 동시에 나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 9는 실린더와 접촉한 지점에서 시작한 지필이 open-run 및 free-run까지 이르는 동안의 온도 변화를 살펴본 결과로서 pre-dryer의 경우 진공 롤까지의 지필의 온도 변화까지, 실린더는 지필과 접

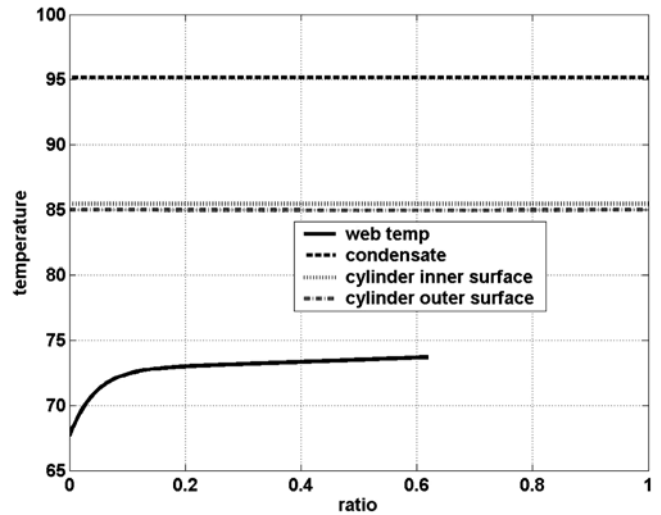


Fig. 7. Drying section of the cylinder contacting with web (cylinder no.47).

촉하는 면의 온도 변화만 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11은 실린더와 지필이 접촉하는 지점에서 시작하여 실린더가 한 사이클 순환하는 동안, 지필은 open-run 및 free-run까지를 동시에 모사한 결과이다.

그림에서 ratio는 실린더 외부 둘레에 대한 web의 실린더 접촉부분의 비율을 의미한다. Fig. 6과 Fig. 7은 실린더가 한번 순환하는 동안의 이동거리를 기준으로 하고 Fig. 8과 Fig. 9는 지필이 실린더와 접촉하여 다음 번 실린더에 접촉하기까지의 이동거리를 기준으로 하여 ratio를 설정하였으며, Fig. 10과 Fig. 11은 실린더 이동거리와 지필의 이동거리(Vaccum roll 이전까지)를 기준으로 ratio를 나타내었다. 모사 결과 pre-dry에 비해 after-dry에서의 지필의 온도 감소 폭이 급격히 변화됨을 알 수 있다. 이는 동일한 열전달 계수의 적용이 수증기 압력과 외부 공기 온도에 의한 증발량 식에 서로 다른 영향을 미치기 때문이다. 구체적으로 pre-dryer 내 지필은 free-water는 거의 증발하고 bond-water만 남게 된다. After-dryer 내 지필은 bond-water만 sizing에서 회수된 양과 결합되어 상대적으로 pre-dryer내 지필보다 after-dryer 내 지필의 열전달 계수가 높을 것임을 알 수 있다. 하지만 dryer 전 구간에 동일한 열전달 계수가 적용된다고 가정하여 최종 수분함량에 맞게 조정해 주었기 때문에 after-dryer에서의 열전달 계수가 낮게 설정될 수도 있다. 또한 수증기 압력 및 건구 온도가 높으며 습구 온도가 낮게 주어졌기 때문에 after-dryer 지필의 온도 모사 결과가 급격히 변화하는 것으로 나타나고 있다.

앞에서 얻은 건조 실린더 모델은 상태함수로 나타낼 수 있다. 다음의 상태함수 식에서 A와 B는 비선형 식을 선형화시킨 결과 얻어지는 계수 행렬들이다.

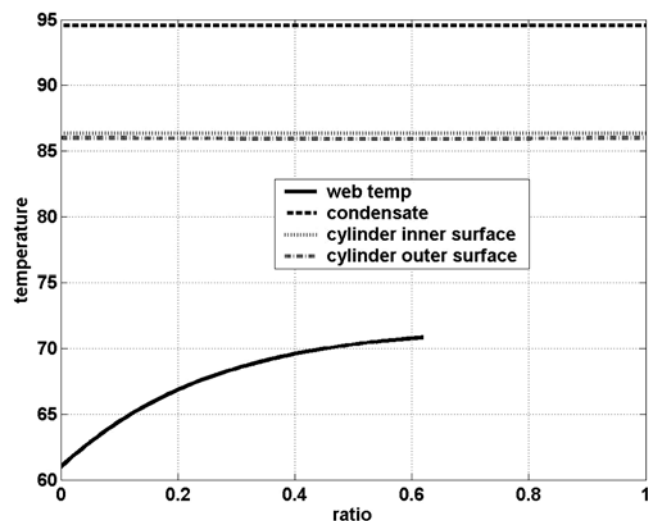


Fig. 6. Drying section of cylinder contacting with web (cylinder no.13).

