

## 굴절 현상을 이용한 건조기에서 건조특성 해석

이 공 훈<sup>†</sup>, 최 병 일, 홍 용 주

한국기계연구원 환경에너지기계연구본부 에너지기계연구센터

### Analysis of Drying Characteristics in the Dryer Using the Refraction of Radiation

Kong Hoon Lee, Byungil Choi, Yong-Ju Hong

**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, a 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 shows 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 by only conduction is also enhanced so that drying time can considerably be reduced.

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

기 호 설 명	
$c_p$ : 비열 (J/kg $^{\circ}$ C)	
$G$ : 복사강도의 입사 (Irradiation, W/m $^2$ )	
$H$ : 두께 (m)	
$h$ : 열전달계수 (W/m $^2$ °C)	
$h_m$ : 물질이동 관련 열전달 계수 (kg/m $^2$ s)	
$I$ : 복사강도 (W/m $^2$ )	
$I_b$ : 흑체복사강도 (W/m $^2$ )	
$i$ : 엔탈피 (J/kg)	
$k$ : 열전도율 (W/m° C)	
$\dot{m}_v$ : 수분 증발량 (kg/m $^2$ s)	
$n$ : 굴절율	
$p$ : 전압력 (Pa)	

$p_r$ : 수증기 분압 (Pa)	
$q_r$ : 복사열유속 (W/m $^2$ )	
$t$ : 시간 (s)	
$T$ : 온도 (°C)	
$x$ : 질대습도	
그리스 문자	
$\epsilon$ : 표면 방사율	
$\kappa$ : 흡수계수 (m $^{-1}$ )	
$\mu$ : 방향코사인	
$\rho$ : 밀도 (kg/m $^3$ ), 표면 반사율	

상첨자

<sup>†</sup>Corresponding author  
 Tel.: +82-42-868-7291; fax: +82-42-868-7335  
 E-mail address: konghoon@kimm.re.kr

+ : 양의 반구 방향 ( $0 \leq \mu \leq 1$ )  
 ' : 입사하는 성분 (incident)

## 하첨자

- $a$  : 주위 공기
- $d$  : 피건조물
- $f$  : 필름
- $fg$  : 잠열
- $v$  : 공기와 피건조물 계면의 수증기
- $w$  : 온수(열원)

## 1. 서론

전열 굴절식 건조 (Refractance Window drying) 는 전도, 대류, 복사의 세 가지 열전달 형태를 모두 활용하는 건조기술로서 낮은 비용으로 고품질의 건조가 가능한 기술 중의 하나이다.<sup>(1,2)</sup> 이 기술에서는 Fig. 1과 같이 원적외선 복사를 투과시키는 투명 플라스틱 필름을 컨베이어 벨트로 사용하고 벨트 아래에는 온수가 순환하며 열에너지를 공급한다. 필름 위에 놓인 피건조물은 건조 초기에는 플라스틱 필름을 굴절 투과한 적외선 복사열을 주로 이용하여 건조되고, 건조가 진행되면서 전도에 의한 건조가 이루어진다. 건조 시간은 피건조물의 두께에 따라 차이가 있지만 일반적으로 건조 초기에 복사 및 전도 열전달에 의하여 수분 이내에 건조가 완료된다.

전열굴절식 건조기술은 분무 건조, 진공 동결 건조 등과 비교하여 피건조물의 건조 상태가 유사하거나 우수하고, 건조가 수분 이내의 짧은 시간 내에 이루어지므로 에너지 절약 효과가 큰 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 복사 굴절 현상을 이용한 전열굴절식 건조기에서의 열전달 및 건조 현상에 대한 해석 모델을 설정하고 온수 온도 및 피건조물 두께의 영향을 분석하였다.

