

열 및 유동을 고려한 가호기 건조시스템의 최적설계 (가호사의 건조 특성에 관한 연구)

김태홍* · 배철호 · 정모 · 김수연 · 사종엽

영남대학교 대학원 기계공학과, 영남대학교 기계공학부

A Study of the Drying Characteristics of a Sizing Yarn

Tae Hong Kim*, Chul Ho Bai, Mo Chung, Soo Youn Kim, Jong Youb Sah

School of Mechanical Engineering, Graduate School, Yeungnam University, Kyongsan, Korea

School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyongsan, Korea

1. 서 론

섬유 산업은 원사공정, 제직준비공정, 제직공정, 염색 및 가공 공정으로 이루어져 있다. 제직준비공정은 제직 및 염색의 결과를 좌우할만큼 큰 영향을 미치며, 원사의 결함이 다소 있더라도 제직준비공정을 통하여 제품의 생산성 및 품질을 일정하게 유지할 수 있다. 제직 준비 공정에는 꼬임을 준 실을 제직공정에 투입하기 전에 실의 끊어짐을 막아 생산성을 향상시키기 위하여, 풀을 먹여서 건조시키는 싸이징 공정이 있다. 싸이징 공정은 풀을 입히는 과정과 이를 압착 로울러를 통하여 풀의 두께가 일정하도록 압착하는 과정, 이를 열풍으로 건조시키는 비접촉식 건조 과정, 다림질과 같은 접촉식 건조 과정, 냉각 과정, 싸이징된 실을 감는 권취 과정으로 이루어져 있다. 이 과정 중에서 현재 가장 문제가 되는 설계 기술은 열풍에 의한 비접촉 건조가 이루어지는 건조실의 설계로써 가호사의 품질, 가호기의 성능, 가호기의 생산성 및 가격에 결정적인 영향을 미치는 요인이다. 열풍에 의한 가호사의 건조상태는 건조 시스템 내의 공기 유동의 속도 및 온도분포, 습도분포, 유출입 공기의 유량, 온도, 습도, 그리고 유입되는 실의 속도, 호제 및 호제농도 등에 의하여 결정된다. 그러므로, 가호기 건조시스템은 눈에 보이지 않는 열풍의 속도를 조절하고 습도의 영향을 파악하여야 하므로 체계적인 설계 기준의 제시없이 올바른 설계 기술을 확보할 수 없다. 더욱이, 비접촉 건조 시스템을 지배하는 물리적 현상을 규명하고 그 특징들을 이해하지 않고서는 올바른 건조 시스템을 개발할 수 없다. 주어진 온도 및 습도의 공기가 일정한 속도로 풀에 젖은 실의 주변을 지나갈 때, 실로부터 수분이 증발되고 공기 중으로 확산 및 대류에 의하여 실의 건조가 진행되는 현상은 건조로 설계에 있어서 가장 중요한 부분이다. 또한, 가열장치

를 통하여 공기 중에 열이 전달되는 현상과 송풍장치 및 유동 조절장치에 의하여 공기 속도 분포를 조절하는 현상은 건조 시스템의 효율과 밀접한 관련이 있다. 그러나, 가호기 건조시스템의 국내 생산은 대부분 영세한 중소기업을 중심으로 이루어지고 있다. 그래서 자본과 기술력의 부족으로 자체적인 설계능력을 갖추지 못하고 있는 실정이다.^[5-7]

본 연구에서는 가호기 건조 시스템설계를 위한 기본 자료로써, 가호기 건조 시스템에서 주어진 온도 및 습도의 공기가 일정한 속도로 풀에 젖은 실의 주변을 지나갈 때, 실에 묻어 있는 호제로부터 수분이 어느 정도 증발되면 호제의 바깥쪽에서부터 호제에 막이 생성되며, 시간이 지남에 따라 계속해서 막은 실의 내부로 성장해 들어간다. 이때, 실에 묻어있는 호제로부터 주변 공기로 어느 정도의 수분이 증발하며, 막이 생성되기 전과 막이 생성되어진 후의 수분의 증발율은 어떻게 변하는지에 대해 알아 보고자 한다. 또한, 건조 시스템 내부의 온도와 습도가 주어졌을 때, 시간에 따른 가호사의 증발율은 어떻게 되는지에 대해 정량적으로 예측해 보려 한다.