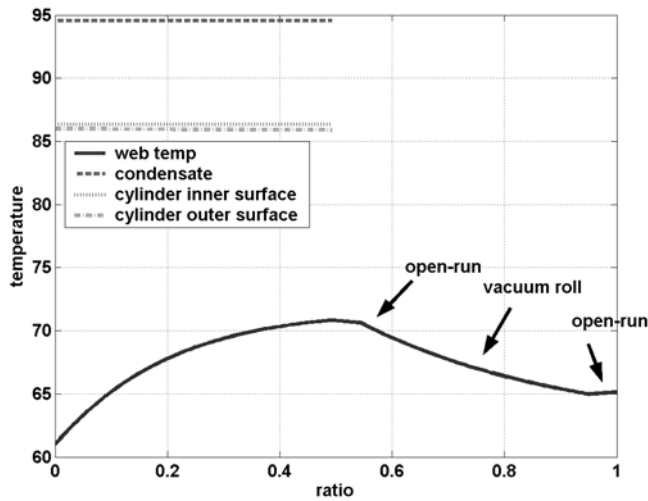


Fig. 8. Drying section of the cylinder and vacuum contacting with web (cylinder and vacuum roll no.13).

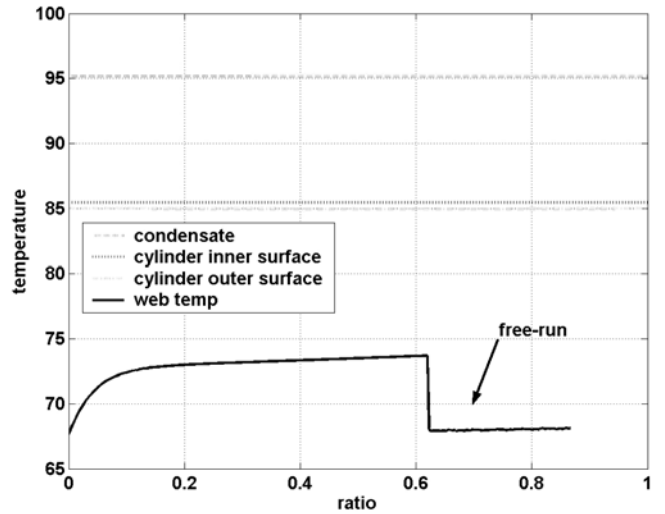


Fig. 11. The drying cylinder contacting with web (cylinder no.47).

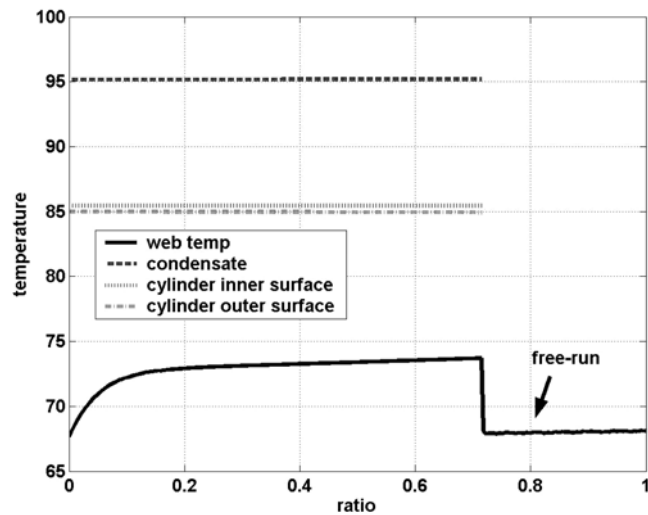


Fig. 9. Drying section of cylinder contacting with web (cylinder no.47).

