

적외선 굴절식 건조기에서 열전달 및 건조 특성 해석

이 공 훈[†], 홍 용 주, 김 옥 중

한국기계연구원 환경에너지기계연구본부 에너지기계연구센터

Analysis of Heat Transfer and Drying Characteristics in the Dryer Using the Refraction of Radiation

Kong Hoon Lee[†], Yong-Ju Hong, Ook Joong Kim

Energy Systems Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received June 14, 2006; revision received July 10, 2006)

ABSTRACT: Analysis of drying characteristics has been carried out with one-dimensional model in the dryer using the principle of the refraction of radiation. The dryer is composed of hot water tank, plastic film conveyer belt, drying material, etc. The model considers the conduction and radiation within the plastic film and drying material. The film is semitransparent to radiation and the drying material is assumed to be semitransparent or opaque to radiation. The results show that the effect of radiative transfer on the drying rate is relatively large when the thickness of drying material is small and the water temperature is high. When the material is thin, the drying rate due to conduction is also enhanced and the drying time can considerably be reduced.

Key words: Drying material(피건조물), Film thickness(필름 두께), Hot water(온수), Radiative transfer(복사전달), Refraction(굴절)

기 호 설 명

c_p : 비열 [J/kgK]
 G : 복사강도의 입사(irradiation) [W/m^2]
 H : 두께 [m]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 h_m : 물질이동 관련 열전달계수 [kg/m^2s]
 I : 복사강도 [W/m^2]
 i : 엔탈피 [J/kg]
 I_b : 흑체복사강도 [W/m^2]
 k : 열전도율 [W/mK]
 \dot{m}_v : 수분증발량 [kg/m^2s]

n : 굴절률
 p : 전압력 [Pa]
 p_v : 수증기 분압 [Pa]
 q_r : 복사열유속 [W/m^2]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]
 t : 시간 [s]
 x : 절대습도 [kg/kg]

그리스 문자

ϵ : 표면방사율
 κ : 흡수계수 [m^{-1}]
 μ : 방향코사인
 ρ : 밀도 [kg/m^3], 표면반사율

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7291; fax: +82-42-868-7335

E-mail address: konghoon@kimm.re.kr

상첨자

- + : 양의 반구방향 ($0 \leq \mu \leq 1$)
- ' : 입사하는 성분 (incident)

하첨자

- a* : 주위공기
- d* : 피건조물
- fg* : 잠열
- j* : 필름
- v* : 공기와 피건조물 계면의 수증기
- w* : 온수(열원)

1. 서론

적외선 굴절식 건조(refractance window drying)는 전도, 대류, 복사의 세 가지 열전달 형태를 모두 활용하는 건조기술로서 낮은 비용으로 고품질의 건조가 가능한 기술 중의 하나이다.^(1,2) 이 기술에서는 Fig. 1과 같이 원적외선 복사를 투과시키는 투명 플라스틱 필름을 컨베이어 벨트로 사용하고 벨트 아래에는 온수가 순환하며 열에너지를 공급한다. 필름 위에 놓인 피건조물은 플라스틱 필름을 굴절 투과한 적외선 복사열을 주로 이용하여 건조된다. 건조 초기에는 피건조물에 함유된 수분으로 인하여 필름과 피건조물 사이에 얇은 수막이 형성되고 이 수막은 컨베이어 벨트를 투과한 복사열을 피건조물에 전달하는 통로 역할을 하여 빠른 건조속도를 가진다. 건조가 진행되

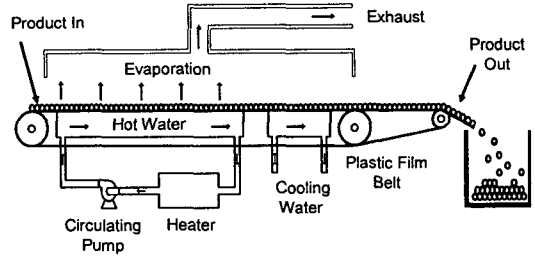


Fig. 1 Schematic of a model dryer.