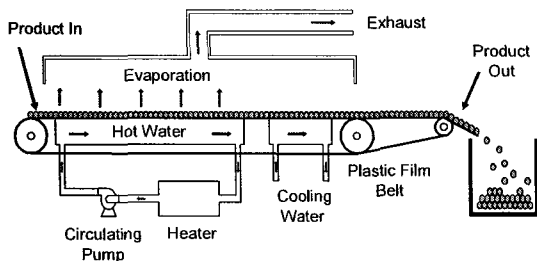


Fig. 1 Schematic of model dryer

## 2. 해석 방법

### 2.1 해석 모델

전열굴절식 건조기에서는 Fig. 2와 같이 필름의 윗면에 피건조물이 있고, 아랫면에 있는 일정 온도의 물이 열원으로 사용된다. 필름은 온수 위에 떠서 이동하지만 이동속도가 느리므로 이동을 무시하고 수직 방향으로의 열전달만을 고려하면 에너지방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>(3)</sup>

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

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

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

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, 이 때에는  $\partial q_r / \partial y$ 를 무시한다.

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

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

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

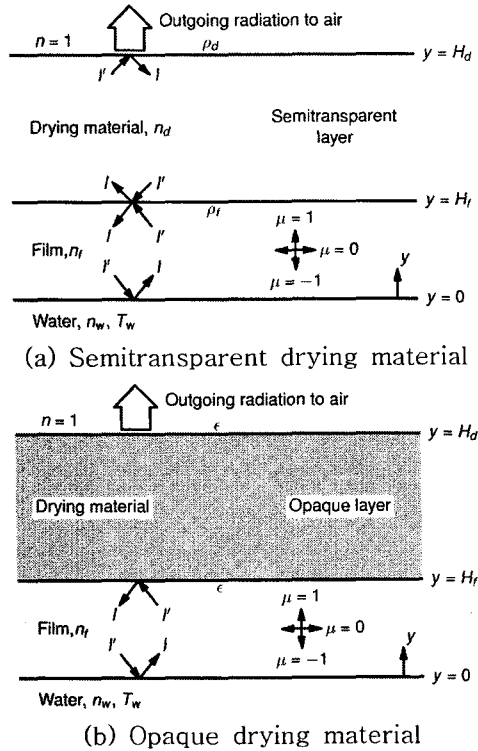


Fig. 2 Schematic of one-dimensional models

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

식 (3)과 (4)에서 피건조물이 반투명한 경우에는  $\delta = 0$ , 불투명한 경우에는  $\delta = 1$ 을 사용한다.  $q_m$ 은 피건조물 표면과 주위 공기 사이의 물질 이동을 동반한 대류 열전달을 나타낸다.<sup>(4)</sup>

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

이 과정의 증발량은 식 (6)과 같고, Lewis의 관계식(Lewis Relation)을 도입하면  $h_m$ 을 유도할 수 있다.<sup>(4)</sup>

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

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

표면에서 증발되는 수증기의 온도가  $T_v$ 이고 포화 상태로 있다고 가정하면 포화수증기가 가지는 엔탈피는 다음과 같다.

Table 1 Thermophysical properties and refractive index<sup>(5)</sup>

Material	Water	Film (Mylar) <sup>(6)</sup>	Skimmed milk
Density (kg/m <sup>3</sup> )	965.3	1390	915
Specific heat (J/kgK)	4206	1176	2100
Conductivity (W/mK)	0.675	0.1554	0.17
Refractive index	1.33	1.65	1.46

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

식 (2)에 나타난 복사열전달의 발산항은 다음의 복사전달방정식을 이용하여 구할 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$\mu \frac{\partial I}{\partial y} = \kappa \{ n^2 I_b [T(y, t)] - I(y, \mu) \} \quad (9)$$

이 방정식의 해를 구하기 위해서는 적절한 경계 조건을 적용해야 하는데 상세한 내용 참고문헌<sup>(3)</sup>에 있다. 본 연구에서 복사전달방정식은 S-8 구분중좌법을 이용하여 해를 구하였다.

## 2.2 물성치 및 해석조건

해석에 사용한 물성치들은 Table 1에 나타내었는데, Mylar 필름에 대한 수치들은 제조사인 DuPont 사의 자료에서 인용하였다.<sup>(6)</sup> 흡수계수는 mylar 필름에 대해서는 1000 cm<sup>-1</sup>, 물<sup>(7)</sup>에 대해서는 2000 cm<sup>-1</sup>를 사용하였다.