2. 이론 해석 및 실험

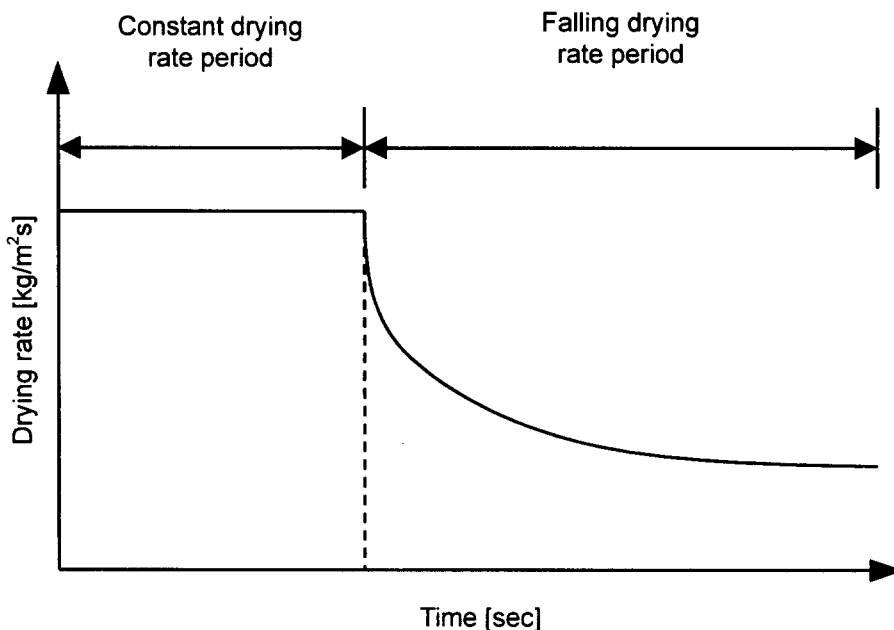


Fig. 1 Drying-rate curve

일반적으로 건조 곡선은 시간에 따라 건조 대상 물질의 수분함량의 변화를 측정하여 구할 수 있다. 실험으로부터 시간에 대한 단위면적에서의 수분증발량을 시간에 대한 곡선으로 나타내면 Fig.1과 같은 건조 곡선을 얻을 수 있다. 건조 곡선은 크게 두 부분으로 나누어져 있는데, 초기 부분은 정속 건조구간이고, 그 이후는 감속 건조구간이다. 호제(아크릴 25% + 물 75%로 구성)가 초기에는 공기층과 접촉해 있는 표면이 마치 물로된 얇은 막이 있는 것처럼 표면온도에 해당하는 포화상태로 존재하다가 어느 정도 건조가 진행되면, 호제의 표면에 막이 생성되어 호제의 표면은 마치 물로된 얇은 막이 깨어진 것처럼 표면온도에 해당하는 포화상태보다 낮은 수분 질량분율을 나타내며, 막의 성장이 계속진행됨에 따라 수분 질량분율은 더욱 떨어지게 된다. 이 결과 건조율이 떨어지게 된다. 이러한 관계를 식으로 나타내 보면 다음과 같다.^[1-3]

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

식(1)에서 $j_{1,s}$ 는 건조율($\text{kg/m}^2\text{s}$)을 나타내며, $m_{1,s}$ 는 공기층과 접하고 있는 호제 표면에서의 수분 질량분율(kg/kg)을 나타내고, $m_{1,e}$ 는 공기 중에 포함되어 있는 수분 질량분율(kg/kg)을 나타낸다. 이들 $m_{1,s}$ 와 $m_{1,e}$ 는 T_s 와 T_e 에 의해 결정되어 진다. 또한, 하첨자 1은 물을 의미하며, s는 공기층과 접하고 있는 호제 표면을, e는 호제 외부의 공기를 의미한다. 그리고, g_{m1} 은 물질전달전도력($\text{kg/m}^2\text{s}$)으로써 호제의 외적 조건인 자연 대류조건 또는 강제 대류조건을 내포하고 있는 인자이다. 저속 물질 전달($\Delta m_1 < 0.1$ 또는 0.2)인 경우에는 열전달과 물질전달간에 상사성이 존재하며, 열전달에서 Nu는 물질전달에서 Sh와 열전달에서 Pr은 물질전달에서 Sc와 상사성이 존재한다. 따라서, $g_{m1} = \frac{Sh \cdot \rho \cdot v}{Sc \cdot D}$ 에서 Sh와 Sc는 열전달의 Nu와 Pr로부터 구할 수 있다.^[1-2]