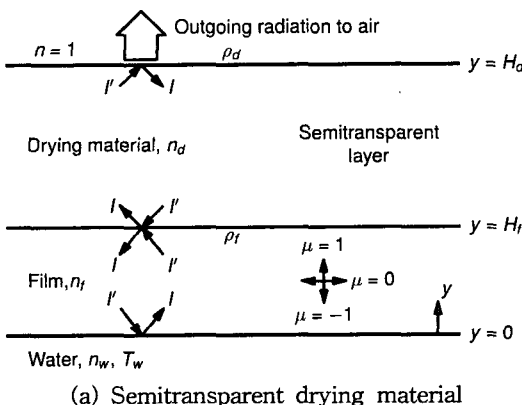
면서 수분의 증발로 수막의 크기가 감소하며 결국 수막이 없어지면 피건조물에 전달되는 복사열이 차단되고 전도열로만 건조가 이루어진다. 건조시간은 피건조물의 두께에 따라 차이가 있지만 일반적으로 수분 이내에 건조가 완료된다.⁽³⁾

적외선 굴절식 건조기술은 분무건조, 진공동결 건조 등과 비교하여 피건조물의 건조상태가 유사하거나 우수하고, 수분 이내의 짧은 시간 내에 건조가 이루어지므로 에너지절약 효과가 큰 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 복사굴절 현상을 이용한 적외선 굴절식 건조기에서의 열전달 및 건조 현상에 대한 해석모델을 설정하고 온수온도, 필름 두께, 열전달계수, 상대습도 및 피건조물 두께의 영향을 분석하였다.

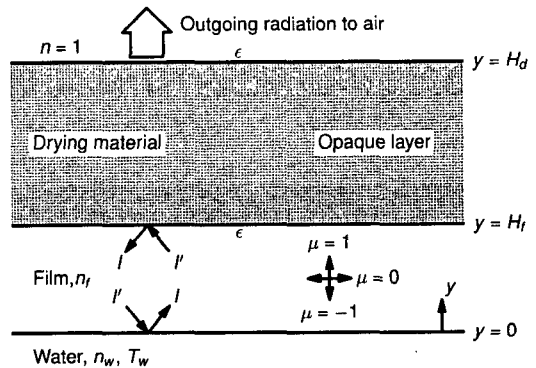
2. 해석방법

2.1 해석모델

적외선 굴절식 건조기에서는 Fig. 2와 같이 필



(a) Semitransparent drying material



(b) Opaque drying material

Fig. 2 Schematic of one-dimensional models.

름의 윗면에 피건조물이 있고, 아랫면에 있는 일정 온도의 물이 열원으로 사용된다. 필름은 온수 위에 떠서 이동하지만 이동속도가 느리므로 이동을 무시하고 수직방향으로의 열전달만을 고려하면 에너지방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.^(3,4)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial q_r}{\partial y} \quad (1)$$

우변의 두번째 항은 매질 내의 복사에 의한 열에너지의 발산(divergence)을 의미하며 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial q_r}{\partial y} = \kappa [4\pi n^2 I_b(T) - G] \quad (2)$$

본 연구에서는 피건조물이 복사에 대하여 반투명(semitransparent)한 경우와 불투명(opaque)한 경우로 나누어 해석하였다. 건조 초기에 피건조물에 수분이 많을 때에는 Fig. 2(a)와 같이 근사적으로 피건조물이 반투명하다고 가정할 수 있고, 필름과 피건조물 내부에서 복사열전달을 고려한다. 수분이 많이 증발된 후에는 Fig. 2(b)와 같이 피건조물이 복사에 대하여 불투명하다고 가정할 수 있고, 이때에는 $\partial q_r / \partial y$ 를 무시한다.

필름의 아랫면($y=0$)에서는 물의 온도가 일정하므로 경계조건으로 일정 온도조건을 사용한다. 피건조물이 반투명한 경우에는 필름과 피건조물의 계면에서 특별한 처리가 필요없으나 불투명한 경우에는 계면에서의 복사의 반사와 방사를 고려하여야 한다.

$$-k_d \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{H_f} = -k_f \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{H_f} + \varepsilon \delta (q_{r,f}^+ \Big|_{H_f} - \pi I_b \Big|_{H_f}) \quad (3)$$