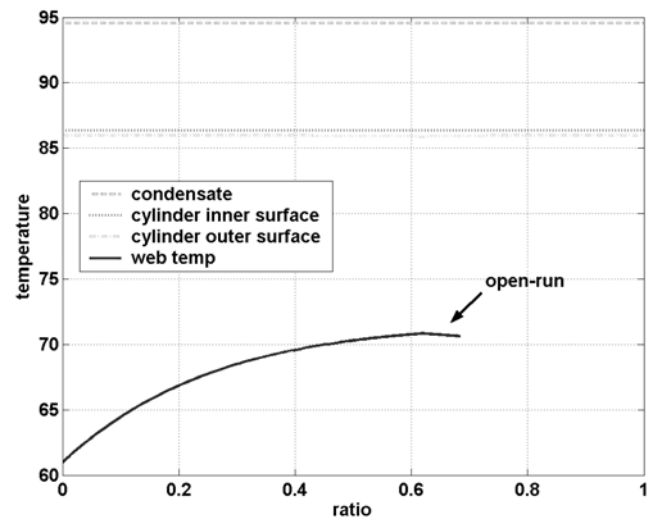


Fig. 10. The drying cylinder contacting with web (cylinder no.13).

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$Y = CX + DU$$

$$Y = GU$$

(30)

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

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

전달함수 G_{ij} 는 부록에 나타내었다. 실제 공정에서 D 는 0이며, C 는 단순히 매개변수의 출력값을 나타내어 주는 항등 행렬이 된다.

각각의 입력변수가 출력변수에 어떤 영향을 줄 수 있는지 알아보기 위하여 Fig. 12에서 각각의 입력변수 U 에 계단 변화가 도입되었을 때의 출력변수의 변화를 살펴보았다. 아울러 위에서 얻은 건조 공정의 모델에 대한 안정성 및 수렴성 여부를 판별하여 보았다. Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 pole들이 대부분 음수이므로 안정한 공정임을 알 수 있다. 그러나 G_{22} 의 경우 일부 zero들은 복소수이거나 양의 값을 가진다.

Fig. 14는 실린더를 세부적으로 응축수, 실린더 내벽 및 실린더 외벽으로 나누어 모사한 결과와 실제 운전 자료를 서로 비교하여 본 것이다. 얻은 모델은 실제 건조공정을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로부터 지중교체시 일정한 조건하에서 입력변수(평량, 속도, 수증기압)의 변화에 따른 출력변수(지필의 온도 및 수분함량)의 변화량을 구할 수 있으며, 실제 공정의 운전에서 측정할 수 없는 정상

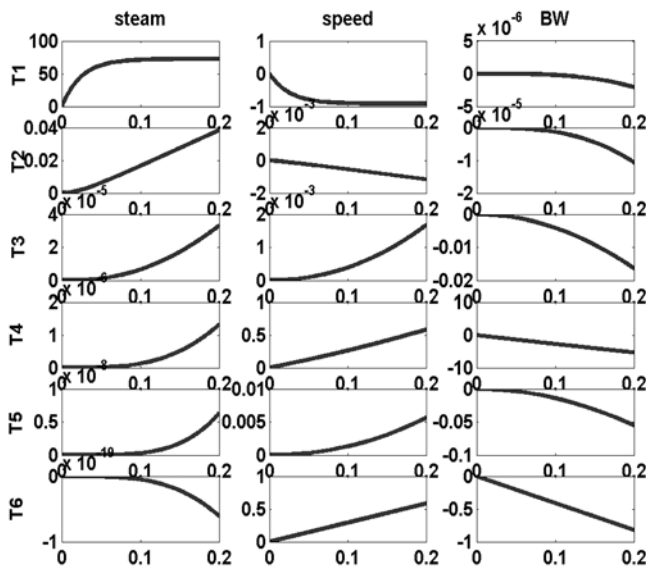
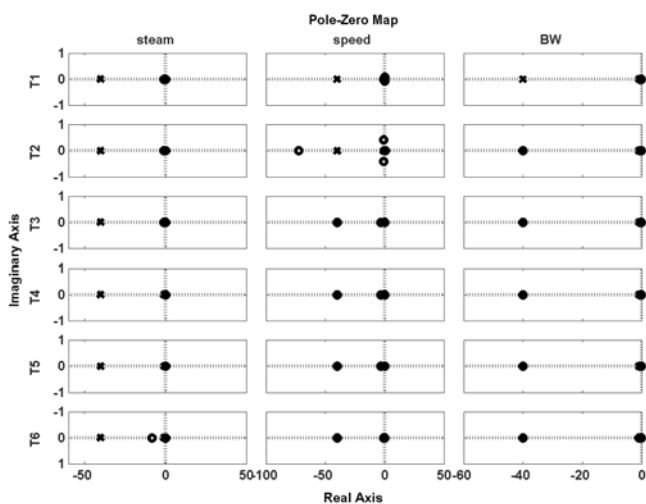
Fig. 12. Step responses (steam: 100 °C, speed: 1,000 m/min, BW: 50 g/m²).

