

CFD를 이용한 종이건조의 전산모사

Simulation of the paper drying using CFD field Model

임정훈 · 이성철

한양대학교 화학공학과

Abstract

The process of papermaking involves water removal on the paper machine wire, in the press section and in the dryer section. In the dryer section, liquid water in the wet web is removed mainly by evaporation. In conventional machine this is achieved by passing the web over a number of steam heated dryer rolls.

A drying process of paper on a heated cylinder roll calculated based on a 1-dimensional model which concerns unsteady heat and mass transfer in the direction of paper thickness. In this study, Prediction of moisture contents average paper sheet temperature and volume fraction along a series of cylinder. Independently, developed models is compared using the same reference data. The model is implemented in CFD code, FLUENT, using user-define-function (UDFs).

1. 서 론

제지산업에서 가장 일반적인 건조시스템은 multi-cylinder건조기로 종이는 여러개의 가열된 실린더를 통과하여 건조하게 된다. 지필에 대한 모델링은 1950년대에서 현재까지 여러문헌이 존재한다. Han[1]은 섬유 mat의 가열표면을 조사하여 종이의 건조에서 내부수분이동에 대해 분석하였고, Lee와 Hind[2]은 건조과정을 묘사하기 위해 포괄적인 질량과 에너지방정식을 완성하였다. Karlsson[3]은 추가로 prahl's의 sorption isotherms 사용에 더하여 확산기반의 물의 이동을 기술하였다.

복잡한 열과 물질전달과정은 부과되는 경계조건의 결과로써 지필내에 내부과정은 시작되며, Multi-cylinder의 신뢰할 수 있는 모델화를 위해 내부에서의 질량과 열전달현상의 이해가 필요하다. 이 연구의 목적은 Press section을 통과한 후 지필의 온도와 수분함량을 계산하고 운전조건과 같은 전형적인 조건하에서 다양한 열과 질량메카니즘을 기초로하는 수학적인 모델의 개발에 있다.

2. 지배방정식

지필은 자유수,결합수 그리고 공기와 증기를 함유하고 있는 층을 이루고 있는 섬유로 구성되어있다. 그림 1과 같이 지필의 단위부피로 표현이 가능하다. 이와 같은 가상의 종이구조모델의 설정은 지필의 열전도도, 수분함량과 같은 이동성질과 관계하기 위하여 가정하였다.

본 연구에서 사용된 모델은 지배방정식은 크게 Continuity, Momentum, Energy, Speicies 방정식으로 나뉘어지고, 이 방정식들은 지필의 건조동안에 발생하는 열과 질량전달을 묘사하기위하여 사용된다. 또한 각 건조형상에 따른 각기 다른 단계들은 열과 질량보존에 대한 경계조건을 반영하였다.

Continuity equation	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_0(1-\varepsilon_{w0})\rho_g) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_g u) = \Omega_w, \quad \Omega_w = \left. \frac{\partial \rho_w}{\partial t} \right _{wf} + \left. \frac{\partial \rho_w}{\partial t} \right _{wb}$
Monentum equation	$\frac{\partial(\rho_g u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_g uu) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \left(\frac{\mu u}{\kappa} \right)$
Moment of water	$u_w = -D_w \frac{\partial \psi}{\partial z}, \text{ where } \psi = \varepsilon_0 S + \varepsilon_{wi}(1-\varepsilon_0)$
Energy equation	$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left\{ (1-\varepsilon_{wi})(1-\varepsilon_0)\rho_f C_{pf} + (\varepsilon_{wi}(1-\varepsilon_0) + \varepsilon_0 \varepsilon_{w0})\rho_w C_{pw} + \varepsilon_0(1-\varepsilon_{w0})\rho_g C_{pg} \right\} T \right]$