피건조물 윗면의 경계조건은 표면에서의 복사교환과 대류, 증발을 고려한 에너지 평형으로부터 구할 수 있는데, 피건조물이 불투명한 경우에는 표면에서의 복사전달을 고려한다.

$$-k_d \frac{\partial T}{\partial y} = q_m + \varepsilon \pi \delta [I_b(T_v) - I_b(T_a)] \quad (4)$$

식(3)과 (4)에서 피건조물이 반투명한 경우에는

$\delta=0$, 불투명한 경우에는 $\delta=1$ 을 사용한다. q_m 은 피건조물 표면과 주위공기 사이의 물질이동을 동반한 대류 열전달을 나타낸다.⁽⁵⁾

$$q_m = h_m (i_v - i_a) \quad (5)$$

이 과정의 증발량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_w = h_m (x_v - x_a) \quad (6)$$

Lewis의 관계식(Lewis Relation)을 도입하면 h_m 을 유도할 수 있다.⁽⁵⁾

$$h_m = \frac{h}{c_{p,a} + c_{p,v} x_a} \quad (7)$$

표면에서 증발되는 수증기의 온도가 T_v 이고 포화상태로 있다고 가정하면 포화수증기가 가지는 엔탈피는 다음과 같다.

$$i_v = c_{p,a} T_v + (c_{p,v} T_v + i_{fg}) x_v \quad (8)$$

온도 T_v 에서의 포화수증기압 p_v 에 대하여 절대습도 x_v 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$x_v = 0.62198 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (9)$$

물의 포화수증기압은 ASHRAE Handbook⁽⁵⁾에 주어진 식을 사용하여 구하였다.

식(2)에 나타낸 복사열전달의 발산항은 다음의 복사전달방정식을 이용하여 구할 수 있다.^(4,6)

$$\mu \frac{\partial I}{\partial y} = \kappa \{ n^2 I_b [T(y, t)] - I(y, \mu) \} \quad (10)$$

이 방정식의 해를 구하기 위해서는 적절한 경계조건을 적용해야 하는데, 상세한 내용은 참고문헌⁽⁴⁾에 있다. 본 연구에서 복사전달방정식은 S-8 구분중좌법을 이용하여 해를 구하였다.

2.2 물성치 및 해석조건

해석에 사용한 물성치들은 Table 1에 나타나 있는데, Mylar 필름에 대한 수치들은 제조사인

Table 1 Thermophysical properties and refractive index

Material	Water	Film (Mylar)	Skimmed milk
Density (kg/m ³)	965	1390	915
Specific heat (J/kgK)	4206	1176	2100
Conductivity (W/mK)	0.675	0.155	0.170
Refractive index	1.33	1.65	1.46

Table 2 Parameters used in the analysis

Parameter	Value
Heat transfer coef. (W/m ² K)	10, 20, 30, 40, 50
Water temperature (°C)	55~95
Relative humidity (%)	30, 50, 70
Film thickness (μm)	75, 100, 125
Material thickness (mm)	0.4, 1.0, 2.0

DuPont 사의 자료에서 인용하였다.⁽⁷⁾ 흡수계수는 Mylar 필름의 경우에는 1,000 cm⁻¹, 물⁽⁸⁾의 경우에는 2,000 cm⁻¹를 사용하였다.

피건조물은 전지분유(Skimmed milk)를 가정하였는데, 피건조물이 복사에 반투명한 경우에는 물과 같은 물성치를, 불투명한 경우에는 전지분유의 물성치(대표값을 나타냄)를 사용하였다. 복사에 불투명한 경우에 피건조물 표면은 흑체로 가정하였다.

해석 및 결과 분석을 위하여 대표적인 파라미터들로서 피건조물 상부의 열전달계수, 열원인 온수의 온도, 공기의 상대습도, 필름 두께를 선정하였고 Table 2에 나타내었다. 기본값은 굵은 글꼴

로 표시하였고 다른 설명이 없으면 이 값을 적용한 것이다. 공기의 온도는 25°C로 고정하였다. 해석을 위한 격자는 다양한 크기의 격자를 시험하여 결과의 정확도를 비교한 후, 필름에 21, 피건조물에 51개의 비균일 격자를 사용하였다.