식(1)은 정속 건조구간에서는 호제의 표면이 포화상태를 유지함으로써 외부에서 공급된 에너지는 모두 수분을 증발시키는데 소모되었으므로, T_s 가 일정하게 되고 따라서, $m_{1,s}$ 도 일정한 값을 유지하게 된다. 그러나, 감속 건조구간에서는 호제의 표면에 막이 생성되어 외부에서 공급된 에너지가 모두 수분을 증발시키는데 소모되지 못하고 호제 내부에 적체되므로, T_s 는 시간이 지남에 따라 상승하고, 따라서 $m_{1,s}$ 도 일정한 값을 유지하지 못하고, 막의 성장과 함께 변화하게 된다. 본 연구에서는 $m_{1,s}$ 에 가장 큰 영향을 미치는 인자로, 외부 온도 T_e 와 상대습도 R.H.의 결과로 나타나는 $P_{1,e}$ 와 막의 두께 ξ 의 함수로 결정된다고 가정하고, 주어진 실험 범위에서, 상관관계식을 구하기 위하여 실험을 수행하여 막에서의 $m_{1,s}$ 의 변화를 구하였다. 이들의 관계를 그래프로 나타내면 다음과 같다.

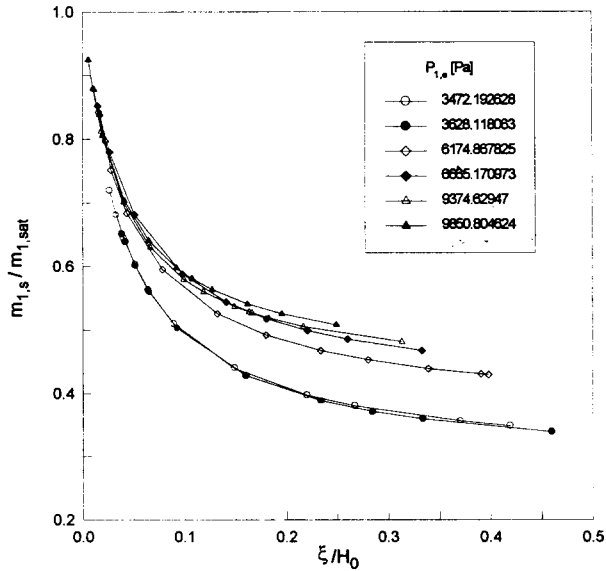


Fig. 2 Mass fraction of plastic paste with various external pressures

3. 결과 및 토의

지금까지의 이론을 바탕으로 외부온도 T_e 와 상대습도 R.H.가 주어졌을 때, 시간에 따른 건조율의 예측방법은 다음과 같다.

1) 정속 건조구간에서 건조율을 구하는 방법은 다음과 같다.

① 호제의 표면 온도 T_s 를 가정한다. ② T_s 에 해당하는 $P_{1,s}$ 를 수증기표에서 구하여,

$m_{1,s} = \frac{x_{1,s}M_1}{x_{1,s}M_1 + (1-x_{1,s})M_2}$ 를 구하고, $\rho_{1,s} = \frac{P_1M_1}{RT_s} + \frac{P_2M_2}{RT_s}$ 를 구한다. ③ 여기서 하첨자 1

은 물, 2는 공기를 의미한다. ④ 외부 온도와 습도는 알려져 있으므로, $m_{1,e}$ 와 $\rho_{1,e}$ 는 단계 3

의 방법으로 구한다. ⑤ $Gr = \frac{(\Delta\rho/\rho)gD^3}{\nu^2}$, 여기서 $\Delta\rho = |\rho_{1,s} - \rho_{1,e}|$, $\rho = \frac{\rho_{1,s} + \rho_{1,e}}{2}$

⑥ 열전달과 물질전달의 상사성으로부터 Nu를 구하는 식을 이용하여 Pr 대신 Sc를 대치시켜 $Sh(Sh = f(Gr, Sc))$ 를 구한다. ⑦ 호제 표면의 에너지 평형으로부터(전도 및 복사열전달 무시)

시) $g_{m1}(m_{1,s} - m_{1,e})h_{fg}A_{top} = U\Delta TA_{side+bottom} + h_c\Delta TA_{top}$ 이므로 $m_{1,s}$ 를 구한다. ⑧ 단계 2에서 구

한 $m_{1,s}$ 와 단계 ⑦에서 구한 $m_{1,s}$ 가 서로 다르면 단계 ①에서 가정한 T_s 를 다른 값으로 가정

하여 두 $m_{1,s}$ 가 같아질 때까지 단계 ①~⑦의 과정을 반복 수행한다. [1-2]

2) 감속 건조구간에서 건조율을 구하는 방법은 다음과 같다.