	$+\frac{\partial}{\partial z}\{\rho_w C_{pw} u_w T + \rho_g C_{pg} u_g T\} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}\right) - \Omega_w \Delta H_{ev}$ $\Delta h_{ev} = \Delta h_{vap} + \Delta h_s$ $\Delta h_{vap} = 2504 - 2.8(T - 273.15)$ $\Delta h_s = 1364 \exp\left[\frac{-19.45MC}{1+MC}\right], \quad k_{eff} = \frac{2}{\frac{1}{k_{eff} _{parallel}} + \frac{1}{k_{eff} _{series}}}$
Species equation	$\frac{\partial(\varepsilon_0 \rho_g Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_g u Y_i) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_0 \rho_g D_{eff} \frac{\partial Y_i}{\partial z}\right) + \Omega_w$ $Y_{air} = (1 - Y_v), \quad D_{eff} = 2.6 \times 10^{-5} T^{1.5} \left(\frac{1.0133 \times 10^5}{P_g}\right)$
Water evaporation	$\left.\frac{\partial \rho_w}{\partial t}\right _{wf} = \frac{2\delta}{2-\delta} \frac{P_{sat} - P_v}{2\pi RT/M_w} S_f \quad (U \geq FSP)$ $\left.\frac{\partial \rho_w}{\partial t}\right _{wb} = \frac{2\delta}{2-\delta} \frac{P_{sati} - P_v}{(2\pi RT/M_w)^{1/2}} S_f \frac{\pi d_k^2}{4l^2} \quad (U < FSP)$ $\log P_{sat} [bar] = 5.127 - \frac{1690}{T + 230}, \quad P_{sati} = P_{sat} \exp\left[-\frac{2\sigma}{\gamma \rho_w RT}\right]$ $\gamma = 10^{(8.17U - 9.51)}, \quad \sigma = 77.5 \times 10^{-3} - 0.185 \times 10^{-3} T$
Porous medium	$\frac{V_s}{V_{s,0}} = \frac{m_w + m_g}{m_{s,0}} = \frac{\rho_w + \rho_g}{\rho_{s,0}}, \quad \varepsilon = \frac{V_g}{V}$ $\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V} = 1 - \frac{V_{s,0}}{V} \left(\frac{\rho_w + \rho_g}{\rho_{s,0}}\right), \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{V_{s,0}}{V \rho_{s,0}} \left(\frac{\partial \rho_w}{\partial t}\right)$

3. 경계조건

Fig 3.에서 보이는 것과 같이 지필의 한쪽면은 투과되지 않는 가열된 실린더 표면에 접촉해 있으며 다른 한쪽은 대기조건에 노출되어 있다. 따라서 경계조건은 다음의 조건에 따른다.

At $z=0$ (the surface that touches the heated cylinder)	$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big _0 = h_{cp}(T_c - T), \quad \frac{\partial \rho_v}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0$
At $z=z$ (the surface that the felt side or the open side)	$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big _z = h_s(T - T_{air}), \quad -D_{eff} \frac{\partial \rho_v}{\partial z} = h_m(\rho_z - \rho_{air}), \quad p = p_{ambient}$

위의 경계조건에서 열전달 계수 h_{cp} 와 h_s 는 Fig 1, 2에서처럼 각기 형상에 대해 다른 단계를 거치게 되며 각 단계에 따라 다음의 조건들이 반영되어 계산된다.

경계조건 1 (paper-air)	$h_{pa} = \frac{\Omega_w z C_{pg}}{\exp \left[\left(\Omega_w z \frac{C_{pg}}{h_{pa}^*} \right) - 1 \right]}$ $Nu_{turb} = \frac{h_{pa}^* L_c}{k_a} = \frac{0.037 Re^{0.81} Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)}$ $Nu_{lam} = \frac{h_{pa}^* L_c}{k_a} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$ $Nu = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}$
경계조건 2 (paper-felt-air)	$h_{pfa} = \frac{\Omega_w z C_{pg}}{\exp \left[\left(\Omega_w z \frac{C_{pg}}{h_{pfa}^*} \right) - 1 \right]}$ $\Omega_w = \Omega_w (1 - FRF) \quad h_{paf}^* = h_{pa}^*$
경계조건 3	

(Cylinder-paper)	$h_{cp} = h_{cp}^0 + 955MC$
질량전달계수	$h_m = 0.014 \left(\frac{P_g M_v}{RT} \right)$

4. 모델의 수행

모델은 전산유체역학용 상용코드인 FLUENT 6.0을 이용하였고, 모든 방정식들은 FLUENT 알고리즘에 따라 연속적이고 반복적으로 수행한다. 하지만 지필 내부에서 발생하는 현상들을 standard version으로 풀수 없기 때문에 사용자 정의 함수(User define functions)를 이용하여 수행하였다.