3. 해석결과

3.1 복사열전달의 영향

온도는 건조기에서 건조에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나이다. Fig. 3에 두께가 0.4 mm인 피건조물 표면의 시간에 따른 온도변화를 살펴보면 3~4초 이내의 매우 짧은 시간 내에 정상상태에 이르는데 이는 건조대상의 두께가 0.4 mm로 얇은 데 기인한다. 피건조물이 반투명한 경우에 불투명한 경우(약 2.5초)보다 약간 늦게 정상상태(약 4초)에 이르는 것을 알 수 있는데, 반투명한 경우에는 피건조물의 비열이 불투명한 경우의 약 2배로 정상상태까지 시간이 더 필요하지만 내부의 복사열전달의 영향으로 시간이 단축된다. 피건조물이 반투명한 경우에 그 표면의 정상상태 온도는 열원의 온도가 95, 85°C일 때 각각 70, 65°C 정도이고 불투명한 경우에는 그 차이가 더 증가한다.

Fig. 4는 온도분포에 대한 복사열전달 영향을 보여준다. 내부에서의 복사열전달을 고려하지 않는다면 필름과 피건조물이 비슷한 크기의 열전도율을 가지므로 선형적인 온도분포를 보여주게 되지만 실제로는 내부의 복사전달에 의하여 온도구배가 크게 달라진다. 피건조물이 복사에 불투명

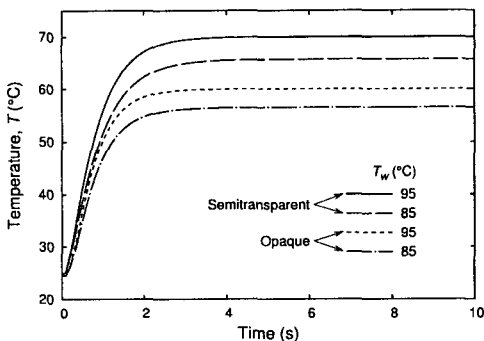


Fig. 3 Surface temperature of drying material with time.

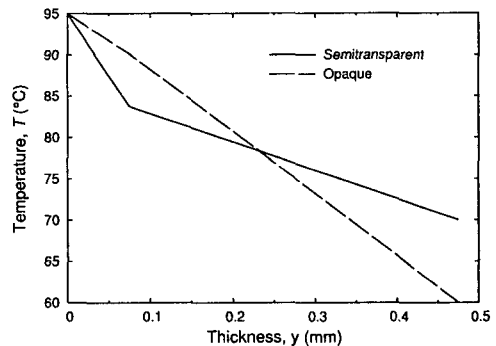


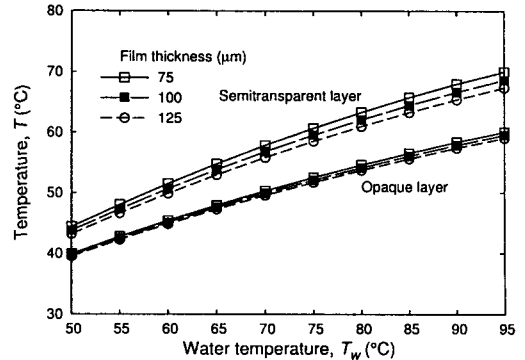
Fig. 4 Temperature distribution in the film and drying material for $T_w = 95^\circ\text{C}$.

한 경우에는 복사열전달이 필름 내의 온도에만 영향을 미치고 피건조물 내부의 열전달에는 큰 영향을 미치지 못한다. 그러나 피건조물이 반투명한 경우에는 열원으로부터 피건조물로 직접 복사에너지가 전달되어 피건조물 상부의 온도 상승에 기여한다. 복사에 의한 열전달은 전도와 달리 인접 매질을 거치지 않고 필름에서 멀리 떨어진 피건조물로 열에너지가 직접 전달되어 피건조물의 온도를 상승시키는 대신 필름의 온도는 감소하게 된다. 그러나 전도에 의하여 온도분포는 연속성을 가지므로 피건조물이 불투명한 경우와 비교하여 반투명한 경우에 필름에서는 온도분포의 기울기가 감소하고, 피건조물에서는 크게 증가하는 형태로 나타난다. 피건조물이 반투명한 경우는 피건조물이 함수율이 높은 건조 초기를 묘사하는 것으로 이 경우에 피건조물의 온도가 상대적으로 높으므로 초기에 빠른 건조속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

