

열 및 유동을 고려한 가호기 건조시스템의 최적설계

-열 및 물질전달을 고려한 열풍건조의 특성-

(The Characteristics of the Hot Air Drying of Sizing Yarn
with Heat and Mass Transfer)

신경호*(영남대 대학원), 김수연, 배철호(영남대 기계공학부)

K. H. Shin(Graduate School, Yeungnam Univ.), S.Y. Kim, C. H. Bae(Yeungnam Univ.)

1. 서 론

다양한 제품의 생산공정에 건조공정이 포함되어 있으며, 이들 제품의 생산성 및 품질은 건조과정에 크게 의존하고 있다. 건조공정에는 열풍으로 건조시키는 비접촉식 건조, 다듬질과 같은 접촉식 건조 등이 있으며, 열풍건조는 건조물질과 열풍이 서로 반대방향으로 이동하는 대향류 건조와 같은 방향으로 이동하는 평행류 건조로 구분할 수 있다. 열풍, 즉 고온의 공기에 의한 건조가 이루어지는 건조시스템에서 열 및 물질전달은 기본적으로 수분과 온도구배에 의하여 이루어지지만, 여기에는 증기압력의 변화로 인한 증기확산, 함수율에 따른 건조물질의 비열, 열전도 계수, 확산계수 등의 물성치들이 변화, 공기와의 접촉면에서 수분의 증발량과 증발열에 의한 에너지 손실 및 건조물질로 부터 증발한 수분의 확산과 대류에 의한 공기 중으로의 물질전달 등 복잡한 현상들이 많이 포함되어 있고, 이들 현상에 대한 이론적 및 실험적 정보가 매우 부족한 상태에 있다.

섬유산업에서 건조공정은 섬유제품의 생산성 및 품질을 결정하는 중요한 공정이며, 대표적인 것 중의 하나가 가호공정이다^(1,5). 가호공정은 실의 제직성을 높이기 위하여 실의 표면에 풀을 입히고 건조하여 가공 처리하는 공정으로써, 크게 가호과정과 건조과정으로 구성되어 있다. 가호사의 품질은 호제의 부착 두께와 건조 정도에 크게 의존하며, 건조과정은 열풍(hot air flow)에 의한 비접촉 건조와 고온 롤러(hot roller)에 의한 접촉 건조로 이루어진다. 건조실에서 풀이 입혀진 실이 일정한 속도로 흐르는 공기 중을 대향류로 이동하면서 실표면으로부터 수분이 증발하여 공기 중으로 확산 및 대류에 의하여 이동함으로써 가호사의 건조가 진행된다. 이러한 건조과정은 실의 표면으로 부터 증발이 일어나는 재료에 열기간, 건조속도가 일정한 항울건조기간, 건조속도가 점차적으로 감소하는 감울건조기간으로 진행되고, 최종적으로 실이 열풍 온도에서의 이루어지는 그 조건에서 평형이 이루어지는 함수율에 도달하여 건조가 종결되게 된다. 실제 건조실에서 가호사의 건조의 대부분은 감울건조과정으로 진행된다^(1~4). 열풍에 의한 가호사의 건조상태는 건조 시스템 내의 공기 유동의 속도 및 온도 분포, 습도 분포, 유출입 공기의 유량, 온도, 습도, 그리고 유입되는 실의 속도, 호제 및 호제의 농도 등에 의하여 결정되므로^(1,5), 이들 인자들은 건조시스템

설계의 주요 변수가 된다. 또한 건조실의 설계는 가호사의 품질, 가호기의 성능, 가호기의 생산성 및 가격에 결정적인 영향을 미치는 요인이다. 그러므로 건조시스템의 설계기술의 확보를 위해서는 건조실내의 공기의 속도 및 온도분포를 조절하는 송풍장치 및 유동조절장치에 대한 연구, 건조를 지배하는 열 및 물질전달 현상 규명 그리고 건조시스템의 입출구조건 및 외부조건 등에 따른 성능 및 특성에 대한 연구는 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 가호기의 건조실에서 가호사의 건조과정에 대하여 적절한 모델링을 하고, 수치적으로 해석하여 다양한 운전조건 및 설계조건에 대한 건조특성 및 성능을 살펴보았다.