5. 결과 및 고찰

지배방정식에 의해 묘사된 1차원 건조모델을 경계조건의 방정식과 서로 결합하여 지필에 대해 적용하였다. 시스템의 입력조건과 물리적인 특성은 Table 1,2에 나타내었다.

본 연구에서 고려된 모델과 비교하기 위하여 동일한 입력값에 대해서 문헌에서 사용된 모델의 결과값을 비교하였다. Fig.4과 Fig.5은 Single-tier dryer와 Double-tier dryer에서 평균지필의 온도와 수분함량에 대해 나타내었다. 건조가 진행됨에 따른 전체적인 모습은 두 모델이 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

Fig.6은 건조 과정중 지필 구조내 부피 비율의 변화를 살펴본 그림이다. 섬유, 물, 기체로 채워진 세공으로 구성된 결합 구조는 건조 과정 중 지필 내부에서 열, 물질 전달에 상당한 영향을 미치게 되고 건조가 진행됨에 따라 물로 차있던 공간이 서서히 기체로 대체되고 EMC이하에서는 수축이 일어나면서 구조가 변화게 되는 과정을 나타내고 있다. Fig.7과 Fig.8은 지필의 두께 방향에 따른 온도분포와 수분함량을 보여주고 있다.

지필이 실린더와 접촉하고 있는 면에서 온도가 가장 뜨겁고 외부의 온도에서 안정화

가 되고 있음을 보여주고 있다. 수분함량은 지필의 양끝면 보다 중앙지점에서 항상 더 젖어 있는 상태가 되고 있다. Fig. 9는 실제 공정(평량 52g, 주행속도 1440m/min)에서 측정된 실린더의 온도값으로 지필의 온도와 수분함량을 예측해보았다. 측정된 지필의 온도와 시뮬레이션 결과값이 약간의 차이가 있으나 비슷한 경향을 보임을 확인할 수 있었으며, 수분의 함량은 거의 일치하였다.

6. 결 론

종이내에 존재하는 섬유, 자유수, 결합수, 공기를 구성된 다공성매체를 가상의 구조를 가정해 종이 두께 방향으로의 1차원 모델을 건조가 진행됨에 따른 물과 증기의 이동을 계산하여 수행하였다. 문헌과 비교해 보아 거의 일치하는 결과를 보임을 확인하여 안정성을 확인하였고, 건조에 따른 지필 내 온도, 수분분포를 두 개의 다른 형상(Single과 Double-tier)에서 조금은 다른 온도분포를 예측할 수 있었다. 지필은 종이의 수축 때문에 더욱 복잡한 양상을 띄게 되는데 건조에 따른 지필의 부피분율도 예측이 가능하였다. 또한 실제 측정된 데이터를 적용하여 안정적인 결과를 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 연구 특성화 사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

인용문헌

1. Han,S.t., Pulp and paper Magazine of Canada, 537-549 (1964)
2. Lee,P.F.,and Hinds, Tappi Journal, 64(12) 39-44 (1981)
3. Karlsson, M., Papermaking Science and Technology., Vol.9, Tappi press, Helsinki, (2000).

4. M.C. Asensio, J. Seyed-Yagoobi and J.A. Lehtinen., *Drying Tech.*, 13(4), 945-958 (1995)
5. Younouke H., Hiroaki K., and Kazuko T., *Heat Transfer-Asian Research.*, 30(2), (2001)
6. B. wilhelmsson, S. Stenstrom., *Drying Tech.*, 13(4),959-975 (1995)
7. B. wilhelmsson, L. Fagerholm., *Tappi Journal.*, 77(5), 159-168 (1994)
8. M. Gardner., *Paper Technology.*, 33-38, (2000)
9. P. Chen and Dabid C.T.Pei., *Int.J.Heat Mass Transfer.*, 32(2), 297-309 (1989)
10. S.A. Reardon, M.R.Davis, and P.E. Doe., *Drying Tech.*, 17(4&5), 655-690 (1999)
11. W.J. Coumans and W.M.A. Kruf., *Drying Tech.*, 13(4), 985-998 (1995)
12. M.C. Asensio., *Transport phenomena during drying of deformable,hygroscopic porous media : findamentals and applications*