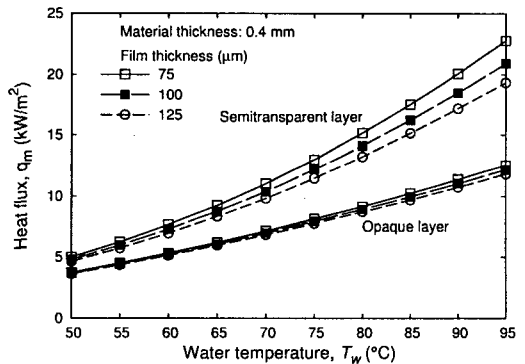
3.2 필름 두께의 영향

적외선 굴절식 건조기에서 또 다른 중요한 인자는 컨베이어 벨트로 사용되는 필름이라고 할 수 있다. 같은 흡수계수를 가지는 필름에 대하여, 두께가 두꺼운 경우에는 더 많은 복사에너지가 필름 내부에서 흡수되어 필름 자체의 온도를 상승시키는 데 기여하기 때문에 피건조물에 상대적으로 작은 양의 복사에너지가 전달된다. Fig.5의 (a)와 (b)는 이러한 현상을 잘 보여주고 있는데, 피건조물이 반투명한 경우에 열원의 온도가 증가할수록 필름의 두께에 따라 피건조물의 온도와 열유속의 차이가 증가한다. 그러나 피건조물이 불투명한 경우에는 그 차이가 감소하여 필름 두께에 따른 영향이 아주 작음을 알 수 있다.

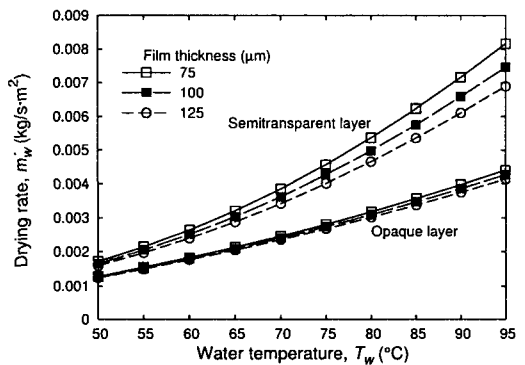
건조속도의 경우에도 열원의 온도에 따라 차이가 발생하고 열원의 온도 상승에 따라 두께에 따른 차이가 증가한다. 열원의 온도가 높을 때 건조속도가 크게 증가하는데, 피건조물이 불투명하면 그 증가율이 둔화된다. 그러나 이러한 두께에 따른 변화는 열전달계수의 영향에 비하면 크지 않은데, 이는 필름 두께의 절대적인 수치가 100 μm 내외로 얇아서 열용량이 절대적으로 작은 값을 가지는데 원인이 있다고 판단된다. 따라서 적외선 굴절식 건조기에서 75~120 μm 범위의 필



(a) Surface temperature



(b) Surface Heat flux



(c) Drying rate

Fig. 5 Temperature, heat flux and drying rate on the surface of drying material with the film thickness and water temperature.

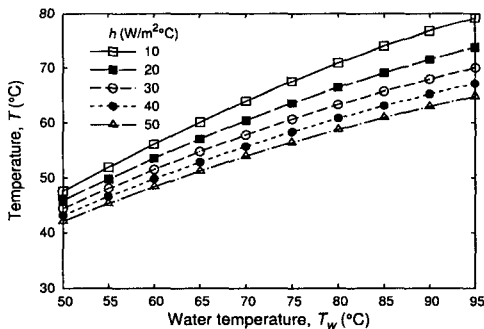
름을 선정하여 사용하고자 한다면 열전달적인 측면보다는 다른 요인, 즉 인장강도, 열팽창 또는 유연성 등을 우선적으로 고려할 필요가 있다.