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

전열굴절식 건조에 영향을 미치는 파라미터들 중에서 피건조물 상부의 건조 공기의 열전달계수는 30 W/m<sup>2</sup>K, 온수 온도는 50~95°C, 건조 공기의 상대습도는 30%, 필름 두께는 75 μm를 기준으로 사용하고, 피건조물의 두께는 0.4, 1, 2 mm를 사용하고, 건조 공기의 온도는 25°C로 고정하였다. 본 연구에서는 주로 피건조물 두께에

대

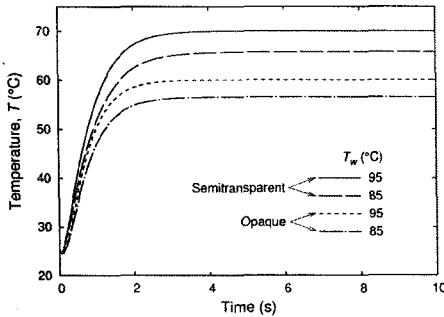


Fig. 3 Surface temperature of drying material with time

하여 해석을 수행하였으며 두께 이외의 파라미터들의 영향은 참고문헌<sup>(8)</sup>에서 살펴볼 수 있다.

해석을 위한 격자는 다양한 크기의 격자를 시험하여 결과의 정확도를 비교한 후, 필름에 21, 피건조물에 51개의 비균일 격자를 사용하였다.

### 3. 해석결과

온도는 건조기에서 건조에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나이다. Fig. 3에 두께가 0.4 mm인 피건조물 표면의 시간에 따른 온도변화를 살펴보면 3 ~ 4 초 이내의 매우 짧은 시간 내에 정상상태에 이르는데 이는 건조 대상의 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 정상상태 까지 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 피건조물의 상태에 따라 온도분포에 대한 복사열전달 영향을 보여준다. 필름 및 피건조물 내부에서의 복사열전달을 고려하지 않는다면 필름과 피건조물이 비슷한 크기의 열전도율을 가지므로 선형적인 온도분포를 보여주게 되지만 내부의 복사전달에 의하여 내부의 온도 기울기가 크게 달라진다. 피건조물이 복사에 불투명한 경우에는 복사열전달이 필름 내의 온도에만 영향을

미치고 피건조물 내부의 열전달에는 큰 영향을

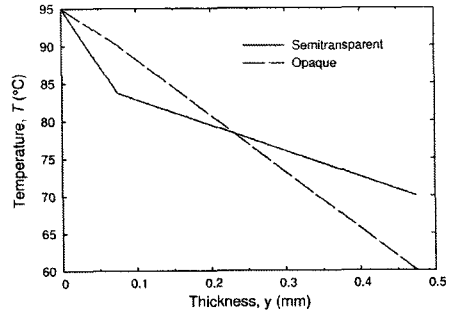


Fig. 4 Temperature distribution in the film and drying material for  $T_w = 95^\circ\text{C}$

미치지 못한다. 그러나 피건조물이 반투명한 경우에는 열원으로부터 피건조물로 직접 복사에너지가 전달되어 피건조물 상부의 온도를 상승시키는 데 기여한다. 이와 같이 피건조물이 반투명한 경우는 피건조물이 함수율이 높은 건조 초기를 모사하는 것으로 피건조물의 온도가 상대적으로 높아서 초기에 빠른 건조 속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 열원인 온수의 온도에 따라 달라지는