Nomenclature

C_p	specific heat at constant pressure	$J / kg \cdot K$
D_{eff}	counter diffusion coefficient between water vapor and air	m^2 / s
d_k	a diameter of the pore that contains water in fiber	m
l	interval of the pore that contains water in fiber	m
ΔH_v	latent heat of vaporization	J / kg
ΔH_s	heat of sorption	J / kg
M	molecular weight	$kg / kmol$
Y	mass fraction	
P_{sat}	saturated vapor pressure of water	Pa
P_v	partial pressure of water vapor	Pa
R	universal gas constant	$J / kmol \cdot K$
z	thickness of paper	m
u	z-direction velocity	m / s
σ	surface tension of water	N / m
δ	the evaporating condensation coefficient	
γ	apparent curvature radius of evaporating surface	m
ϵ_0	fiber outside volume / a whole volume of paper	
ϵ_{wi}	volume of water in the fiber / volume of water	
ϵ_{wo}	volume of free water / volume outside fiber	
κ	permeability	m^2
k	thermal conductivity	$W / m \cdot K$
FRF	felt reduction factor	
FSP	fiber saturation point	
Mc	Moisture content	kg_w / kg_f

Table 1. Drying simulation model inputs [4]

MachineConditions		Single-Tier	Two-Tier
Single-tier	- Cylinders 1~5	87 °C	--
	- Cylinders 6~10	108 °C	--
	- Cylinders 11~30	118 °C	--
	- Rolls 1~29	85 °C	--
	Machine Speed	1400 m/min	
Double-tier	- Cylinders 1~6	--	110 °C
	- Cylinders 7~15	--	118 °C
	- Cylinders 16~28	--	122 °C
	- Cylinders 29~48	--	132 °C
	Machine Speed		600 m/min
	Paper wrap	--	216.9 °
	Felt wrap	--	193.4 °
	Length		
	- Phase 1	3.88m	0.188m
	- Phase 2	0.71m	3.309m
	- Phase 3	3.18m	0.188m
	- Phase 4	0.71m	1.794m
PaperCharacteristics		Single-Tier	Two-Tier
	Product	Newsprint	Linerboard
	Basis weight	49g/m ²	180g/m ²
	Initial moisture content	55%	55%
	Final moisture content	7.3% (8%)	6.6% (7%)
	Initial sheet temperature	45 °C	45 °C
	Thickness	0.125mm	0.27mm
	Web permeability	4.0*10 ⁻¹⁴ m ²	8.0*10 ⁻¹⁶ m ²
	Surface void fraction	0.20	0.22
Pocket Condition			
	Air temperature	75 °C	85 °C

Table 2. Physical properties for the paper

	parameter	unit	value
Physical properties	C_{pf}	$J/kg \cdot K$	1340
	C_{pw}		4190
	C_{pg}		1010
	k_f	$W/m \cdot K$	0.6
	k_w		0.75
	k_g		0.025
Water evaporation parameters	S_f	m^2/m^3	28000
	l	mm	5
	d_k	μm	20
	M_w	$kg/kgmol$	18
	δ		1