3.3 열전달계수의 영향

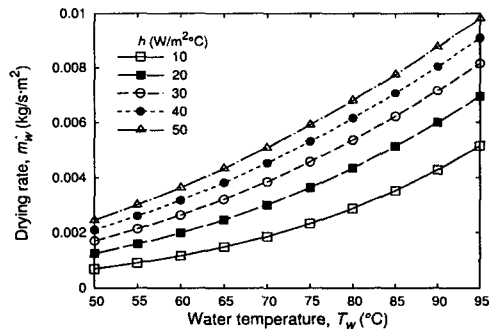
적외선 굴절식 건조기의 건조현상에 가장 큰 영향을 미치는 인자의 하나가 피건조물 표면의 열전달계수임을 Fig. 6에 나타낸 결과로부터 확인할 수 있다. 피건조물 표면의 온도는 열전달계수의 증가에 따라 감소하는데, 열전달계수가 작을 때 그 차이가 크고, 열전달계수가 증가할수록 감소 폭은 작아진다. Fig. 6에서 보면 열원의 온도가 95 °C일 때, 열전달계수가 10에서 50 W/m²°C으로 증가하면 온도는 약 15 °C 정도 감소하지만 건조속도는 약 2배 증가하는 것을 확인할 수 있다. 적외선 굴절식 건조기가 식품, 의약품 등의 건조를 목적으로 하고 있는 것을 감안하면 피건조물 표면의 대류 열전달의 활성화에 따라 건조온도가 낮아지고, 건조속도가 빨라지므로 상대적으로 낮은 온도에서 피건조물의 품질을 유지하는 데 큰 도움이 된다고 할 수 있다.

3.4 상대습도의 영향

Fig. 7은 열원온도와 건조공기의 상대습도에 따른 온도와 건조속도의 변화를 보여준다. 상대습도가 클 때 온도가 높고 상대습도가 낮을 때 온도가 낮게 나타나는데, 이는 상대습도가 낮을 때 수분 증발이 더 활발하여 주위로의 열전달이 더 활발해지기 때문이다. 그러나 상대습도에 따른 영향은 다른 인자의 영향과 비교하여 그 영향이 크지는 않다. 또한 다른 경우와 반대로 피건조물이 불투명한 경우에 반투명한 경우보다 온도변화의 폭이 큰데, 이는 적외선 굴절식 건조기에서 많은 수분 증발이 일어나는 건조 초기보다는 건조속도가 느려지는 건조 후반기에 상대습도의 제어가 상대적으로 더 중요함을 의미한다. 그러나 본 연구에 결과에서 나타난 상대습도의 영향은 크지 않은데, 공기의 온도를 25 °C로 고정하여 증발에 따른 공기의 상태변화를 고려하지 않은 것이 그 이유라고 할

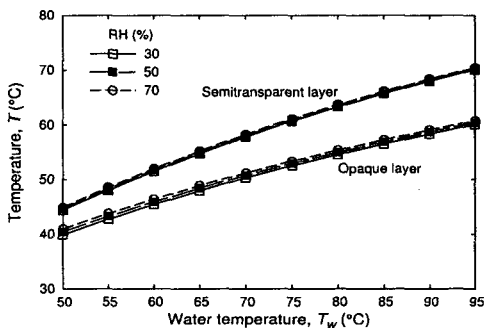


(a) Surface temperature

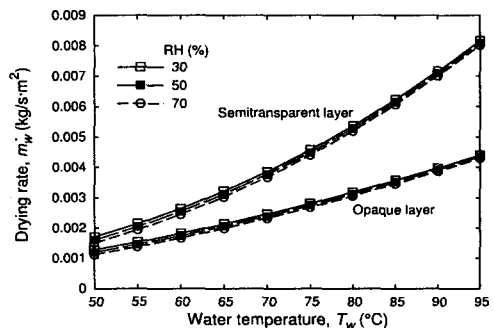


(b) Drying rate

Fig. 6 Temperature and drying rate on the surface of semitransparent drying material with heat transfer coefficient.



(a) Surface temperature



(b) Drying rate

Fig. 7 Temperature on the surface of drying material with relative humidity of ambient air.

수 있다. 상대습도의 영향을 보다 자세히 관찰하기 위해서는 공기의 유동 및 물질전달을 고려하도록 건조모델을 개선할 필요가 있다고 판단된다.