Fig. 13. Stability of the drying process(○: zero, ●, x: pole).

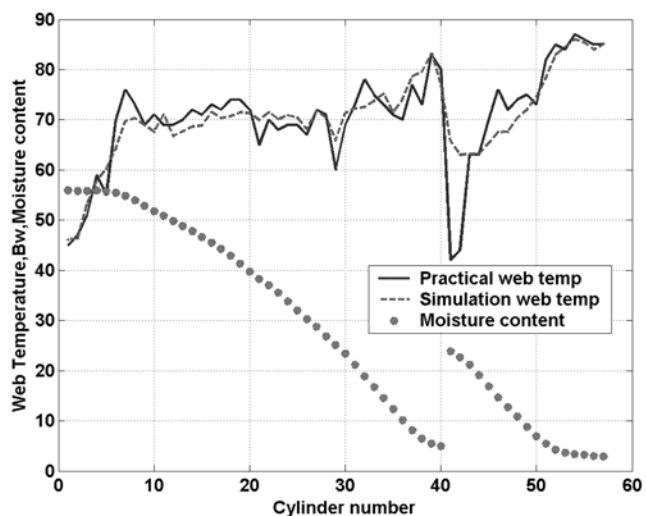


Fig. 14. Simulation of web temperature and moisture content in the dryer process(pre-dryer, after-dryer).

상태에서의 실린더 내부의 온도 변화를 얻을 수 있다.

5. 결 론

제지공정 건조 실린더의 동특성을 규명하기 위하여 다양한 건조 유형들을 두루 감안한 실린더 모델을 규명하였다. 실린더 내의 수증기로부터 응축수, 실린더 자체에 이르는 열전달 계수는 추정식과 경험에 의해 얻어진 값들을 이용하였으며 수증기 압력이 일정할 경우 한 사이클의 건조과정 동안 실린더 내벽과 응축수의 온도는 일정하다고 보았다. 필과 사이징의 최종 수분함량 및 실제 지필의 온도를 이용하여 지필과 공기와 열전달 계수를 조정하였으며, 또한 평량에서 bone-dry는 일정하다고 가정하여 수분 증발량을 추정하였다. 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. 건조 공정의 모사 결과와 실제 운전 자료를 서로 비교하여 본 결과 얻은 모델은 실제 건조공정을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다. 아울러 건조 유형에 따른 모사를 수행하여 각 계의 온도변화를 살펴보았으며 유도된 전달 함수를 통하여 안정성 및 수렴성을 확인하였다.

사용기호

- A : Evaporation area [m²]
- Bw : Basis weight [kg/m²]
- c_a : Heat capacity of air [kcal/kg °C]
- C₁ : Heat capacity of condensate [kcal/kg °C]
- C₂ : Heat capacity of cylinder [kcal/kg °C]
- C₃ : Heat capacity of canvas [kcal/kg °C]
- D₁ : Density of condensate [kg/m³]
- D₂ : Density of cylinder [kg/m³]
- D₃ : Density of canvas [kg/m³]
- g : Evaporation rate [kg/m²]
- H₁ : Heat transfer coefficient between condensate interface and cylinder [kcal/m²sec °C]
- H₂ : Heat transfer coefficient between condensate and cylinder interface [kcal/m²sec °C]
- H₃ : Heat transfer coefficient between cylinder and cylinder interface [kcal/m²sec °C]
- H₄ : Heat transfer coefficient between cylinder and web interface [kcal/m²sec °C]
- H₅ : Heat transfer coefficient between web and canvas interface [kcal/m²sec °C]
- H₆ : Heat transfer coefficient between canvas and air [kcal/m²sec °C]
- H₇ : Heat transfer coefficient between web and air [kcal/m²sec °C]
- H₉ : Heat transfer coefficient between cylinder and air [kcal/m²sec °C]
- L₁ : Thickness of condensate [m]
- L₂ : Thickness of cylinder [m]
- L₃ : Thickness of canvas [m]
- Le : Lewis number
- m : Basis weight [kg/m²]

m_{ev} : Evaporation rate [kg/m²sec]
 Ms : Moisture content [kg/kg]
 r : Radius of cylinder [m]
 R_v : Gas constant of water vapor [461.5 J/Kgwater/K]
 P_{va} : Vapor pressure [bar]
 P_{tot} : Total pressure [bar]
 P_{vpo} : Partial vapor pressure at the surface of web [bar]
 T_1 : Temperature of condensate [°C]
 T_2 : Temperature of the 1st cylinder interface [°C]
 T_3 : Temperature of the 2nd cylinder interface [°C]
 T_4 : Temperature of pulp [°C]
 T_5 : Temperature of web [°C]
 T_6 : Temperature of web interface [°C]
 T_7 : Temperature of vacuum cylinder [°C]
 T_{aw} : Temperature of wet bulb [°C]
 T_s : Temperature of steam [°C]
 V : Operation speed [m/min]
 w : Width of web [m]