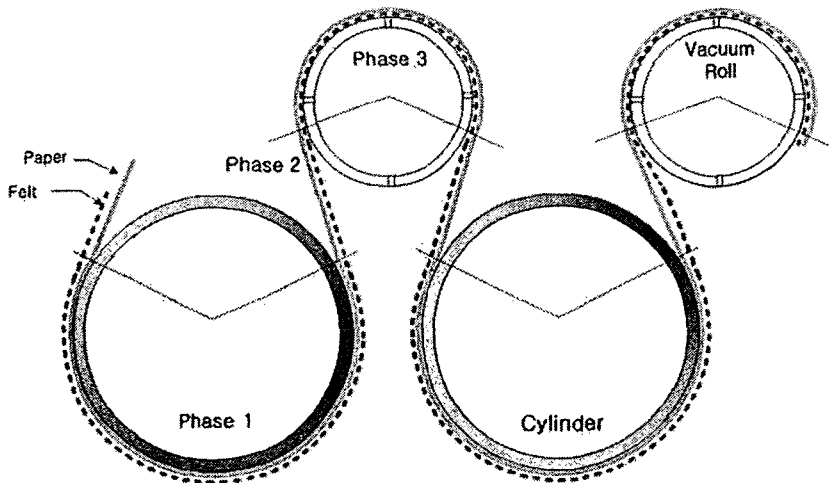


Figure 1. Single-tier dryer section configuration

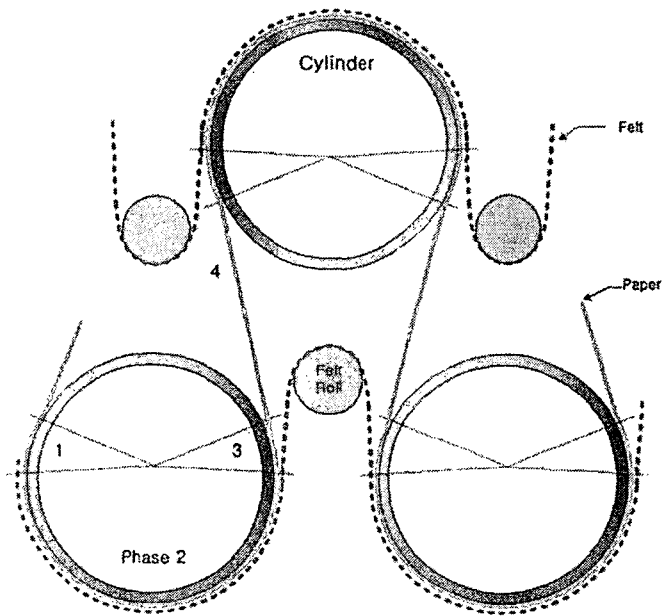


Figure 2. Double-tier dryer section configuration

Within cell $1 - \epsilon_0$		Out of cell ϵ_0	
Fiber	Water in fiber	Water around fiber	Gas
$(1 - \epsilon_{wi})(1 - \epsilon_0)$	$\epsilon_{wi}(1 - \epsilon_0)$	$\epsilon_0 \epsilon_{wo}$	$\epsilon_0 (1 - \epsilon_{wo})$

Figure 3. Volume fraction of wet paper

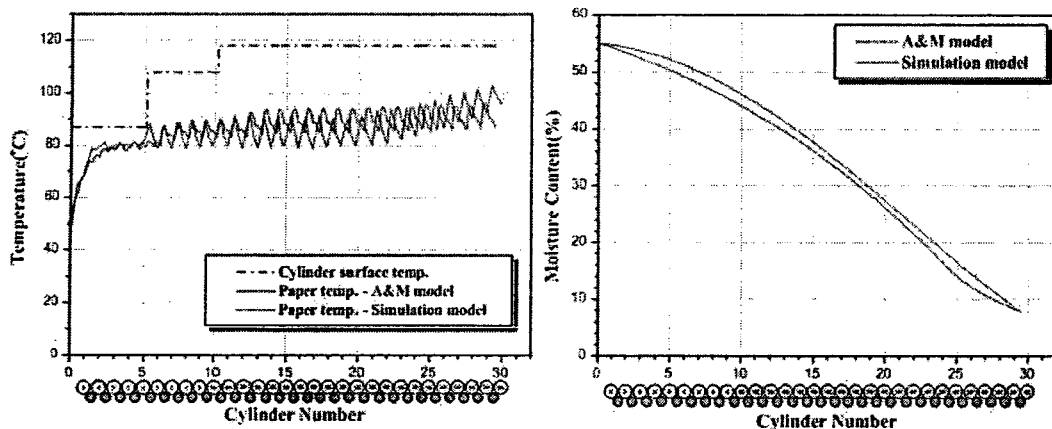


Figure 4. Cylinder surface , web temperature and moisture content during of newsprint a single-tier dryer section.