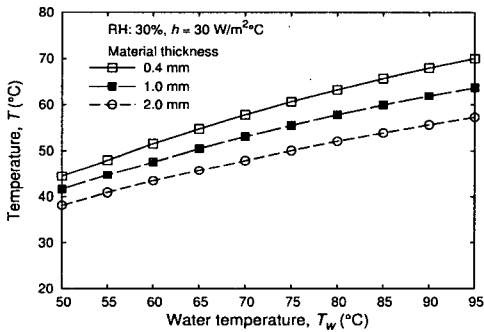
3.5 피건조물 두께의 영향

Fig. 8에는 열원인 온수의 온도에 따라 달라지는 피건조물 표면의 온도를 나타내었다. 피건조물 두께에 따라서는 예상할 수 있듯이 피건조물 두께가 얇을 때 피건조물 표면의 온도가 높고, 두꺼울 때 표면의 온도가 낮게 나타난다. 피건조물 두께에 따른 온도의 변화는 온수의 온도가 증가할수록 증가하나 급격하게 변화하지는 않는다.

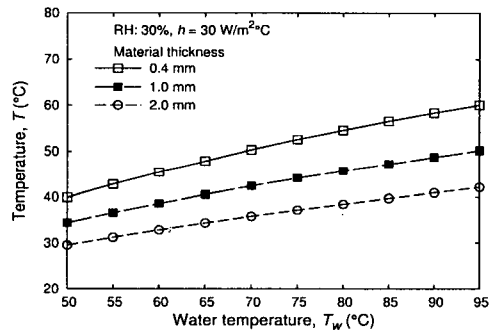
두께에 따른 온도의 변화는 피건조물이 복사열투명할 때 더 크게 나타나고, 반투명한 경우에는 상대적으로 작는데, 이는 복사 및 전도의 고유한 전달 특성에 기인한다. 피건조물이 반투명

한 경우에는 열에너지가 복사에 의하여 멀리 떨어진 입자들 사이에도 전달이 가능하므로 두께가 두꺼워지더라도 열전달 효율이 전도만에 의한 것보다 더 멀리까지 전달되어 두께방향의 온도차가 감소하는 효과가 있다. 전도는 열전도율에 의하여 온도차가 결정되는데, 반투명한 경우에는 복사열전달에 의하여 온도차가 감소되어 두께에 따른 변화가 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 9에는 피건조물의 두께에 따른 건조속도의 변화를 나타내었다. 온수의 온도가 낮을 때에는 건조속도가 작기 때문에 피건조물이 복사에 불투명한 경우와 반투명한 경우의 차이가 크지 않으나 온수온도가 높을 때에는 그 차이가 커진다. 온수온도가 95°C일 때, 0.4 mm 두께의 피건조물에 대해서는 반투명한 경우의 건조속도가 불투명한 경우에 비하여 약 1.8배 크게 나타나지만 피건조물의 두께가 두꺼워지면 2배 이상으로 증가

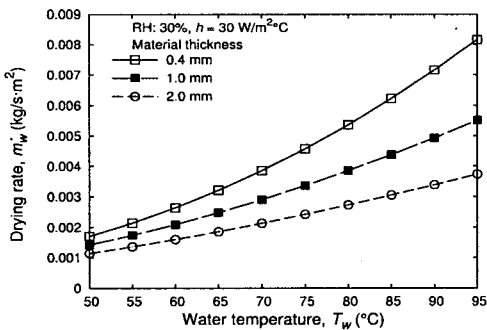


(a) Semitransparent material

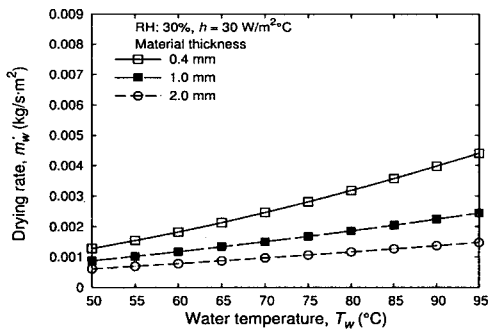


(b) Opaque material

Fig. 8 Surface temperature variations for semitransparent and opaque materials with water temperature and material thickness.



(a) Semitransparent material



(b) Opaque material

Fig. 9 Drying rates for semitransparent and opaque materials with water temperature and material thickness.