2. 건조 모델링

가호기 열풍 건조시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 열교환기에 의해서 고온이 된 공기가 송풍기에 의해서 적절한 속도로 건조실로 유입되고, 이 유입된 공기와 그 반대방향으로 어떤 속도로 이동하는 가호사 사이의 열 및 물질전달에 의하여 건조가 진행되도록 하고 있다. 건조실에서 건조는 여러 가지 요인들에 의하여 영향을 받는데, 건조실내의 공기의 속도 및 온도 그리고 그들의 분포, 습도 그리고 실의 속도 등에 주로 영향을 받는다. 특히 건조되는 실의 표면으로부터 증발되는 수분의 양은 열풍의 속도, 온도 및 상대습도에 의하여 크게 지배된다.

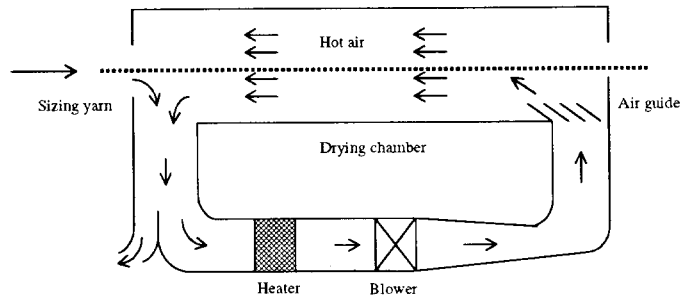


Fig. 1 Schematic diagram of the Hot Air Drying system

본 연구에서는 논의의 초점을 건조현상에 맞추기 위하여 건조실에서 공기의 속도 및 온도는 이상적인 분포 즉, 균일한 분포를 가진 것으로 보고 연구를 진행하였다. 이에 따라 건조현상에 주된 영향을 미치는 인자는 공기의 속도, 온도 및 습도, 실의 속도가 된다. 이제 건조실내에서 일어나는 수분의 증발과 공기중으로 확산 및 대류를 살펴 보기로 하자. 우선 Fig.2에서 보는 바와 같이 길이가 L 인 건조실 내를 온도 T_f , 함수율 ϕ , 속도 U_f 로 이동하는 실과 온도 T_a , 상대습도 RH , 속도 U_a 로 이동하는 공기 사이에 열 및 물질의 전달이 일어나고, 이에 따른 건조율을 살펴 보자.

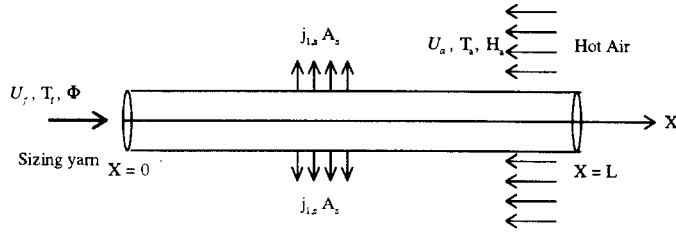


Fig. 2 Drying processing of the Sizing yarn surface

건조율($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)을 나타내는 $j_{1,s}$ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$j_{1,s} = g_{m1} (m_{1,s} - m_{1,e}) \quad (1)$$

여기서 $m_{1,s}$ 는 공기와 접하고 있는 호제 표면에서의 수분질량분율을, $m_{1,e}$ 는 공기중의 수분의 질량분율을 각각 나타내고, 이들은 공기의 온도 및 습도 그리고 호제의 온도 등에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 본 연구진에서 수행한 호제의 막성장 실험을 통해 얻어진 $m_{1,s}$ 에 대한 실험식을 가호사에 적용하였다.

$$m_{1,s} = (m_{1,e})(0.25)^k \quad (2)$$

여기서 k 는 공기중의 수증기 분압 P_e 에 의하여 결정되는 값으로 다음 식과 같다.

$$k = -1.81459^{-9} P_e^2 + 4.06815^{-5} P_e - 0.375425 \quad (3)$$

그리고 g_{m1} 은 물질전달계수로써 실 표면에 묻혀있는 호제와 주위 공기와의 대류에 의하여 주로 의존하며, 저물질전달의 경우 식(4)와 같은 열전달과 물질전달간의 유사성이 존재하고 이 유사에 의하여 열전달계수로 부터 g_{m1} 를 구할 수 있다^(7,10).

$$g_{m1} = \frac{Sh_x \rho \nu}{Sc_x} \quad (4)$$

여기서 Sh 와 Sc 는 Nu 와 Pr 로 부터 구할 수 있고, 사용한 Nu 는 평판위의 난류유동에 대한 실험식으로써 다음 식과 같다.