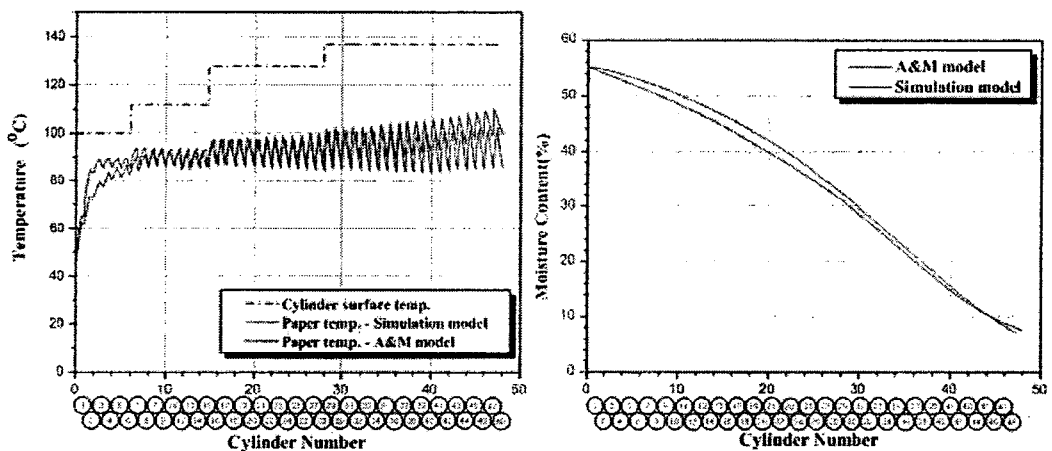


Figure 5. Cylinder surface , web temperature and moisture content during drying of linerboard in a double-tier dryer section.

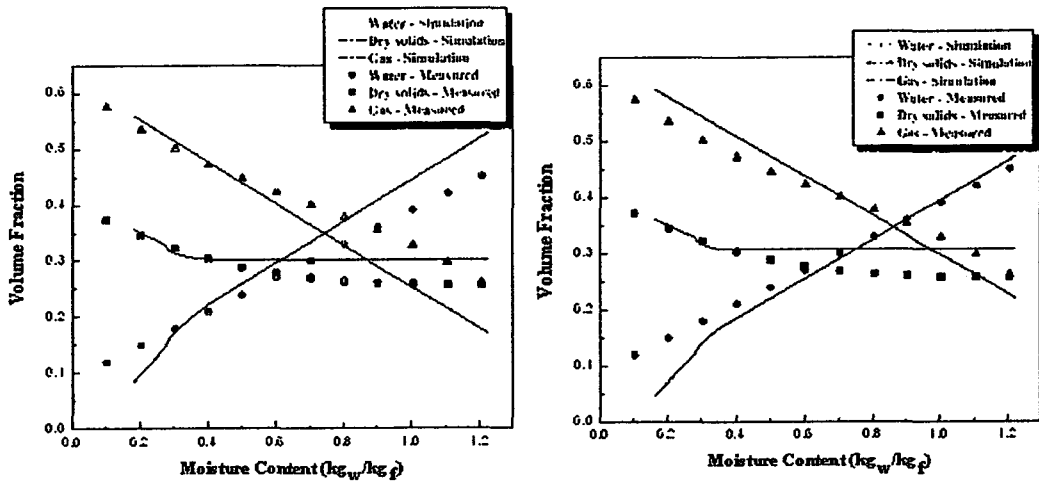


Figure 6. Development of volume fractions during drying of in a single-tier dryer section and double-tier dryer section.

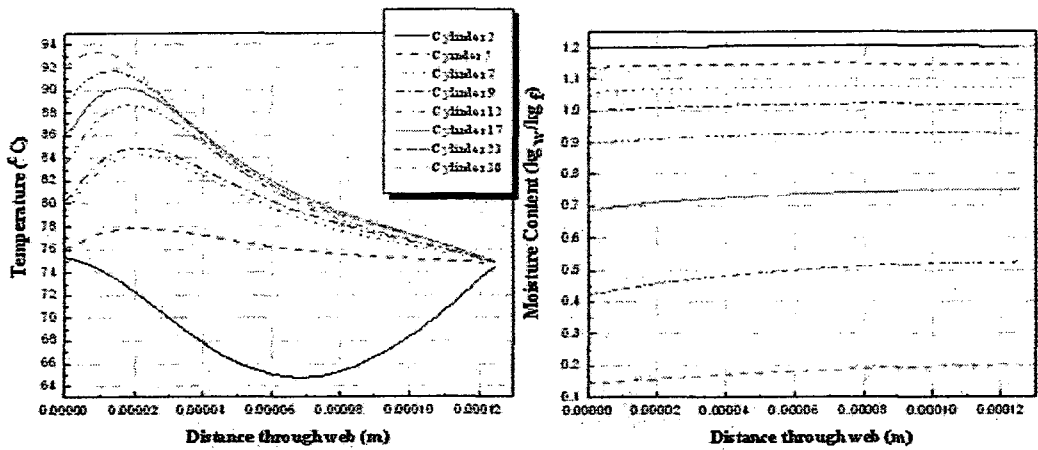


Figure 7. Internal Temperature & moisture content distribution within paper during single-tier drying