한다. 이는 피건조물의 두께가 두꺼울 때 복사열 전달이 건조에 미치는 영향이 더 크다는 것을 의미한다. 그러나 두께에 따른 건조속도의 감소가 크기 때문에 건조속도를 빠르게 하기 위해서는 피건조물의 두께가 얇은 것이 바람직하다. 또한 적외선 굴절식 건조기의 관점에서 보면, 피건조물이 복사에 반투명한 것은 건조 초기의 현상이고, 불투명한 것은 건조 후기의 현상이라 볼 수 있으므로 불투명한 경우에도 건조속도가 크게 감소하는 것은 바람직하지 않다. 일반적으로 건조 시간을 결정하는 것은 감률건조에 해당하는 건조 후기의 건조속도이므로 Fig. 9의 결과를 두고 판단하면 피건조물의 두께가 얇을 때 건조시간을 크게 단축할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

적외선 굴절식 건조기에서의 건조 특성을 파악하기 위한 해석을 수행하였다. 해석결과로부터 피건조물의 상태에 따라 열전달 및 건조에 복사열전달이 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

피건조물이 복사열전달에 대하여 반투명한 경우에 불투명할 때에 비하여 피건조물의 온도가 최고 25℃까지 더 상승하고, 건조속도는 약 2배 증가하였다. 건조공기의 상대습도가 건조에 미치는 영향은 정확하게 파악할 수 없었으나 피건조물 상부의 공기의 대류는 온도 및 건조속도에 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 건조기 구성요소 중의 핵심이라 할 수 있는 컨베이어용 필름의 두께는 열전달 및 건조에 큰 영향을 미치지 않아서 건조기 설계단계에서 필름 두께를 비교적 자유롭게 선택할 수 있음을 알 수 있었다.

같은 조건에서 복사에 반투명한 피건조물이 복사에 불투명한 경우보다 피건조물의 두께에 따른 온도변화가 작았으며, 이는 복사에 의한 온도 재분배 효과에 기인한다고 볼 수 있다. 그러나 건조속도는 복사에 반투명한 경우에 두께에 따른 변화가 더 크게 나타나고, 이는 반투명한 피건조물에서 두께가 얇을 때 복사열전달이 건조에 미치는 영향이 더 크다는 것을 의미한다. 따라서 피건조물이 복사에 반투명하다고 볼 수 있는 건조 초기에 복사열전달에 의한 건조속도의 향상을 최대한 활용하기 위해서는 피건조물의 두께를 얇게 하는 것이 바람직하다. 또한 피건조물이 얇은 경

우에 전도에 의한 건조속도도 두꺼운 경우보다 상대적으로 크므로 얇은 두께의 피건조물의 건조 속도 향상은 전체적인 건조시간을 단축할 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단에서 지원한 “전열굴절식 건조기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Abonyi, B. I., Feng, H., Tang, J., Edwards, C. G., Chew, B. P., Mattinson, D. S. and Fellman, J. K., 2001, Quality retention in strawberry and carrot purees dried with refractance window system, *Journal of Food Science*, Vol. 67, No. 3, pp. 1051-1056.
2. Choi, B., Lee, K. H. and Kim, M. B., 2005, Drying characteristics of a refractance window dryer, *Proc. of the SAREK 2005 Summer Annual Conf.*, pp. 1113-1118.
3. Lee, K. H., Choi, B. and Hong, Y.-J., 2006, Analysis of drying characteristics in the dryer using the refraction of radiation, *Proc. of SAREK 2006 Summer Annual Conf.*, pp. 1191-1196.
4. Lee, K. H. and Viskanta, R., 1999, Comparison of the diffusion approximation and the discrete ordinates method for heat transfer in glass, *Glastechnische Berichte*, Vol. 72, pp. 254-265.
5. Parsons, R. A., ed., 1997, *ASHRAE Handbook: 1997 Fundamentals*, SI ed., ASHRAE, Atlanta.
6. Modest, F. M., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
7. <http://www.dupontteijinfilms.com/cntProductsMylarDatashts.html>
8. Hale, G. M. and Query, M. R., 1973, Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region, *Applied Optics*, Vol. 12, pp. 555-563.