$$Nux = \frac{0.0296 Re_x^{-1/5} \cdot Re_x \cdot Pr}{[1 + 12.7 \cdot [0.0296 Re_x^{1/5}]^{-1/5}] (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5)$$

위의 식들을 이용하여 건조율을 계산할 수 있고, 건조실내에서 가호사와 열풍에 대한 질량 및 에너지 균형식은 다음과 같으며^(7,10), 여기서 건조덕트로 부터 외부로 방출되는 열손실은 고려하지 않았다. 우선 질량균형식은

$$\Delta m_{air} = -j_{1,s} \cdot A_s \quad (6-1)$$

$$\Delta m_{yam} = -j_{1,s} \cdot A_s \quad (6-2)$$

와 같고, 에너지 균형식은 다음과 같다.

$$\Delta(m_{air} \cdot h_{air}) = -Q_{conv} + Q_{evap} \quad (7-1)$$

$$Q_{conv} - Q_{evap} = Q_{storage} \quad (7-2)$$

위의 식으로 부터 공기와 가호사의 온도변화를 구할 수 있으며, 이때 온도변화에 대한 열전달 계수 및 물질전달 계수등의 물성치들에 대한 변화는 열풍과 가호사의 온도에 대한 평균값을 사용하였다.

3. 계 산

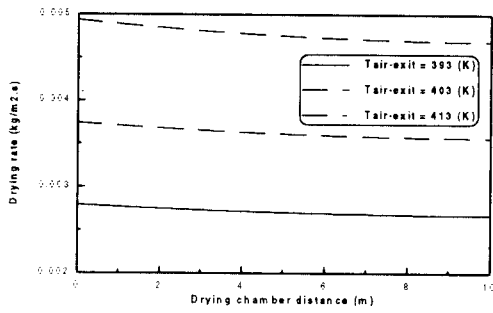
공기의 온도, 습도, 속도 그리고 실의 속도에 따른 건조특성을 살펴보기 위하여 계산을 수행하였다. 건조실에 대한 계산은 계산 구간을 n등분하고 각 구간에서의 건조율, 함수율, 온도 및 습도변화를 구하였고, 이때 실표면에서의 대류 열전달 및 물질전달 계산에서 속도는 실과 공기의 상대속도를 사용하였다. 계산순서는 실이 투입되는 지점, 즉 공기의 출구쪽에서 시작하여 실의 출구 쪽으로 계산하였고, 건조율, 실의 함수율, 공기의 온도, 습도를 계산하였다.

계산에서 실이 투입되는 쪽을 기준으로 하였으며, 이 지점에서 공기의 온도를 120, 130, 140℃로, 호제가 부착된 실의 초기온도를 40℃, 그리고 사속은 1.5, 2, 2.5m/s, 실의 초기함수율은 150%로 하였다. 공기의 속도는 기존의 가호기에 설치된 송풍기 용량(3.7K/W)을 기준으로 하여 계산한 값을 사용하였으며, 유로 단면에서의 공기의 평균속도는 0.71m/s 이다. 그리고 실의 투입구에서 공기의 습도는 세가지로 10%, 20%, 30%로 주었다.

4. 결과 및 검토

Fig.3은 공기의 온도, 습도, 사속을 변화시켰을 때 건조실내에서의 건조특성을 나타내는 그림이다. 여기서, 온도가 높을수록 사속이 빠를수록 건조가 잘됨을 알 수있다. Fig.4는 공기의 출구온도를 130℃로 하여 습도를 변화 시킨 경우 실의 온도 분포를 나타낸 그림이다. Fig.5는 상대습도 10(%)인 경우의 건조기 출구의 공기 온도변화에 따른 건조실내의 공기의 온도변화를 나타낸 그림이다. Fig.6은 온도에 따른 실의 함수율변화를 나타내며,

130°C인 경우에 실제 건조기에서 적절한 건조가 이루어짐을 알 수 있다.