감속 건조구간에서는 Fig. 2로부터 구한 $m_{1,s}$ 는 $P_{1,e}$ 와 ξ 의 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{m_{1,s}}{m_{1,sat}} = \left(\frac{m_{1,e}}{m_{1,sat}} \right) \cdot \left(\frac{\xi}{H_0} \right)^{[-1.81459(10^{-9}) \cdot P_{1,e}^2 + 4.06815(10^{-5}) \cdot P_{1,e} - 0.375425]} \quad (2)$$

여기서, $m_{1,sat}$ 는 포화상태일때의 $m_{1,s}$ 를, H_0 는 호제의 초기 깊이를 나타낸다.

그러나, 식(1)에서는 건조가 진행됨에 따른 막의 성장을 알 수 없으므로, 시간의 변화에 따른 막의 성장을 알기 위해 비정상상태에 대한 식이 유도 되어져야 한다.

$$(\text{막의 성장율}) = (\text{수분 증발율}) \quad (3)$$

식(3)으로부터 다음의 식을 유도할 수 있다. [1-2]

$$\frac{d\xi}{dt} = \phi \frac{g_{m1}}{\rho_l} [m_{1,s}(P_{1,e}, \xi) - m_{1,e}] \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 실험값과 이론값에서 오는 오차를 보상하는 수정인자이며, 이상적인 경우 1이다. 따라서, 적절한 초기 ξ_0 를 가정하게 되면, 시간의 변화에 따라서도 식(1), (2), (4)로부터 주어진 조건으로부터 건조율을 구할 수 있게 된다.

4. 실험 결과 및 결론

식(1), (2), (4)로부터 가호사의 건조를 예측하여 보면 Fig. 3과 같이 나타난다.

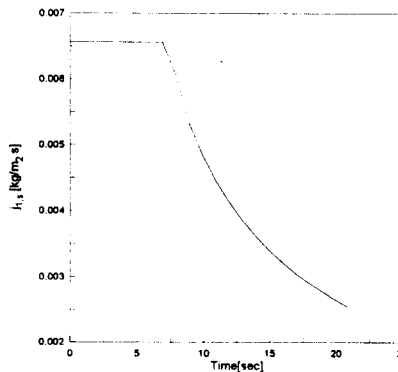


Fig. 3 Drying curve for a sizing yarn

Fig.3은 $D = 0.00049\text{m}$, $T_e = 393.15\text{ K}$, $P_{1,e} = 10376.63118\text{ Pa}$ 의 조건에서 가호사가 호제를 충분히 흡수하여, 호제의 지름과 가호사 전체의 지름이 같다는 가정하에 구한 것이다. 또한, 하나의 가호사에 대해 원통 주변의 강제대류 열전달식을 사용하여 구한 것으로 사용되어진 열전달식은 식(5)와 같다.^[4]

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}}; \quad Re < 10^4, Pr > 0.5 \quad (5)$$

본 연구에서는 호제에 막이 생성되지 않았을때와 막이 생성되었을 때, 각각의 경우에 대한 건조율을 계산하는 방식을 서술하였으며, 특히 막이 생성되었을 때의 $m_{1,s}$ 를 식으로 정리하여 막이 성장함에 따른 수분 증발율을 예측할 수 있게 되었다. 그리고, 식(1)의 g_m 으로부터 열전달과 물질전달의 상사성을 이용하여 자연대류 또는 강제대류인 경우에 대해서도 정성적으로 수분의 증발율을 예측할 수 있게 되었다.^[11]

감사의 글

이 논문은 1997년 교육부 학술연구조성비 대학부설연구소 지원에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

6. 참고 문헌

- (1) Mills, A.F., 1995, "Heat and Mass Transfer", Irwin, Ch.9
- (2) Treybal, R.E., 1968, "Mass Transfer Operation", McGraw Hill, part 4
- (3) 김 병규, 이 근배, 박 수행, 1984, "단위조작(II)", 형설출판사, 제25장
- (4) Warren M. Rohsenow, James P. Hartnett, Ejup N. Ganic, 1985, "Handbook of Heat Transfer Fundamentals. 2nd edition", McGraw Hill, Ch.6~8
- (5) "가호기술", 한국섬유기술연구소
- (6) "사가공 공정기술", 영남대학교 지역협력연구센터, 1996
- (7) "사이징 공정기술", 영남대학교 지역협력연구센터, 1996