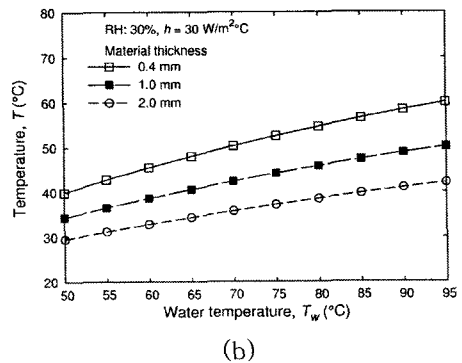
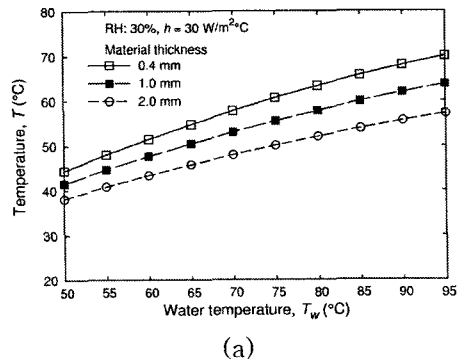


Fig. 5 Surface temperature variations for (a) semitransparent and (b) opaque materials with

water temperature and material thickness

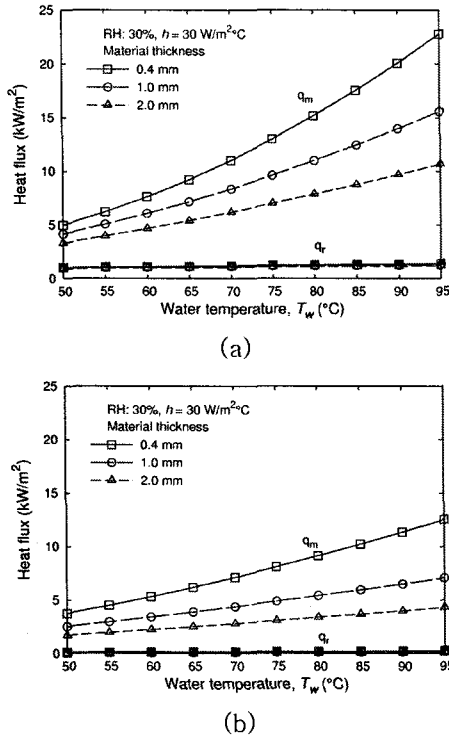


Fig. 6 Heat fluxes for (a) semitransparent and (b) opaque materials with water temperature and material thickness

피건조물 표면의 온도를 나타내었다. 앞에서 설명한 것처럼 피건조물이 반투명한 경우에 불투명한 경우보다 피건조물 표면의 온도가 더 높으며 온수의 온도가 높아지면 표면의 온도가 높아지는 것을 알 수 있다. 피건조물 두께에 따라서는 예상할 수 있듯이 피건조물 두께가 얇을 때 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 복사열에 불투명하여 피건조물 내부에서 전도에 의한 열전달만이 이루어질 때 더 크게 나타나고, 반투명한 경우에는 상대적으로 작는데, 이는 복사 및 전도의 고유한 전달 특성에 기인한다. 피건조물이 반투명한 경우에는 열에너지가 복사에 의하여 멀리 떨어진 입자들 사이에도 전달이 가능하므로 두께가 두꺼워지더라도 열전달 효율이 전도만에 의한 것보다 더 멀리까지 전달되어 두께 방향의 온도차가 감소하는 효과가 있다. 전도는 열전도율에 의하여 온도차가 결정되

는데 반투명한 경우에는 복사열전달에 의하여 온

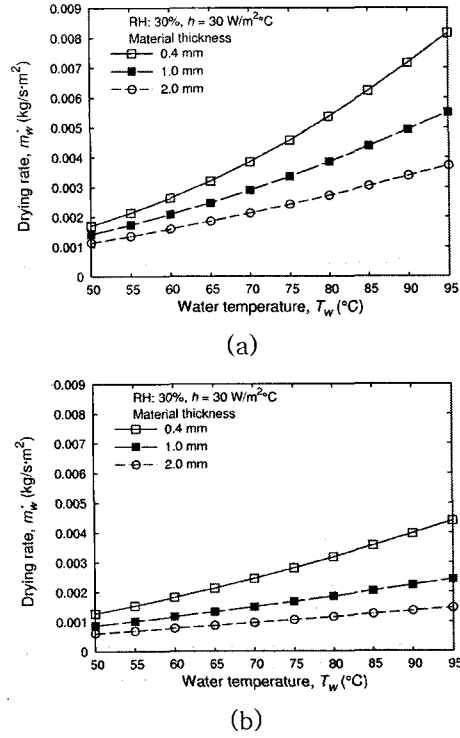


Fig. 7 Drying rates for (a) semitransparent and (b) opaque materials with water temperature and material thickness