그리이스 문자

α : Heat transfer coefficient between web and air [kcal/m²sec]
 ΔH_{ev} : Heat of evaporation [kcal/kg]
 Δh_s : Heat of absorption [kcal/kg]
 Δh_{vap} : Latent heat [kcal/kg]
 ρ_a : Density of air [kg/m³]

부 록 : 전달함수 $G_{ij}(s)$

$$\begin{aligned}
 G_{11} &= \frac{29.11S^5 + 28.09S^4 + 2.382S^3 + 0.0363S^2 + 1.678S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{21} &= \frac{0.08793S^4 + 0.08375S^3 + 0.00614S^2}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{31} &= \frac{0.0008522S^3 + 0.0007773S^2 + 0.0000461S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2 + 0.000008362} \\
 G_{41} &= \frac{0.0005856S^2 + 0.0000483S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{51} &= \frac{0.00006089S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{61} &= \frac{-2.714 \cdot 10^{-17}S^2 - 2.312 \cdot 10^{-16}S - 1.85 \cdot 10^{-17}}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{12} &= \frac{-0.03668S^5 - 0.03544S^4 - 0.003038S^3 - 0.00004068S^2 + 0.00002638S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{22} &= \frac{-0.00003407S^5 - 0.0002506S^4 - 0.0002351S^3 + 0.00001317S^2 + 0.00009664 - 0.000007774}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2 + 0.000008362S}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_{32} &= \frac{0.0007214S^4 + 0.003139S^3 + 0.01002S^2 + 0.0009207S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{42} &= \frac{0.002352S^5 + 0.1025S^4 + 0.3308S^3 + 0.04319S^2 + 0.001492S - 0.00001009}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{52} &= \frac{0.0002446S^4 + 0.01064S^3 + 0.03352S^2 + 0.001726S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{62} &= \frac{0.002921S^5 + 0.1199S^4 + 0.1131S^3 + 0.00949S^2 + 0.0001392S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{13} &= \frac{-0.001795S^2 - 0.0008719S - 0.00005971}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{23} &= \frac{-0.0001637S^3 - 0.006639S^2 - 0.003192S - 0.0002182}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{33} &= \frac{-0.01689S^4 - 0.6853S^3 - 0.3375S^2 - 0.02643S - 0.0002677}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{43} &= \frac{-0.5506S^5 + 22.36S^4 - 11.9S^3 - 1.304S^2 - 0.0425S - 0.0002833}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{53} &= \frac{-0.05725S^4 - 2.32S^3 - 1.046S^2 - 0.04925S - 0.0003571}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2} \\
 G_{63} &= \frac{-0.08199S^5 - 3.365S^4 - 3.175S^3 - 0.2664S^2 - 0.003908S}{S^6 + 41.04S^5 + 38.72S^4 + 3.249S^3 + 0.04766S^2}
 \end{aligned}$$

참고문헌

1. Depoy, J. A., "Analog Computer Simulation of Paper Drying A Workable Model," *Pulp & Paper M. Canada*, **73**(1), 67-75(1972).
2. Mori, Y., Shimizu, H., Takao, K., Ikari, T. and Nambu, T., "Development of A New Automatic Grade Change System for Paper Machine," *Proceedings from Control Systems 2000*, Victoria. B. C., Canada, 231(2000).
3. Berrada, M., Tarasiewicz, S., Elkadiri, M. E. and Radziszewski, P. H., "A State Model for the Drying Paper in the Paper Product Industry," *IEEE Trans. Indust. Electronics*, **44**(3), 579-586(1997).
4. Karlsson, M., "Papermaking Science and Technology Book 9," *Fapet Oy*, 55(2000).
5. Karlsson, M., Stenstrom, S. and Baggerud, E., "Dynamic Simulation of the Steam Supply System for a Multi-cylinder Dryer," *Nordic Pulp and Paper Res. J.*, **17**(1), 66-74(2002).