(a) Air temperature

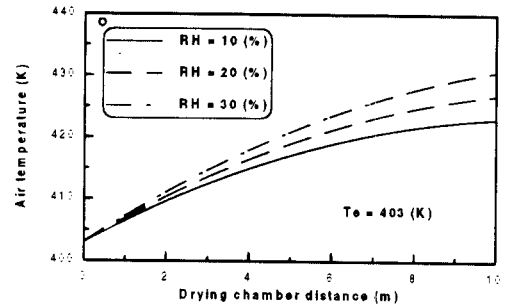
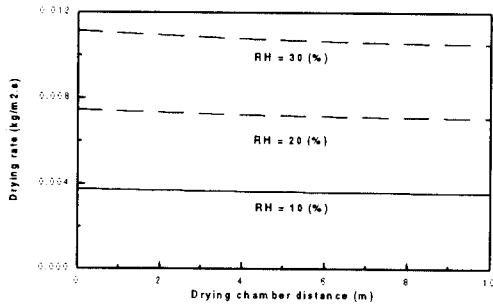


Fig. 4 Sizing yarn temperature with Air humidity



(b) Relative Humidity

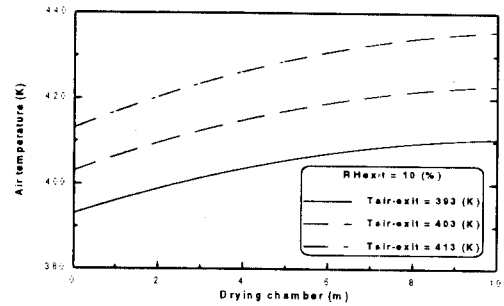
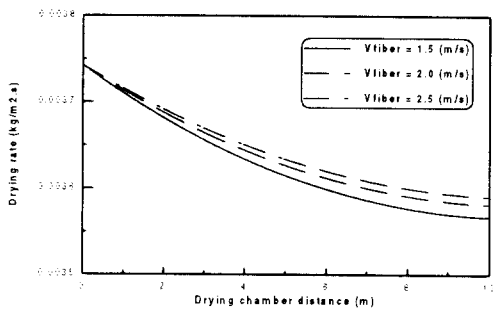


Fig. 5 Hot air temperature with air temperature



(c) Sizing yarn speed
Fig. 3 Drying rate

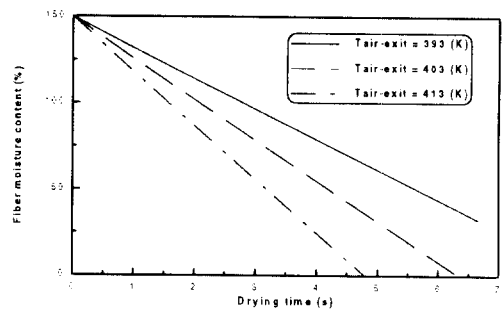


Fig. 6 Moisture content with air temperature

4. 결 론

본 연구에서는 가호사의 열풍 건조과정에 대하여 적절한 모델링을 하고, 수치적으로 해석하여 건조실의 건조특성 및 성능을 살펴보았다. 건조과정의 모델링 및 수치해석을 통하여 가호사의 건조율 및 함수율 예측이 가능하였으며, 다양한 설계조건에 대한 성능해석을 통하여 공기의 온도 및 습도에 대한 최적의 운전 및 설계조건의 탐색도 가능하였다.

건조율은 건조가 진행됨에 따라 점차적으로 감소하였으며, 건조고장의 말기에는 건조율의 변화가 매우 적었다. 공기부분을 제외한 조건이 동일한 경우 공기의 온도가 증가할수록, 습도가 감소할수록 건조율은 증가하였다.

감사의 글

본 논문은 1997년 한국 학술진흥재단의 대학부설 연구소(우수 연구소) 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 저자는 감사 드립니다.

참고문헌

1. "가호기술", 한국섬유기술연구소.
2. "사가공 공정기술", 영남대학교 지역 협력연구센터, 1996.
3. "건조설비 실태조사", 에너지관리공단, 1990.5.
4. "사이징 공정기술", 영남대학교 지역협력연구센터, 1996.
5. Arun S. Mujumdar, 1995, "Handbook of Industrial Drying", 2nd ed., McGill Univ.
6. Arun S. Mujumdar, 1992, "Advances in Drying", 5th ed., McGill Univ.
7. Anthony F. Mills, 1995, "Heat and Mass Transfer", Univ. of California at Los Angeles.
8. Rita M. Crow, 1973, "The Drying of Textile Fabrics", Journal of the Textile Reserch.
9. T. Elperin and B. Krasovitev, 1995, "Evaporation of Liquid droplets containing small solid particles", Int. Journal of the Heat and Mass Transfer.
10. W. M. Kays and M. E. Crawford, 1993, "Convective Heat and Mass Transfer", 3rd ed., McGraw-Hill.