도차가 감소되어 두께에 따른 변화가 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 상황에서 피건조물 표면의 열유속을 나타낸다. 열유속도 온도 변화처럼 피건조물이 복사에 반투명할 때 더 크게 나타나고 이는 결국 건조 속도에 영향을 미치게 된다. 다만 온수 온도의 증가에 따라 표면 열유속의 증가율이 온도의 경우보다 더 큰 것을 알 수 있다. 온수의 온도가 95°C일 때, 피건조물 표면의 온도는 반투명과 불투명한 경우에 약 10°C 이상의 차이를 보이고 두께 증가에 따라 그 차이가 증가한다. 열유속의 경우에는 같은 온수온도에 대하여 두께가 얇은 0.4 mm인 경우에는 반투명한 경우가 불투명한 경우보다  $q_m$ 이 2배에 못 미치는 크기를 가지지만 두께 증가에 따라 표면의 열유속  $q_m$ 이 2배 이상으로 증가하는 것을 알 수 있다.

건조속도는 앞에서 분석한 온도 및 열유속에 의하여 결정되는 것으로서 Fig. 7에 나타난 건조

속도는 열유속의 변화와 유사하게 나타난다. 온수의 온도가 낮을 때에는 건조 속도가 작기 때문에 피건조물이 복사에 불투명한 경우와 반투명한 경우의 차이가 크지 않으나 온수 온도가 높을 때에는 그 차이가 커진다. 온수 온도가 95℃일 때, 0.4 mm 두께의 피건조물에 대해서는 반투명한 경우의 건조속도가 불투명한 경우에 비하여 약 1.8배 크게 나타나지만 피건조물의 두께가 두꺼워지면 2배 이상으로 증가한다. 이는 피건조물의 두께가 두꺼울 때 복사열전달이 건조에 미치는 영향이 더 크다는 것을 의미한다. 그러나 두께에 따른 건조 속도의 감소가 크기 때문에 건조속도를 빠르게 하기 위해서는 피건조물의 두께가 얇은 것이 바람직하다. 또한 전열굴절식 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. 7의 결과를 두고 판단하면 피건조물의 두께가 얇을 때 건조시간을 크게 단축할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

전열굴절식 건조기에서의 건조 특성을 파악하기 위한 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 피건조물의 상태에 따라 열전달 및 건조에 복사열전달이 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 같은 조건에서 복사에 반투명한 피건조물이 복사에 불투명한 경우 보다 두께에 따른 온도 변화가 작았으며 이는 복사에 의한 온도 재분배 효과에 기인한다고 볼 수 있다. 그러나 열유속 및 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 건조 속도의 향상을 최대한 활용하기 위해서는 피건조물의 두께를 얇게 하는 것이 바람직하다. 또한 피건조물이 얇은 경우에 전도에 의한 건조 속도도 두꺼운 경우보다 상대적으로 크므로 얇은 두께의 피건조물의

건조 속도 향상은 전체적인 건조시간의 단축을 가져온다.

#### 후기

본 연구는 에너지관리공단의 지원으로 수행중인 “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. 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.
4. Parsons, R. A., ed., 1997, *ASHRAE Handbook: 1997 Fundamentals*, SI ed., ASHRAE, Atlanta.
5. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York.
6. <http://www.dupontteijinfilms.com/cntProductsMylarDatashts.html>
7. Hale, G. M. and Querry, M. R., 1973, Optical Constants of Water in the 200 nm to 200  $\mu\text{m}$  Wavelength Region, *Applied Optics*, Vol. 12, 555-563.
8. Lee, K. H., Choi, B., and Hong, Y.-J., 2006, Heat Transfer in the Dryer using the Refraction of Radiation, *Proc. of KSME 2006 Spring Annual Meeting*, to be published.